



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

## **“ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES LÍQUIDOS, GASEOSOS Y SÓLIDOS EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
ESPECIALIZACIÓN POTENCIA**

**Presentado por:**

**CARLOS ALBERTO VILLEGAS GUERRERO**

**TOMO I**

**Guayaquil - Ecuador**

**2009**

## **AGRADECIMIENTO**

A los catedráticos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral - ESPOL, por sus enseñanzas brindadas, sanas críticas y continuo empuje a la investigación.

A mi padre, el Ing. Alberto Villegas Prado, por haberme incentivado en el desarrollo de este trabajo investigativo. Su experiencia siempre ha sido la guía de mi superación profesional.

A mi Director de Tesis, el Ing. Juan Gallo Galarza, quien con su experiencia académica y vastos conocimientos sobre el tema, ha dedicado su preciado tiempo en la orientación de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

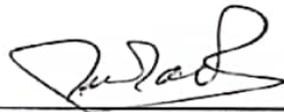
A mis padres Alberto y Esperanza, por el apoyo que siempre me han dado en el cumplimiento de mis metas y sueños. A mis hermanos, Viviana, Anizia y Joseph por el incondicional cariño entregado. A mi esposa Laura y la razón de mi vida, mi hija Mía Valentina, por todo el amor brindado.

## TRIBUNAL DE GRADO



---

**Ing. Holger Cevallos**  
**SUB-DECANO FIEC**



---

**Ing. Juan Gallo Galarza**  
**DIRECTOR DE TESIS**



---

**Ing. Jorge Flores**  
**VOCAL PRINCIPAL**



---

**Ing. Jorge Aragundi**  
**VOCAL PRINCIPAL**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”



---

Carlos Alberto Villegas Guerrero

## RESUMEN

*Cada equipo de alta tensión instalado en las subestaciones eléctricas que conforman el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), cumple una función específica de importancia dentro del mismo. De tal forma que podríamos decir, que gran parte de la confiabilidad de este sistema, depende de las condiciones en que tales equipos se encuentren, si estos han sido correctamente instalados, si desde su recepción en campo han sido adecuadamente sometidos a análisis internos a través de ensayos tanto eléctricos como dieléctricos, y si en consecuencia se ha cumplido estrictamente con los periodos de mantenimiento preventivos recomendados por el propio fabricante.*

*Los **ensayos dieléctricos**, son los métodos aplicados para evaluar las condiciones actuales en las que se encuentra el sistema de aislamiento de un equipo. El término **sistema de aislamiento**, se refiere al subconjunto total de **materiales aislantes** en sus diferentes estados (sólidos, líquidos y gaseosos) que se involucran en la construcción de un equipo eléctrico, con la finalidad de interactuar entre sí y brindar una barrera de aislamiento entre sus partes conductoras y entre estas con respecto a la masa sólidamente aterrizada del mismo.*

*Es a partir de estas definiciones, que nace la necesidad de conocer el **análisis y la aplicación de los distintos materiales aislantes en los equipos eléctricos de alta tensión**, es decir: cuáles son sus características, como se encuentran dispuestos*

*internamente en el equipo, cual es su función, que problemas atentan contra su vida útil, cuales son los métodos aplicados por el fabricante para su evaluación en la producción, cuales son los métodos que permiten realizar un seguimiento de sus condiciones en campo y finalmente, que métodos permiten su reacondicionamiento y/o recuperación si fuera posible.*

*Esclarecer estas inquietudes es la temática de este proyecto de tesis, que comprende de seis capítulos que abordan lo siguiente:*

*CAPÍTULO I: Información básica sobre: Qué son los materiales aislantes?, los efectos eléctricos normales de operación a los que estos se encuentran sometidos y una breve descripción de sus propiedades generales.*

*CAPITULO II: Descripción de los tipos de materiales aislantes involucrados en cada uno de los principales equipos de alta tensión instalados en las subestaciones de transmisión eléctrica. Así como también, el detalle de sus características y una muestra gráfica de su disposición dentro de tales equipos.*

*CAPÍTULO III: Descripción de los principales factores de la contaminación y/o degradación de los materiales aislantes durante el periodo normal de funcionamiento del equipo eléctrico de alta tensión en el cual se encuentren instalados.*

*CAPÍTULO IV: Conceptos básicos, principios de funcionamiento, procedimientos, normas aplicadas, técnicas de análisis y evaluación de resultados, de los ensayos dieléctricos aplicados tanto en fábrica como en campo, para el control de las condiciones del sistema de aislamiento de los principales equipos de alta tensión.*

*CAPITULO V: Exposición de casos reales sobre análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de los principales equipos de alta tensión instalados en varias subestaciones eléctricas que conforman el Sistema Nacional de Transmisión (SNT).*

*CAPÍTULO VI: Descripción de los métodos existentes para la preservación del sistema de aislamiento de los principales equipos de alta tensión. Exposición de casos reales sobre la aplicación de estos métodos en equipos de alta tensión instalados en varias de las subestaciones eléctricas que conforman el Sistema Nacional de Transmisión (SNT).*

# ÍNDICE GENERAL

Pág.

## CAPÍTULO I

### **1. LOS MATERIALES AISLANTES O DIELECTRICOS**

<b>1.1 Definición.....</b>	<b>31</b>
<b>1.2 Clasificación.....</b>	<b>31</b>
<b>1.3 Comportamiento de los materiales aislantes ante la acción de un campo eléctrico.....</b>	<b>32</b>
1.3.1 El Campo Eléctrico	
1.3.2 Diferencia de Potencial Eléctrico	
1.3.3 La Polarización – Efecto del Campo Eléctrico sobre un material aislante	
1.3.4 Análisis del comportamiento de los materiales aislantes bajo la acción de un Campo Eléctrico	
<b>1.4 Propiedades Generales. Su significado e importancia.....</b>	<b>54</b>
1.4.1 Propiedades Eléctricas	
1.4.2 Propiedades Mecánicas	
1.4.3 Propiedades Físico-Químicas	

## **CAPÍTULO II**

### **2. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES EN LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN INSTALADOS EN LAS SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

<b>2.1 Finalidad.....</b>	<b>68</b>
<b>2.2 Principales equipos de alta tensión instalados en las subestaciones de transmisión eléctrica.....</b>	<b>68</b>
2.2.1 Transformador de Potencia	
2.2.2 Transformadores de Instrumentación	
2.2.3 Seccionador de Potencia	
2.2.4 Interruptor de Potencia	
2.2.5 Equipo Encapsulado	
<b>2.3 Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los Transformadores de Potencia.....</b>	<b>74</b>
2.3.1 Consideraciones Generales	
2.3.2 Materiales aislantes sólidos que forman parte del aislamiento principal del transformador	
2.3.3 Materiales aislantes sólidos que forman parte del sistema del aislamiento secundario del transformador	
2.3.4 Los líquidos aislantes y su importancia dentro del sistema de aislamiento total del transformador	
2.3.5 Características del Sistema aceite-papel	

2.3.6	Propiedades y Características Técnicas de los materiales aislantes para su uso en los Transformadores de Potencia	
<b>2.4</b>	<b>Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los Transformadores de Instrumentación .....</b>	<b>106</b>
2.4.1	Consideraciones Generales	
2.4.2	Materiales aislantes que conforman el sistema de aislamiento total de los Transformadores de Instrumentación	
2.4.3	Propiedades y Características Técnicas de los materiales aislantes para su uso en los Transformadores de Instrumentación	
<b>2.5</b>	<b>Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los Seccionadores de Potencia.....</b>	<b>118</b>
2.5.1	Consideraciones Generales	
2.5.2	Materiales aislantes que conforman el sistema de aislamiento de un Seccionador de Potencia	
2.5.3	Propiedades y Características Técnicas de los materiales aislantes para su uso en los Seccionadores de Potencia	
<b>2.6</b>	<b>Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los Interruptores de Potencia.....</b>	<b>119</b>
2.6.1	Interruptores a Gran Volumen de Aceite (tipo GVO)	
2.6.2	Interruptores a Gas Hexafluoruro de Azufre SF <sub>6</sub>	

## **2.7 Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los Equipos**

**Encapsulados..... 137**

2.7.1 Consideraciones Generales

2.7.2 Materiales aislantes que conforman el sistema de aislamiento de un  
Equipo Encapsulado

2.7.3 Propiedades y Características Técnicas de los materiales aislantes  
para su uso en los Equipos Encapsulados

## **2.8 Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los**

**Bushing's como elemento principal de los equipos de alta  
tensión..... 141**

2.8.1 Consideraciones Generales

2.8.2 Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los  
Bushing's No Capacitivos

2.8.3 Materiales aislantes que intervienen en la construcción de los  
Bushing's Capacitivos

2.8.4 Propiedades y Características Técnicas de los materiales aislantes  
para su aplicación en la construcción de los Bushing's

### **CAPÍTULO III**

#### **3. FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN Y/O DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN**

<b>3.1 Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en los Transformadores de Potencia.....</b>	<b>148</b>
3.1.1 Agentes de la degradación del aislamiento sólido	
3.1.2 La contaminación del aceite aislante	
3.1.3 La deterioración del aceite aislante	
<b>3.2 Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en los Transformadores de Instrumentación.....</b>	<b>182</b>
<b>3.3 Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en Interruptores de Potencia.....</b>	<b>183</b>
3.3.1 Interruptores a Gran Volumen de Aceite (tipo GVO)	
3.3.2 Interruptores a Gas Hexafluoruro de Azufre SF <sub>6</sub>	
<b>3.4 Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en los Equipos Encapsulados.....</b>	<b>189</b>
3.4.1 Análisis de la contaminación del gas SF <sub>6</sub> en operación	
<b>3.5 Factores de la contaminación de los bushing's y aisladores en general.....</b>	<b>192</b>
3.5.1 Consideraciones Generales	

3.5.2 Agentes Contaminantes

3.5.3 Proceso de la contaminación

## **CAPÍTULO IV**

### **4. LOS ENSAYOS DIELECTRICOS Y SU APLICACIÓN EN EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN**

**4.1 Definición de Ensayos Dieléctricos..... 195**

**4.2 Clasificación de los Ensayos Dieléctricos..... 196**

**4.3 Principio básico de los Ensayos Dieléctricos..... 197**

4.3.1 Ensayos AC

4.3.2 Ensayos DC

4.3.3 Ensayos de Sobrevoltaje

**4.4 Ensayos Dieléctricos aplicados para el control del sistema de aislamiento en los Transformadores de Potencia..... 272**

4.4.1 Consideraciones Generales

4.4.2 Ensayos Dieléctricos aplicados en campo

4.4.3 Ensayos Dieléctricos especiales aplicados en fábrica

4.4.4 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de los Ensayos Dieléctricos en campo

**4.5 Ensayos aplicados para el control del aceite dieléctrico como parte del sistema de aislamiento de un Transformador de Potencia..... 314**

4.5.1 Consideraciones Generales

4.5.2 Ensayos Físico-Químicos

4.5.3 Ensayos Eléctricos

4.5.4 Ensayo para el Análisis de los Gases Disueltos

4.5.5 Ensayos aplicados para el control del aceite dieléctrico del  
cambiador de tomas bajo carga (LTC) de un transformador

4.5.6 Procedimientos a seguir para la toma de muestras en campo del  
aceite aislante a ser sometido a ensayos

**4.6 Ensayos Dieléctricos aplicados para el control del sistema de  
aislamiento en los Transformadores de Instrumentación..... 390**

4.6.1 Consideraciones Generales

4.6.2 Ensayos Dieléctricos aplicados en campo

4.6.3 Ensayos Dieléctricos especiales aplicados en fábrica

4.6.4 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de los  
Ensayos Dieléctricos en campo

**4.7 Ensayos Dieléctricos aplicados para el control del sistema de  
aislamiento en los Seccionadores de Potencia..... 409**

4.7.1 Consideraciones Generales

4.7.2 Ensayos Dieléctricos aplicados en campo

4.7.3 Ensayos Dieléctricos especiales aplicados en fábrica

4.7.4 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de los  
Ensayos Dieléctricos en campo

<b>4.8 Ensayos Dieléctricos aplicados para el control del sistema de aislamiento en los Interruptores de Potencia.....</b>	<b>418</b>
4.8.1 Consideraciones Generales	
4.8.2 Ensayos Dieléctricos aplicados en campo	
4.8.3 Ensayos Dieléctricos especiales aplicados en fábrica	
4.8.4 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de los Ensayos Dieléctricos en campo	
<b>4.9 Ensayos Dieléctricos aplicados para el control del sistema de aislamiento en los Equipos Encapsulados.....</b>	<b>444</b>
4.9.1 Consideraciones Generales	
4.9.2 Ensayos Dieléctricos aplicados en campo	
4.9.3 Ensayos Dieléctricos especiales aplicados en fábrica	
4.9.4 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de los Ensayos Dieléctricos en campo	
<b>4.10 Ensayos Dieléctricos aplicados para el control del sistema de aislamiento de los Bushing's como elemento principal de los equipos de alta tensión.....</b>	<b>459</b>
4.10.1 Consideraciones Generales	
4.10.2 Ensayos Dieléctricos aplicados en campo	
4.10.3 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de los Ensayos Dieléctricos en campo	

## **CAPÍTULO V**

<b>5. CASOS DE ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO EN CAMPO DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN INSTALADOS EN VARIAS DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN (SNT)</b>	
<b>5.1 Consideración Básica.....</b>	<b>479</b>
<b>5.2 CASO I – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Potencia.....</b>	<b>481</b>
<b>5.3 CASO II – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Instrumentación.....</b>	<b>512</b>
<b>5.4 CASO III – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Seccionador de Potencia.....</b>	<b>551</b>
<b>5.5 CASO IV – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Interruptor de Potencia.....</b>	<b>556</b>
<b>5.6 CASO V – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Equipo Encapsulado.....</b>	<b>577</b>

## **CAPÍTULO VI**

### **6. MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA PRESERVACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN**

- 6.1 Métodos utilizados para la preservación del sistema de aislamiento de los Transformadores de Potencia..... 587**
- 6.1.1 Tratamiento del aceite aislante
  - 6.1.2 Secado interno del Transformador de Potencia
- 6.2 Métodos utilizados para la preservación del sistema de aislamiento de los Equipos Encapsulados..... 645**
- 6.2.1 Tratamiento del Gas Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>)
  - 6.2.2 Secado interno del Equipo Encapsulado
- 6.3 Casos sobre la aplicación de los métodos de preservación del aislamiento en equipos de alta tensión instalados en varias de las subestaciones eléctricas que conforman el Sistema Nacional de Transmisión (SNT)..... 661**
- 6.3.1 Consideración Básica
  - 6.3.2 CASO I – Aplicación de los Métodos de Preservación del aislamiento en un Transformador de Potencia
  - 6.3.3 CASO II – Aplicación de los Métodos de Preservación del aislamiento en un Equipo Encapsulado

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla #2.1</b>	Composiciones de los aceites parafínicos y nafténicos.....	33
<b>Tabla #2.2</b>	Materiales aislantes aplicados en los transformadores de corriente.....	110
<b>Tabla #2.3</b>	Características relevantes de un aceite para interruptor de potencia.....	123
<b>Tabla #3.1</b>	Existencia de borra en el aceite de transformadores de potencia, relacionada con su Número de Neutralización.....	177
<b>Tabla #3.2</b>	Existencia de borra en el aceite de transformadores de potencia, relacionada con su Tensión Interfacial.....	177
<b>Tabla #3.3</b>	Solubilidad de los gases en el aceite de un transformador.....	181
<b>Tabla #3.4</b>	Resultados del análisis de una muestra de gas SF <sub>6</sub> del compartimento de un interruptor después de 10000 operaciones.....	190
<b>Tabla #4.1</b>	Relaciones entre factor de potencia y factor de disipación.....	216
<b>Tabla #4.2</b>	Ventajas y desventajas de los ensayos de descargas parciales según el tipo.....	234
<b>Tabla #4.3</b>	Voltajes aplicados en el ensayo de factor de potencia recomendados para transformadores inmersos en aceite.....	274
<b>Tabla #4.4</b>	Voltajes aplicados en el ensayo de factor de potencia para transformadores tipo inmersos en aceite, ensayados en ausencia del líquido aislante y bajo presión atmosférica o gran presión absoluta.....	275
<b>Tabla #4.5</b>	Tensiones aplicadas para el ensayo de resistencia de aislamiento, en base a la tensión nominal del transformador.....	283
<b>Tabla #4.6</b>	Valores mínimos de resistencia de aislamiento.....	286
<b>Tabla #4.7</b>	Formulas para determinar valores mínimos de resistencia de aislamiento.....	286
<b>Tabla #4.8</b>	Clasificación de colores conforme a la norma ASTM.....	323
<b>Tabla #4.9</b>	Diagnóstico de fallas en base a la aplicación tabular de las relaciones de Dornenburg.....	373
<b>Tabla #4.10</b>	Diagnóstico de fallas según el área clave de referencia del triángulo de Duval.....	376
<b>Tabla #4.11</b>	Voltajes de ensayo de FP recomendados por la Doble Engineering Company.....	419
<b>Tabla #4.12</b>	Datos de la tabla I de la norma IEC 56-4.....	437
<b>Tabla #5.1</b>	Valores mínimos referenciales de Resistencia de Aislamiento (Criterio I).....	486
<b>Tabla #5.2</b>	Valores mínimos referenciales de Resistencia de Aislamiento (Criterio II).....	488

<b>Tabla #5.3</b>	Condiciones del aislamiento según el Índice de Absorción.....	489
<b>Tabla #5.4</b>	Condiciones del aislamiento según el Índice de Polarización.....	490
<b>Tabla #5.5</b>	Cuadro comparativo entre registros de ensayos de Factor de Potencia obtenidos en fábrica y en campo.....	494
<b>Tabla #5.6</b>	Cuadro comparativo entre registros de ensayos de Factor de Potencia obtenidos en fábrica y en campo.....	500
<b>Tabla #5.7</b>	Registros de ensayos de Rigidez Dieléctrica del aceite.....	502
<b>Tabla #5.8</b>	Cuadro comparativo de los resultados obtenidos de ensayos de rigidez dieléctrica del aceite durante su periodo de reacondicionamiento.....	504
<b>Tabla #5.9</b>	Condiciones del aislamiento Transformador de Tensión ØA según el Índice de Absorción.....	518
<b>Tabla #5.10</b>	Condiciones del aislamiento Transformador de Tensión ØB según el Índice de Absorción.....	518
<b>Tabla #5.11</b>	Condiciones del aislamiento Transformador de Tensión ØC según el Índice de Absorción.....	518
<b>Tabla #5.12</b>	Cuadro comparativo de resultados de Factor de Potencia del aislamiento.....	522
<b>Tabla #5.13</b>	Cuadro comparativo de resultados de Pérdidas en el aislamiento.....	522
<b>Tabla #5.14</b>	Cuadro comparativo de resultados de Capacitancia del aislamiento.....	522
<b>Tabla #5.15</b>	Cuadro comparativo de las componentes de la corriente de ensayo.....	526
<b>Tabla #5.16</b>	Condiciones del aislamiento Transformador de Corriente ØA según el Índice de Absorción.....	534
<b>Tabla #5.17</b>	Condiciones del aislamiento Transformador de Corriente ØB según el Índice de Absorción.....	534
<b>Tabla #5.18</b>	Condiciones del aislamiento Transformador de Corriente ØC según el Índice de Absorción.....	534
<b>Tabla #5.19</b>	Cuadro comparativo de resultados de Factor de Potencia del aislamiento.....	538
<b>Tabla #5.20</b>	Cuadro comparativo de resultados de Pérdidas en el aislamiento.....	538
<b>Tabla #5.21</b>	Cuadro comparativo de resultados de Capacitancia del aislamiento.....	538
<b>Tabla #5.22</b>	Cuadro comparativo de las componentes de la corriente de ensayo.....	539
<b>Tabla #5.23</b>	Cuadro comparativo entre registros de Factor de Potencia del aislamiento, obtenidos en fábrica y en campo.....	540
<b>Tabla #5.24</b>	Cuadro comparativo entre registros de capacitancia del aislamiento, obtenidos en fábrica y en campo.....	541

<b>Tabla #5.25</b>	Cuadro comparativo entre registros de capacitancia del aislamiento, obtenidos en fábrica y en campo.....	549
<b>Tabla #5.26</b>	Cuadro de resultados del esquema de ensayo #1.....	584
<b>Tabla #6.1</b>	Acción de la máquina filtro-prensa sobre las impurezas en el aceite.....	589
<b>Tabla #6.2</b>	Relación entre los valores de rigidez dieléctrica inicial del aceite y el tiempo estimado de durabilidad del papel filtro a ser utilizado.....	592
<b>Tabla #6.3</b>	Acción de la máquina centrífuga sobre las impurezas.....	595
<b>Tabla #6.4</b>	Acción de la máquina de termovació sobre las impurezas.....	596
<b>Tabla #6.5</b>	Valores recomendados para el aceite nuevo posterior a su reacondicionamiento.....	602
<b>Tabla #6.6</b>	Valores referenciales que indican la necesidad de someter el aceite aislante en operación a un proceso de reacondicionamiento.....	603
<b>Tabla #6.7</b>	Valores recomendados para el aceite usado posterior a su reacondicionamiento.....	603

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
<b>Figura #1.1</b>	Fuerzas que actúan sobre una carga en el seno del campo eléctrico.....	33
<b>Figura #1.2</b>	Líneas de campo eléctrico entre dos cargas $q$ de signo contrario.....	33
<b>Figura #1.3</b>	Desplazamiento de una carga ante la acción de un campo eléctrico.....	34
<b>Figura #1.4</b>	Superficie equipotencial de una carga $+q$ .....	36
<b>Figura #1.5</b>	Dipolo en un campo eléctrico uniforme.....	37
<b>Figura #1.6</b>	Estructura geométrica de la molécula de agua $H_2O$ .....	38
<b>Figura #1.7</b>	Campo eléctrico originado por una placa cargada (análisis de una superficie gaussiana).....	42
<b>Figura #1.8</b>	Condensador de placas paralelas.....	43
<b>Figura #1.9</b>	Polarización de un dieléctrico en presencia de un campo externo.....	44
<b>Figura #1.10</b>	Vector polarización sobre una superficie no perpendicular.....	46
<b>Figura #1.11</b>	Disposición de dos materiales aislantes en paralelo.....	49
<b>Figura #1.12</b>	Disposición de dos materiales aislantes en serie.....	50
<b>Figura #1.13</b>	Disposición de dos materiales aislantes en forma refractaria.....	53
<b>Figura #1.14</b>	Variación de la tensión de ruptura de un material aislante, en función de la temperatura.....	57
<b>Figura #1.15</b>	Concepto de Ángulo de pérdidas de un dieléctrico.....	59
<b>Figura #2.1</b>	Sección de una fase de un transformador trifásico tipo núcleo inmerso en aceite mineral aislante, mostrando sus partes aisladas.....	75
<b>Figura #2.2</b>	Resistencia a la tensión de impulso de varios materiales aislantes.....	104
<b>Figura #2.3</b>	Transformador de corriente con aislamiento colocado sobre el secundario.....	108
<b>Figura #2.4</b>	Transformador de corriente con aislamiento colocado sobre el primario.....	109
<b>Figura #2.5</b>	Influencia de la proporción de componentes básicos (feldespato, caolín y cuarzo) en las propiedades de la porcelana electrotécnica.....	113
<b>Figura #2.6</b>	Vista en corte de una fase de un interruptor tipo GVO.....	121
<b>Figura #2.7</b>	Vista en corte de un Interruptor a gas $SF_6$ tipo tanque muerto, señalando sus partes aislantes.....	128
<b>Figura #2.8</b>	Parte interruptora de un interruptor de potencia.....	129

<b>Figura #2.9</b>	Vista en corte de un Interruptor a gas SF6 tipo tanque vivo, señalando sus partes aislantes.....	130
<b>Figura #2.10</b>	Comparación de la rigidez dieléctrica entre el SF6, aceite y aire.....	132
<b>Figura #2.11</b>	Vista en corte de un bushing no capacitivo Westinghouse, tipo RJ de 15KV.....	142
<b>Figura #2.12</b>	Vista en corte de un bushing no capacitivo General Electric, tipo LC de 15 a 69 KV.....	143
<b>Figura #2.13</b>	Cuerpo capacitivo de un bushing.....	145
<b>Figura #2.14</b>	Vista en corte de un bushing capacitivo ABB tipo GOE de 230KV.....	145
<b>Figura #3.1</b>	Distribución del contenido de humedad en el arrollamiento de un transformador, al exponerlo a una temperatura ambiente de 30°C y humedad relativa de 80%.....	150
<b>Figura #3.2</b>	Formación de agua, como resultado de la deterioración térmica del papel.....	152
<b>Figura #3.3</b>	Efecto de la humedad sobre el envejecimiento del papel Manila (0,076mm) con reducción de su resistencia a la tracción a 25% de su valor original.....	153
<b>Figura #3.4</b>	Variación de la resistencia mecánica del papel aislante en función de la humedad y del tiempo de envejecimiento.....	153
<b>Figura #3.5</b>	Variación del factor de potencia del cartón prensado (pressboard) en función de su contenido de humedad.....	154
<b>Figura #3.6</b>	Resistencia mecánica a la perforación por impulso del cartón prensado impregnado de aceite.....	155
<b>Figura #3.7</b>	Valor relativo al grado de polimerización del papel impregnado en función del tiempo y la temperatura (papel desgasificado y con contenido de agua 0,3%).....	156
<b>Figura #3.8</b>	Correlación entre la resistencia mecánica a la tracción y el grado de polimerización.....	156
<b>Figura #3.9</b>	Acción del calentamiento, la humedad y el oxígeno, en el desenvolvimiento de la degradación celulósica.....	158
<b>Figura #3.10</b>	Contenido de 2-FAL en el aceite con relación al grado de polimerización, según varias investigaciones.....	162
<b>Figura #3.11</b>	Rigidez dieléctrica de un aceite nuevo, en función de su contenido de agua.....	165
<b>Figura #3.12</b>	Característica del equilibrio de la humedad entre el aceite mineral aislante y el aislamiento celulósico impregnado.....	166
<b>Figura #3.13</b>	Curva de solubilidad para un tipo de aceite aislante.....	167
<b>Figura #3.14</b>	Fases de la deterioración del aceite aislante.....	172
<b>Figura #3.15</b>	Representación esquemática de las capas de lodo producto de la deterioración del aceite aislante, depositadas sobre la bobina del transformador.....	173

<b>Figura #3.16</b>	Curva de tensión interfacial vs número de neutralización de los aceites.....	176
<b>Figura #3.17</b>	Representación esquemática del proceso de ruptura en un interruptor inmerso en aceite aislante.....	185
<b>Figura #4.1</b>	Circuitos equivalentes simplificados de un espécimen de aislamiento.....	198
<b>Figura #4.2</b>	Diagrama fasorial simplificado de las corrientes presentes en el dieléctrico.....	199
<b>Figura #4.3</b>	Circuito básico de un Puente Schering.....	203
<b>Figura #4.4</b>	Circuito básico y diagrama fasorial de un Puente Doble de 2500 Voltios.....	205
<b>Figura #4.5</b>	Circuito básico y diagrama fasorial de un puente Doble de 10000 Voltios.....	208
<b>Figura #4.6</b>	Circuito básico y diagrama fasorial de un puente Megger de 10000Voltios.....	211
<b>Figura #4.7</b>	Esquema de análisis de un capacitor para interpretar los modos de ensayo.....	213
<b>Figura #4.8</b>	Esquema eléctrico de un dieléctrico con presencia de una burbuja gaseosa.....	218
<b>Figura #4.9</b>	Trayectoria de la tensión en el circuito de la figura #4.8, cuando existen las descargas parciales.....	219
<b>Figura #4.10</b>	Circuito equivalente del dieléctrico en presencia de una descarga parcial.....	220
<b>Figura #4.11</b>	Ancho de banda y frecuencias de corte para la medición de descargas parciales.....	223
<b>Figura #4.12</b>	Visualización de las descargas parciales en modo “fase resuelta”.....	226
<b>Figura #4.13</b>	Visualización de las descargas parciales en modo “registro de repetición”.....	226
<b>Figura #4.14</b>	Visualización de las descargas parciales en modo “NQS”.....	227
<b>Figura #4.15</b>	Visualización de las descargas parciales en modo “registro histórico”.....	228
<b>Figura#4.16a</b>	Impedancia de medición en serie con el capacitor de acoplamiento.....	229
<b>Figura #4.16b</b>	Impedancia de medición en serie con el espécimen bajo ensayo.....	229
<b>Figura #4.16c</b>	Circuito de medición bajo tensión inducida.....	230
<b>Figura #4.17a</b>	Calibración del circuito de medición de Descargas Parciales con impedancia de medición en serie con el capacitor de acoplamiento.....	231
<b>Figura #4.17b</b>	Calibración del circuito de medición de Descargas Parciales con impedancia de medición en serie con el equipo bajo ensayo.....	231
<b>Figura #4.18</b>	Perforación de un material aislante.....	235

<b>Figura #4.19</b>	Esquema básico de un instrumento medidor de rigidez dieléctrica.....	237
<b>Figura #4.20</b>	Circuito equivalente simplificado de un espécimen de aislamiento bajo ensayo.....	243
<b>Figura #4.21</b>	Curvas que muestran las componentes de la corriente medida durante un ensayo de aislamiento con tensión de corriente directa.....	246
<b>Figura #4.22</b>	Diagrama eléctrico del Megger de aislamiento con fuente de alimentación AC y rectificador a DC.....	247
<b>Figura #4.23</b>	Representación esquemática de un ensayo utilizando un megohmmetro con terminal de guarda.....	251
<b>Figura #4.24</b>	Curva típica de resistencia de aislamiento (en megaohms) con tiempo para el método de “corto tiempo” o “lectura puntual”.....	255
<b>Figura #4.25</b>	Trazo típico de una prueba tiempo – resistencia o de doble lectura.....	257
<b>Figura #4.26</b>	Curvas típicas con el ensayo de “Voltajes por Pasos”.....	260
<b>Figura #4.27</b>	Curva de evaluación de las pruebas de potencial.....	263
<b>Figura #4.28</b>	Normalización de la onda de sobretensión.....	266
<b>Figura #4.29</b>	Esquema de un generador de impulso con resistencia de puesta a tierra (descarga) posterior a la de amortiguamiento.....	269
<b>Figura #4.30</b>	Esquema de un generador de impulso con resistencia de puesta a tierra (descarga) junto al espacio disruptivo.....	271
<b>Figura #4.31</b>	Esquema de medición de descargas parciales de un transformador mediante un bushing tipo capacitivo.....	289
<b>Figura #4.32</b>	Esquema de conjunto para ensayo de tensión aplicada.....	292
<b>Figura #4.33</b>	Ensayo de tensión inducida. Análisis del aislamiento entre espiras.....	294
<b>Figura #4.34</b>	Obtención del doble de la tensión nominal por el aumento de la inducción magnética.....	296
<b>Figura #4.35</b>	Sentido de propagación de la onda de tensión.....	298
<b>Figura #4.36</b>	Esquema de ensayo en un transformador, para aplicación de onda de impulso.....	298
<b>Figura #4.37</b>	Primera onda aplicada, reducida, utilizada para la verificación de defectos acentuados y del tiempo $T_2$ .....	300
<b>Figura #4.38</b>	Segunda onda aplicada, reducida, utilizada para la determinación del tiempo $T_1$ .....	301
<b>Figura #4.39</b>	Tercera y cuarta ondas aplicadas: cortada.....	302
<b>Figura #4.40</b>	Quinta onda aplicada: plena.....	303
<b>Figura #4.41</b>	Oscilogramas obtenidos en transformadores diferentes y todos están buenos.....	306
<b>Figura #4.42</b>	Tubo graduado para la determinación de la acidez del aceite.....	330
<b>Figura #4.43</b>	Relación NN/tiempo-temperatura del aceite aislante mineral.....	332
<b>Figura #4.44</b>	Representación esquemática del gas característico $C_2H_2$ .....	367
<b>Figura #4.45</b>	Representación esquemática del gas característico $H_2$ .....	368

<b>Figura #4.46</b>	Representación esquemática del gas característico H <sub>2</sub> .....	369
<b>Figura #4.47</b>	Representación esquemática del gas característico C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> .....	370
<b>Figura #4.48</b>	Representación esquemática del gas característico CO.....	371
<b>Figura #4.49</b>	Gráfico de diagnóstico de fallas en transformadores según las relaciones de Dornenburg.....	374
<b>Figura #4.50</b>	Triángulo de Duval, para el diagnóstico de los resultados de ADGD.....	375
<b>Figura #4.51</b>	Disposición de la válvula de tres vías para la evacuación del aceite.....	384
<b>Figura #4.52</b>	Disposición de la válvula de tres vías para el llenado de aceite de enjuague de la jeringa.....	384
<b>Figura #4.53</b>	Disposición de la válvula de tres vías para el vaciado del aceite de enjuague de la jeringa.....	385
<b>Figura #4.54</b>	Voltaje de cresta en kV vs % de probabilidad de presencia de efluvios.....	413
<b>Figura #4.55</b>	Principal esquema de conexiones para un interruptor tripolar.....	436
<b>Figura #4.56</b>	Esquema de ensayo para determinar la presencia de descargas parciales.....	447
<b>Figura #4.57</b>	Origen de descarga parcial por presencia de partículas extrañas.....	448
<b>Figura #4.58</b>	Circuito de ensayo con resonancia en serie.....	450
<b>Figura #4.59</b>	Señal de salida del convertidor de frecuencia.....	451
<b>Figura #4.60</b>	Diagrama de voltaje de ensayo vs tiempo.....	454
<b>Figura #4.61</b>	Collares de caucho conductor.....	461
<b>Figura #4.62</b>	Ensayo de collar caliente simple, en modo de ensayo GSTground.....	462
<b>Figura #4.63</b>	Ensayo de collar caliente simple, en modo de ensayo UST.....	463
<b>Figura #4.64</b>	Ensayo de collar caliente múltiple en modo de ensayo GSTground.....	464
<b>Figura #4.65</b>	Ensayo UST de bushing capacitivo.....	468
<b>Figura #4.66</b>	Ensayo GST-guard de bushing capacitivo.....	468
<b>Figura #4.67a</b>	Métodos de ensayos de Resistencia de Aislamiento en bushing's tipo No Capacitivo.....	471
<b>Figura #4.67b</b>	Métodos de ensayos de Resistencia de Aislamiento en bushing's tipo Capacitivo.....	471
<b>Figura #5.1</b>	Curvas de absorción de los ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento - CASO I.....	484
<b>Figura #5.2</b>	Método de ensayo para determinar el factor de potencia del aceite aislante.....	506
<b>Figura #5.3</b>	Abstracto de resultados, tomado del informe K970-1 de la Morgan Schaffer.....	510
<b>Figura #5.4</b>	Abstracto de diagnóstico, tomado del informe K970-1 de la Morgan Schaffer.....	511

<b>Figura #5.5</b>	Curvas de absorción de los cuatro ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de tensión ØA - CASO II.A.....	515
<b>Figura #5.6</b>	Curvas de absorción de los cuatro ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de tensión ØB - CASO II.A.....	516
<b>Figura #5.7</b>	Curvas de absorción de los cuatro ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de tensión ØC - CASO II.A.....	516
<b>Figura #5.8</b>	Diagrama fasorial de la corriente de ensayo.....	523
<b>Figura #5.9</b>	Circuito eléctrico del espécimen bajo ensayo.....	524
<b>Figura #5.10</b>	Curvas de absorción de los tres ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de corriente ØA - CASO II.B.....	531
<b>Figura #5.11</b>	Curvas de absorción de los tres ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de corriente ØB - CASO II.B.....	531
<b>Figura #5.12</b>	Curvas de absorción de los tres ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de corriente ØC - CASO II.B.....	532
<b>Figura #5.13</b>	Curvas de absorción de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento en el transformador de tensión capacitivo – CASO II.C.....	545
<b>Figura #5.14</b>	Circuito equivalente del ensayo para la medida de la resistencia del aislamiento de un polo del seccionador – CASO III.....	554
<b>Figura #5.15</b>	Curvas de absorción de cada ensayo aplicado para medida de la resistencia de aislamiento de los polos del interruptor 52-032- CASO IV.....	559
<b>Figura #5.16</b>	Curvas de absorción de cada ensayo aplicado para medida de la resistencia de aislamiento de los polos de interruptores 52-032 y 52-002- CASO IV.....	563
<b>Figura #5.17</b>	Curva” voltaje de ensayo vs tiempo” aplicada en CASO V.....	582
<b>Figura #6.1</b>	Modelo esquemático del paso del aceite en el filtro.....	590
<b>Figura #6.2</b>	Tambor de una máquina centrífuga.....	594
<b>Figura #6.3</b>	Absorción de la tierra fuller, según la Engelhard Minerals and Chemical Corp.....	618
<b>Figura #6.4</b>	Afinidad del papel con el agua vs temperatura (S.D Myers).....	638
<b>Figura #6.5</b>	Diagrama funcional del instrumento de medida de punto de rocío.....	658

# INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia debido al aumento de los centros de consumo de energía eléctrica, ha originado en cadena la construcción de grandes centrales de generación, líneas de transmisión de largas distancias y estaciones de servicio para manejo de elevadas tensiones. Tal situación, ha incidido directamente en la necesidad de fabricar equipos de mayor capacidad para alta tensión, siendo su estructura constructiva cada vez más compleja, de mayor volumen y de especial cuidado.

El manejo de elevadas tensiones en la estructura constructiva de un equipo, implica consecuentemente el aumento del volumen de material aislante a usarse, con el fin de mantener en sus propios canales las partes conductoras internas y soportar adecuadamente las diferencias de potencial creadas entre varias de sus secciones, brindando el distanciamiento mínimo de seguridad requerido cuando en servicio. Se podría decir que más del 50% de la estructura constructiva de un equipo se encuentra compuesta de materiales aislantes.

Los diferentes materiales aislantes dispuestos en un equipo conforman lo que se llama su sistema de aislamiento. El funcionamiento adecuado de este sistema depende de los continuos análisis periódicos que apliquemos y de las adecuadas acciones preventivas que tomemos.

La aplicación de métodos con el fin de evaluar ciertos parámetros característicos del sistema de aislamiento, es lo que se conoce como *ensayos dieléctricos*. Es decir, el análisis y diagnóstico del estado del sistema de aislamiento de un equipo se efectúa mediante ensayos dieléctricos, que según sea su finalidad, pueden ser desarrollados tanto en fábrica como en campo.

#### **OBJETIVO GENERAL:**

“Proporcionar los conocimientos teóricos y prácticos sobre la aplicación de los materiales aislantes sólidos, líquidos y gaseosos en los equipos eléctricos de alta tensión, mediante el análisis de sus propiedades características y función dentro de los mismos, para asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia a partir de ensayos aplicados”.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Verificar los tipos de materiales aislantes que intervienen en la construcción de los equipos eléctricos de alta tensión, a través del estudio de sus propiedades y características, para determinar el enfoque de los ensayos dieléctricos a aplicarse.
- Describir los principales factores que influyen en la degradación de los materiales aislantes de los equipos eléctricos de alta tensión, a partir de

investigaciones realizadas, para recomendar las adecuadas acciones preventivas y correctivas a tomar.

- Establecer las herramientas necesarias, mediante la recopilación de normas, publicaciones y textos, para el correcto análisis en campo del estado del aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión.
- Determinar el control oportuno de los materiales aislantes, mediante la aplicación de ensayos dieléctricos y métodos de preservación, para prevenir posteriores fallas de los equipos eléctricos de alta tensión.

#### **HIPÓTESIS CENTRAL:**

*La hipótesis central de este proyecto, parte en que “el análisis y aplicación de los materiales aislantes sólidos, líquidos y gaseosos, incide significativamente en el funcionamiento de los equipos eléctricos de alta tensión”.*

Para comprobar dicha hipótesis se ha aplicado uno de los métodos científicos de la investigación como lo es el *método deductivo*, el cual comprende la verificación del cumplimiento de uno o varios casos en particular, a partir de la comparación con lo que ya está determinado por las leyes o principio general. De esta forma, el procedimiento a seguir para su desarrollo se rige en el cumplimiento de las etapas de *la aplicación, la comprobación y la demostración*.

## CAPÍTULO I

### 1. LOS MATERIALES AISLANTES O DIELECTRICOS

#### 1.1 DEFINICIÓN

Los *materiales aislantes* son sustancias que poseen baja conductividad eléctrica y por tanto, significativa resistencia al paso de la corriente en presencia de un campo eléctrico externo.

#### 1.2 CLASIFICACIÓN

Los materiales aislantes se pueden clasificar de cuatro maneras, que son:

1) Por su naturaleza, en:

- ✓ Materiales aislantes de estado Sólido
- ✓ Materiales aislantes de estado Líquido
- ✓ Materiales aislantes de estado Gaseoso

2) Por su origen, en:

- ✓ Materiales aislantes Naturales
- ✓ Materiales aislantes Sintéticos

3) Por su composición, en:

- ✓ Materiales aislantes Orgánicos
- ✓ Materiales aislantes Inorgánicos

4) Por su temperatura máxima de trabajo, en:

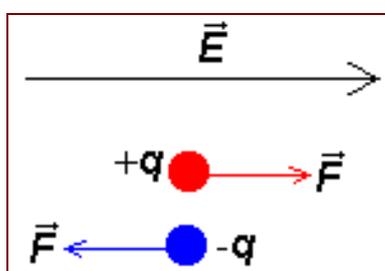
- ✓ Materiales aislantes de Clase Y (90°)
- ✓ Materiales aislantes de Clase A (105°)
- ✓ Materiales aislantes de Clase E (120°)
- ✓ Materiales aislantes de Clase B (130°)
- ✓ Materiales aislantes de Clase F (155°)
- ✓ Materiales aislantes de Clase H (180°)
- ✓ Materiales aislantes de Clase C (mayor de 180°)

### **1.3 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES AISLANTES ANTE LA ACCIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO.**

#### **1.3.1 EL CAMPO ELÉCTRICO**

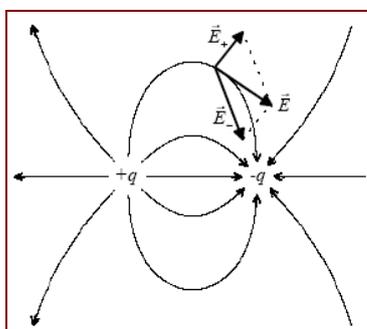
Se conoce como *campo eléctrico* a la región del espacio en la vecindad de los cuerpos electrizados donde actúan las fuerzas eléctricas.

Este posee en cada uno de sus puntos una propiedad vectorial conocida como **intensidad de campo**  $\vec{E}$ , que le permite producir dicha fuerza sobre cualquier carga eléctrica. Esta fuerza es igual al producto de la carga por la intensidad del campo eléctrico  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ . Si la carga es positiva experimenta una fuerza en el sentido del campo y si esta es negativa experimenta una fuerza en sentido contrario al campo.



*Figura 1.1 – Fuerzas que actúan sobre una carga en el seno del campo eléctrico*

Su representación es mediante líneas de fuerza eléctricas, conocidas como “**líneas de campo eléctrico**”. Estas, son normales a la superficie de todo cuerpo conductor y su densidad es proporcional a la intensidad de campo eléctrico en esa región. La tangente en cada punto de una línea de campo, indica el **vector de campo eléctrico**  $\vec{E}$ .

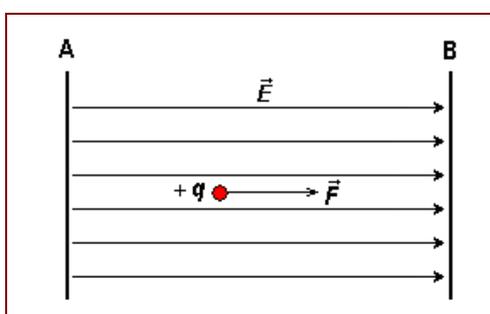


*Figura 1.2 – Líneas de campo eléctrico entre dos cargas q de signo contrario*

## 1.3.2 DIFERENCIA DE POTENCIAL ELÉCTRICO

### 1.3.2.1 Diferencia de potencial eléctrico

Una carga  $q$  se mueve dentro de un campo eléctrico  $\vec{E}$  desde una posición “A” hacia una posición “B” bajo la acción de las fuerzas producto de la intensidad de campo. *Es decir el campo eléctrico realiza un trabajo.*



*Figura 1.3 – Desplazamiento de una carga ante la acción de un campo eléctrico*

Para un desplazamiento infinitesimal  $d\vec{r}$ , el trabajo hecho por el campo eléctrico es  $\vec{F} \cdot d\vec{r} = q\vec{E} \cdot d\vec{r}$ . Este trabajo, al tener en cuenta que la fuerza eléctrica es conservativa, se puede expresar como una disminución de la energía potencial eléctrica  $\Delta U$ , siendo así tal reducción en función del campo eléctrico dado como una cantidad  $dU = -q\vec{E} \cdot d\vec{r}$ . Por lo tanto, para un desplazamiento finito de la carga de prueba entre las posiciones “A” y “B”, el **cambio de energía potencial** se expresa así:

$$\Delta U = U_B - U_A = -\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = -q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.1)$$

La energía potencial por unidad de carga,  $U/q$ , es independiente del valor de  $q$  y tiene un valor único en cada punto en el campo eléctrico. La cantidad  $U/q$  recibe el nombre de **potencial eléctrico**,  $V$ . Debido a que la energía potencial es una cantidad escalar, el potencial eléctrico es también una cantidad escalar.

La **diferencia de potencial eléctrico**,  $\Delta V = V_B - V_A$ , entre las posiciones “A” y “B” se define como el cambio de energía potencial dividida entre la carga  $q$ :

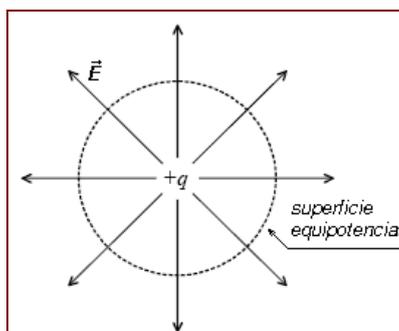
$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta U}{q} = -\int_A^B E \cdot dr \quad (1.2)$$

Puesto que la diferencia de potencial es una medida de la energía por unidad de carga, la unidad del SI del potencial es en **Joules por Coulomb**, definido como **Volt (V)**. La diferencia de potencial entre dos puntos también se denomina **tensión eléctrica** o **voltaje**.

*Las cargas eléctricas positivas al encontrarse en un campo eléctrico se mueven hacia potenciales decrecientes (en el mismo sentido de las líneas de campo) y las cargas eléctricas negativas se mueven hacia potenciales crecientes (en sentido opuesto a las líneas de campo). Por tanto, las líneas de campo eléctrico señalan la dirección en la que disminuye el potencial.*

### 1.3.2.2 Superficies equipotenciales

Son superficies que resultan de unir entre sí todos los puntos del campo que se hallan al mismo potencial. Además, son cortadas perpendicularmente por las líneas de fuerza. Si la tensión varía, varían simultáneamente las líneas de fuerza y las superficies equipotenciales, de tal modo que el número de estas permanecen constantemente proporcionales a la tensión sin que su forma geométrica sufra alteración de ningún género.



**Figura 1.4** – Superficie equipotencial de una carga  $+q$

Un ejemplo real del comportamiento de las líneas de fuerza y las superficies equipotenciales, se muestra en la *figura anexa 1.1*.

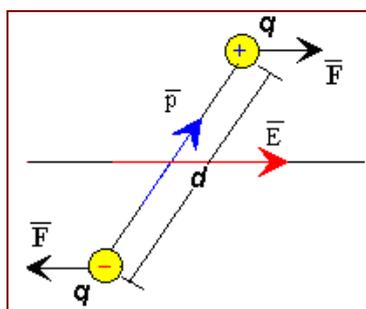
### 1.3.3 LA POLARIZACIÓN - EFECTO DEL CAMPO ELÉCTRICO SOBRE UN MATERIAL AISLANTE

No existen electrones libres que se puedan desplazar en los materiales aislantes, todos se encuentran ligados a sus átomos. Por eso, cuando se aplica un

campo eléctrico externo a un dieléctrico, su comportamiento es muy distinto al de los conductores.

### 1.3.3.1 Momento de Dipolo Eléctrico

Un *dipolo eléctrico* es un sistema formado por dos cargas iguales  $q$  y de signo contrario, separadas una distancia  $d$ . Por lo tanto, se define *el momento dipolar* ( $\vec{p}$ ), como un vector cuyo módulo es el producto de la carga  $q$  por la separación entre cargas  $d$ , en dirección de la recta que las une, y de sentido de la negativa a la positiva.



*Figura 1.5 – Dipolo en un campo eléctrico uniforme*

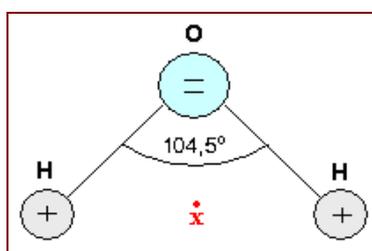
Sobre un dipolo situado en un campo eléctrico actúa un par fuerzas cuyo momento tiende a orientar al dipolo en la dirección del campo. Sin embargo, esta tendencia está contrarrestada por la agitación térmica de las moléculas. Para cada campo y cada temperatura tendremos una orientación media, resultado del compromiso entre ambas tendencias contrapuestas.

### 1.3.3.2 Materiales Aislantes Polares y No Polares

#### Materiales aislantes polares

Se conoce como *material aislante polar*, a aquel dieléctrico que esta constituido de *moléculas polares*.

En las moléculas polares, las cargas eléctricas positivas y negativas no tienen la misma distribución espacial y sus centros geométricos no coinciden, incluso en ausencia de campo externo. Un ejemplo es la molécula de agua, en la que los dos átomos de hidrógeno se enlazan al oxígeno formando un ángulo de  $104,5^\circ$  entre sus enlaces.



*Figura 1.6 – Estructura geométrica de la molécula de agua  $H_2O$*

El centro de la carga negativa está cerca del átomo de oxígeno, y el centro de la carga positiva está en un punto **x** a la mitad de la línea que une a los dos átomos de hidrógeno. Las cargas positiva y negativa separadas forman lo que se denomina un *dipolo eléctrico*. En ausencia de campo estos dipolos moleculares están orientados

al azar e interaccionan continuamente unos con otros. El momento dipolar resultante es diferente de cero.

Al aplicar el campo externo los momentos tienden a orientarse en la dirección del campo, aunque la agitación térmica no cesa y la orientación no es completa, a menos que el campo sea muy intenso y la temperatura muy baja.

*En forma general, un material aislante polar está caracterizado por un desequilibrio permanente de las cargas eléctricas dentro de cada molécula y su propiedad más interesante consiste en la capacidad de orientarse en la dirección de un campo externo, provocando pérdidas dieléctricas elevadas a ciertas temperaturas y frecuencias.*

*Mecanismos de Polarización → “Orientación de dipolos permanentes”*

### **Materiales aislantes no polares**

Se conoce como *material aislante no polar*, a aquel dieléctrico que está constituido de *moléculas no polares*.

En las moléculas no polares, los centros geométricos de las cargas positivas y negativas coinciden debido a su disposición simétrica. En ausencia de campo no existe separación de cargas y por tanto, el momento dipolar es cero.

Un campo externo atrae a las cargas negativas y empuja a las positivas produciendo una deformación de la molécula y una pequeña separación de las cargas. Se crea un momento dipolar en la dirección del campo, que desaparece cuando éste cesa.

*En forma general, un material aislante no polar está caracterizado por no existir desequilibrio permanente de las cargas eléctricas dentro de cada molécula y puesto que ésta no puede ser distorsionada por la aplicación de un campo eléctrico, no existe tendencia al giro. Por consiguiente, este tipo de material está exento de variación brusca de las pérdidas dieléctricas por variación de la temperatura o de la frecuencia, y cualquier variación de la constante dieléctrica o del factor de potencia, se produce gradualmente.*

*Mecanismos de Polarización → “Polarización de moléculas no polares”*

### **1.3.3.3 El Fenómeno de la Polarización**

Los dieléctricos son sustancias en las que todas las partículas cargadas están muy fuertemente ligadas a sus moléculas y átomos que lo forman. A diferencia de los conductores, en los materiales aislantes, estas cargas no son libres de moverse cuando están bajo la influencia de un campo eléctrico externo, no obstante las fuerzas producidas por este campo origina desplazamientos relativos de las cargas de signo opuesto cuya extensión depende de la mayor o menor rigidez con que

éstas estén unidas. Este desplazamiento de cargas producido por el efecto de un campo exterior se conoce como *polarización de un material*.

Como resultado de esta polarización de la carga, se crea un campo eléctrico molecular de menor magnitud y sentido opuesto al externo, ya que va de la parte de la molécula donde se concentra la carga positiva a la negativa.

#### **1.3.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES AISLANTES BAJO LA ACCIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO**

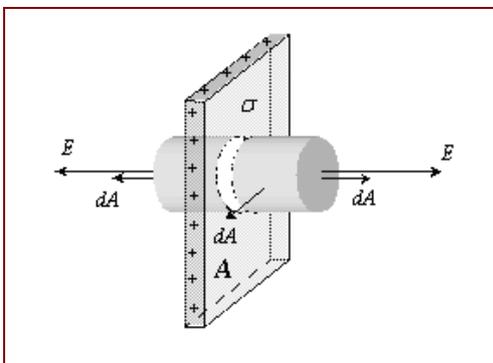
Al ser la función básica de los materiales aislantes dentro de un equipo de alta tensión, el aislar eléctricamente sus partes conductoras entre sí y estas con respecto a la cubierta metálica sólidamente aterrizada, estos materiales son sometidos a la acción de un campo eléctrico que los atraviesa y el cual es originado por las diferencias de potencial existentes.

Debido a la similitud del esquema constructivo de un equipo de alta tensión (conductor-aislamiento-tierra) con el de un capacitor, se puede fácilmente entender bajo el principio básico de funcionamiento de un condensador de placas paralelas, el comportamiento y ciertas particularidades de los materiales aislantes sometidos a la acción de un campo eléctrico.

### 1.3.4.1 Principio del condensador de placas paralelas

El condensador práctico más sencillo está formado por dos placas planas conductoras y paralelas de superficie  $A$  (infinitas), situadas a una distancia  $d$  (muy pequeña en comparación con la dimensión de las placas) y conteniendo en su interior como dieléctrico ideal el vacío con permitividad  $\epsilon_0$  ( $8.854187 \times 10^{-12}$  C<sup>2</sup>/N.m<sup>2</sup>).

El campo eléctrico  $E_+$  creado por la lámina plana infinita con densidad de carga  $+\sigma$ (C/m<sup>2</sup>), debe ser perpendicular y tener el mismo valor en los puntos equidistantes de ella.



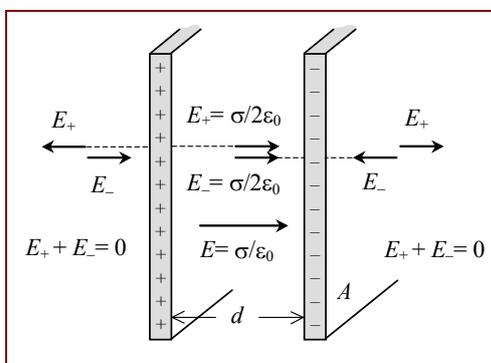
**Figura 1.7** – Campo eléctrico originado por una placa cargada (análisis de una superficie gaussiana)

Entonces, si tomamos una superficie gaussiana cilíndrica como muestra la figura 1.7, el flujo del campo la atraviesa solamente por las dos caras de su base y entonces se tiene que:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 2EA = \frac{q_i}{\epsilon_0} = \frac{A\sigma}{\epsilon_0} \rightarrow E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (1.3)$$

Por lo tanto, el campo  $E_-$  de la lámina con densidad de carga  $-\sigma$  es el mismo pero de sentido contrario (dirigido hacia la lámina en vez de salir de ella). De esto se concluye que en el condensador, los campos se suman en la región intermedia pero se cancelan en la zona externa, donde son opuestos. De este modo, la resultante en el interior del condensador será entonces:

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = cte \quad (1.4)$$



**Figura 1.8** – Condensador de placas paralelas

*Este campo eléctrico  $\vec{E}$  generado en el interior de las placas es uniforme.*

La diferencia de potencial entre las dos placas se obtiene integrando el campo desde la placa negativa hasta la positiva:

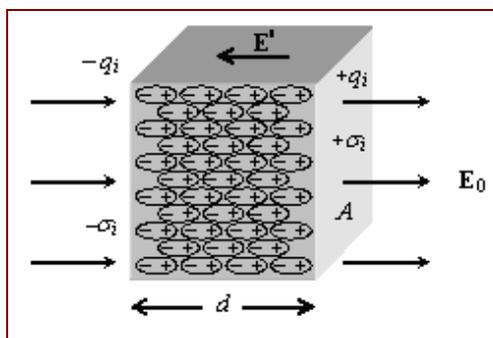
$$\Delta V = -\int_{-}^{+} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \int_{-}^{+} dr = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d \quad (1.5)$$

Si los conductores son placas de superficie  $A$ , su carga será  $Q = \sigma A$  y finalmente la capacidad del condensador es:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\sigma A}{\sigma d / \epsilon_0} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.6)$$

### 1.3.4.2 Efecto de la inserción de un material aislante entre las placas del condensador

Al introducirse un material aislante entre las placas conductoras de un condensador, sobre este actúa el campo eléctrico externo y sus dipolos moleculares (permanentes o inducidos) tienden a orientarse en la dirección del campo, tal como muestra la figura 1.9.



**Figura 1.9** – Polarización de un dieléctrico en presencia de un campo externo

Por lo tanto, sobre las caras del dieléctrico en contacto con las placas aparecen cargas de polarización con densidad  $+\sigma_i$  y  $-\sigma_i$  que dan lugar al campo inducido y contrario  $E'$ , siendo el campo neto:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (1.7)$$

$E_0$  es el campo eléctrico externo inicialmente aplicado

Evidentemente el campo total disminuye por la presencia del dieléctrico; esta reducción es característica de cada material y se cuantifica por una *constante dieléctrica*  $\kappa$ , cuyos valores se muestran en la [tabla anexa 1.A1](#)

El efecto del dieléctrico entre las placas de un condensador también se pone de manifiesto en su diferencia de potencial, la cual disminuye conforme la constante dieléctrica  $\kappa$ , dándose lo siguiente:

$$\Delta V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\int \frac{\vec{E}_0}{\kappa} \cdot d\vec{r} = \frac{\sigma}{\kappa \epsilon_0} d \quad (1.8)$$

Esto, conlleva de igual forma a que la capacitancia del condensador aumente en el mismo factor  $\kappa$ . por lo tanto:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\sigma A}{\sigma d / \kappa \epsilon_0} = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.9)$$

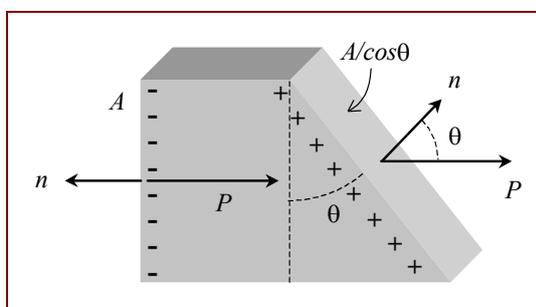
El momento dipolar total de la muestra es la suma de los momentos dipolares. Si  $d$  es el espesor de la muestra y  $q_i$  la carga inducida en las superficies, su valor será:

$$\sum_j \vec{p}_j = q_i \vec{d} \quad (1.10)$$

Es decir, el producido por las cargas superficiales  $\pm q_i$ , ya que las otras se cancelan mutuamente. Definimos la *polarización*  $\mathbf{P}$  de la muestra como el momento dipolar por unidad de volumen.

$$P = \frac{\sum p_j}{V} = \frac{q_i d}{Ad} = \sigma_i \quad (1.11)$$

Si una de las caras no fuera perpendicular al campo, la carga inducida  $q_i$  se reparte por una superficie  $A/\cos\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo que forma la normal a la superficie con el vector polarización.



**Figura 1.10** – Vector polarización sobre una superficie no perpendicular

Por tanto la densidad superficial será:

$$\sigma_i = \frac{q_i}{A/\cos\theta} = \frac{q_i}{A} \cos\theta = P \cos\theta = \vec{P} \cdot \vec{n} \quad (1.12)$$

La polarización  $\mathbf{P}$  depende del campo neto aplicado. Cuanto más intenso sea, mayor será la separación de cargas y, por tanto,  $\mathbf{P}$ . En la mayoría de los casos la relación es de proporcionalidad:

$$\vec{P} = \chi_e \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.13)$$

La constante  $\chi_e$  se denomina *susceptibilidad eléctrica* e indica la mayor o menor facilidad de la sustancia para ser polarizada. La permitividad  $\epsilon_0$  se introduce para que  $\chi_e$  sea un número adimensional, ya que  $\epsilon_0 \mathbf{E}$  tiene dimensiones de densidad superficial de carga ( $\text{C}/\text{m}^2$ ), igual que la polarización. En los dieléctricos  $\chi_e$  es positivo y en el vacío  $\chi_e = 0$ , ya que no hay moléculas que puedan polarizarse.

Del teorema de Gauss Generalizado, se determina el flujo del vector Desplazamiento  $\vec{D}$ , que para el caso del condensador se define como el flujo electrostático producido entre las dos placas paralelas, referido a las cargas eléctricas de los extremos (cargas de los electrodos) de un espacio limitado por una serie continua de líneas de fuerza, conocido como “tubo de fuerza”.

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{A} = q_0 \quad (1.14)$$

Donde el vector desplazamiento  $\vec{D}$ , está dado en unidades culombios/cm<sup>2</sup> y su expresión física es la siguiente:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.15)$$

Dicho de otro modo, las líneas del campo  $\vec{D}$  empiezan o terminan en las cargas libres, de la misma forma que las líneas del campo  $\vec{P}$  lo hacen en las cargas de polarización y las de  $\vec{E}$  en todo tipo de cargas. Poniendo  $\vec{P}$  en función de la susceptibilidad eléctrica (ecuación 1.13) el desplazamiento queda:

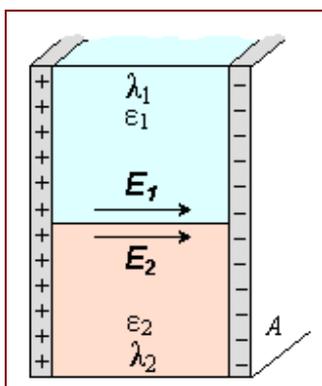
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \chi_e \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (1.16)$$

Donde  $(1+\chi_e)$  es igual a la constante dieléctrica  $\kappa$  y  $\epsilon$  es la permitividad del material aislante (es decir  $\epsilon = \epsilon_0 \kappa$ )

### 1.3.4.3 Aislamiento de varias capas – Combinaciones distintas de materiales aislantes

La disposición de dos o más materiales aislantes de permitividad ( $\epsilon$ ) y conductibilidad ( $\lambda$ ) diferentes, puede darse las siguientes formas:

- a) **En paralelo** – Cuando la superficie de separación de los dieléctricos es paralela a las líneas de fuerza.



**Figura 1.11** – Disposición de dos materiales aislantes en paralelo

Las componentes tangenciales de las intensidades de campo a lo largo de la superficie divisoria de ambos dieléctricos, son iguales; ya que si se consideran dos puntos próximos de dicha superficie, la diferencia de potencial entre ellos, calculada siguiendo uno de los dieléctricos, ha de resultar igual que siguiendo el otro. Por lo tanto, los vectores desplazamiento son diferentes y su valor depende de la relación de sus permitividades.

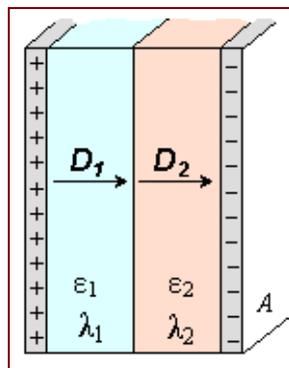
$$E_1 = E_2$$

$$\frac{D_1}{\epsilon_1} = \frac{D_2}{\epsilon_2}$$

$$D_1 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot D_2 \qquad D_2 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot D_1 \qquad (1.17)$$

Este es un caso poco común y resulta ser menos peligroso ya que solo se consideran las componentes normales del campo.

- b) *En serie* – Cuando las líneas de fuerza son perpendiculares a la superficie de separación de los dos dieléctricos.



*Figura 1.12 – Disposición de dos materiales aislantes en serie*

Haciendo un análisis a la superficie divisoria, se puede concluir que el desplazamiento de carga por unidad de área  $D$  no varía al pasar de un dieléctrico al otro, esto implica que las intensidades de campo en una y otra sustancia, varíen en forma inversa a las permitividades.

$$D_1 = D_2$$

$$\varepsilon_1 \cdot E_1 = \varepsilon_2 \cdot E_2$$

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot E_2 \quad E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1 \quad (1.18)$$

La intensidad de campo  $E_1$  rige en todo el dieléctrico 1 y la intensidad de campo  $E_2$ , en todo el dieléctrico 2. Por lo tanto las tensiones parciales correspondientes a cada dieléctrico pueden calcularse como sigue:

$$\Delta V = -\int_{d_1}^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{r} - \int_{d_1+d_2}^{d_1} \vec{E}_2 \cdot d\vec{r}$$

$$\Delta V = \frac{Q}{A\epsilon_0} \left( \frac{d_1}{\kappa_1} + \frac{d_2}{\kappa_2} \right)$$

$$V_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \frac{d_1}{\kappa_1} \quad V_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \cdot \frac{d_2}{\kappa_2} \quad (1.19)$$

Estas formulas son perfectamente aplicables cuando se trata de tensión alterna y son atribuibles a la distribución de tensiones en las capas de aislamiento en el momento de la conexión. Tales condiciones sólo iniciales, se deben a que la mayoría de los materiales aislantes sólidos o líquidos poseen una cierta conductividad ohmica ( $\lambda$ ) que no es despreciable, es decir, las suposiciones de resistencia infinita en los dieléctricos no se dan en la práctica.

*Por lo tanto, luego del transiente de conexión, comienza la circulación conductiva de una corriente que hace variar la repartición de las tensiones a lo largo de los aislamientos.*

En *condiciones estacionarias*, esta corriente que penetra en cada elemento de un dieléctrico ha de ser igual a la que sale del mismo (razonamiento válido para la superficie límite entre dos sustancias diferentes donde la densidad de corriente del primer material  $J_1$  es igual a la del segundo  $J_2$ ). De otro modo, se produciría una acumulación de carga eléctrica en el elemento considerado y la repartición de tensiones quedaría alterada. Esto conlleva a las siguientes conclusiones:

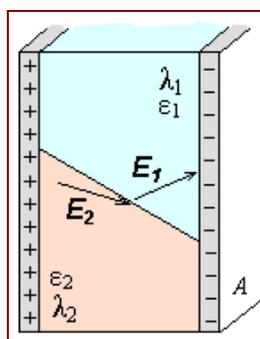
$$\begin{aligned}
 J_1 &= J_2 & J_1 &= J_2 \\
 \frac{I_1}{A} &= \frac{I_2}{A} & \lambda_1 E_1 &= \lambda_2 E_2 \\
 I_1 &= I_2 & \frac{E_1}{E_2} &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1} & (1.20)
 \end{aligned}$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  son las corrientes estacionarias de cada medio respectivamente y  $A$  la superficie que atraviesan. Por lo tanto, las nuevas tensiones parciales en condiciones estacionarias, correspondientes a cada dieléctrico, serían:

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= -\int_{d_1}^0 \vec{E}_1 \cdot d\vec{r} - \int_{d_1+d_2}^{d_1} \vec{E}_2 \cdot d\vec{r} \\
 \Delta V &= \frac{1}{A} \left( \frac{I_1}{\lambda_1} \cdot d_1 + \frac{I_2}{\lambda_2} \cdot d_2 \right)
 \end{aligned}$$

$$V_1' = \frac{1}{A} \cdot \frac{I_1}{\lambda_1} \cdot d_1 \quad V_2' = \frac{1}{A} \cdot \frac{I_2}{\lambda_2} \cdot d_2 \quad (1.21)$$

- c) **Refractaria** – Cuando se dispone los materiales aislantes en una forma tal, que estos se hallen recorridos por líneas de fuerza cuya dirección no siempre sea perpendicular ni paralela a la superficie de separación o límite. Al igual que las líneas de fuerza, las líneas de inducción electrostática y las superficies equipotenciales forman una desviación angular en la superficie límite o divisoria, lo cual se conoce con el término de **refracción**. Tal es el siguiente caso donde el límite de separación esta dado de forma inclinada:



**Figura 1.13** – Disposición de dos materiales aislantes en forma refractaria

Del análisis vectorial mostrado en el **apéndice 1.A1** de esta unidad, sobre el comportamiento de las líneas de fuerza en la superficie limitante; se concluyen las siguientes expresiones en base a sus ángulos de refracción con respecto a la perpendicular a la línea divisoria:

$$E_1 \operatorname{sen} \alpha_1 = E_2 \operatorname{sen} \alpha_2 \quad (1.22)$$

$$D_1 \cos \alpha_1 = D_2 \cos \alpha_2 \quad (1.23)$$

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (1.24)$$

## 1.4 PROPIEDADES GENERALES. SIGNIFICADO E IMPORTANCIA

Los materiales aislantes deben cumplir con ciertas *propiedades generales* que les permitan asegurar de manera eficiente el aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión. Estas propiedades son:

- a) *Propiedades Eléctricas*
- b) *Propiedades Mecánicas*
- c) *Propiedades Físico-Químicas*

### 1.4.1 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

#### 1.4.1.1 Resistencia de Aislamiento

Se denomina *resistencia de aislamiento* de un material aislante, a la resistencia presente en él que se opone al paso de la corriente eléctrica de fuga, medida en la dirección en que deba asegurarse el aislamiento.

La corriente de fuga puede seguir dos trayectos posibles, uno sobre la superficie y otro a través del cuerpo del material aislante, por lo tanto, es necesario distinguir entre *resistencia de aislamiento superficial* y *volumétrica*. Se sobreentiende que estos dos caminos actúan en paralelo y la pérdida óhmica total depende en gran parte de las condiciones en la superficie del material.

- 1) *La resistencia de aislamiento superficial* es la resistencia que ofrece la superficie del material al paso de la corriente, cuando se aplica una tensión entre dos zonas de dicha superficie. El valor de esta resistencia se refiere a la superficie comprendida entre las dos zonas sometidas a tensión, las cuales están en contacto con los electrodos, y suele medirse en  $M\Omega/cm^2$ . A esta magnitud se la denomina también *resistividad superficial*.
  
- 2) *La resistencia de aislamiento volumétrica* es la resistencia que opone el material a ser atravesado por la corriente, cuando se aplica una tensión entre dos de sus caras. También se denomina *resistividad transversal o volumétrica* y está expresada en  $M\Omega \cdot cm^2/cm$ .

La resistividad volumétrica de un material aislante no es un valor constante, como suele ocurrir con los materiales conductores, sino que varía con la temperatura, la tensión aplicada, el tiempo, la humedad, el espesor del material y otros factores.

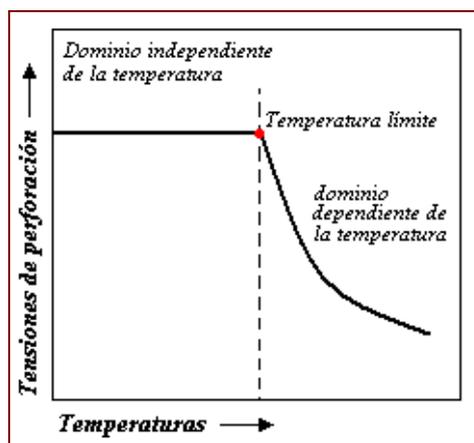
*Cuanto mayor sea la resistividad de un material, tanto mejor resultará como aislante. Por consiguiente, al elegir un material como dieléctrico, debe procurarse que tenga una elevada resistividad, para reducir al mínimo las corrientes de fuga.*

#### **1.4.1.2 Rigidez dieléctrica**

Se conoce como *rigidez dieléctrica* de un material aislante, al máximo gradiente de potencial que éste es capaz de soportar sin que se produzca una descarga disruptiva. Su valor suele expresarse en kilovoltios por milímetro (kV/mm).

La *descarga disruptiva* no es más que una corriente eléctrica que se presenta en los dieléctricos que están sometidos a la acción de un campo eléctrico, debido a que las fuerzas coercitivas de los átomos del material, son menores que las fuerzas que tratan de mover los electrones en dirección opuesta a la intensidad del campo.

Hasta un cierto valor de temperatura denominado *temperatura límite*, la rigidez dieléctrica es independiente de ella; por encima de ésta, ya existe una influencia tal como se puede apreciar en la figura 1.14. En general, esta temperatura límite está comprendida entre  $-50^{\circ}\text{C}$  y  $+50^{\circ}\text{C}$ , aunque en la porcelana y otros materiales cerámicos es mucho mayor.



**Figura 1.14** – Variación de la tensión de ruptura de un material aislante, en función de la temperatura.

Relacionado con el concepto de rigidez dieléctrica está el de *perforación eléctrica* o *ruptura*. Se habla de *perforación eléctrica* o *ruptura* de un material aislante, cuando la descarga disruptiva se produce por debajo del valor de la temperatura límite, ya que, en este caso, la perforación se debe exclusivamente a la tensión aplicada. Si la perforación se produce por encima de la temperatura límite, se denomina *perforación electrotérmica*, y esta se presenta cuando la tensión aplicada para una temperatura inicial dada, es insuficiente para provocar la perforación inmediatamente, pero la promueve a causa del calentamiento interno debido a las pérdidas dieléctricas.

*El valor de la temperatura límite es de importancia esencial para la elección de un material aislante apropiado, ya que es un índice de plena garantía de su funcionamiento.*

*Cuanto mayor sea la tensión de perforación de un material aislante, más difícilmente se producirá la perforación en servicio. Por lo tanto, interesa utilizar dieléctricos de más elevada rigidez dieléctrica, cuanto más elevada sea la tensión a la que deban trabajar.*

#### **1.4.1.3 Constante dieléctrica**

La *constante dieléctrica* ( $\kappa$ ) es una característica técnica, cuyo valor varía para cada dieléctrico y su producto con la permitividad del espacio libre o vacío ( $\epsilon_0$ ), permite determinar la permitividad del material aislante ( $\epsilon_n$ ) sometido a un campo eléctrico.

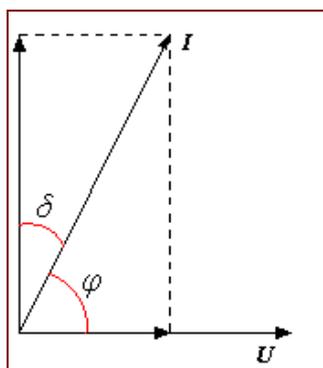
$$\epsilon_n = \kappa \cdot \epsilon_0 \quad (1.25)$$

*Al igual que la rigidez dieléctrica, el material aislante que debe elegirse debe poseer una constante dieléctrica elevada, con el objetivo de conseguir la máxima capacidad con un mínimo volumen.*

#### **1.4.1.4 Factor de Pérdidas**

La corriente de fuga, al atravesar un material aislante, lo calienta. El *factor de pérdidas dieléctricas*  $tg(\delta)$  o *factor de disipación*, constituye un criterio para medir la pérdida de potencia por calentamiento de un dieléctrico.

Un material aislante sometido bajo la acción de un campo eléctrico, se lo puede graficar con el siguiente diagrama vectorial de pérdidas en dieléctricos:



*Figura 1.15 – Concepto de Ángulo de pérdidas de un dieléctrico*

Donde  $U$ , es el voltaje aplicado al dieléctrico;  $I$ , es la corriente de fuga que atraviesa el dieléctrico;  $\varphi$ , es el ángulo de factor de potencia y  $\delta$ , el ángulo de pérdidas dieléctricas.

El caso más favorable será aquel en que la potencia perdida a través del aislamiento sea nula, es decir, cuando  $\delta=0^\circ$ . Esta situación se da cuando la tensión y la corriente están desfasadas  $90^\circ$  ( $\varphi=90^\circ$ ) y sólo ocurriría si se tratara de un aislante perfecto (el vacío); lo cual en aplicación real no es posible, encontrándose siempre un desfase menor a  $90^\circ$ , tal como se observa en la figura 1.15. Por lo tanto, conociendo el valor del ángulo de pérdidas  $\delta$ , puede calcularse fácilmente el factor de pérdidas  $\text{tg}(\delta)$ . Considerando, que el ángulo ( $\delta$ ) varía con la temperatura, la tensión aplicada y otros factores, pero muy especialmente por la frecuencia.

*El factor de pérdidas dieléctricas de un material aislante, es una medida de la calidad del dieléctrico: cuanto más bajo fuera éste, más se aproxima de la condición de dieléctrico ideal y menores son las pérdidas. Por lo tanto, “Un material será tanto mejor aislante cuanto menor sea su factor de pérdidas”*

#### **1.4.1.5 Factor de Potencia**

El *factor de potencia*  $\cos(\varphi)$  de un dieléctrico se lo define como el coseno del ángulo de desfase entre la tensión aplicada al material aislante y la componente de la corriente que lo atraviesa (Ver figura 1.15). Muchas veces se utiliza este concepto en lugar del factor de pérdidas  $\text{tg}(\delta)$ , cuando se quiere expresar la calidad de un aislante.

Como se indicó anteriormente en el análisis del factor de pérdidas dieléctricas, el aislante ideal sería aquel que presente  $\varphi=90^\circ$ , y por consiguiente  $\cos(\varphi)=0$ , con lo que no habría circulación de corriente a través del aislante.

*Por lo tanto, “Un material es tanto mejor aislante, cuanto más bajo sea su factor de potencia”*

#### 1.4.1.6 Resistencia al arco

La *resistencia al arco* se mide por el tiempo que un material aislante es capaz de resistir los efectos destructivos de un arco antes de inutilizarse por haber formado éste un camino carbonizado, conductor, sobre la superficie del aislante. Este tiempo depende naturalmente, de la tensión aplicada y de la corriente de arco.

No todos los materiales aislantes se carbonizan pero si casi todos pueden agrietarse por el intenso calor que acompaña el arco. No obstante, algunos materiales resultan mejores que otros en lo que respecta a la resistencia de arco, ya que las condiciones en que éste se produce, varían considerablemente.

### 1.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

#### 1.4.2.1 Resistencia a la Tracción

La *resistencia a la tracción* es la propiedad de resistir esfuerzos mecánicos que tiendan a estirar o alargar un material aislante. El sistema de moldeo tiene una importante influencia en el valor de la resistencia a la tracción, así como la temperatura y la humedad.

#### 1.4.2.2 Resistencia a la Compresión

La *resistencia a la compresión* es la propiedad de resistir esfuerzos mecánicos que tiendan a comprimir o acortar un material aislante. Sus valores por lo general, son más elevados que los de resistencia a la tracción, o sea que se necesitará más esfuerzo para romper un dieléctrico por compresión que por tracción. Su valor suele expresarse en unidades de fuerza (Kg/cm<sup>2</sup>). La temperatura influye notablemente, disminuyendo con el aumento de esta.

#### 1.4.2.3 Resistencia a la Flexión

La *resistencia a la flexión* es la capacidad del material aislante para resistir esfuerzos que tiendan a doblarlo. De la misma forma que en las anteriores propiedades, está influenciada por la humedad y la temperatura.

#### 1.4.2.4 Dureza

La *dureza* se define como la resistencia que un material aislante opone a la penetración, por tanto, es una característica muy directamente relacionada con la resistencia a la compresión.

#### 1.4.2.5 Resistencia al choque

La *resistencia al choque* es la capacidad del material aislante para resistir el impacto de un choque o golpe.

#### 1.4.2.6 Límite Elástico

Se denomina *límite elástico*, al esfuerzo máximo que puede aplicarse al material aislante, sin que experimente deformaciones permanentes. Por debajo de este valor máximo aplicable, existen otros que también producen la deformación del material pero éste, una vez que cesa el esfuerzo, recupera su forma primitiva. A estas deformaciones se les llama *deformaciones elásticas*.

Cabe recordar que, todo material, por muy buenas que sean sus propiedades mecánicas, pueden resistir los esfuerzos ya nombrados anteriormente hasta cierto límite, por encima del cual el material se deforma, sin volver a recuperar su forma primitiva.

#### 1.4.2.7 Maquinabilidad

Se denomina *maquinabilidad* de un material aislante, a la facilidad con que éste puede ser mecanizado con herramientas cortantes. Algunos materiales aislantes presentan una extraordinaria facilidad para el mecanizado, mientras que otros son muy difíciles de trabajar.

### 1.4.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

#### 1.4.3.1 Peso Específico

El *peso específico* de un material aislante, es el peso de la unidad de volumen de dicho material. Este suele expresarse en gramos por centímetro cúbico ( $\text{gr/cm}^3$ ).

#### 1.4.3.2 Porosidad

La *porosidad* de un material aislante, es la propiedad que tienen todos los cuerpos de dejar espacios vacíos, o poros, entre sus moléculas, gracias a lo cual pueden ser comprimidos o dilatados y hacerse permeables a los gases y aún a los líquidos.

Esta constituye un gran inconveniente de la buena calidad de los dieléctricos, pues en los poros se acumula humedad y el polvo del ambiente en que se encuentran; o el mismo aire que los llena, bajo la acción del campo eléctrico, se ioniza, perdiendo sus propiedades aislantes y ocasionando su destrucción prematura.

#### 1.4.3.3 Higroscopicidad

Se denomina *higroscopicidad* o *poder higroscópico* a la capacidad de absorción de la humedad que tiene un material aislante. Esta constituye una

consecuencia directa de la propiedad anterior, ya que es en los poros donde se aloja el agua procedente de la humedad atmosférica o del ambiente húmedo en que se encuentra dicho material.

*En los dieléctricos, la humedad reduce considerablemente la rigidez dieléctrica y la resistencia de aislamiento. Por consiguiente y siempre que sea posible, se preferirán los aislantes de menos higroscopicidad. En algunas ocasiones, para reducir los efectos de la humedad, se reviste el material de una capa impermeable.*

#### **1.4.3.4 Calor Específico**

El *calor específico* de un material aislante, es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado centígrado, la temperatura de un gramo de dicho material.

*Un material aislante debe poseer el calor específico lo más elevado posible, con el objeto de que al estar sometido bajo la acción del calor, su elevación de temperatura sea pequeña.*

#### **1.4.3.5 Conductividad Térmica**

La *conductividad térmica*, es la facilidad que un material aislante presenta al paso del calor. Por lo tanto, cuanto menor sea la conductividad térmica de un dieléctrico, con mayor dificultad permitirá la transmisión del calor generado en el

conductor eléctrico por efecto Joule, a los cuerpos vecinos y al ambiente que le rodea.

#### **1.4.3.6 Inflamabilidad**

La *inflamabilidad*, es la facilidad que tiene un material aislante para inflamarse. Siempre que sea posible se ha de preferir el dieléctrico menos inflamable, el cual ofrecerá una mayor seguridad de funcionamiento al trabajar a altas temperaturas, o en lugares con peligro de incendios, chispas u otras eventualidades.

#### **1.4.3.7 Temperatura de Seguridad**

La *temperatura de seguridad*, es la capacidad de resistencia a la acción del calor o la temperatura límite a la que pueden ser sometidos los materiales aislantes sin que se produzca la degradación de sus características, que los conducirá a su destrucción.

*La elevación de temperatura de un material aislante sobre límite de seguridad, permite la alteración de sus características, disminuyendo su resistencia de aislamiento, su rigidez dieléctrica y su resistencia mecánica, además que aumenta su facilidad para ser atacados por agentes químicos.*

#### **1.4.3.8 Resistencia a los Ácidos y a los Álcalis**

Los materiales aislantes se descomponen por la acción de los ácidos fuertes y de los álcalis. Esta descomposición se manifiesta primero por un ablandamiento y a veces, por un aumento de volumen del material afectado, resultando notablemente disminuidas sus propiedades mecánicas y eléctricas.

## **CAPÍTULO II**

### **2. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES EN LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN INSTALADOS EN LAS SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

#### **2.1 FINALIDAD**

Permitir aislar eléctricamente las partes conductoras de un equipo de alta tensión entre sí y estas mismas respecto a tierra o la masa metálica que lo conforma, para modificar en gran proporción el campo eléctrico y mantener el flujo de corriente en sus propios canales.

#### **2.2 PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN INSTALADOS EN LAS SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

##### **2.2.1 TRANSFORMADOR DE POTENCIA**

Es un transformador con núcleo de hierro que tiene un arrollamiento primario conectado a la red de corriente alterna y uno o más arrollamientos secundarios que producen distintas tensiones alternas. Es decir, permite transformar el voltaje alterno del sistema de un nivel nominal a otro.

En las subestaciones de transmisión de nuestro sistema eléctrico, estos se presentan en esquema de autotransformador o transformador de múltiples devanados, como unidades trifásicas o tres unidades monofásicas formando un banco trifásico. Una muestra sobre este equipo y sus características se puede apreciar en las *figuras anexas 2.1.A, B*

## **2.2.2 TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN**

Son transformadores que transfieren valores de corriente, tensión, o fase primarios al circuito secundario, con la suficiente exactitud para permitir la conexión de instrumentos de protección y medida al secundario en lugar del primario.

Utilizado de esta forma, sólo tienen acceso a los instrumentos, magnitudes de corrientes o tensiones reducidas. Por tanto, según la magnitud en juego se clasifican en *Transformadores de Tensión* y *Transformadores de Corriente*.

### **2.2.2.1 Transformadores de Tensión (de Potencial)**

En este tipo de transformadores de instrumentación hay que destacar la existencia de dos diseños:

- 1) *El transformador de potencial normal*, cuyo arrollamiento primario toma directamente su tensión de alimentación del circuito de potencia al que se conecta en paralelo. Su tensión secundaria se utiliza exclusivamente para alimentar instrumentos de medición y reles de protección, empleando un voltaje estándar de 115 y  $115/\sqrt{3}$ . Se lo encuentra por lo general hasta tensiones nominales de 69kV.
  
- 2) *El transformador de potencial capacitivo*, cuyo arrollamiento primario toma su tensión de alimentación del circuito de potencia al que se conecta, a través de módulos de capacitancias en serie. A diferencia del anterior tipo detallado, aparte de utilizar su voltaje secundario para alimentar instrumentos de medición y reles de protección, su característica constructiva le permite acoplar equipos carrier de onda portadora para comunicaciones. Se lo encuentra por lo general para tensiones nominales mayores a 69kV.

Para ambos casos, el arrollamiento secundario en condiciones normales de uso, presenta una tensión de módulo prácticamente proporcional a la tensión primaria, que difiere en fase en un ángulo próximo a cero.

En las subestaciones de transmisión de nuestro sistema eléctrico, ambos equipos de alta tensión, se presentan normalmente en un diseño *tipo pedestal* ubicado sobre

una estructura metálica tipo celosía, tal como se muestra en las *figuras anexas 2.2.A, B*

#### **2.2.2.2 Transformador de Corriente**

Es un transformador con su arrollamiento primario conectado en serie con el circuito portador de la corriente que debe someterse a medida o control. La corriente se mide a través del arrollamiento secundario, por lo tanto presenta una corriente secundaria no mayor a 5 amperios, cuyo módulo es prácticamente proporcional a la corriente primaria y que difiere en fase en un ángulo próximo a cero.

Los hay de distintas formas constructivas para alta tensión, con núcleo en la parte inferior o con núcleo en la parte superior o cabezal. Esto difiere en la disposición del aislamiento dentro de él, lo cual se pondrá en detalle en el ítem 4.2 de esta unidad.

En las subestaciones de transmisión de nuestro sistema eléctrico, ambos modelos de este equipo en alta tensión, se presentan normalmente en un diseño *tipo pedestal* ubicado sobre una estructura metálica tipo celosía, tal como se muestran en las *figuras anexas 2.3.A, B*.

### 2.2.3 SECCIONADOR DE POTENCIA

El seccionador es un aparato mecánico de conexión que asegura, en posición abierta, una distancia de seccionamiento que satisface condiciones específicas. Es capaz de abrir y de cerrar un circuito cuando se establece o interrumpe una corriente de valor despreciable, o bien no se produce ningún cambio importante de la tensión entre los bornes de cada uno de los polos del seccionador.

Es también capaz de conducir corrientes en las condiciones normales del circuito, y de soportar corrientes por un tiempo especificado en condiciones anormales como las de cortocircuito.

Se los clasifica por el plano en que se mueven las cuchillas, vertical, horizontal, por la distancia de seccionamiento, también vertical u horizontal, por el número de columnas de aisladores que tienen por polo, dos o tres columnas, por la posición relativa de los polos, diagonal, paralelos, en fila india.

En las subestaciones de transmisión de nuestro sistema eléctrico, se presenta en conjunto de tres unidades monopolares que operan simultáneamente en un sistema trifásico bajo accionamiento manual y/o eléctrico, tal como se muestra en la *figura anexa 2.4*.

#### 2.2.4 INTERRUPTOR DE POTENCIA

El interruptor es un aparato de maniobra mecánico, capaz de establecer, conducir e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito; y también de establecer, conducir por un tiempo determinado, e interrumpir corrientes en determinadas condiciones anormales como las de cortocircuito

Este es el aparato que ha sufrido mayores evoluciones y cambios en sus principios de funcionamiento, casi podríamos decir que es como si hubiese habido modas (aunque la realidad fuera consecuencia frecuentemente de dificultad tecnológica). Citamos solo los medios de interrupción aceite y gas SF<sub>6</sub>, como los únicos presentes en interruptores instalados en las subestaciones de transmisión de nuestro sistema eléctrico actual, cuyos modelos se presentan en las *figuras anexas 2.5.A, B, C*.

#### 2.2.5 EQUIPO ENCAPSULADO

El *equipo encapsulado* o también conocido como “GIS” *Gas-Insulated Substation* (Subestación Aislada en Gas), es un sistema construido integralmente en el cual todos sus componentes tales como, interruptores, seccionadores, transformadores de tensión, transformadores de corriente, pararrayos y barras; son aislados del aire en compactos compartimentos de metal llenados con gas Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>). Estos componentes interactúan entre si formando un

esquema de barra similar al formado convencionalmente con componentes eléctricos independientes.

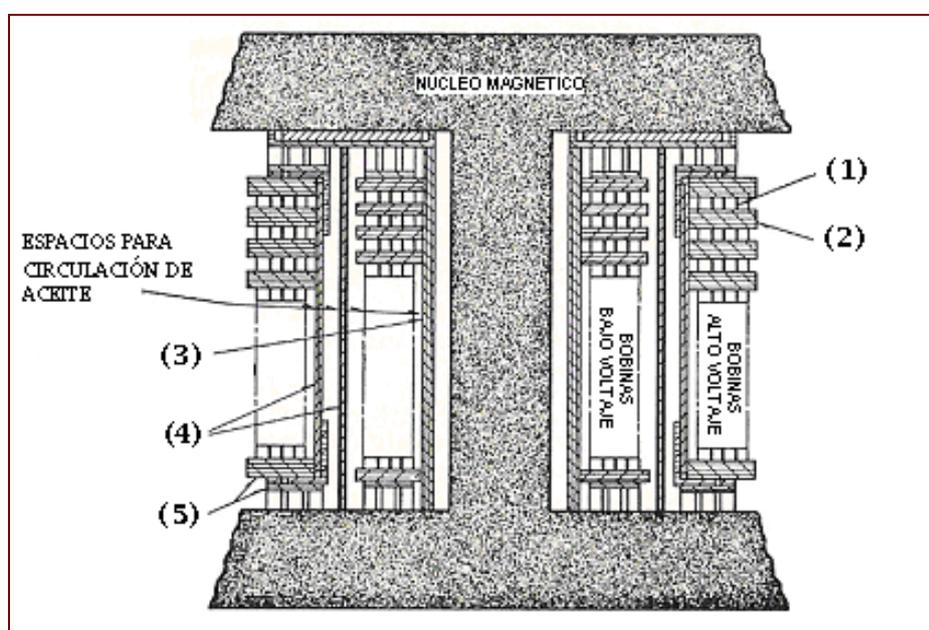
Por lo tanto, una subestación cuyos componentes eléctricos constituyentes (barras y equipos) trabajen independientemente al aire libre, se conoce como “Subestación Convencional”, y una subestación donde todos sus componentes se encuentren encapsulados y totalmente aislados del aire, se conoce como “Subestación Encapsulada”. Una muestra de este sistema encapsulado instalado en una de las subestaciones de nuestro sistema eléctrico, se presenta en la *figura anexa 2.6*.

## **2.3 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

### **2.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

El aislamiento de los transformadores de potencia es el más complejo de entre los equipos eléctricos existentes dentro de una subestación, esto es debido al rol que este debe cumplir como parte de un sistema eléctrico de potencia (requiere de alta confiabilidad), por lo que se hace necesario el empleo de distintos materiales aislantes en el diseño de su estructura de aislamiento.

En general, todos los transformadores de potencia deben cumplir la siguiente estructura de aislamiento: (1) aislamiento en los propios conductores entre espiras, (2) aislamiento entre capas o bobinas, (3) aislamiento entre el arrollamiento de bajo voltaje y tierra, (4) aislamiento entre el arrollamiento de alto voltaje y el arrollamiento de bajo voltaje, y (5) aislamiento entre el arrollamiento de alto voltaje y tierra. Estos varios tipos de aislamiento son ilustrados en la siguiente figura 2.1:



**Figura 2.1** – Sección de una fase de un transformador trifásico tipo núcleo inmerso en aceite mineral aislante, mostrando sus partes aisladas.

Esta estructura de aislamiento, se divide en *principal* y *secundaria*, por tanto, a continuación se exponen los diferentes materiales aislantes que conforman a cada una de ellas.

### 2.3.2 MATERIALES AISLANTES SÓLIDOS QUE FORMAN PARTE DEL AISLAMIENTO PRINCIPAL DEL TRANSFORMADOR

El aislamiento presente entre los arrollamientos de alto y bajo voltaje y, entre el arrollamiento de bajo voltaje con respecto a la masa, es considerado como el *aislamiento principal del transformador*, y debe poseer la suficiente resistencia dieléctrica y mecánica a los golpes.

El arrollamiento de bajo voltaje, que es el más cercano al núcleo, está enrollado alrededor de un cilindro de *micarta*, el cual le permite un aislamiento eficiente con respecto a masa.

El aislamiento entre arrollamientos de alto y bajo voltaje, consiste de tubos o cilindros sólidos aislantes limitadores de *cartón prensado “pressboard”*; entre los cuales existen espacios desnudos con el propósito de permitir la libre circulación del aceite dentro, alrededor del núcleo y la estructura de la bobina. La circulación del aceite por estos espacios permite mediante convección la remoción del calentamiento producido en el núcleo y las bobinas debido al efecto Joule y corrientes parásitas.

### 2.3.3 MATERIALES AISLANTES SÓLIDOS QUE FORMAN PARTE DEL AISLAMIENTO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR

El aislamiento de los conductores entre espiras, entre bobinas o capas y entre el arrollamiento de alto voltaje con respecto a la masa, es considerado como el *aislamiento secundario del transformador*.

Los conductores de las bobinas están aislados con varias capas de *papel Kraft o manila* especialmente delgadas envueltas sobre su superficie, con un espesor entre dos espiras consecutivas de unos 0,5mm para los arrollamientos de baja tensión y de 0,7 a 1,5mm para los de alta tensión. Esto le da una mayor rigidez mecánica y eléctrica.

El aislamiento entre bobinas o capas, lo constituye generalmente espaciadores en forma de anillos de *cartón prensado “pressboard”, presspan o baquelita*.

El aislamiento entre el arrollamiento de alto voltaje con respecto a masa, localizado en sus extremos, consiste de arandelas laminadas de *papel de base fenólica* y *cartón prensado “pressboard”*. En los modelos para alta tensión, se distribuyen varios anillos angulares cilíndricos con bridas, paralelos a las superficies de igual potencial; esta disposición provee un aislamiento efectivo y aumenta la distancia de escurrimiento eliminando las concentraciones locales de flujo dieléctrico en los extremos del devanado y evitando la formación de coronas de aceite. Esta última

característica ofrece una alta resistencia dieléctrica en un espacio comparativamente pequeño.

Se recomienda ver la *figura anexa 2.7*, donde se muestra en detalle la estructura de aislamiento tanto principal como secundario del transformador de potencia.

### **2.3.3.1 Soporte y Fijación de las partes interiores**

Las partes interiores del transformador, tales como, terminales y conductores superiores que salen de las bobinas; son aislados adecuadamente y asegurados firmemente a soportes, para resistir los esfuerzos mecánicos producidos por las corrientes de cortocircuito, golpes durante el transporte y otros factores.

Para tales propósitos, se proveen apoyos de *cartón comprimido* o *madera* sumergida en aceite perfectamente deshidratados o tubos de aislamiento de *micarta*. Estos apoyos o soportes se colocan a distancias de aislamiento apropiadas desde el núcleo, estructura de soporte y otros conductores, y además previniendo que ante la influencia de golpes mecánicos se aflojen, tuerzan o cambien de posición.

Una muestra de estas partes interiores aisladas, se presenta en las *figuras anexas 2.8 y 2.9.A, B, C, D, E, F*.

#### **2.3.4 LOS LÍQUIDOS AISLANTES Y SU IMPORTANCIA DENTRO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TOTAL DEL TRANSFORMADOR**

Los *líquidos aislantes* son ampliamente utilizados en los transformadores de potencia; esto se debe al hecho de que, además de la función básica de aislar los arrollamientos en su totalidad, actúan como medio refrigerante ayudando en la transferencia de calor originado por las pérdidas en las partes activas, para el medio ambiente. El *aceite mineral* y el *aceite sintético*, debido a sus excelentes propiedades, han sido los líquidos aislantes mayormente empleados para la inmersión de transformadores. No obstante, luego de que hace varios años, investigaciones comprobaran la existencia de efectos perjudiciales contra la salud humana y el medio ambiente durante el uso de los aceites sintéticos, en la actualidad se prohíbe su comercialización, dándose único lugar al aceite mineral.

#### **2.3.5 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ACEITE – PAPEL**

El papel Kraft impregnado con un buen aislante, limpio y seco como el aceite mineral, es uno de los mejores sistemas de aislamiento conocido por los fabricantes de transformadores, en cuanto a nuevos esquemas que están surgiendo en el mercado.

El aislamiento aceite-papel de un transformador se caracteriza porque la función aislante reside propiamente en el aceite, mientras que el papel, que es también de

por sí un excelente material aislante, desempeña en este caso, funciones básicas de otro género, tales como:

- a) Comportarse como un filtro que corta la acumulación de las partículas macroscópicas o impurezas, las cuales tienen tendencia a alinearse en cadena a lo largo de las líneas de fuerza. Estas formaciones alineadas son bien conocidas como causas de descargas en el aceite.
- b) Ser soporte de los esfuerzos mecánicos, especialmente en caso de cortos circuitos que lo someten a considerables solicitaciones. Considerando que, lo que limita en general la vida del transformador es la pérdida de resistencia mecánica del aislamiento.
- c) Separar los conductores manteniendo la distancia necesaria.

Cabe destacar que existe una diferencia importante entre el aceite y el papel aislante; el aceite del transformador es una comodidad renovable que mediante el *proceso de regeneración* es posible su restauración a condición de nuevo, mientras que el papel Kraft del transformador no es renovable, y su vida perdida como resultado de la negligencia para con esta parte del sistema de aislamiento, está perdida para siempre.

*Por tanto, se puede decir sin ninguna duda que “la vida del transformador es la vida del papel” y todo aquello que afectara la vida del papel afectará la vida del transformador.*

## **2.3.6 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES PARA SU USO EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

### **2.3.6.1 La Micarta**

Se da el nombre general de *mica* a un grupo de silicatos de aluminio, cuya característica común es que pueden exfoliarse en láminas flexibles, resistentes y extraordinariamente delgadas. Al ser la Micarta un material aislante a base de mica, consta esencialmente de estos tres componentes:

- 1) Como material básico se emplean las laminillas o escamas de mica pura, material que determina las propiedades dieléctricas y térmicas del producto resultante.
- 2) Las laminillas de mica se aglomeran con un producto orgánico y mineral como lo es la resina fenólica (o baquelita en polvo), para obtenerse placas o tubos rígidos. Se mejoran las propiedades mecánicas y térmicas del producto resultante.

- 3) Muchas veces, aunque no en todos los casos, se utilizan materiales aislantes como soporte de las escamas de mica, tales como papel, tela, cartón, tejido de vidrio y otros. Esto con el objetivo de mejorar aún más las propiedades mecánicas del producto final.

La mica pura por naturaleza es un aislante de clase C, es decir, que puede trabajar permanentemente a temperaturas superiores a 180°C; pero la adición del aglomerante de resina fenólica, el cual es de inferiores cualidades térmicas, hace que el producto final resulte de una clase térmica inferior, resultando un producto de clase B (temperatura de servicio hasta 130°C).

Las características técnicas de la micarta se exponen en la *tabla anexa 2.A1*.

### **2.3.6.2 La Madera**

La *madera* está constituida por celulosa, en una proporción de 40% a 60%, asociada a una sustancia dura, la lignina, que actúa como tejido de sostén. Además, las diferentes variedades de madera, contienen otras sustancias que determinan en muy buena parte sus propiedades, tales como: resinas, almidón, aceites, tanino, materias colorantes y otras. En la estructura de aislamiento del transformador se emplean maderas duras, tales como la de haya, el fresno, el arce, el nogal, el roble y la teca.

Para su empleo en los transformadores, es necesario secarla por varios meses, exponerla a una desecación en caliente en horno especial y finalmente someterla a tratamiento de cocido con el propio aceite del transformador; este último con el fin de mejorar las propiedades dieléctricas y eliminar en gran parte el contenido de humedad que pudiera tener.

Las características técnicas de la madera impregnada con aceite mineral se exponen en la *tabla anexa 2.B1*.

### **2.3.6.3 El Papel Aislante**

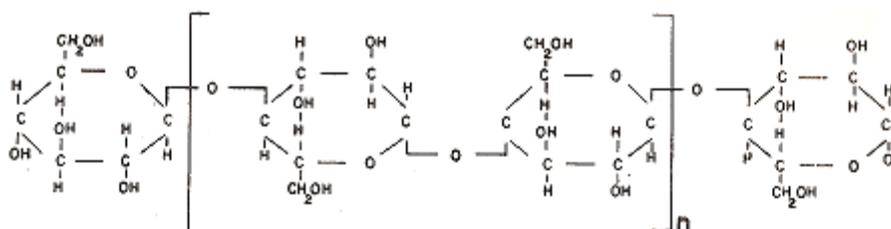
El papel aislante se fabrica con pulpa de madera, trapos o fibras vegetales. Las propiedades mecánicas del papel dependen en gran parte, de las fibras básicas empleadas en su fabricación.

En la actualidad, el papel que constituye el aislamiento sólido del transformador, es de naturaleza celulósica, es decir, proviene de la pulpa de madera. Su obtención, comienza de la separación de la celulosa de los soportes o productos que la acompañan, para posteriormente luego de su blanqueo sea transformada en papel.

El proceso de separación empleado distingue a dos tipos de celulosa, *la celulosa al sulfito* y *la celulosa al sulfato*; esto se debe a que cada proceso se realiza por

cocción de la madera en bisulfito o en sulfato sódico. Se halla muy extendido el criterio de que las celulosas al sulfato son las mejores para usos eléctricos.

La celulosa, que es el principal constituyente del papel, se presenta en forma de largas cadenas que son la repetición de un número más o menos grande de anillos de glucosa. La molécula de la celulosa es compleja y su fórmula general es  $(C_6H_{12}O_5)_n$ . Una cadena celulósica típica tiene la siguiente disposición:



Su estructura le permite ser fácilmente impregnado con un impregnante bien escogido que le confiera óptimas propiedades. El impregnante actualmente asociado al papel aislante, es el aceite mineral, con el cual se consiguen los siguientes resultados:

- ✓ Se llenan los poros del papel y se tiende a eliminar la humedad.
- ✓ Se aumenta la rigidez dieléctrica, ya que se elimina el aire ocluido en los poros, que es causa de los fenómenos de ionización.

- ✓ Se aumenta la resistencia térmica al calor del material básico.
- ✓ El llenado de los poros puede reducir la tendencia a la contracción.
- ✓ Se tiende a aumentar la conductividad térmica del papel, resultando de ello una mejor eliminación del calor.

Hay que recalcar, que el papel aislante utilizado en transformadores, después de seco, es impregnado de barniz o resina aislante y posteriormente de aceite. Su impregnación con barniz o resina no impide, más si retarda la penetración de agua.

El barniz, el cual contiene solventes volátiles, puede dar origen a la formación de cavidades en la masa aislante, en las cuales existe la posibilidad de que se formen descargas parciales. La impregnación del papel con resinas, las cuales no contienen solventes volátiles, dificulta la formación de cavidades. Por tanto, ésta última es la más recomendable.

El papel celulósico es considerado *anisótropo*, es decir, sus propiedades son distintas en sentido del largo, del ancho o del espesor. De todos modos, se consideran las siguientes propiedades:

- 1) Las propiedades dieléctricas dependen solo en parte de la naturaleza de la materia prima empleada. Pero, si se hallan afectados por el contenido de humedad, volumen de los poros y las impurezas.
- 2) La rigidez dieléctrica efectiva solo puede establecerse para los papeles finos, con los de mayor espesor aparecen descargas rampantes.
- 3) La constante dieléctrica para el papel acabado depende de la proporción de fibra, poros y humedad presente.
- 4) Las pérdidas dieléctricas y la resistencia de aislamiento varían con el grado de humedad.
- 5) Las propiedades mecánicas dependen de la estructura fibrosa y del contenido de humedad. Como el agua ablanda los papeles, puede disminuir su resistencia a la tracción.

El papel aislante de origen celulósico, comúnmente aplicado en la estructura de aislamiento de un transformador es el conocido papel Kraft, del cual se habla a continuación:

## **El Papel Kraft**

El *papel kraft*, se obtiene de la pulpa de madera por procesos químicos, que corresponden a la separación de la celulosa por disolución de las sustancias complementarias mediante el tratamiento con sulfato sódico. Tiene color tostado y puede impregnarse fácilmente.

La temperatura máxima del papel kraft neutro usado para aislamiento de los conductores del transformador, inmerso en aceite aislante, es de 55°C sobre la temperatura ambiente, sin que halla degradación de la celulosa.

El papel kraft es extremadamente poroso, se estima que contiene de 80% a 95% de aire, por tanto, absorbe cerca del 10% del volumen de aceite colocado en el transformador. Posee una gran afinidad por el agua, cerca de 600 a 800 veces mayor que el aceite aislante en el cual esta inmerso.

Existe una fórmula empírica, dada por los fabricantes, que permite determinar el peso aproximado del papel kraft empleado en un transformador, en base al valor de su potencia nominal; la cual esta dada de la siguiente forma:

$$\text{peso del papel (Kg)} = 0,136 \cdot (kVA) \quad (2.1)$$

Las características técnicas del papel kraft se exponen en la *tabla anexa 2.C1*.

### **El Papel de Base Fenólica (Fenolite)**

Es formado de conjuntos de láminas de papel kraft aglutinadas con resina fenólica, prensadas bajo condiciones específicas de presión y temperatura y, posteriormente curadas. Posee óptimas cualidades mecánicas y eléctricas, además de ser de fácil transformación. Es usado en cuerpos de anillos estáticos, en la estructura de conmutadores, en cuñas del núcleo y en algunos calces.

### **Los Papeles Especiales**

Existen papeles especiales, que son fabricados a base de algodón, partiendo de trapos, cáñamo, lino y gramíneas (esparto). Estos fueron durante mucho tiempo, los únicos en ofrecer propiedades satisfactorias para uso en la industria eléctrica, hasta que fueron sustituidos por el papel kraft.

Uno de estos papeles especiales, que en la actualidad se siguen usando dentro de la estructura de aislamiento de un transformador, es el *papel Manila* o llamado también *papel de hilo*; el cuál se fabrica a partir de la fibra de cáñamo de Manila, cuerdas viejas de abacá y desperdicios de su fabricación. Es un papel fino, muy blanco y de gran resistencia mecánica a pesar de su ligereza.

#### **2.3.6.4 El Cartón aislante**

El cartón aislante se fabrica con las mismas materias primas que el papel, pero la presión aplicada durante la fabricación es mayor. Es más grueso, menos flexible y, por lo general, más denso que el papel.

En su estado natural, es higroscópico y debe impregnarse con aceite, cera, barniz y otros compuestos para mejorar sus propiedades dieléctricas y preservarlo de la humedad.

Según los materiales básicos que lo constituyen, recibe diferentes denominaciones, siendo los aplicables en la estructura de aislamiento de los transformadores de potencia, los siguientes:

##### **1) Prespan**

Es fabricado con fibras de celulosa de alta calidad y está constituido por gran número de capas finas, prensadas fuertemente, cuyas caras están endurecidas y vidriadas. El espesor de estas hojas está comprendido entre 0,1 y 5 milímetros.

Su composición es preparada cuidadosamente; la cantidad de celulosa es bastante elevada y el resto está conformado por papeles viejos

convenientemente escogidos; contiene poca carga, esta medianamente encolado (para hacerlo menos absorbente), muy limpio, exento de cualquier traza metálica y es químicamente neutro.

Se utiliza convenientemente barnizado, para mejorar sus propiedades dieléctricas y ser protegido contra la humedad ambiente.

Este material estratificado es usado en la fabricación de la gran mayoría de los calces y estacas que se encuentran en el transformador, así como también: capas, barreras, canaletas, anillos y otros. Teniendo en cuenta que este material es sometido a intensos campos eléctricos en ciertas regiones del transformador, debe ser libre de impurezas, principalmente en los equipos de extra alta tensión.

Las características técnicas del *prespan* se exponen en la *tabla anexa 2.D1*.

## **2) Pressboard**

Es un cartón aislante que proviene de la fibra celulósica, ya que se encuentra elaborado de pulpa kraft de madera suave de bajo rendimiento o pulpa mecánica de madera dura de alto rendimiento; entre las cuales no existe mucha diferencia en propiedades.

Luego de su impregnación con aceite aislante, presenta una excelente rigidez dieléctrica (56 a 64 KV), constante dieléctrica (3.5 a 3.9), resistencia mecánica, conductividad térmica y bajo factor de disipación (0.28 a 0.6 %).

Existen también, pressboards de fibra sintética que son menos pesados y que toleran mayor temperatura de operación, en comparación con los provenientes de fibra celulósica; pero debido a su elevado costo, su uso se ve limitado. Actualmente, los fabricantes optan por la mezcla de ambos tipos de fibras para su elaboración, resultando un material algo ligero (por estar poco comprimido), que se pliega y moldea con gran facilidad.

#### **2.3.6.5 El Aceite Mineral**

El *aceite mineral* es obtenido a través de procesos de refinación y extracción adecuados a partir de determinadas fracciones de destilación del petróleo natural. Ignorando impurezas o aditivos especiales, son exclusivamente constituidos por *hidrocarburos*, sustancias consideradas como no polares y que de acuerdo con su origen, presentan estructuras moleculares diferentes.

Los *hidrocarburos* son la clase más sencilla de los compuestos orgánicos, los cuales son constituidos principalmente por *carbono e hidrógeno* y contienen otros elementos que se pueden considerar sus derivados. El aspecto estructural clave de los hidrocarburos, y por ello de la mayor parte de las sustancias orgánicas, es la

existencia de enlaces de carbono-carbono estables. El carbono es el único elemento capaz de formar cadenas extendidas estables de átomos enlazados mediante uniones sencillas, dobles o triples.

Los hidrocarburos se pueden dividir en cuatro tipos generales, dependiendo de las clases de enlaces carbono-carbono en su molécula; estos son: *alcanos*, *alquenos*, *alquinos* e *hidrocarburos aromáticos*. Dentro de los cuales se encuentran los que constituyen el aceite mineral para fines de aislamiento de equipos de alta tensión, tales como: hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos.

- Los ***hidrocarburos isoparafínicos*** son compuestos de la familia de los *alcanos* (*hidrocarburos saturados*) con fórmula general  $C_nH_{2n+2}$ , los cuales se caracterizan por contener enlaces sencillos y por tener el mayor número posible de átomos de hidrógeno por átomo de carbono. De acuerdo a la forma de enlazar sus átomos de carbono, estos toman el nombre de *hidrocarburos de cadena lineal* o de *hidrocarburos de cadena ramificada*. Tienen un bajo punto de fluidez, menor tendencia a la gasificación y son a la vez resistentes a la oxidación (debido a que los alcanos son poco reactivos). En la industria petrolífera son vulgarmente conocidos como *parafinas*.
- Los ***hidrocarburos nafténicos*** al igual que los hidrocarburos isoparafínicos son compuestos de la familia de los alcanos con fórmula general  $C_nH_{2n}$ .

Debido a la forma de enlazar sus átomos de carbono formando anillos o ciclos se los conoce con el nombre de *cicloalcanos*. Poseen características similares a los isoparafínicos, pero más estables a la oxidación, con menor tendencia a la formación de gases y carbones ante descargas eléctricas, con bajo punto de fluidez y un aceptable coeficiente de expansión. En la industria petrolífera son vulgarmente conocidos como *naftenos*.

- Los ***hidrocarburos aromáticos*** son compuestos muy particulares dentro de los hidrocarburos y al igual que los alquenos y alquinos toman el nombre de *hidrocarburos insaturados*, debido a que contienen menos hidrógeno que un alcano con el mismo número de átomos de carbono. Sus átomos de carbono están unidos en una estructura anular plana. Los aromáticos que forman parte del aceite aislante, presentan ramificaciones que los hacen algo estables a la oxidación.

En general se puede decir que los hidrocarburos aromáticos ramificados poseen las siguientes propiedades:

- ✓ Bajo coeficiente de expansión
- ✓ Baja estabilidad a la oxidación, pero con la ventaja de que forman compuestos químicos estables impidiendo subsiguientes reacciones de

oxidación, comportándose como INHIBIDORES NATURALES contra el proceso de acidificación del aceite, impidiendo la forma acelerada de lodos.

- ✓ Alto poder solvente de lacas y resinas

Su proporción en el aceite es de 4% a 8% para evitar que sus propiedades indeseables afecten notablemente el comportamiento adecuado del aceite aislante.

*No se encuentra en los aceites aislantes eléctricos, hidrocarburos alquenos ni alquinos ya que son productos indeseables debido a su actividad química relativamente elevada, lo cual aportaría con el envejecimiento del aceite.*

#### **2.3.6.5.1 El Aceite Mineral Parafínico y Nafténico**

Básicamente, existen dos tipos de aceites minerales, los *parafínicos* y los *nafténicos*, y estos son diferenciados por su cantidad relativa de compuestos parafínicos, nafténicos y aromáticos o por las influencias de estas composiciones en ciertas características de los productos.

La definición exacta del tipo de aceite sólo es posible a través del conocimiento del petróleo crudo de origen; de este modo, un aceite aislante es llamado de

parafínico, cuando proviene de petróleo parafínico y de nafténico, cuando proviene de petróleo nafténico.

Por un simple análisis es difícil concluir si un aceite es de tipo nafténico o parafínico. Las siguientes relaciones de composición son admitidas en una tentativa de identificación del tipo de aceite aislante:

<i>Tipo de aceite aislante</i>	<i>Compuestos aromáticos (%)</i>	<i>Compuestos nafténicos (%)</i>	<i>Compuestos parafínicos (%)</i>
<i>Nafténico</i>	<i>11</i>	<i>47</i>	<i>42</i>
<i>Parafínico</i>	<i>8</i>	<i>29</i>	<i>63</i>

*Tabla 2.1 – Composiciones de los aceites parafínicos y nafténicos*

En la práctica el aceite nafténico se lo conoce como “Tipo A”, y es empleado en equipos con tensión máxima superior a 34.5KV. De igual manera, el aceite parafínico se lo conoce como “Tipo B”, y es empleado en equipos con tensión máxima igual o inferior a 34.5KV. Cabe recalcar las siguientes diferencias entre ambos tipos de aceite:

- 1) *Precipitación de partículas de carbón:* En los aceites parafínicos, la precipitación de las partículas de carbón es lenta, mientras en los aceites nafténicos es rápida.
- 2) *Liberación de gases:* El aceite parafínico libera el gas hidrógeno, lo que es indeseable. Los aceites nafténicos absorben gas hidrógeno.

- 3) *Comportamiento en bajas temperaturas:* El aceite parafínico puede formar cera parafínica a 0°C, a no ser que sea muy bien descerado, y el aceite nafténico se comporta muy bien a -40°C.
- 4) *Punto de anilina y recuperación:* Los aceites parafínicos tienen un punto de anilina más elevado (de 79°C a 84°C) que los nafténicos (de 59°C a 82°C), por lo tanto su recuperación es más difícil.
- 5) *Formación de ácidos:* Los ácidos formados en los aceites parafínicos son más fuertes que los que se forman en el aceite nafténico.
- 6) *Viscosidad del aceite:* Con la disminución de la temperatura, la viscosidad del aceite aumenta. La adición de un modificador de flujo en el aceite parafínico mejora su escurrimiento.

*Debido a que sólo el 15% de las reservas mundiales conocidas de petróleo bruto poseen base nafténica, ya se ha estado llevando a cabo en diversos países, estudios y procesos para la obtención de aceites con base parafínica de mejores características, para que se permita su uso en equipos con mayores niveles de tensión, logrando así, la sustitución de los aceites de base nafténica.*

### 2.3.6.5.2 Propiedades del Aceite Mineral – Significado

**a) Punto de fulgor** - Es la menor temperatura en la cual se forman vapores inflamables en la superficie del aceite, y son identificados porque estos se inflaman por un pequeño intervalo de tiempo cuando están en contacto con una llama.

**b) Punto de inflamación** – Es la temperatura en la cual los vapores de un aceite se inflaman y continúan quemándose por más de cinco segundos. Esta debe ser un poco superior a la temperatura de punto de fulgor.

*Esta propiedad guarda relación con la viscosidad del aceite, por lo tanto, cuanto menos viscoso fuera éste, menor será su punto de inflamación y viceversa.*

**c) Punto de Combustión** – Es la temperatura en la que el aceite aislante se inflamará espontáneamente en contacto con el aire. Esta debe ser un poco superior a la temperatura de punto de inflamación.

**d) Punto de Congelación** - Es la temperatura en la que el aceite aislante se ha convertido en cuerpo sólido.

Un aceite aislante destinado para su uso en transformadores, deberá poseer un punto de congelación igual o mayor a una temperatura mínima de referencia de  $-15^{\circ}\text{C}$ ; valor que debe ser superior al punto de fluidez.

- e) **Punto de Fluidez** - Es la temperatura más baja en la cual el aceite, en condiciones perfectamente establecidas, escurre. Es decir, la temperatura a partir de la cual, la viscosidad de líquido solidificado, se hace sensible a un calentamiento progresivo.

*El aceite debe tener un punto de fluidez compatible con la temperatura del ambiente en que fuera instalado el transformador.*

- f) **Densidad** - Es la relación entre la masa de determinado volumen de aceite y la masa de igual volumen de agua pura en la temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ .

El rango de densidad relativa de un aceite aislante destinado para su uso en transformadores, se debe ubicar entre 0,7 y 1,050.

- g) **Viscosidad** - Es la resistencia que el aceite ofrece al escurrimiento continuo sin turbulencia, inercia u otras fuerzas. Su característica debe ser tal, que permita la circulación de aceite libremente por los radiadores o aletas de refrigeración del transformador.

*La viscosidad de los aceites depende fuertemente de la temperatura. Por lo tanto, la cantidad de calor que el aceite es capaz de transferir por hora, del transformador para el medio ambiente, depende de la viscosidad.*

- h) Punto de Anilina** – Es la temperatura en que hay la separación de anilina de una mezcla de anilina y aceite.

*El punto de anilina está de cierta forma, relacionado con la propiedad de disolver materiales con los cuales entra en contacto y con su contenido aromático.*

- i) Acidez (Número de Neutralización)** – Es el peso en miligramos de hidróxido de potasio *KOH* (base), que se requiere para neutralizar un gramo de aceite.

La acidez normalmente admitida en un aceite aislante destinado para su uso en transformadores, es de 1 a 2 moléculas de ácido para cada  $10^4$  moléculas de aceite. Es decir, el contenido de ácidos ha de ser tal que, el grado de acidez no sea superior a 0,05 mgKOH, necesarios para neutralizar  $1 \text{ cm}^3$  de aceite.

- j) Tensión Interfacial** – Es la fuerte atracción recíproca entre las moléculas de la superficie del aceite.
- k) Rigidez Dieléctrica** - Es una medida de capacidad de un aceite aislante de resistir la tensión eléctrica sin fallar, o sea, el valor de la tensión en la cual ocurre la ruptura dieléctrica del fluido.
- l) Factor de Potencia** – Es la relación entre las pérdidas dieléctricas del aceite y el producto de la tensión aplicada por la corriente de fuga que circula en el aceite.

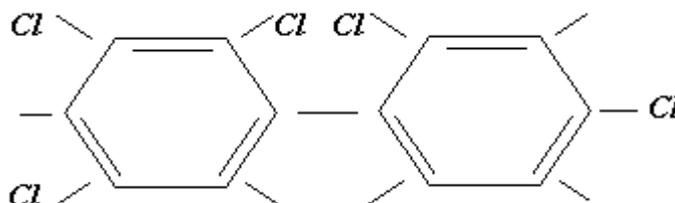
Estas pérdidas dieléctricas se deben a la diferencia de potencial que origina la circulación de una corriente de fuga en el interior del aceite aislante.

Las características técnicas para los aceites aislantes en sus dos clasificaciones (Aceites Tipo A y Tipo B), que permitan su aplicación adecuada en los transformadores de potencia, están establecidos por varias normas, tales como, las alemanas V.D.E, las americanas A.S.T.M y las brasileras N.B.R. Estas normas son aplicadas por los diversos fabricantes, por tanto, las propiedades de su producto deben cumplir con tales requerimientos; siendo para cada uno de ellos mejores que otro. Dentro de las marcas más conocidas en nuestro medio, se encuentra: TEXACO, REPSOL, GULF y SHELL.

En las *tablas anexas 2.E1 y 2.F1*, se presentan los requerimientos de las propiedades de los aceites aislantes según las normas más aplicadas.

### 2.3.6.6 El Aceite Sintético

El *aceite sintético* o también definido según la norma ASTM (D-2864)79 como *askarel*, es un líquido aislante desarrollado a base de hidrocarburos clorados. Su composición esta dada por una mezcla de bifenilos policlorados PCB's en una concentración de 40 a 70%, compuesto químico de cadena doble y cuya molécula tiene la siguiente formula estructural:



Su fórmula molecular es:  $C_{12}H_{(10-X)}Cl_{(X)}$ , (donde  $X > 2$ ). La molécula del PCB es formada por dos anillos bencénicos condensados, de los cuales dos o más átomos de hidrógenos son sustituidos por átomos de cloro.

PCB o Bifenilo Policlorado se refiere a un grupo de 209 isómeros obtenidos mediante la cloración de los bifenilos y se caracteriza por el contenido de clorina. De este grupo, sólo tres derivados han sido utilizados en transformadores y estos

corresponden a los números 1242, 1254 y 1260 (los primeros dos dígitos corresponden al número de átomos de carbono de la molécula y los otros dos corresponden al porcentaje de cloro en peso, de cada tipo).

### **Propiedades del Askarel**

El askarel es un aceite de color oscuro (similar al aceite quemado de un auto) que presenta una gran resistencia a la oxidación y a la sedimentación. La formación de ácidos y lodos es mucho menor que el aceite mineral, hasta 120° de temperatura permanente. El cloro está fuertemente combinado, de modo que a las temperaturas normales de trabajo no ataca a los metales.

En comparación con el aceite mineral, éste posee una constante dieléctrica aproximadamente el doble, una rigidez dieléctrica algo mayor, un factor de pérdidas algo más elevado y una mayor resistencia al fuego (prácticamente ininflamable).

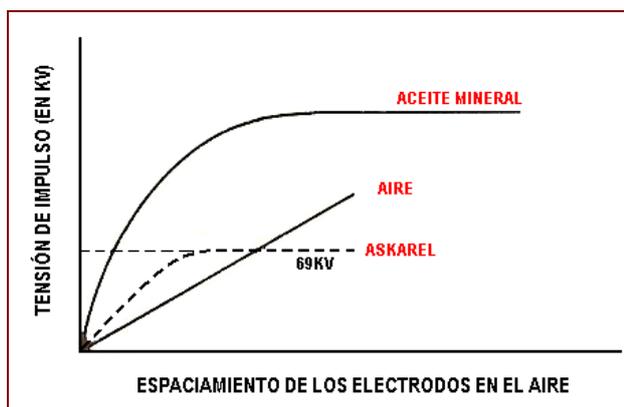
El aceite mineral se inflama cuando es descompuesto por el calor o por el arco eléctrico, ya que entre sus productos de descomposición está el hidrógeno que reacciona violentamente con el oxígeno atmosférico y esta reacción está acompañada de incendio y de explosión. Por tanto, la no inflamabilidad del askarel radica en que éste, ante la presencia del arco eléctrico, no genera hidrógeno libre y

en su lugar produce predominantemente gases de ácido clorhídrico (ClH) considerados no combustibles y gases combustibles en cantidades menores.

Para muchas aplicaciones la viscosidad y el punto de goteo de los diferentes bifenilos clorados PCB's puros, resultan ser demasiado altos, sobre todo si han de servir como medio refrigerante. En tal hecho se basa la composición del askarel por una mezcla de PCB's y una pequeña proporción de benceno clorado, éste último ayudando en la reducción de dichas propiedades. No obstante, en servicio, este líquido aislante experimenta un aumento de la viscosidad nada despreciable, siendo preciso controlar a menudo su fluidez y en caso necesario mejorarla con adiciones sucesivas de líquido nuevo.

Debido al mayor coeficiente de dilatación térmica del askarel, los depósitos de expansión de los transformadores han de ser mayor que cuando se trata de aceite mineral. Por esta y otras características, se podría decir que este equipo debe construirse especialmente para ser aislado con askarel.

El askarel a diferencia del aceite mineral, tiene características inferiores de resistencia a las tensiones de impulso (ver la figura 2.2). Por tal razón, éste líquido aislante ha sido utilizado en transformadores con tensión no mayor a 69kV y con potencia no mayor a 15 MVA.



*Figura 2.2 – Resistencia a la tensión de impulso de varios materiales aislantes*

Se ha comprobado que el askarel puede conservar sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva en el transformador, siendo innecesaria su regeneración en algunos de los casos.

Recibe distintos nombres comerciales, según los países y firmas fabricantes, podemos citar los siguientes: *Asbestol, Clophen, Clorextol, Inerteen, Diaclor, Dykanol, Pyranol, Pyralene y Santotherm.*

Las características técnicas del askarel se muestran en la *tabla anexa 2.G1.*

### **El askarel y la salud humana**

Estudios realizados han determinado que el askarel es perjudicial para la salud humana. Un miligramo de PCB en el ambiente por cada metro cúbico ( $1\text{mg}/\text{m}^3$ ) es suficiente para ocasionar cáncer; existiendo un aumento en su

frecuencia en trabajadores que normalmente se encuentran expuestos a este compuesto en sus sitios de trabajo.

Después del contacto indebido con este compuesto o la exposición a sus vapores, se producen irritaciones cutáneas o lesiones dermatológicas severas, manifestándose en forma de erupciones semejantes al acné. Adicionalmente, se produce una degeneración aguda hepática que se manifiesta en síntomas como: somnolencia, indigestión, náusea, ictericia, crecimiento del hígado y debilidad que progresa al coma. El daño hepático ocurre con cifras de exposición de 1 a 2 mg/m<sup>3</sup>.

Las personas que necesitan realizar trabajos con líquidos que contienen PCB's, deben tomar los siguientes cuidados:

- ✓ Evitar el contacto directo del líquido con la piel. Usar gafas de seguridad o protector facial, guantes a base de polietileno, botas o zapatos con suela sintética y ropa protectora (delantal no absorbente descartable)
- ✓ Evitar su manoseo a temperaturas elevadas, encima de los 60°C.
- ✓ Evitar respirar vapores que contengan PCB, especialmente los producidos por el arco eléctrico.

*Cabe recalcar, que el PCB es un tóxico bioacumulativo, es decir, se acumula en el organismo durante años y su efecto es lento.*

## **2.4 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN**

### **2.4.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

En el diseño de la estructura del aislamiento de los transformadores para instrumentación, se emplean materiales aislantes sólidos y líquidos, que en comparación con los transformadores de potencia, estos son similares pero en menores proporciones.

### **2.4.2 MATERIALES AISLANTES QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO TOTAL DE LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN**

Todos los elementos internos de los transformadores de instrumentación, los cuales son preliminarmente deshidratados y desgasificados, están contenidos dentro de una cámara aislante de *porcelana de alúmina* de alta calidad, fabricada por proceso húmedo, siendo homogénea y bien vitrificada, cuya característica la hace totalmente impermeable a la humedad.

El conjunto cámara de porcelana y tanque de acero del transformador es llenado totalmente de *aceite mineral aislante*, cuyas características y afinidad con otros aislantes sólidos como el papel y la madera, brindan un excepcional sistema de aislamiento al equipo.

El aislamiento principal, es decir entre los arrollamientos y las partes puestas a tierra, es hecho de varias capas de *papel Kraft* impregnado con un líquido aislante, cuyo número depende del nivel de aislamiento y el voltaje del sistema.

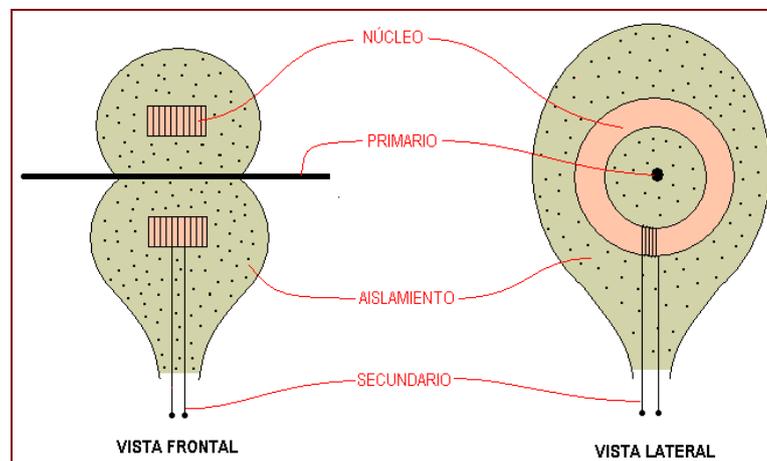
Como soporte y fijación de las partes interiores de los transformadores de instrumentación, se emplean apoyos de *madera*, que al encontrarse estos sumergidos en el aceite permiten mantener las distancias de aislamiento adecuadas entre las partes conductoras y la masa del equipo.

### **Influencia de la disposición física de la estructura de aislamiento en el diseño constructivo de los transformadores de corriente**

Los transformadores de corriente de alto voltaje y extra-alto voltaje son generalmente del tipo inmerso en aceite aislante. Los diferentes tipos de construcción de transformadores de corriente son dependientes de la forma de disposición del aislamiento entre el primario y el secundario. Por lo tanto, existen principalmente tres tipos básicos:

### 1) TIPO 1:

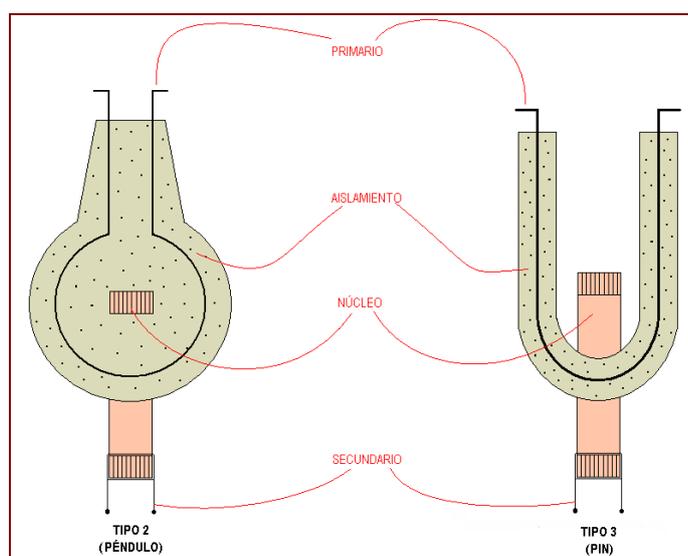
Todo el aislamiento es colocado sobre el secundario, que se localiza en la parte superior del aparato. El primario es una simple barra o bobinado repartido uniformemente, que pasa por el centro del núcleo tipo toroide, el cual contiene el bobinado secundario.



*Figura 2.3 – Transformador de corriente con aislamiento colocado sobre el secundario*

### 2) TIPO 2 Y 3:

En estos tipos de construcciones, el aislamiento es colocado sobre el primario, que tiene una forma de un péndulo (tipo 2) o de una “U” (tipo 3). El núcleo del secundario se ubica en la parte inferior.



**Figura 2.4** – Transformador de corriente con aislamiento colocado sobre el primario

Para extra-alta tensiones, se puede encontrar combinaciones de los dos tipos, con la mitad del aislamiento sobre el primario y la otra mitad sobre el secundario.

La diferencia fundamental entre los tipos 1 y los otros (2 y 3) está en el hecho de que el primero conserva la simetría uniforme para el enrollamiento primario, lo cual es muy importante. En la mayoría de los casos los transformadores de corriente contienen varios núcleos, cada uno con un enrollamiento secundario, pero el enrollamiento primario y el aislamiento son comunes.

Los materiales aislantes aplicados en los transformadores de corriente, dependen de su diseño, nivel de aislamiento y su capacidad; normalmente se los clasifica de la siguiente manera:

<b>TRANSFORMADORES DE CORRIENTE DE ALTA TENSIÓN</b>			
<b>MODELO</b>	<b>NIVEL DE AISLAMIENTO (KV)</b>	<b>CAPACIDAD (Amperios)</b>	<b>MATERIALES AISLANTES</b>
<i>Seco</i>	<i>34,5 a 145</i>	<i>2000</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Resina epoxidica</i></li> <li>• <i>Porcelana o resina cicloalifática</i></li> </ul>
<i>Inmerso en líquido aislante</i>	<i>Hasta 245</i>	<i>4000</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Papel</i></li> <li>• <i>Aceite Mineral</i></li> <li>• <i>Porcelana</i></li> </ul>

**Tabla 2.2** – *Materiales aislantes aplicados en los transformadores de corriente*

Una muestra real de la estructura constructiva de los diferentes tipos de transformadores de instrumentación, se pueden apreciar en las *figuras anexas 2.10.A, B, C*.

## **2.4.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES PARA SU USO EN LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN**

### **2.4.3.1 La Porcelana**

Por su composición, corresponden al grupo I de los materiales cerámicos, y sus materiales básicos son los siguientes:

- *El cuarzo u óxido de silicio*, que es un anhídrido silícico. Se trata de un material de gran dureza, que funde a 1720°C, siendo su punto de reblandecimiento 1500°C.

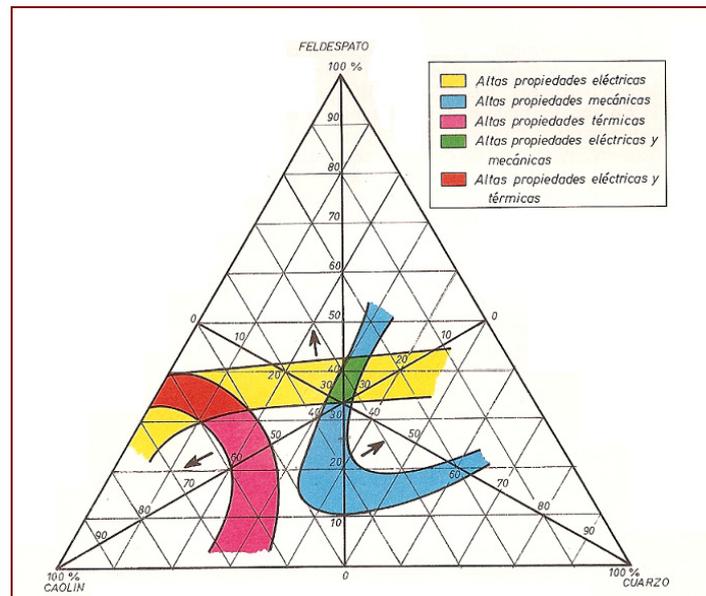
- *El caolín o tierra de porcelana*, que es un silicato de aluminio puro. Se trata de un material blanco ligeramente amarillento, muy blando y de tacto algo grasiento. Su peso específico es de 2.2 a 2.6 kg/cm<sup>3</sup>. Se reblandece sin fundir a 1880°C y absorbe fácilmente la humedad.
- *El feldespato*, nombre genérico de un grupo de minerales formadores de rocas, es un silicato anhídrido de aluminio, con potasio, sodio y calcio. El feldespato potásico es el más empleado en la fabricación de la porcelana, siendo éste un material duro y cuyo peso específico es de 2,6 Kg/cm<sup>3</sup>. Es más fusible, por lo que actúa como fundente y aglomerante de las partículas de caolín o cuarzo.

Los tres componentes básicos citados se mezclan bien y se amasan con agua, quitando las impurezas; esta agua se elimina después mediante filtros-prensa. Dejando la masa humedecida durante cierto tiempo se vuelve plástica; luego se espesa, amasándola y batiéndola. Antes de la cocción se le da la forma debida a la porcelana, mediante tres procedimientos distintos de moldeado: moldeo por prensado (preparación por vía seca), moldeo a torno (preparación por vía húmeda) y moldeo por colada (preparación por fundición).

Después de moldeadas, se secan las piezas y luego se cuecen, a una temperatura de unos 900°C (cocido en bruto) esmaltándolas después, por inmersión en un esmalte constituido de 79,1% de óxido silícico, 13,4% de óxido aluminico, 4% de óxido de calcio, 1,2% de óxido de magnesio y 1,4% de óxido de potasio. Finalmente se procede a la cocción definitiva hasta alcanzar una temperatura de 1400°C, por 24 horas.

*La capa vitrificada, casi siempre blanca o marrón, contribuye de una manera eficaz a mejorar las propiedades mecánicas a la vez que conserva las piezas limpias en servicio. Se considera que este aumenta de un 20 a un 40% las resistencias a la tracción y a la flexión, de la porcelana no esmaltada.*

La composición aproximada de la porcelana electrotécnica para usos generales es de 50% de caolín, 25% de cuarzo y 25% de feldespato. Esta porcelana considerada de composición básica tiene unas propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas de tipo medio. Si se requiere fabricar porcelanas especiales en las que predominen una o más de estas propiedades, deben modificarse las proporciones de los componentes básicos según la siguiente figura 2.5.



**Figura 2.5** – Influencia de la proporción de componentes básicos (feldespato, caolín y cuarzo) en las propiedades de la porcelana electrotécnica.

*El caolín mejora las cualidades térmicas de la porcelana, pero a costa de las propiedades mecánicas; la elevación del porcentaje de cuarzo, aumenta su resistencia mecánica, pero en detrimento de la resistencia térmica; y un aumento en el contenido de feldespato, mejorara sus propiedades dieléctricas.*

Las propiedades generales de la porcelana electrotécnica son:

- a) Gran resistencia mecánica a la compresión y a la flexión, y buena resistencia a la tracción y a la torsión.
- b) Impermeable al agua (casi antihigroscópica) y a los gases.

- c) No es atacable por los álcalis y ácidos concentrados, excepto el ácido fluorhídrico.
- d) Debido a su pequeño coeficiente de dilatación térmica, presenta una elevada temperatura máxima de servicio (del orden de los 1000°C) y excelente resistencia a las variaciones bruscas de temperatura.

Se debe tomar en cuenta que durante el tiempo el cual actúa el calor, la porcelana tiene una temperatura de reblandecimiento de 1500 a 1700°C según su composición; mientras que para el esmalte exterior esta es de unos 1000°C.

- e) Elevada rigidez dieléctrica, aproximadamente de 34 a 38 kV/mm.

Hasta aproximadamente unos 150°C, la rigidez dieléctrica es prácticamente independiente de la temperatura. Cuando la temperatura de servicio sobrepasa de los 70°C, la porcelana experimenta una gran disminución en su resistencia a la perforación eléctrica, independiente del tipo de corriente.

Las características técnicas de la porcelana se muestran en la *tabla anexa 2.H1*.

### **La Porcelana de Sílice y Alúmina**

La *porcelana de sílice* o porcelana de cuarzo, está compuesta de pequeñas cantidades de materiales crudos naturales, tales como: cuarzo, caolín y feldespato.

Esta posee todas las mejores características de la porcelana técnica, es decir, capacidad de aislamiento, estabilidad dimensional, dureza, resistencia térmica y resistencia a la corrosión.

Su exposición a las altas temperaturas y mucho tiempo al fuego, llevan a la reducción del cuarzo sólido contenido en el cuerpo de la cerámica, debido a la fusión de los granos de cuarzo. Esta reducción causa el decrecimiento de la resistencia mecánica de la porcelana.

Por lo tanto, cambios intensos de la temperatura de la pieza, pueden llevar al incremento de microfisuras ya existentes, causando la reducción de la fuerza mecánica.

La *porcelana de alúmina* se obtiene, cuando el contenido de cuarzo de la estructura normal de la porcelana, se reemplaza por óxido de *aluminio o alúmina* ( $Al_2O_3$ ). Esto lleva al aumento de su fuerza mecánica (relacionado al número más pequeño de microfisuras).

Durante el proceso de sinterización, son formados compuestos como la mullita y el corindón (mineral mas duro que se conoce después del diamante) y la porcelana es obtenida con alto contenido de la fase de vidrio que lleva a la no porosidad sin la fusión de los granos de óxido de aluminio (de este modo, altas temperaturas y largo tiempo de exposición al fuego no afectan la fuerza mecánica). Por lo tanto, las porcelanas de alúmina son insensibles a los cambios de temperatura y su resistencia mecánica es principalmente controlada por la cantidad de corindón.

*La porcelana de alúmina en comparación con la porcelana de sílice ofrece: rigidez dieléctrica reforzada, alta resistencia al choque térmico, alta resistencia mecánica, resistencia al envejecimiento y conductividad térmica.*

Las características técnicas de la porcelana de alúmina se muestran en la *tabla anexa 2.II*.

#### **2.4.3.2 El Papel Kraft**

Los requerimientos de propiedades del papel kraft para ser utilizado como aislamiento de los arrollamientos de un transformador de corriente o de potencial, son similares a los exigidos para fines de aislamiento de un transformador de potencia. Por lo tanto, sus características técnicas hacen igual referencia a la *tabla anexa 2.C1*.

### 2.4.3.3 El Aceite Mineral

Los requerimientos de propiedades para un aceite aislante a utilizarse en un transformador de instrumentación son similares a los de uno aplicado en transformadores de potencia, pero considerando lo siguiente:

- a) Debido a que el aceite contenido en este tipo de equipos, se encuentra prácticamente a la temperatura ambiente; se debe tomar en cuenta el clima del lugar donde este está destinado a instalarse, ya que si se tratare de lugares fríos, esto afectará notablemente a su viscosidad. Por lo tanto, se deberá considerar un valor máximo adecuado de dicha propiedad, que permita al aceite tener mayor fluidez aún en bajas temperaturas y garantice una buena evacuación del calor producido por las pérdidas.
- b) Al solicitarse un aceite más fluido por las razones ya explicadas anteriormente, menor será su punto congelación y su punto de inflamación.

La reducción del punto de congelación del aceite, permitirá que la formación de sólidos no se dé en condiciones normales de operación, pudiendo afectar a sus propiedades eléctricas (rigidez dieléctrica y el factor de pérdida). Pero, a la vez, la reducción del punto de inflamación del aceite pondrá en riesgo de inflamación al mismo, ante cualquier eventualidad.

## **2.5 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SECCIONADORES DE POTENCIA**

### **2.5.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

El aislamiento principal de los seccionadores de alta tensión radica sólo en las columnas aisladoras de sus polos, las mismas que actúan como ejes de las cuchillas seccionadoras y a la vez brindan una distancia de aislamiento necesaria con respecto a la estructura base soporte que se encuentra a potencial de tierra.

### **2.5.2 MATERIALES AISLANTES QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE UN SECCIONADOR DE POTENCIA**

Las columnas aisladoras de los polos de un seccionador, también conocidas como *aisladores de núcleo sólido*, son fabricadas de *porcelana de alúmina o porcelana de sílice*, siendo la primera la más utilizada.

Una de las principales características constructiva de un aislador de núcleo sólido, es la eliminación de cavidades y espacios de aire internos en la estructura de la porcelana, los cuales son responsables de las descargas parciales. Además, la perforación interna es eliminada y desvía las descargas eléctricas sobre la superficie del aislador.

Se recomienda ver la *figura anexa 2.11* donde se muestra físicamente el corte de un aislador de núcleo sólido.

## **2.5.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES PARA SU USO EN LOS SECCIONADORES DE POTENCIA**

### **2.5.3.1 La Porcelana de Alúmina**

Las propiedades de la porcelana de alúmina aplicada para la fabricación de las columnas aisladoras de los polos de un seccionador de potencia, son similares a las explicadas en el ítem 2.4.4.1.1 y sus características técnicas se exponen en la *tabla anexa 2.11*.

## **2.6 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA**

### **2.6.1 INTERRUPTORES A GRAN VOLUMEN DE ACEITE (TIPO GVO)**

#### **2.6.1.1 Consideraciones generales**

Este es el tipo más antiguo de los interruptores de potencia. Anteriormente consistía apenas de un recipiente metálico con los contactos simplemente inmersos

sólo en el aceite. En la actualidad, los interruptores GVO poseen cámaras de extinción donde se fuerza el flujo de aceite sobre el arco. En las potencias más bajas, las tres fases, normalmente, están inmersas en un único recipiente y en las más elevadas el encapsulamiento es monofásico, es decir, cada fase con su respectivo recipiente.

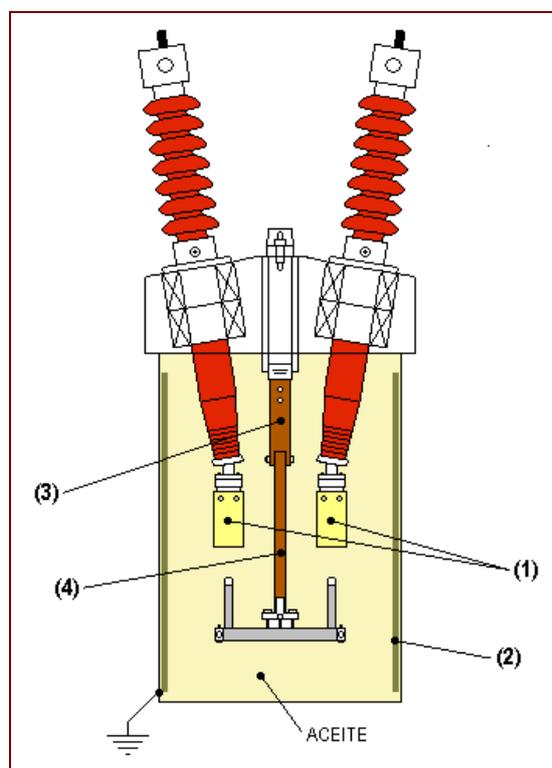
*Como en estos interruptores el tanque de aceite está aterrizado, son frecuentemente denominados “interruptores de tanque muerto”.*

#### **2.6.1.2 Materiales aislantes que conforman el sistema de aislamiento de este equipo**

El *aceite mineral* con sus destacadas características, fue el primer y único material aislante líquido utilizado como medio de extinción de los interruptores de potencia. Su aplicación en gran magnitud dentro de la estructura de estos equipos, permite denominarlo como su “aislamiento principal”, debiendo cumplir dos funciones primordiales:

- ✓ Actuar como aislamiento principal entre las partes internas vivas, y estas con respecto a la masa u otros elementos internos del interruptor que se encuentran a potencial de tierra.
  
- ✓ Actuar como medio eficaz de extinción del arco voltaico.

Adicionalmente, existen varios elementos de material aislante sólido que son parte de la fabricación de un interruptor de potencia tipo GVO, tales como: la cámara de extinción de arco (1), el revestimiento interno del tanque (2), el ensamblaje guía de la varilla de operación (3) y la varilla de operación de los contactos móviles (4). Estos, son ilustrados en la siguiente figura 2.6:



**Figura 2.6** – Vista en corte de una fase de un interruptor tipo GVO

- 1) **El tubo aislador (cámara de interrupción)** que encierra los contactos estacionarios y parte del ensamblaje de interrupción del arco, es un tubo de *papel laminado con resinas fenólicas* o *enrollado de filamento de vidrio*, y su función principal es la de reducir la duración del arco y la liberación de

energía del mismo, con el objetivo de disminuir la deterioración del aceite, la quema de los contactos y la elevación de la presión del gas.

- 2) ***El revestimiento interno del tanque*** es una película fina de material aislante resistente, que puede ser *papel o fibra procesada*, y su función principal es la de evitar que las partículas de conducción en el aceite, formen una trayectoria directa a tierra desde la parte más baja de los bushing's hacia el tanque sólidamente aterrizado.
- 3) ***El ensamblaje guía de la varilla de operación*** del tipo cruceta o tipo "V", al igual que la varilla de operación, es de *madera laminada con resinas fenólicas*, y su función principal es la mantener firme la dirección del movimiento de la varilla de operación.
- 4) ***La varilla de operación*** de los contactos móviles es fabricada de *madera laminada con resinas fenólicas*, y su función principal es la de abrir o cerrar el interruptor con un movimiento verticalmente hacia abajo o hacia arriba respectivamente.

El material aislante utilizado en la fabricación de esta varilla esta diseñado principalmente para resistir el voltaje de línea a tierra, que se produce cuando la cruceta metálica con contactos móviles se energiza al cerrar el interruptor y

además, resistir el esfuerzo mecánico generado por su rápida operación de apertura y cierre.

Se recomienda ver las *figuras anexas 2.12.A, B, C, D*, donde se muestra físicamente en detalle estas partes internas que conforman la estructura de aislamiento del interruptor de potencia inmerso en aceite mineral aislante.

### **2.6.1.3 Propiedades y características técnicas de los materiales aislantes para su uso en los interruptores tipo GVO**

#### **2.6.1.3.1 El Aceite Mineral**

El aceite usado en interruptores de potencia posee las mismas características y es intercambiable con el que es usado en transformadores. No obstante, en adición a las usuales funciones de aislamiento y disipación de calor, este ayuda en la interrupción del arco. Por tanto, las temperaturas de funcionamiento del aceite a utilizarse en un interruptor son diferentes y están directamente relacionadas con los siguientes datos de referencia:

<i>PUNTO DE INFLAMACIÓN (MÍNIMO)</i>	<i>180°C</i>
<i>PUNTO DE COMBUSTIÓN (MÍNIMO)</i>	<i>210°C</i>
<i>PUNTO DE CONGELACIÓN (MÍNIMO)</i>	<i>-5°C</i>
<i>PUNTO DE FLUIDEZ (MÍNIMO)</i>	<i>-10°C</i>

**Tabla 2.3** – Características relevantes de un aceite para interruptor de potencia

En vista de que sus características técnicas son casi similares a las de un aceite utilizado en un transformador, vale citar nuevamente la revisión de las *tablas anexas 2.EI y 2.FI*.

#### **2.6.1.3.2 Madera y papel laminados con resina fenólica**

Se comprenden bajo el nombre de *materiales laminados*, ciertas sustancias orgánicas de soporte (papel, tejidos, chapas de madera y otros), constituidas por un medio encolante endurecible (resinas artificiales).

En este caso, la madera y el papel se recubren o impregnan de la resina fenólica en cuestión y se prensan a cierta temperatura (bajo presión de 70 a 150 atmósferas), en sentido perpendicular a las capas, para obtener el producto resultante semifabricado, conocidos como papel y contrachapeado baquelizados.

Las resinas fenólicas o fenoplásticos, son resinas sintéticas compuestas de fenoles (cresoles) y formaldehídos. La Tensión disruptiva del material resultante es tanto mayor cuanto menor sea el contenido de resina.

Las propiedades más importantes de estos materiales laminados se resumen en la *tabla anexa 2.JI*.

### 2.6.1.3.3 Fibra procesada

La fibra procesada se la obtiene tratando papel de trazo de algodón con cloruro de zinc, lo que hace que el papel se gelatinice en parte. El papel tratado se pasa sobre un cilindro calentado, donde se lamina al espesor deseado. La masa homogénea así obtenida se lava con agua hasta que se extrae totalmente el cloruro de zinc y otras sustancias que pudieran ser contenidas. La fibra así purificada, se seca, se prensa y se satina quedando en disposición de ser utilizada.

Absorbe hasta un 60% de agua cuando se la sumerge en este líquido durante cierto tiempo y puede aumentar su volumen. Los disolventes orgánicos y los aceites no tienen acción sobre la fibra pero es atacada por los ácidos fuertes.

La fibra procesada tiene de por sí, de 5 a 6% de humedad natural y del 40 a 60% de humedad relativa, que decrece cuando la humedad ambiental es reducida y aumenta en caso contrario. Su temperatura máxima de seguridad es de unos 150°C.

Tiene gran resistencia mecánica, buena flexibilidad y buena rigidez dieléctrica. Normalmente se la encuentra en colores gris, negro, rojo y blanco, siendo pocas las diferencias de propiedades entre muestras de colores diferentes.

Las características técnicas de este material aislante se exponen en la *tabla anexa 2.K1*.

## **2.6.2 INTERRUPTORES A GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF<sub>6</sub>**

### **2.6.2.1 Consideraciones Generales**

Los interruptores de potencia a SF<sub>6</sub> representan sin duda alguna, la tendencia actual en las áreas de alta y extra alta tensión. Las excelentes características del gas hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>, han permitido sustituir en gran parte el uso de otros medios aislantes como el aceite mineral, el aire y el vacío en los interruptores de potencia; resultando en la disminución de las dimensiones del equipo, su fácil ensamblaje durante el montaje y la reducción de los periodos de mantenimiento.

Normalmente, estos interruptores son disponibles en tres polos individuales y su mecanismo de operación puede ser del tipo mecánico, hidráulico ó de resorte operado.

*Como en estos interruptores, su cámara de interrupción puede o no estar aterrizada, son frecuentemente denominados “interruptores de tanque muerto o tanque vivo”.*

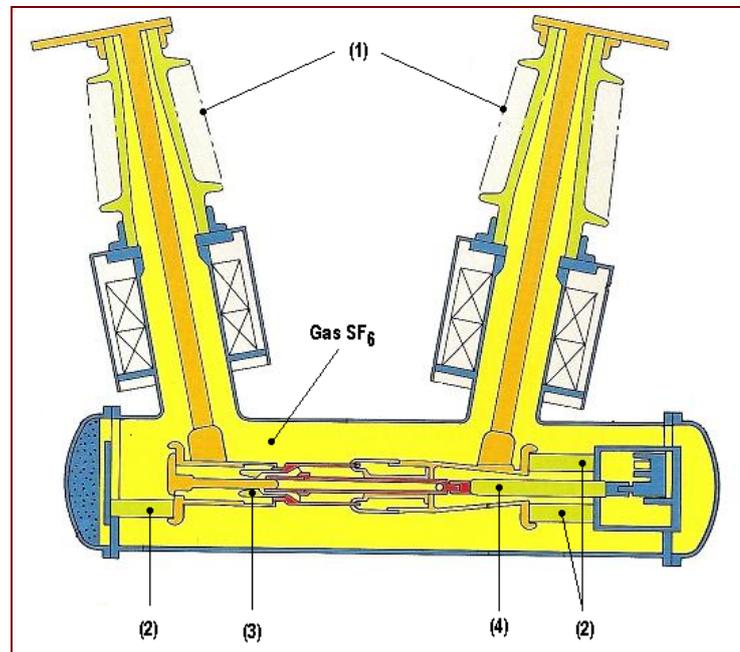
### **2.6.2.2 La importancia en la aplicación del gas Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>) como parte del sistema de aislamiento de este equipo**

Este tipo de interruptor emplea como aislamiento principal el gas *Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>)*, habiéndose comprobado que es el único que posee reunidas las propiedades físicas, químicas y eléctricas, favorables para la extinción de los arcos eléctricos formados durante las conexiones y desconexiones. Por lo tanto, al igual que el aceite aislante, cumple dos funciones importantes dentro de los interruptores de potencia:

- 1) Ser un medio eficaz de extinción del arco eléctrico formado durante el cierre y/o apertura del interruptor de potencia.
- 2) Aislar completamente las partes internas vivas del interruptor con respecto a la masa del equipo sólidamente aterrizada.

### **2.6.2.3 Materiales aislantes sólidos que conforman el sistema de aislamiento de un interruptor a gas SF<sub>6</sub> tipo Tanque Muerto**

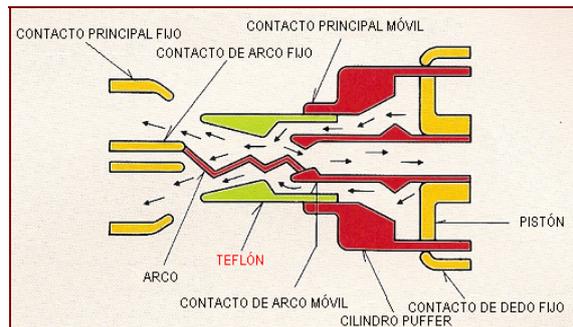
Los interruptores en SF<sub>6</sub> de tipo tanque muerto involucran dentro de su construcción el uso de varias partes de material aislante sólido, como son: los manguitos (1), los soportes de la cámara de interrupción (2), las toberas del contacto móvil de la cámara de interrupción (3) y la varilla de operación (4).



**Figura 2.7** – Vista en corte de un Interruptor a gas SF<sub>6</sub> tipo tanque muerto, señalando sus partes aislantes

- 1) **Los manguitos** son de *porcelana de alúmina* e internamente llenos con el gas SF<sub>6</sub> del propio equipo. Su función principal es aislar completamente a los tubos conductores de alimentación, además de brindar una distancia segura de aislamiento entre los terminales de alimentación y la masa del equipo sólidamente aterrizada.
  
- 2) **Los aisladores de soporte** son construidos de *fibra de vidrio*, y su función principal es mantener fija la cámara de interrupción y brindar la distancia de aislamiento necesaria entre esta y el tanque del interruptor sólidamente aterrizado.

- 3) **Las toberas de contactos móviles** son construidas de *teflón*, y su función principal es la de encerrar el arco y no permitir que este entre en contacto con otro material, mientras el gas SF<sub>6</sub> expulsado por el pistón se concentra en esta área y lo extingue eficientemente.



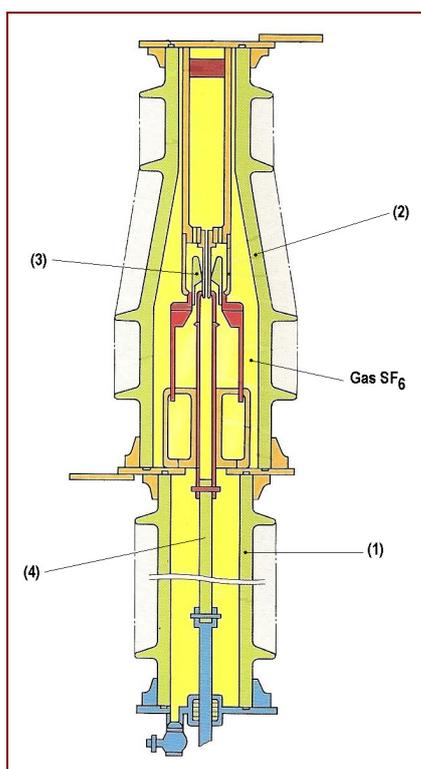
**Figura 2.8** – Parte interruptora de un interruptor de potencia

- 4) **La varilla de operación** al igual que los aisladores soportes de la cámara de interrupción, es de *fibra de vidrio*, y su función principal es la de realizar el movimiento del cilindro propulsor, ya sea para la operación de apertura o cierre del interruptor.

#### 2.6.2.4 Materiales aislantes sólidos que conforman el sistema de aislamiento de un interruptor a gas SF<sub>6</sub> tipo Tanque Vivo

Los interruptores a SF<sub>6</sub> de tipo tanque vivo involucran dentro de su construcción el uso de varias partes de material aislante sólido, como son: la

columna de aislador soporte (1), la columna de aislador de la cámara de interrupción (2), la tobera de contactos móviles (3) y la varilla de operación (4).



**Figura 2.9** – Vista en corte de un Interruptor a gas  $SF_6$  tipo tanque vivo, señalando sus partes aislantes

- 1) **La columna de aislador soporte** es de *porcelana de alúmina* e internamente llena con gas  $SF_6$ . Su función principal es la de crear una distancia segura de aislamiento entre el terminal inferior y la estructura metálica del equipo.
- 2) **La columna con cámara de interrupción** es de *porcelana de alúmina* e internamente llena con gas  $SF_6$ , y su función principal es la de mantener herméticamente el mecanismo de interrupción.

- 3) *Las toberas de contactos móviles* son construidas de *teflón*, y su función principal es la de encerrar el arco y no permitir que este entre en contacto con otro material, mientras el gas SF<sub>6</sub> expulsado por el pistón se concentra en esta área y lo extingue eficientemente.
  
- 4) *La varilla de operación* es construida de *fibra de vidrio*, que debido a su buena resistencia mecánica y rigidez dieléctrica, y al encontrarse unida al mecanismo de palanca, permite operar el cilindro propulsor para la apertura o cierre del interruptor mediante movimientos verticales hacia arriba o hacia abajo.

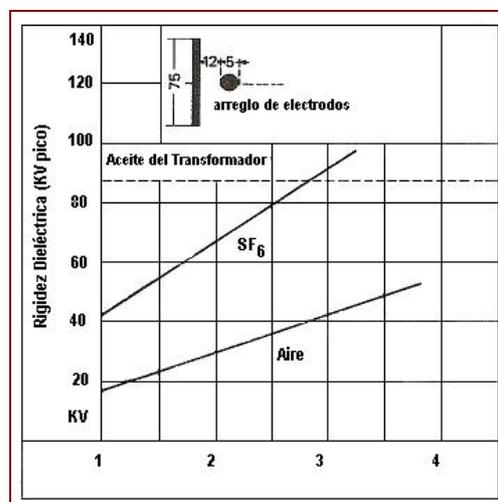
### **2.6.2.5 Propiedades y Características técnicas de los materiales aislantes para su uso en los interruptores a gas SF<sub>6</sub>**

#### **2.6.2.5.1 El gas SF<sub>6</sub>**

El gas SF<sub>6</sub> es un gas incombustible, no venenoso, incoloro, inodoro y debido a su estructura molecular simétrica es extremadamente estable e inerte, hasta cerca de 500°C, comportándose como un gas noble. Con un peso específico de 6,14 g/l, él es 5 veces más pesado que el aire, por tanto, a 20°C y a la presión atmosférica, su densidad es cinco veces mayor que la del aire.

A la presión atmosférica, su coeficiente de transmisión del calor es 1,6 veces mayor que el del aire y, a una presión de  $2\text{kg/cm}^2$ , este coeficiente es, aproximadamente 25 veces el del aire a presión atmosférica. Esta propiedad, facilita una rápida disipación del calor y de esta forma, se reduce el aumento de temperatura global en el equipo.

Las características aislantes del  $\text{SF}_6$  varían en función de la presión (en la realidad en función de la densidad) y son bastante superiores a aquellas de los medios aislantes más comunes usados en interruptores, tales como aceite mineral y aire comprimido. La siguiente figura muestra una comparación entre estos medios aislantes:



**Figura 2.10** – Comparación de la rigidez dieléctrica entre el  $\text{SF}_6$ , aceite y aire

El gas SF<sub>6</sub> es uno de los gases más electronegativos que existen, es decir, que sus moléculas tienen gran afinidad para los electrones libres, con los cuales se combinan para formar hexafluoruro de azufre cargado negativamente, junto con iones de pentafluoruro de azufre cargado positivamente. Como estos iones son pesados y, por consiguiente, prácticamente inmóviles, no actúan como portadores de corriente. Esta característica del SF<sub>6</sub> es la que le proporciona sus excelentes propiedades dieléctricas y su gran poder de extinción del arco.

Las características técnicas de este material aislante se exponen en la *tabla anexa 2.II*.

#### **2.6.2.5.2 La Porcelana de Alúmina**

Las propiedades de la porcelana de alúmina aplicada para la fabricación de los manguitos o las columnas aisladoras de los interruptores de potencia, son similares a las explicadas en el ítem 2.4.4.1.1 y sus características técnicas se exponen en la *tabla anexa 2.II*.

#### **2.6.2.5.3 El Teflón**

El teflón o politetrafluoretileno es un material termoplástico de excepcionales propiedades físicas, mecánicas y eléctricas.

Es traslúcido, blanco o grisáceo, inalterable a los agentes atmosféricos, nula absorción de humedad, presenta gran resistencia al envejecimiento por oxidación, especialmente a altas temperaturas.

En funcionamiento permanente abarca una gama de temperaturas comprendida entre  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $+325^{\circ}\text{C}$ , sin perder ninguna de sus propiedades. Se descompone a una temperatura de 450 a  $500^{\circ}\text{C}$ . No arde pero se pone incandescente. Por estas razones importantes se resume su aplicación como paredes que encierran el arco producido dentro de la cámara de interrupción.

Presenta excelentes propiedades eléctricas, incluso a altas temperaturas y frecuencias. No la atacan los ácidos ni los disolventes, ni siquiera las temperaturas elevadas; en cambio, si pueden atacarlo los álcalis concentrados.

Las propiedades mecánicas se ven afectadas por el grado de cristalinidad de su estructura. Las cargas mejoran su dureza y su resistencia a la compresión, pero perjudican sus propiedades eléctricas.

Las características técnicas de este material aislante se exponen en la *tabla anexa 2.M1*.

#### **2.6.2.5.4 Material estratificado a base de fibra de vidrio**

La fibra de vidrio corresponde al vidrio estirado en finos filamentos aplicados en forma de hilado, para lo cual, se emplea un vidrio especial, libre de sustancias alcalinas e insoluble en el agua.

Se producen dos tipos de fibras: fibras en hebras y fibras continuas. Ambas se diferencian de su longitud y sus diámetros están comprendidos entre 0,0050 y 0,0075 mm.

Su resistencia a la tracción y a la compresión es muy elevada y superior a la de otras fibras textiles. Por el contrario su resistencia al rozamiento debe ser reforzada con la aplicación de barnices especiales.

Es ininflamable y de una extraordinaria resistencia al calor y su temperatura máxima de servicio está únicamente limitada por los productos de impregnación utilizados. No es higroscópica y resiste perfectamente a la humedad, a la corrosión, a los ácidos y a los aceites; únicamente es atacada por el ácido fluorhídrico y, en mucho menor grado, por los álcalis concentrados.

La fibra de vidrio es muy estable químicamente y sus propiedades mecánicas apenas sufren alteración hasta temperaturas de 500°C. Sus propiedades

dieléctricas son excelentes, ya que su resistencia de aislamiento es más elevada que la de cualquier aislante textil.

Los materiales estratificados a base de fibra de vidrio, son caracterizados por estar constituidos de láminas superpuestas del material base o soporte, y de una resina que lo impregna, la cual actúa como aglutinante entre cada estrato o lámina, consiguiéndose una perfecta unión bajo presión y temperatura.

La clase térmica del material estratificado depende del material utilizado como aglutinante o aglomerante. Empleando como aglutinante una resina del tipo de fenol-formor, melamina-formol o epóxidos, se obtiene un material de clase térmica B (120°C).

*Para aplicaciones de alta tensión donde haya que soportar importantes esfuerzos mecánicos (como es el caso de la varilla de operación de los interruptores en SF<sub>6</sub>), los materiales estratificados a base de fibra de vidrio que utilizan resinas epoxídicas como aglutinante, son los indicados.*

Estos tienen una elevada resistencia mecánica, un reducido coeficiente de absorción de agua, excelente conductividad térmica, gran resistencia a la humedad y a los agentes atmosféricos, buenas propiedades dieléctricas y factor de pérdidas reducido.

## **2.7 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS EQUIPOS ENCAPSULADOS**

### **2.7.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

La construcción de subestaciones encapsuladas es una nueva tendencia de los equipos de alta tensión, luego de muchos años de estudio sobre la aplicación del gas Hexafluoruro de Azufre ( $SF_6$ ) como un aislante y medio interruptor.

### **2.7.2 MATERIALES AISLANTES QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE UN EQUIPO ENCAPSULADO**

El *gas hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ )* es utilizado como el aislamiento principal de la totalidad del equipo encapsulado, encontrándose a presión dentro de cada uno de sus compartimentos.

El uso de este gas dentro del equipo encapsulado permite aislar eficientemente las partes conductoras y brindar una absoluta no-inflamabilidad durante la interrupción de un arco (este en el compartimento del interruptor).

Las barras conductoras y demás partes vivas del equipo GIS son soportadas por aisladores de *resina epoxídica moldeada* fijados a la cubierta metálica, cuya resistencia dieléctrica al voltaje del equipo entre fases y entre estas con respecto a

tierra, permite brindar una buena distancia de aislamiento, incluso cuando la presión de gas SF<sub>6</sub> haya disminuido y se encuentre cerca de la presión atmosférica.

De igual forma, las barreras aislantes de los compartimentos son de *resina epoxídica moldeada*. Estas barreras aislantes permiten aislar en diferentes compartimientos a las barras, interruptores, seccionadores (de línea, selectores de barra y de aterrizamiento) y transformadores de voltaje, para facilitar al mantenimiento de cualquiera de estos sin necesidad de afectar al resto de componentes del equipo encapsulado.

La disposición de estas partes aislantes, dentro de la estructura constructiva de un equipo encapsulado, se presenta en las *figuras anexas 2.13 y 2.14.A, B, C, D, E, F*.

## **2.7.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES PARA SU USO EN LOS EQUIPOS ENCAPSULADOS**

### **2.7.3.1 El gas SF<sub>6</sub>**

Las propiedades del gas SF<sub>6</sub> aplicado como aislamiento principal de los equipos encapsulados, son similares a las explicadas en el ítem 2.6.2.5.1 y sus características técnicas se exponen en la *tabla anexa 2.L1*.

### 2.7.3.2 Resinas Epoxídicas

Las resinas epoxídicas o resinas epóxi, se conocen también con el nombre de resinas etoxilínicas. Se presentan como líquidos viscosos o en forma sólida.

Las materias básicas que intervienen en su fabricación son los difenilolpropano y epiclorhidrina. Según las cantidades relativas de los dos constituyentes y las condiciones en que se efectúan las relaciones se obtienen las resinas líquidas, viscosas o sólidas.

Las propiedades típicas de estas resinas solamente se obtienen por reticulación de las moléculas epoxídicas bifuncionales (polímero obtenido de la mezcla de las sustancias básicas) con agentes endurecedores de carácter alcalino o carácter ácido.

Las resinas epoxídicas son materiales termoplásticos que por un mecanismo químico de endurecimiento, se transforma en un cuerpo duro que no es plástico, es decir en un material termoestable. Se caracterizan por las siguientes propiedades:

- a) Se prestan a diversas aplicaciones y pueden utilizarse para revestir, impregnar, pegar y barnizar.

- b) Su empleo se da a la temperatura ambiente o a una temperatura algo más elevada.
- c) Permite recubrir pantallas metálicas, partes activas de equipos eléctricos y piezas de conexión, manteniéndolas sólidamente en su posición.
- d) Cuando están endurecidas se adhieren bien a casi todos los cuerpos.

Se distinguen dos grupos de resinas epoxídicas: *las resinas epoxídicas duras* y *las resinas epoxídicas cargadas (moldeadas)*.

*Las resinas epoxídicas duras* son las que proceden naturalmente de la reacción referida entre el difenilolpropano y la epíclorhidrina. Sus características técnicas se exponen en la *tabla anexa 2.N1*.

*Las resinas epoxídicas cargadas* presentan la ventaja de que sus propiedades pueden modificarse grandemente por la adición de toda clase de cargas, siendo las más corrientes los materiales de granulometría determinada, tales como: harina de cuarzo, polvo de cuarzo, harina de esteatita, calcita, óxido de calcio y otros.

En la *tabla anexa 2.01* se expresan las características técnicas de las resinas epoxídicas con diferentes cargas, considerando una composición básica de 100 partes en peso de resina pura, 70 partes en peso de endurecedor, 0,5 partes en peso de acelerador y 250 partes en peso de carga.

## **2.8 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS BUSHING'S COMO ELEMENTO PRINCIPAL DE LOS EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN**

### **2.8.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

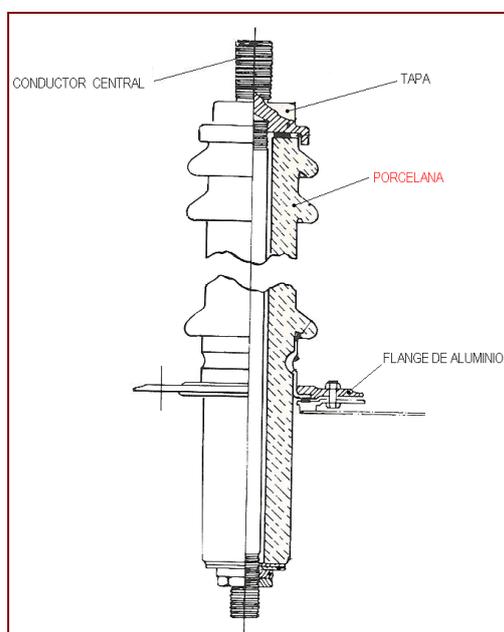
La función primaria del bushing es proveer una entrada aislada para un conductor energizado que entra a un tanque o cámara de un equipo de alta tensión; siendo normalmente utilizados en interruptores tipo GVO y transformadores de potencia. Son constructivamente diferenciados en función de su aplicación, siendo la tensión y la corriente, factores dominantes en su determinación.

Constructivamente estos se pueden clasificar en dos tipos: bushing's con aislamiento capacitivo y no capacitivo.

## 2.8.2 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS BUSHING'S NO CAPACITIVOS

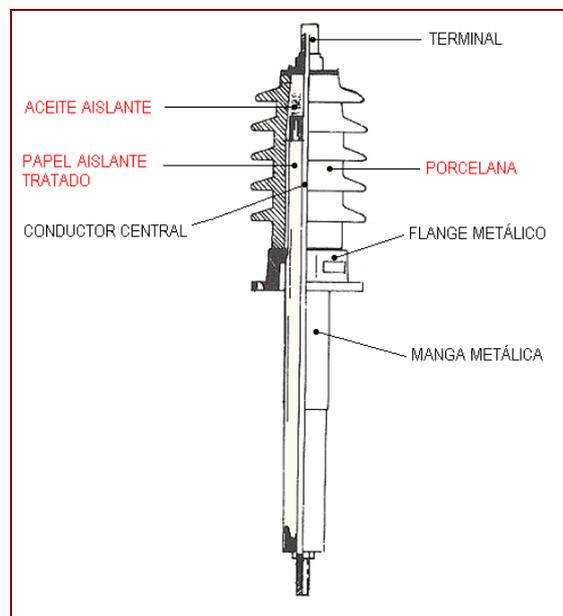
Este es el tipo más simplificado de bushing y es principalmente constituido por un cuerpo cerámico y un conductor. Normalmente son fabricados para soportar tensiones nominales igual o menores a 69kV. De acuerdo a su estructura de aislamiento se dividen en dos tipos, que son los siguientes:

- 1) Consiste de un cilindro cónico de *porcelana de alúmina sólida*, que por su interior permite el paso de una hasta conductora. Posee un flange metálico cimentado en su parte central y por tratarse de un bushing externo-interno posee aletas en la parte superior y es corrugado en la parte inferior.



**Figura 2.11** – Vista en corte de un bushing no capacitivo Westinghouse, tipo RJ de 15KV

- 2) Consiste de un cilindro sólido de *porcelana de alumina*, con una hasta conductora envuelta por un determinado número de finos cilindros concéntricos de *papel tratado con barniz de laca o resina*, separados por calces de *madera tratada* y llenando sus espacios con *aceite aislante*. La parte inferior del bushing no posee porcelana.



**Figura 2.12** – Vista en corte de un bushing no capacitivo General Electric, tipo LC de 15 a 69 KV

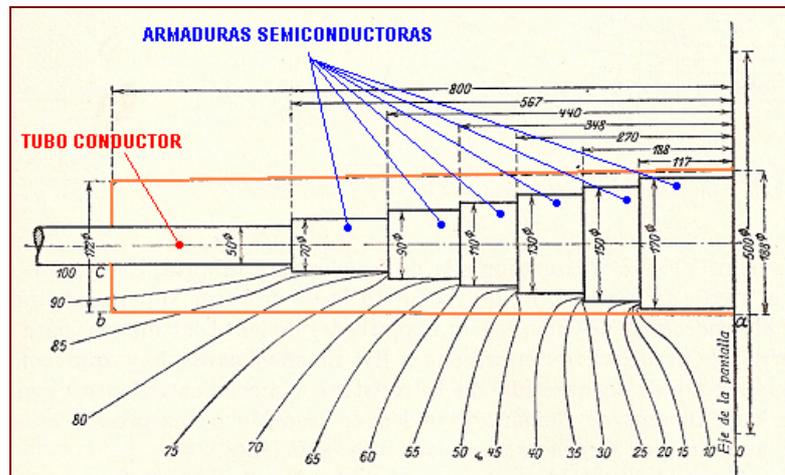
Recomiendo ver la *figura anexa 2.15.A*, donde se puede apreciar realmente uno de estos tipos de bushing's no capacitivos.

### 2.8.3 MATERIALES AISLANTES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS BUSHING'S CAPACITIVOS

Los bushing's capacitivos consisten de: un conductor central de cobre o estaño que puede ser macizo o en forma de tubo, envuelto por una *capa aislante de papel baquelizado* y sobre esta un *cuerpo capacitivo* compuesto de armaduras semiconductoras (hojas de metal) que constituyen capacitores cilíndricos y coaxiales con aislamiento de papel impregnado con aceite mineral o masa aislante de resina sintética. Todo esto cubierto por una estructura cónica de *porcelana de alúmina* sólida vitrificada tanto en la parte superior como inferior del bushing, siendo rellenado todos los espacios internos con aceite mineral.

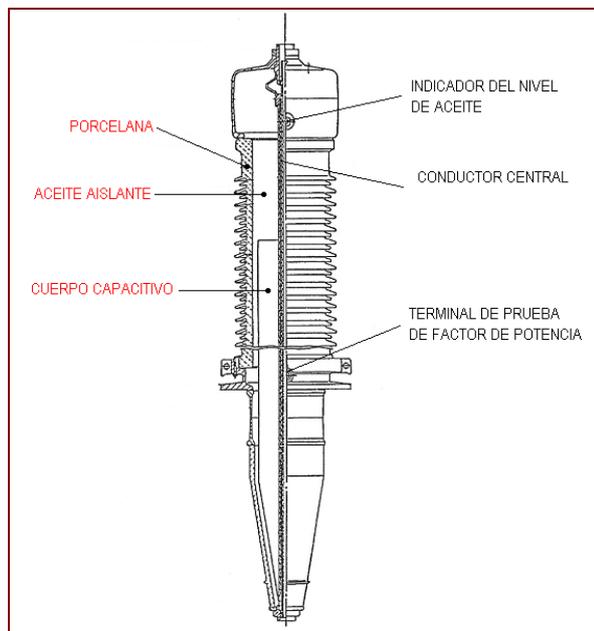
Su fabricación se da normalmente para soportar tensiones nominales igual o mayores a 69kV.

La distribución uniforme de las armaduras semiconductoras del cuerpo capacitivo, es con el fin de obtener entre ellas una capacitancia constante, para asegurar la distribución relativamente uniforme del voltaje y de este modo una alta rigidez dieléctrica.



*Figura 2.13 – Cuerpo capacitivo de un bushing*

Adicionalmente, estos bushing's contienen en la parte superior un indicador del nivel de aceite y en la parte media un tap o derivación capacitiva, diseñado exclusivamente para evaluar las condiciones internas del aislamiento con el ensayo de factor de potencia.



*Figura 2.14 – Vista en corte de un bushing capacitivo ABB tipo GOE de 230KV*

Recomiendo ver la *figura anexa 2.15.B*, donde se puede apreciar realmente este tipo de bushing.

## **2.8.4 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES PARA SU APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE LOS BUSHING's**

### **2.8.4.1 La Porcelana de Alúmina**

Las propiedades de la porcelana de alúmina aplicada para la fabricación de los bushing's, son similares a las explicadas en el ítem 2.4.4.1.1 y sus características técnicas se exponen en la *tabla anexa 2.II*.

### **2.8.4.2 El Aceite Mineral**

Las propiedades del aceite aislante utilizado para el llenado de los bushing's, son totalmente similares a las de un aceite destinado para su uso en transformadores, por lo tanto, se hace referencia a lo explicado en el ítem 2.3.6.5 y a las *tablas anexas 2.EI y 2.FI*.

### **2.8.4.3 El Papel Aislante**

Las propiedades del papel aislante utilizado dentro de la estructura de aislamiento de un bushing, son similares a las explicadas en el ítem 2.3.6.3 y las características de la *tabla anexa 2.C1*.

## **CAPÍTULO III**

### **3. FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN Y/O DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN**

#### **3.1 FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN Y/O DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

##### **3.1.1 AGENTES DE LA DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO SÓLIDO**

Los principales agentes de la degradación del aislamiento sólido de un transformador de potencia son: la humedad, la temperatura y la reacción química promovida por ambos en presencia del oxígeno.

Como ya se expuso en la unidad anterior, la mayor parte del aislamiento sólido de los transformadores de potencia, está constituido de materiales aislantes de naturaleza celulósica. Por lo tanto, el análisis causa-efecto sobre la degradación o envejecimiento del aislamiento sólido realizado en este literal, se refiere a los materiales celulósicos más empleados, tales como: papel kraft, papel Manila, cartón kraft, cartón prensado y madera.

### 3.1.1.1 Efecto de la humedad en la degradación del aislamiento sólido

La humedad es uno de los mayores enemigos del aislamiento de papel. En el caso de los transformadores inmersos en aceite aislante, más del 90% del agua ingresada se sitúa en el papel y sólo menos de un 10% se encuentra en el aceite.

Cabe recordar que el papel kraft de uso común en transformadores, es extremadamente poroso y posee una gran afinidad por el agua, cerca de 600 a 800 veces mayor que el aceite aislante en el cual está inmerso.

En la fabricación de los transformadores de alta y extra alta tensión, estos son secados hasta alcanzar niveles de humedad residual del orden de 0,3% a 0,5% con relación al peso del papel seco. Para que estas características sean conservadas, se requiere que el aceite aislante para inmersión del equipo, sea secado hasta alcanzar un nivel de contenido de agua del orden de 10ppm o menos.

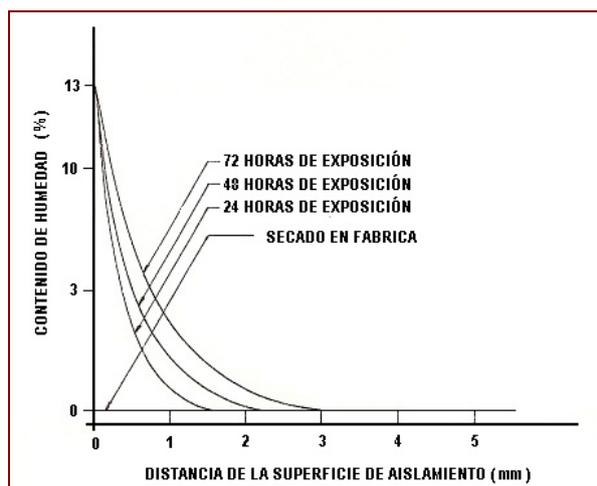
La contaminación del aislamiento sólido por humedad, puede ocurrir durante la operación del equipo o por otras fuentes que se destacan a continuación:

- a) **Pérdida de la estanqueidad durante el transporte** - Es usual transportar un transformador sin aceite y presurizado con gas seco (normalmente nitrógeno super-seco o pré-purificado, con un punto de rocío inferior a  $-40^{\circ}\text{C}$ ) a una presión entre  $0,20$  y  $0,25\text{kgf/cm}^2$  (20 y 25kPa).

Cualquier accidente que ocurra implicando la pérdida de estanqueidad, puede provocar la contaminación del aislamiento al permitir la penetración de humedad en el tanque, a niveles que dependieran de la gravedad del accidente, tiempo de exposición y condiciones atmosféricas.

- b) Montaje e instalación de accesorios en campo** - Durante la inspección interna en el recibimiento del transformador, operaciones de montaje e instalación de accesorios (especialmente los bushing's), el tiempo de exposición y las condiciones atmosféricas son factores que contribuyen para la penetración de humedad.

La humedad adsorbida penetra de 2 a 3mm en la superficie del aislamiento, conforme ilustra la figura 3.1 para un ambiente con temperatura de 30°C y 80% de humedad relativa.



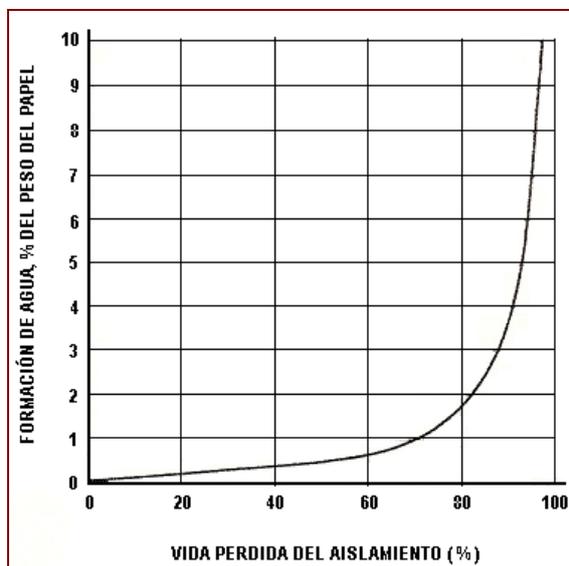
**Figura 3.1** –Distribución del contenido de humedad en el arrollamiento de un transformador, al exponerlo a una temperatura ambiente de 30°C y humedad relativa de 80%

- c) **Mal estado de la sílica-gel** - La sílica-gel nueva o regenerada es muy eficiente; en estas condiciones ella seca el aire que entra por el deshidratador hacia el tanque de expansión del transformador, a valores de punto de rocío en torno de  $-40^{\circ}\text{C}$ . No obstante, el problema radica en que su eficacia cae rápidamente, principalmente en regiones húmedas.

*Por lo tanto, al constatarse el estado desactivado de la sílica-gel en el deshidratador, significa que por este camino está penetrando humedad.*

- d) **Envejecimiento propio del aislamiento sólido** - El envejecimiento del aislamiento, causado por la degradación térmica de la celulosa, tiene como producto la formación de agua. Al menos que esta agua sea extraída, la misma acelerará todavía más la degradación del papel.

La siguiente figura 3.2, ilustra la formación de agua en porcentaje del peso del papel y en función de la vida útil atribuida al aislamiento.

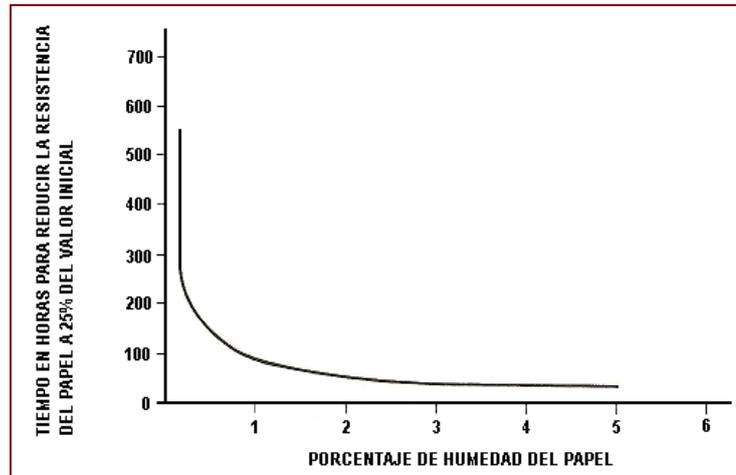


*Figura 3.2 – Formación de agua, como resultado de la deterioración térmica del papel*

### **Efectos de la contaminación del aislamiento sólido por humedad**

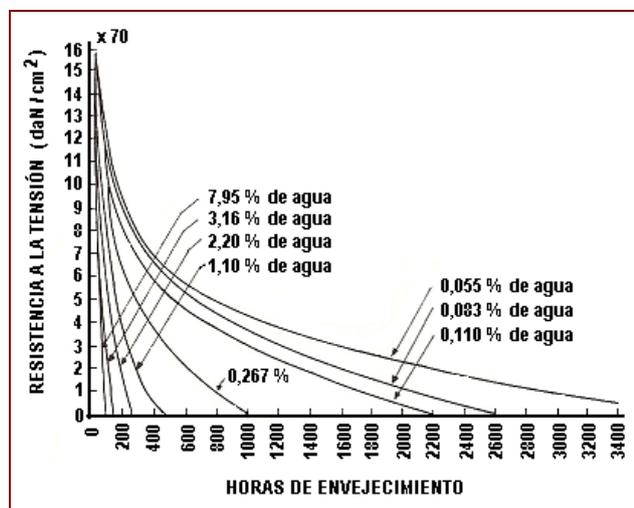
Pequeñas cantidades de agua en el aislamiento sólido, provocan considerable reducción de su resistencia mecánica, la misma que disminuye tan rápido cuanto mayor fuera su contenido.

Esto se puede apreciar en la siguiente figura 3.3, que relaciona la reducción de la resistencia mecánica del papel aislante del transformador, con el aumento de contenido de agua en el mismo.



**Figura 3.3** – Efecto de la humedad sobre el envejecimiento del papel Manila (0,076mm) con reducción de su resistencia a la tracción a 25% de su valor original

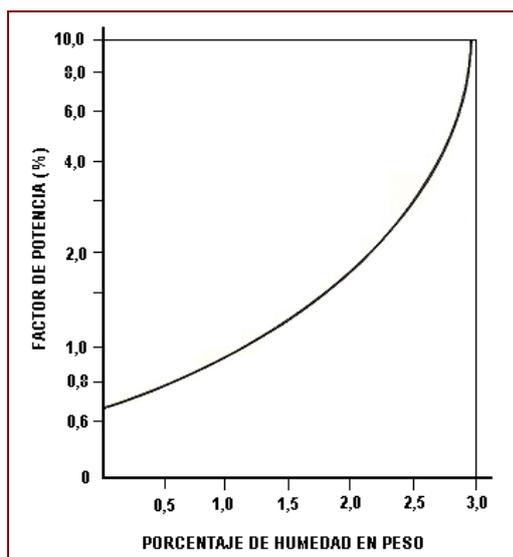
La disminución de la resistencia mecánica del aislamiento sólido, es considerada como un importante indicativo para medir su tiempo de envejecimiento o vida útil.



**Figura 3.4** – Variación de la resistencia mecánica del papel aislante en función de la humedad y del tiempo de envejecimiento.

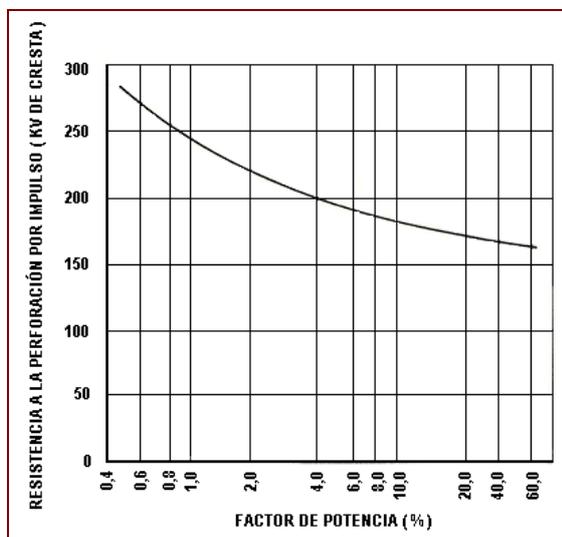
Además de la reducción de la resistencia mecánica del aislamiento sólido, sus propiedades dieléctricas se ven perjudicadas con el contenido de humedad, reflejándose en el aumento de su factor de potencia.

Esto se lo puede apreciar en la siguiente figura 3.5, que relaciona este aumento del factor de potencia en el cartón prensado que forma parte del aislamiento del transformador, con el contenido de humedad en el mismo.



**Figura 3.5** – Variación del factor de potencia del cartón prensado (pressboard) en función de su contenido de humedad.

*Cabe recalcar que, la resistencia a la perforación por impulso del aislamiento sólido de un transformador, disminuye conforme aumenta su factor de potencia.*

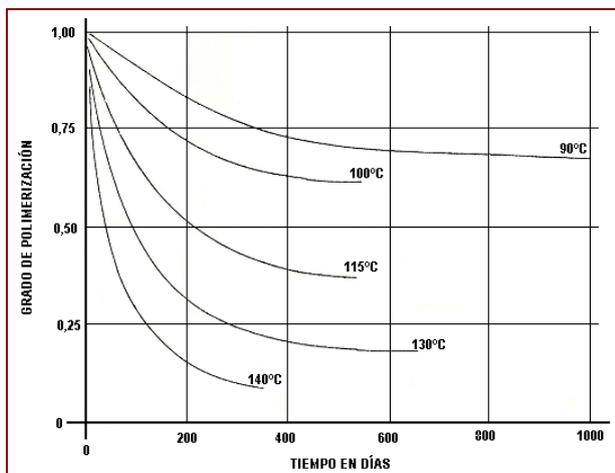


*Figura 3.6 – Resistencia mecánica a la perforación por impulso del cartón prensado impregnado de aceite*

### 3.1.1.2 Efecto de la temperatura en la degradación del aislamiento sólido

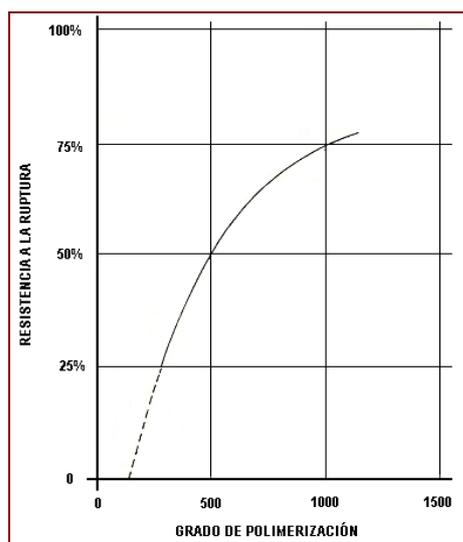
En razón de su débil estabilidad térmica, el papel es objeto de un envejecimiento sustancial cuando es sometido al efecto de la temperatura por sobrecalentamiento. Esto se traduce por una disminución de sus características, particularmente las mecánicas.

El resultado, puede ser observado en la figura 3.7, donde son mostradas las variaciones relativas del grado de polimerización en función del tiempo de envejecimiento, para cinco valores diferentes de temperatura.



**Figura 3.7** – Valor relativo al grado de polimerización del papel impregnado en función del tiempo y la temperatura (papel desgasificado y con contenido de agua 0,3%)

Actualmente se considera que el grado de polimerización, es un parámetro que debe ser tenido en cuenta muy en serio dado que es, sin duda, un indicativo del deterioro térmico del papel y por tanto de su cristalización. Conforme lo mostrado en la figura 3.8, para bajos valores de grado de polimerización, el papel pierde su resistencia a la tracción mecánica.



**Figura 3.8** – Correlación entre la resistencia mecánica a la tracción y el grado de polimerización

La IEEE incluso ha definido el fin de la vida confiable del transformador en términos del grado de polimerización del papel que forma el aislamiento sólido. Si el grado de polimerización disminuye hasta 200, el papel se debilita tanto que cualquier esfuerzo lo romperá y producirá una falla.

*Para transformadores retirados de operación en fin de vida, experiencias han demostrado que el grado de polimerización del papel se sitúa entre 100 y 200 moléculas de glucosa.*

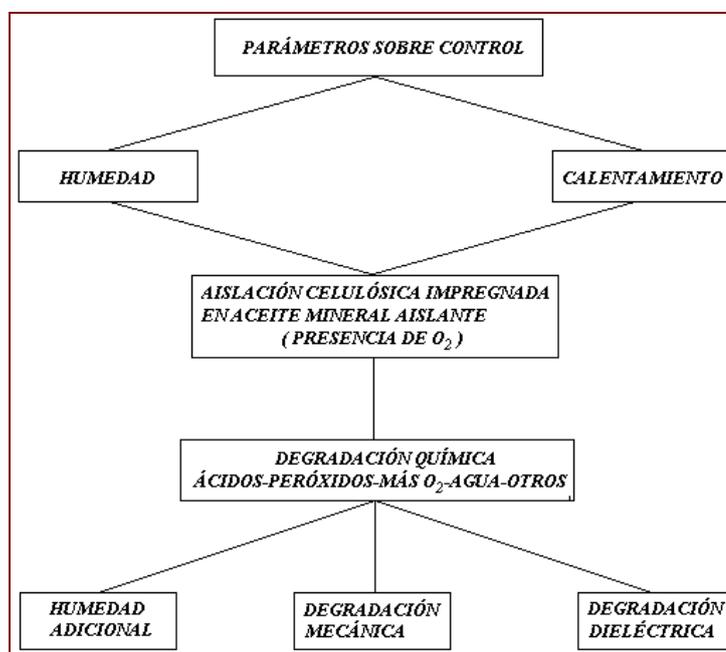
En conclusión, el papel aislante inmerso en aceite y calentado por tiempo prolongado queda con su resistencia mecánica muy reducida. La resistencia mecánica del aislamiento disminuye más rápidamente que su resistencia de aislamiento, pudiendo debilitarse a tal punto que no puede más resistir los esfuerzos de cortocircuitos e impulsos de tensión.

*Hay que tener presente que la humedad en combinación con el sobrecalentamiento, degeneran el sistema de aislamiento sólido, antes que la rigidez dieléctrica del aceite muestre problemas.*

### 3.1.1.3 La degradación del aislamiento sólido debido a reacciones químicas promovidas por el oxígeno.

El oxígeno disuelto en el aceite aislante, infliere directamente sobre el papel para acelerar su envejecimiento. Los productos de la oxidación del aceite actúan, igualmente, en la degradación del papel.

Cuando las condiciones favorecen la difusión del aire en el aceite, la velocidad de descomposición es incrementada en gran magnitud. El esquema de la figura 3.9 ilustra esta degeneración, la cual se desenvuelve hasta que una decisión adecuada sea tomada para interrumpir el proceso, o una falla determine la salida del transformador de potencia de su normal operación.



**Figura 3.9** – Acción del calentamiento, la humedad y el oxígeno, en el desenvolvimiento de la degradación celulósica

#### 3.1.1.4 Los Compuestos Furánicos

Como se mencionó en el capítulo anterior, el aislamiento sólido conformado en gran parte por el papel, está compuesto por fibras de celulosa. Esta última es un polímero formado a su vez, por moléculas de glucosa.

Cuando el papel está nuevo, antes de su instalación en el transformador y su secado en fábrica, la cadena promedio del polímero tiene una longitud de 1000 a 1200 moléculas de glucosa.

El proceso de instalación y secado del papel descomponen en cierta medida la celulosa; de manera que ese papel nuevo en un transformador nuevo tiene cadenas de polímeros ligeramente reducidas (alrededor de 800 a 1000 moléculas de glucosa). La longitud promedio de la cadena de celulosa se denomina “Grado de Polimerización” (GP) del papel. A medida que el papel envejece, se produce una descomposición natural y gradual de las cadenas de polímeros, hecho conocido como “despolimerización”. Es decir, se reduce el tamaño de dichas cadenas, disminuyendo a su vez la rigidez mecánica del papel.

Cuando la cadena de la celulosa se rompe y forma dos cadenas más cortas, se separan una o más moléculas de glucosa y también se forma cierta cantidad de agua, de monóxido y de dióxido de carbono. La molécula de glucosa cambia

químicamente durante este proceso y forma un compuesto que contiene un anillo de furano (anillo glucosílico)

Los compuestos que contienen un anillo de furano son parcialmente solubles en aceite. Estos compuestos se forman en el papel, pero emigran parcialmente al aceite en donde es posible detectarlos mediante análisis químico. Las temperaturas a las cuales se produce la descomposición y la presencia de niveles de oxígeno y humedad anormalmente elevados, determinan los compuestos que se forman. Se puede formar una variedad de tales compuestos furánicos, sin embargo unos son más comunes que otros. Tal es el caso de los furanos que se detallan a continuación:

- **2-furaldehído**, también denominado **furfural** o **furfuraldehído**. Es el compuesto furánico que se encuentra con mayor frecuencia. Contiene el 90% de todos los furanos que puede haber en el aceite. Se forma por sobrecalentamiento general de la celulosa o puede presentarse como resultado de una condición de falla en el pasado. Es uno de los compuestos furánicos más estables bajo las condiciones en el interior del transformador. El resto de los compuestos se descomponen y forman 2-furaldehídos adicionales.
- **2-furil alcohol**, también denominado **furfural alcohol** o **furfurol**. Es el compuesto furánico que se forma en presencia de gran contenido de humedad,

y es la prueba de una condición de descomposición activa del papel debido a elevados niveles de humedad en el aislamiento sólido.

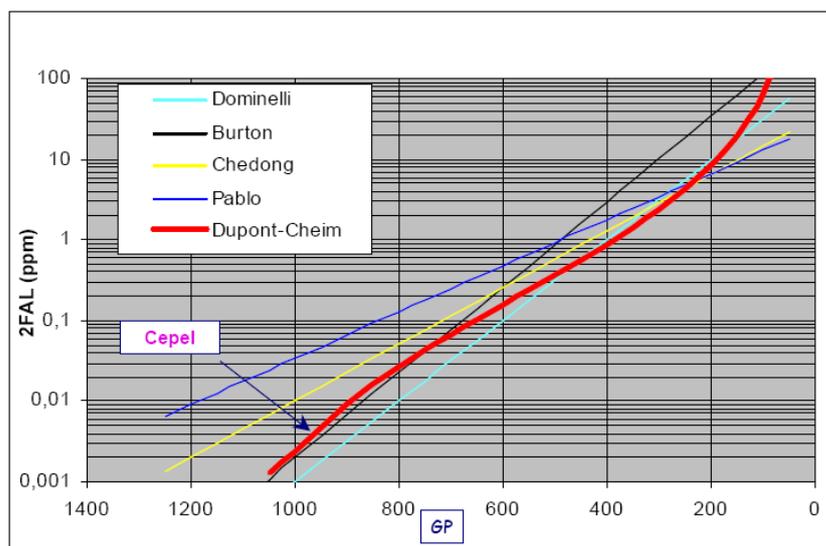
- **2-acetil furano.** Es el menos común de los compuestos furánicos que se puede encontrar en un transformador operativo. Se encuentra con mayor frecuencia en transformadores averiados que han sufrido descargas eléctricas por rayos, lo cual lleva a la conclusión preliminar de que la formación de este compuesto puede ser el resultado de elevados niveles de esfuerzo eléctrico.
- **5-metilo-2-furaldehido.** Se forma como resultado de sobrecalentamiento intenso y localizado de la celulosa y es la prueba de una condición que se supone falla por punto caliente a alta temperatura.
- **5-hidroximetilo-2-furaldehido.** Se forma como resultado de la descomposición del papel en presencia de grandes cantidades de oxígeno y es la prueba de la oxidación del aislamiento sólido.

### **Furanos y Grado de Polimerización**

Es lógico que a un deterioro de la estructura química del papel como consecuencia de una mayor temperatura de operación del transformador manifestado por una disminución del Grado de Polimerización, corresponda un mayor contenido de compuestos furánicos disueltos en el aceite, especialmente del

compuesto 2-FURALDEHIDO (2FAL) cuya proporción es mas del 90% comparada con la de los demás furanos.

Estudios recientes han determinado que el contenido de 2-furaldehido (2-FAL) disuelto en el aceite esta ligado al grado de polimerización. A continuación podemos observar que varios investigadores coinciden muy cercanamente en la tendencia que relaciona el 2-FAL con el grado de polimerización GP.



**Figura 3.10** – Contenido de 2-FAL en el aceite con relación al grado de polimerización, según varias investigaciones.

*En resumen, con la determinación del contenido de furanos de una muestra de aceite del transformador, podemos estimar su grado de polimerización. Por tanto, como ya se explicó en el ítem 3.1.1.2, al conocer este último parámetro, podemos proyectar con seguridad su vida útil remanente.*

### 3.1.2 LA CONTAMINACIÓN DEL ACEITE AISLANTE

Un aceite es considerado “contaminado” cuando contenga humedad u otros componentes extraños que NO sean producto de su oxidación. Las principales causas de la *contaminación* por humedad del aceite aislante de un transformador en operación, son las siguientes:

- a) La mala conservación de la sílica-gel (en transformadores que poseen tanque de expansión sin membrana)
- b) Puntos de filtración en el transformador,
- c) El envejecimiento térmico del aislamiento celulósico.

El agua puede existir en el aceite en tres estados: disuelta (en solución), no disuelta (en suspensión o en emulsión) o libre (depositada). El agua disuelta o en solución no es tan nociva en el aceite, mientras que, el agua en estado libre es extremadamente nociva por dos motivos: disminuye acentuadamente su rigidez dieléctrica y permite la transferencia de este excedente para la celulosa. En forma emulsionada o en suspensión, puede o no afectar la rigidez, pero acelera la formación de compuestos polares que van a intervenir en la oxidación del aceite.

*Por lo tanto, es muy importante que se controle el contenido de agua en el aceite para evitar que el mismo alcance la saturación.*

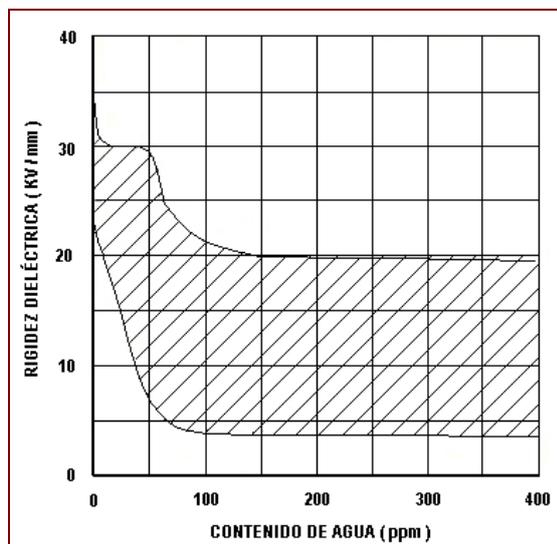
### **3.1.2.1 Influencia del agua y las partículas sólidas en la rigidez dieléctrica del aceite aislante**

Un líquido es considerado como aislante eléctrico en cuanto su autoionización o contenido de iones extraños, fuera tan bajo que una tensión continua permanente aplicada no produzca calentamiento sensible. A un gradiente de 10kV/mm esa concentración es de  $10^{-4}$  iones/dm<sup>3</sup>. Mientras la concentración en iones libres se mantuviera debajo de este valor límite, no se observa una influencia notoria sobre la rigidez dieléctrica.

En un aceite con agua disuelta, de contenido saturante y a la temperatura ambiente; existe cerca de  $5,4 \times 10^{12}$  iones provenientes del agua en cada decímetro cúbico de aceite. Cabe recalcar que, la autoionización de las moléculas de aceite, por estas ser esencialmente apolares, deben ser despreciables, por lo que el contenido total de iones no se debe apartar mucho de este valor.

Existen discordancias en la graficación de la curva que relaciona la rigidez dieléctrica de un aceite nuevo en función de su contenido de agua, debido a que, en la práctica, como el agua pura no es el único contaminante del aceite, las cosas pasan de manera bien diferente y la graficación experimental realizada por varios

investigadores ha creado curvas con las más diversas formas. Resumiendo en un solo gráfico varios de estos resultados, se obtiene la siguiente figura 3.11.



*Figura 3.11 – Rigidez dieléctrica de un aceite nuevo, en función de su contenido de agua*

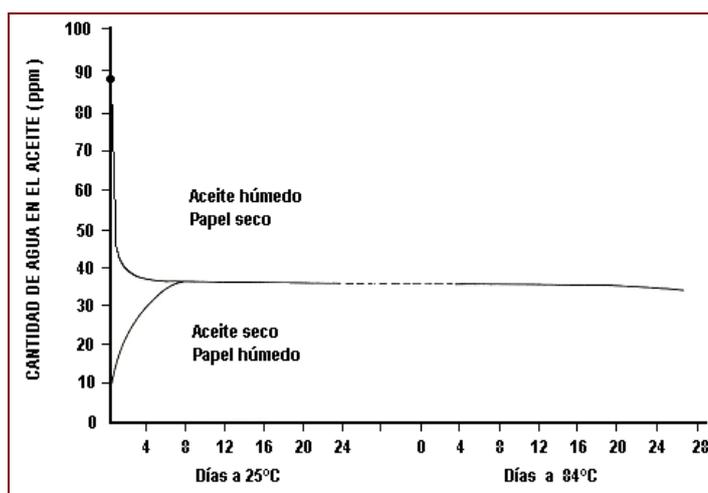
Uno de los factores que en conjunto con la presencia de agua parece tener una influencia significativa sobre la rigidez dieléctrica de un aceite, es la presencia de pequeñas partículas sólidas. No obstante, si existieran dichas partículas en un aceite bien seco, su efecto sería pequeño sobre la rigidez dieléctrica.

Por lo tanto, la gran dispersión que se encuentra al trazar experimentalmente la relación entre la rigidez dieléctrica de un aceite aislante en función de su contenido de agua, resulta de no tomar en consideración la eventual presencia de partículas sólidas. La intensidad de la influencia de estas partículas sólidas, depende en gran medida de su naturaleza y dimensiones de las partículas, bien como de su cantidad.

### 3.1.2.2 El equilibrio de la humedad entre el aceite mineral aislante y el aislamiento celulósico impregnado.

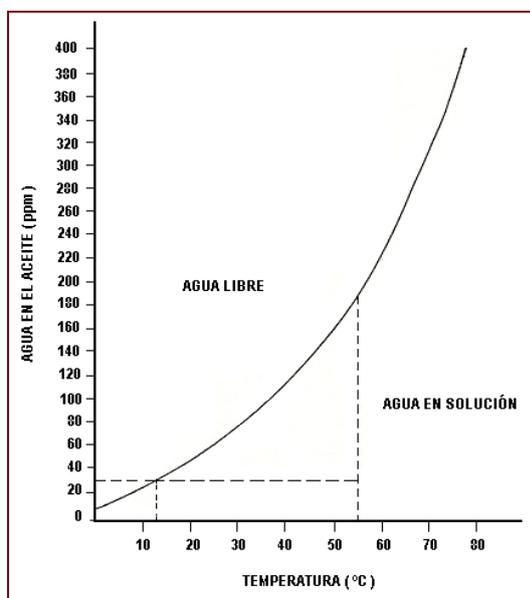
Por ser, el papel kraft y el cartón prensado (pressboard) aislantes muy higroscópicos, son secadores muy eficaces del aire y del aceite aislante. La celulosa seca, cuando es ingresada en aceite húmedo, absorbe la humedad de este. Dicha absorción se da hasta un punto en que es alcanzado un estado de equilibrio. En la situación inversa, esto es, el papel húmedo ingresado en aceite seco, el agua pasa del papel para el aceite.

En la figura 3.12 se puede ver con buena aproximación que, el valor de 35ppm de agua en el aceite podrá ser considerado como valor máximo admisible, a 25°C, sin que haya transferencia a la celulosa. Es importante destacar que este equilibrio varía con el tipo de aceite y con el valor de la temperatura.



*Figura 3.12 – Característica del equilibrio de la humedad entre el aceite mineral aislante y el aislamiento celulósico impregnado*

Por otra parte, la figura 3.13 muestra que durante su operación normal, cerca de 55°C, el aceite del transformador podrá tener un contenido de agua bien encima de los 35ppm sin perjuicio para el papel. Entretanto, si el mismo llega a ser desconectado y el aceite se resfría, el agua excedente a 35ppm podría tornarse agua libre y ser adsorbida por la celulosa. Vale también decir que, durante el funcionamiento del mismo, debido a los cambios de calor, hay puntos de aceite-papel con temperatura bajo los 55°C considerados.



**Figura 3.13** – Curva de solubilidad para un tipo de aceite aislante

*Además de ejercer un riguroso control de los factores que pueden introducir humedad en el aceite, es necesario medir su contenido de agua, periódicamente, para evitar que el mismo alcance el límite de 35ppm. En el caso de que esto ocurra, es aconsejable medir la humedad relativa en la superficie del aislamiento.*

### 3.1.3 LA DETERIORACIÓN DEL ACEITE AISLANTE

Cuando están en servicio los transformadores de potencia, los aceites minerales aislantes se encuentran sujetos a la influencia de varios factores tales como la temperatura relativamente elevada, la presencia de oxígeno y el contacto con varios materiales de construcción. Estos factores van a provocar la oxidación del aceite aislante, resultando una diversidad de productos indeseables.

La principal causa de la *deterioración* del aceite es la presencia del oxígeno, el mismo que se encuentra libre en el aire presente en el interior del transformador, disuelto en el aceite aislante, o pudiendo ser formado por la degradación propia de la celulosa.

El oxígeno al entrar en contacto con el aceite, principalmente a una temperatura relativamente elevada, se combina, alterando sus propiedades físico-químicas y provocando reacciones de polimerización, quiebra de cadenas carbónicas, condensación y otros; dando origen a todos los fenómenos relativos al envejecimiento del aceite.

Por lo tanto, cuando se habla de oxidación de los aceites, se sobrentiende normalmente el conjunto de estos fenómenos. Se podría decir en términos generales que la oxidación del aceite mineral aislante es sinónimo de lo que se conoce como *deterioración o envejecimiento del aceite*.

La estabilidad de los aceites aislantes a la oxidación depende mayormente de su estructura. Así, con base en investigaciones hechas a varias mezclas conocidas de hidrocarburos que se encuentran en los aceites aislantes, es posible trazar las siguientes líneas generales:

- a) Los hidrocarburos aromáticos sin cadenas laterales son poco o nada sensibles a la oxidación. Si entre los anillos aromáticos fuera introducido un carbono alifático, su resistencia a la oxidación disminuye. Cuanto más complicada y asimétrica fuera la estructura, menor será la estabilidad. Los productos de oxidación incluyen una mayoría de productos de polimerización relativamente a los productos ácidos.

Los hidrocarburos aromáticos con cadenas laterales son tan menos estables a la oxidación cuanto mayor es el número y medida de esas cadenas. La oxidación comienza por darse en las cadenas laterales originando productos ácidos. Los productos de polimerización y condensación se forman en pequeñas cantidades;

- b) Los hidrocarburos nafténicos son tan más sensibles a la oxidación cuanto mayor es su masa molecular, el número y medida de las cadenas laterales. En este caso, sin embargo, la oxidación se inicia no en las cadenas laterales más sí en el anillo, normalmente en el átomo de carbono donde se enlaza la cadena lateral. Los principales productos de oxidación son los ácidos libres y ésteres.

- c) En los hidrocarburos parafínicos la estabilidad a la oxidación depende del número de carbonos terciarios, visto estos serán los más fácilmente oxidables.

De acuerdo a la American Society of Testing and Materials (ASTM), el proceso de oxidación del aceite tiene inicio cuando el oxígeno entra en combinación con los hidrocarburos inestables (los cuales son considerados impurezas del aceite, ya que los hidrocarburos estables difícilmente reaccionan con el oxígeno) en la presencia de catalizadores y aceleradores existentes en el transformador.

Los agentes *catalizadores* presentes en la oxidación del aceite, son el agua, el cobre de los arrollamientos y el hierro del núcleo; donde el agua es el principal agente catalizador. Además existen agentes *aceleradores* del proceso de oxidación del aceite, tales como, el calor, la tensión eléctrica, la vibración, los impulsos de tensión y los choques mecánicos y de carga; siendo el calor el principal acelerador debido a que mientras más elevada es la temperatura del aceite, mayor será la velocidad de su oxidación.

*Aceite “NUEVO” en un transformador puesto en operación, es decir recientemente instalado, “NO EXISTE”. La deterioración del aceite comienza desde que este fuera colocado en el equipo, en la fábrica, antes de la expedición hacia el campo.*

### 3.1.3.1 Proceso de oxidación del aceite

Estudios efectuados por la ASTM concluyen que el proceso de oxidación del aceite se desenvuelve conforme dos ciclos:

1. Formación de productos solubles de la deterioración del aceite, principalmente ácidos.
2. Transformación de los productos solubles en productos insolubles, que componen el sedimento o lodo.

El mecanismo de deterioración de un aceite aislante es bastante complejo. Se acepta hoy en día que los fenómenos comienzan por la formación de un hidroperóxido resultante de fijación de oxígeno por un radical libre. Tal radical no es más que el resultado de la separación de un átomo de hidrógeno de una molécula de hidrocarburo. Se admite que la formación de radicales libres sea fomentada por la acción catalítica de los metales como hierro y cobre (especialmente el cobre) y de la temperatura.

A partir de los hidroperóxidos (primera fase), que son productos intermedios inestables, se forma toda la gama de productos de oxidación (segunda fase), conforme se esquematiza en la siguiente figura:

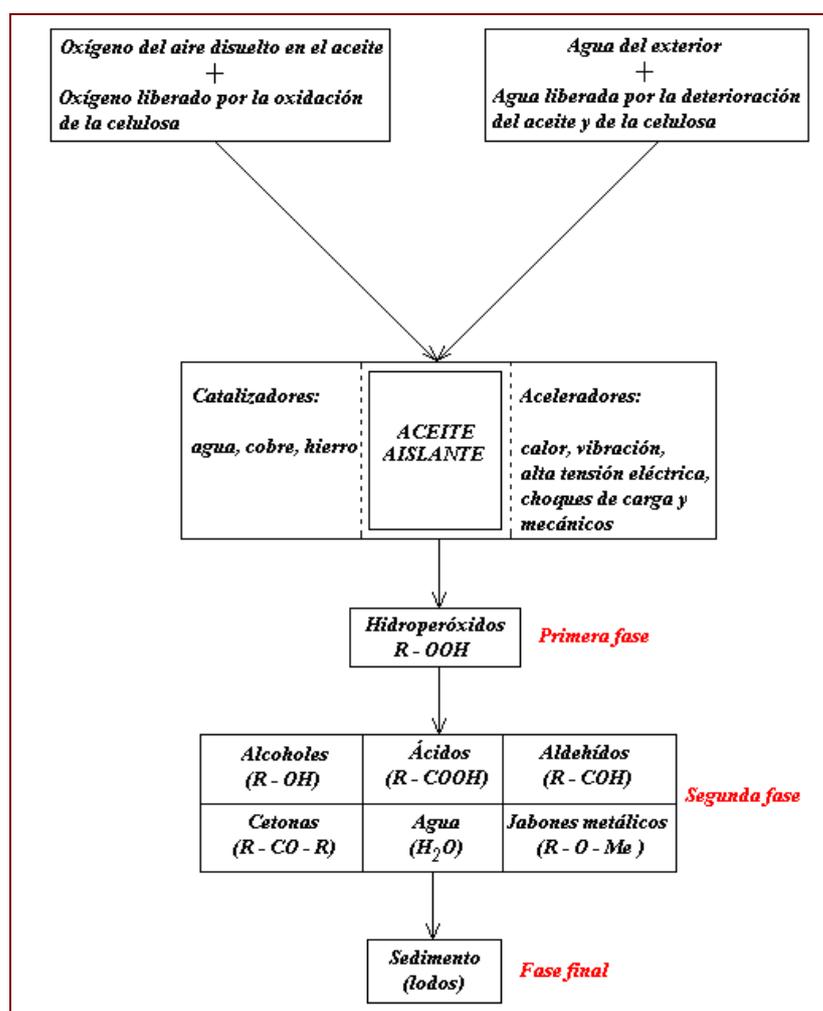


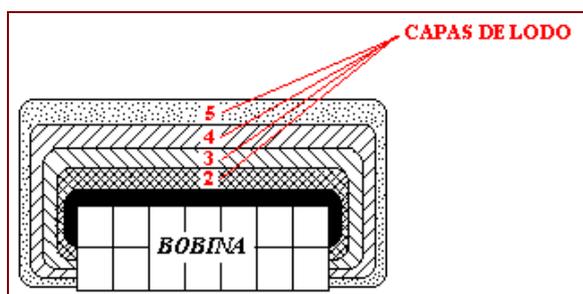
Figura 3.14 – Fases de la deterioración del aceite aislante

Los primeros productos de oxidación altamente contaminantes que se forman son los *alcoholes* y *aldehídos*, estas sustancias polares aparecen para a su vez entre ellos lateralmente generar *cetonas* y *jabones metálicos*, y posteriormente en el proceso obtener *ácidos orgánicos* que también reaccionan fácilmente entre sí formando *ésteres*, los cuales a su vez se activan y polimerizan aglomerándose y formando complejos moleculares de alto peso en forma de *sedimentos (lodos)*, que se depositan en los intersticios de las fibras de la celulosa, las bobinas, el núcleo y

radiadores del transformador, formando en casos de avanzada degradación capas endurecidas, afectando notablemente las condiciones de operación del equipo poniéndolo en grave riesgo de falla.

### 3.1.3.2 Efectos de la deterioración del aceite aislante en el transformador

La formación de capas de sedimento o lodo en el aislamiento es intermitente y ellos son de diferentes durezas. Los grupos directamente en contacto con el aislamiento es el más duro porque está a una temperatura más elevada que las demás, y su oxidación es más acelerada.



**Figura 3.15** – Representación esquemática de las capas de lodo producto de la deterioración del aceite aislante, depositadas sobre la bobina del transformador

Por lo tanto la disipación de calor es perjudicada, pues un sedimento de 3 a 6mm de espesor sobre el aislamiento sólido (especialmente de las bobinas), redonda en un aumento de 10°C a 15°C en la temperatura de operación del transformador. Por consecuencia va a acelerar más el envejecimiento no sólo del aceite sino que también de los restantes materiales aislantes.

Los productos de óxidos sólidos insolubles en el mismo aceite caliente, también se pueden depositar en los estrechos canales de las bobinas. Así, va a ser dificultada la circulación del aceite en esos canales, donde pasará a haber un sobrecalentamiento del que podrá acabar por resultar en un rápido envejecimiento de los aislantes sólidos envueltos.

Además de los graves inconvenientes ya apuntados sobre formación de lodos con consecuente deficiente circulación del aceite dentro de los transformadores de potencia y formación de productos químicamente activos que aceleran la deterioración del aceite, el deterioro del aceite abarca una multiplicidad de otros problemas, como por ejemplo:

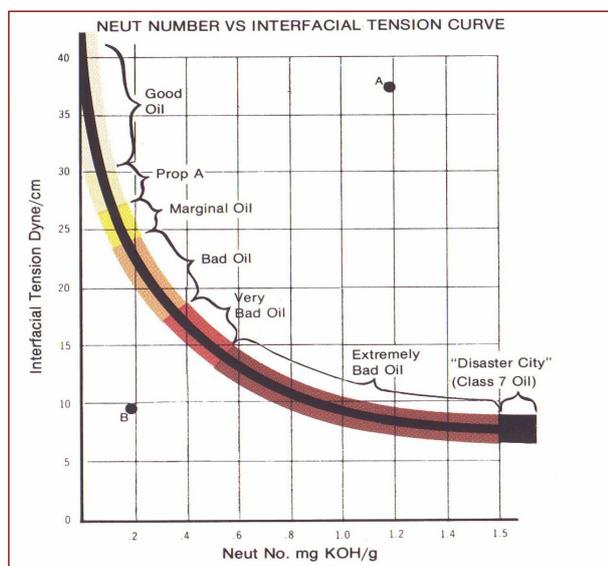
- La formación de productos de condensación y polimerización (que muchas veces en su estado final son insolubles hasta en el aceite caliente), puede aumentar la viscosidad del aceite, lo que dificulta su circulación, ocurriendo posteriormente un aumento de calor por la mala refrigeración.
- La oxidación da origen a la formación de ácidos y muchos productos más o menos polares que, siendo químicamente activos, ejercen su acción perjudicial sobre los restantes materiales de construcción (principalmente productos orgánicos tales como el papel aislante), contribuyendo para la formación más intensa de radicales libres.

*La presencia de estos productos de oxidación provoca un aumento de acidez y  $\text{tg}(\delta)$  del aceite, disminución de su tensión interfacial y todavía un aumento de la habilidad para disolver agua con eventual consecuente disminución de la rigidez dieléctrica.*

### **3.1.3.3 Correlación entre el Número de Neutralización y la Tensión Interfacial del aceite aislante en oxidación**

Se acostumbra caracterizar de forma definitiva la oxidación, por los valores bajos de tensión interfacial y altos de acidez (número de neutralización), ya que los demás pueden sufrir alteración con la disminución de la condición de aislante del aceite, a través de contaminación de partículas sólidas y húmedas, sin existir oxidación.

Varios estudios han demostrado la existencia de esta dependencia entre la Tensión Interfacial y el Número de Neutralización, conforme la figura 3.16 que se muestra a continuación:



**Figura 3.16** – Curva de tensión interfacial vs número de neutralización de los aceites

El *número crítico de neutralización del aceite* es el valor límite máximo de condiciones de acidez, determinado experimentalmente, después del cual la acción catalizadora de los ácidos tienen efecto altamente acelerador de la oxidación., estando el inhibidor completamente agotado. El número crítico de neutralización es de 0.25mg de KOH por gramo de aceite.

La ASTM ejecutó un estudio durante un periodo de once años (de 1946 a 1957) en 500 transformadores en operación, investigando el valor de la tensión interfacial, del número de neutralización y la existencia de borra en el transformador, habiendo constatado lo siguiente:

<b>NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN</b>	<b>EXISTENCIA DE BORRA EN EL ACEITE DEL TRANSFORMADOR</b>	
<b>Mg KOH/g</b>	<b>VALOR %</b>	<b>No. DE UNIDADES</b>
<i>0,03-0,10</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>0,11-0,20</i>	<i>38</i>	<i>190</i>
<i>0,21-0,60</i>	<i>72</i>	<i>360</i>
<i>encima de 0,60</i>	<i>100</i>	<i>500</i>

**Tabla 3.1** – Existencia de borra en el aceite de transformadores de potencia, relacionada con su Número de Neutralización

<b>TENSIÓN INTERFACIAL</b>	<b>EXISTENCIA DE BORRA EN EL ACEITE DEL TRANSFORMADOR</b>	
<b>Dina/cm</b>	<b>VALOR %</b>	<b>No. DE UNIDADES</b>
<i>debajo de 14</i>	<i>100</i>	<i>500</i>
<i>14-16</i>	<i>85</i>	<i>425</i>
<i>16-18</i>	<i>69</i>	<i>345</i>
<i>18-20</i>	<i>35</i>	<i>175</i>
<i>20-22</i>	<i>33</i>	<i>165</i>
<i>22-24</i>	<i>30</i>	<i>150</i>
<i>encima de 24</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

**Tabla 3.2** – Existencia de borra en el aceite de transformadores de potencia, relacionada con su Tensión Interfacial

Con la ayuda de estos resultados se estableció la *tabla anexa 3.A1*, donde se clasifica al aceite según sus condiciones y los efectos en el transformador. Se puede ver así la importancia que tiene para la vida de un transformador una buena estabilidad a la oxidación del aceite aislante.

El envejecimiento de los aceites parafínicos tiende a producir mayor cantidad de dióxido de carbono en el papel aislante que los aceites nafténicos. Se concluye, por lo tanto, que el papel celulósico se deteriorará más rápido en el aceite parafínico,

lo que contradice con la creencia general de que el envejecimiento de la aislación sólida parece no depender del aceite.

*El grado de oxidación del aceite es determinado por ensayos físico-químicos que indican la presencia de residuos o lodo, presencia de agua, baja rigidez dieléctrica, alta pérdida dieléctrica, alto índice de neutralización de la acidez y bajo valor de tensión interfacial.*

#### **3.1.3.4 Formación de gases en el aceite aislante en operación**

El aceite puede contener disueltos *gases combustibles y no combustibles*. Entre los combustibles se cuentan: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) y acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>). Los no combustibles que pueden ser encontrados son: oxígeno (O<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El aceite puede disolver hasta 10% de su volumen de aire. Los gases oxígeno y nitrógeno provienen del aire atmosférico, con el cual está o estuvo en contacto.

Los aislamientos sólido y líquido sufren deterioración durante el funcionamiento normal del transformador, esto es, con su operación hasta el límite máximo recomendado de temperatura y la ausencia de contacto con el oxígeno y la humedad exterior.

Los gases que se forman por la deterioración normal del aislamiento sólido son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); el monóxido de carbono (CO), en menor cantidad que el  $\text{CO}_2$ ; y cantidades menores de hidrógeno, metano y etano.

Los gases CO y  $\text{CO}_2$ , más agua, se forman cuando la celulosa es sobrecalentada ( $140^\circ\text{C}$ ). Su pirolisis, esto es, destrucción por el calor ( $250^\circ\text{C}$ ), origina los gases CO en mayor cantidad que el  $\text{CO}_2$ , además de agua, carbón y alquitrán.

Cuando el aceite mineral aislante es sobrecalentado ( $500^\circ\text{C}$ ), origina los gases metano, etano, etileno,  $\text{CO}_2$  ( $400^\circ\text{C}$ ) y agua ( $200^\circ\text{C}$ ) en presencia de oxígeno. La pirolisis del aceite conduce a la formación de hidrógeno (de 60% a 80%), acetileno (de 10% a 25%), metano (de 1,5% a 3,5%) y etileno (de 1,0 a 2,9%).

Además del calor, conducen también a la formación de gases del aislamiento:

- Descargas parciales (corona) y centellamiento. El efecto corona puede ocurrir en los ángulos de los conductores con una tensión de cerca de 12 kV. El centellamiento es una descarga eléctrica débil con duración muy corta, un microsegundo o menos.
  
- Arco eléctrico, que es una descarga eléctrica prolongada e intensa.

Son también fuentes de gases en el aceite:

- La contaminación del gas nitrógeno del colchón de gas de transformadores sellados.
- Transformadores transportados con CO<sub>2</sub>. Los enrollamientos del transformador retienen cerca del 10% del volumen total del aceite.
- Transformador no-desgasificado después de haber sido reparado.
- Hidrólisis debido a la presencia de agua.
- Motor quemado del sistema de refrigeración forzada. Existen instalaciones en que el aceite del transformador baña el motor que acciona la bomba de circulación del aceite.
- Polución atmosférica.
- Contaminación por el aceite de la llave conmutadora del conmutador de derivaciones bajo carga.

La existencia de gases en el aceite debido a estos orígenes no significa una condición de falla insipiente del transformador, tan solamente una situación irregular. La solubilidad, volumen a volumen de los gases en el aceite aislante de transformadores a 101 kPa y 25°C es la siguiente, en porcentaje:

<b>GAS</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
<i>Hidrógeno (H<sub>2</sub>)</i>	<i>7,0</i>
<i>Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</i>	<i>8,6</i>
<i>Monóxido de Carbono (CO)</i>	<i>9,0</i>
<i>Oxígeno (O<sub>2</sub>)</i>	<i>16,0</i>
<i>Metano (CH<sub>4</sub>)</i>	<i>3,00</i>
<i>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</i>	<i>120,0</i>
<i>Etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)</i>	<i>280,0</i>
<i>Etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)</i>	<i>280,0</i>
<i>Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)</i>	<i>400,0</i>

**Tabla 3.3** – Solubilidad de los gases en el aceite de un transformador

Investigaciones en laboratorio llevan a la conclusión de que las burbujas de los gases se disuelven totalmente en el aceite cuando el no estuviera saturado y desde que su contacto con el mismo se dé por tiempo prolongado.

Si el contacto fuera por un corto espacio de tiempo, las burbujas de los gases no se disolverán totalmente y el exceso se acumulará en la parte superior del transformador en el relé buchholz.

Los análisis de gases recogidos del relé buchholz comprueban que, cuando el aceite está saturado de gases, puede haber un cambio entre los gases disueltos y los de la burbuja, hasta ser alcanzado un estado de equilibrio.

### **3.2 FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN Y/O DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN**

Como ya se mencionó en la unidad anterior, existe una gran similitud entre los materiales aislantes que forman parte de la estructura de aislamiento de los transformadores de instrumentación con los transformadores de potencia. Esto, debido a su semejanza en principio y funcionabilidad; basando su estructura de aislamiento en la aplicación de papel y madera impregnados con aceite.

La estructura de aislamiento de estos equipos, a diferencia de los transformadores de potencia, no se ve amenazada en gran escala por la contaminación de humedad o ingreso de aire atmosférico, esto, debido a que son fabricados para operar herméticamente sellados, sin necesidad de inspecciones internas para su inicial puesta en servicio o mantenimiento.

Salvo la existencia de una falla proveniente desde su fabricación, este podría presentar algún problema, el cual sería detectado con los ensayos en campo aplicados tanto en la recepción como el control de los periodos de mantenimiento del mismo.

### **3.3 FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN Y/O DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA**

#### **3.3.1 INTERRUPTORES A GRAN VOLUMEN DE ACEITE (TIPO GVO)**

##### **3.3.1.1 La contaminación del aislamiento sólido por humedad**

Al igual que los transformadores de potencia, durante la operación del interruptor podrá ocurrir la contaminación del aislamiento sólido por humedad, con consecuente reducción de su vida útil de operación. La principal fuente de ingreso de humedad, se puede dar durante la inspección interna en el recibimiento del equipo, en el periodo de montaje e instalación de sus accesorios y durante algún mantenimiento que involucre la apertura de la cuba del interruptor; siendo el tiempo de exposición y las condiciones atmosféricas los factores que contribuyen para su ingreso.

Las partes aislantes sólidas que se ven mayormente afectadas por la consecuente penetración de humedad en el interruptor son, la varilla de operación y ensamblaje guía fabricadas normalmente en madera. Estas se ven amenazadas por los siguientes motivos:

- 1) Se producen cambios irregulares en su estructura o forma, provocándose pandeos que dificultan su movimiento adecuado.

- 2) Se crean a través de ellas caminos de posibles corrientes de descarga, con peligrosas consecuencias.

Igual situación ocurre en las chimeneas con rejilla de desionización (o cámaras aislantes de interrupción), donde su fibra, al verse expuesta a la penetración de humedad, esta puede dilatarse y sufrir modificaciones en su forma.

### 3.3.1.2 El arco de ruptura y sus efectos en el aceite aislante

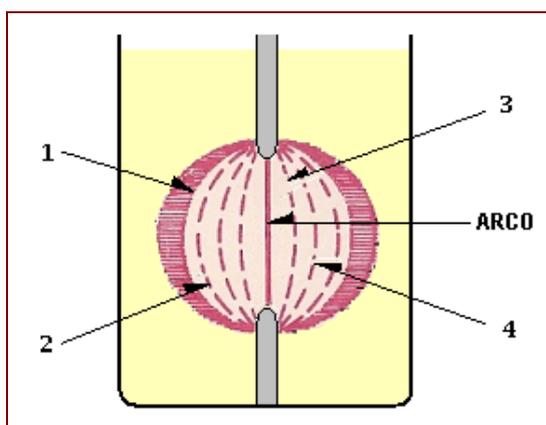
La inmersión de los contactos de ruptura en el aceite, no evita la formación del arco durante la separación de los contactos pero, en cambio, se consigue que la energía absorbida para la vaporización y descomposición del aceite, pueda utilizarse para enfriar enérgicamente la columna del arco y los propios contactos.

Las temperaturas en el centro del arco pueden alcanzar valores tan altos como del orden de 6000 a 8000 °C. Esto provocará la descomposición del aceite y dará lugar a la formación de carbón y liberación de gases, que bajo determinaciones experimentales se encuentran en el siguiente orden:

<i>Hidrógeno</i>	83%
<i>Metano</i>	9%
<i>Etileno</i>	4,2%
<i>Etano</i>	3,6
<i>Propano</i>	0,2%

Se puede apreciar que entre los gases generados, el hidrógeno predomina, a tal punto que se podría decir que el arco quema en una atmósfera de hidrógeno. Cabe recalcar que, todos estos gases están fuertemente ionizados, es decir, de sus átomos se han arrancado electrones.

El campo eléctrico originado por la tensión de reestablecimiento, impulsa a los iones positivos hacia el contacto que actúa como cátodo, mientras que los electrones y los iones negativos, rechazados por el cátodo, se dirigen hacia el ánodo. Los choques producidos por el movimiento de estas partículas producen nuevos iones, con lo que se aumenta la ionización de la columna que rodea al arco, contribuyendo también la emisión termoiónica de los contactos, que frecuentemente llegan a la temperatura de incandescencia por causa de la energía del arco en el momento de la ruptura. Esta masa de gases ionizados forma una bolsa en el seno del aceite, en cuyo interior se haya el arco.



**Figura 3.17** – Representación esquemática del proceso de ruptura en un interruptor inmerso en aceite aislante: 1) Zona de Vaporización, 2) Vapor saturado, 3) Hidrógeno, 4) Vapores recalentados

El núcleo del arco, queda rodeado de una zona de hidrógeno con temperatura de 500 a 800°C, que al ser éste, un gas con conductividad térmica bastante elevada, permite que se procese de manera eficiente la retirada de calor de las proximidades del arco. Alrededor de la capa de hidrógeno se encuentra una capa de vapor recalentado y sobre esta, una capa de vapor saturado cuya periferia constituye la zona de vaporización.

*El proceso de desionización del arco es debido, principalmente a la presencia del hidrógeno, cuya acción desionizante es 7,5 veces superior a la del aire.*

La polución del aceite por el carbón producido por el arco, aunque no afecta a sus cualidades desde el punto de vista de extinción del arco, si reduce sus propiedades dieléctricas, ensucia los contactos y los diferentes órganos y aislantes sumergidos en el aceite. Cabe recordar que éste es más peligroso al depositarse sobre la superficie de los aisladores bajo la acción de los campos electrostáticos.

Las partículas de carbón reducen la rigidez dieléctrica si ellas permanecen suspendidas en el aceite en apreciables cantidades, bajo normales circunstancias; no obstante, el carbón se aglomera y asienta en el fondo del tanque; la humedad ayuda a esta aglomeración y asentamiento.

Los gases pueden formar mezclas explosivas con el aire, que en caso de inflamarse el aceite, provocarían consecuentemente la explosión del interruptor.

*En conclusión todo el aceite usado en interruptores está sujeto al deterioro en servicio debido a la carbonización y a la presencia de agua, aún bajo las condiciones más favorables. Es por lo tanto esencial hacer inspecciones, pruebas periódicas y purificar el aceite siempre que sea necesario para mantenerlo en buena condición. Raramente necesitará ser cambiado por excesiva oxidación.*

### **3.3.2 INTERRUPTORES A GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF<sub>6</sub>**

#### **3.3.2.1 Degradación del gas hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) por efecto del arco de ruptura**

Las descargas eléctricas tienden a descomponer el gas en una intensidad proporcional a la energía de las mismas. Sobre la influencia del arco de ruptura, el SF<sub>6</sub> se descompone en sus elementos atómicos conforme la siguiente ecuación:

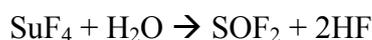
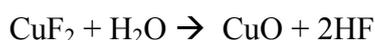


Disminuyendo la temperatura, la reacción se da rápidamente en la dirección opuesta, recomponiendo el SF<sub>6</sub>. La restauración del gas sería total si no hubiese

reacciones secundarias entre el gas descompuesto y los metales vaporizados de los contactos y otras partes estructurales del interruptor.

Los productos más comunes de estas reacciones secundarias son los fluoruros de cobre o tungsteno, tales como  $\text{CuF}_2$  y  $\text{WF}_6$ . Estos compuestos, sin embargo, son también no conductores, por lo tanto, una eventual asentamiento de los mismos en las paredes de la cámara del interruptor, no irá a afectar el desempeño del equipo. También podrá haber la formación de compuestos secundarios del azufre como el  $\text{SF}_4$  y el  $\text{S}_2\text{F}_2$  (no conductores).

Si el  $\text{SF}_6$  contuviera humedad, los productos secundarios ya mencionados, irán a reaccionar con el agua, liberando *ácido fluorhídrico* altamente corrosivo a materiales, conteniendo silicio (vidrio y porcelana) y tóxico, de acuerdo con las siguientes reacciones:



En el caso de los interruptores de potencia, el  $\text{SF}_6$  se encuentra en un sistema cerrado y prácticamente exento de humedad por toda la vida útil del equipo. Además de esto existe la presencia de filtros con elementos deshumidificadores para cualquier eventualidad, de manera que, el problema de humedad y de sus consecuencias, prácticamente no existe.

Se produce una cierta degradación del gas después de muchas extinciones de arco; sin embargo esta degradación es muy pequeña y tiene un efecto despreciable sobre la rigidez dieléctrica y las propiedades de extinción del gas SF<sub>6</sub>.

*Un arco producido con una energía de aproximadamente 1700kJ, descompone de manera significativa el gas SF<sub>6</sub>. Investigaciones han comprobado que producto de una descomposición de esta magnitud, se generan grandes cantidades de SOF<sub>2</sub>. Es así que se concluye, que la tasa de producción de dicho producto de descomposición, depende directamente de la energía del arco que ocurre en el gas.*

### **3.4 FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN Y/O DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS EQUIPOS ENCAPSULADOS**

#### **3.4.1 Análisis de la contaminación del gas SF<sub>6</sub> en operación**

Las impurezas tienen un pequeño efecto sobre las características eléctricas del gas SF<sub>6</sub>. Esto se lo ha podido constatar en varios análisis realizados por la MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION a equipos encapsulados luego de algunos años en operación.

El compartimento del interruptor, es el que presenta mayor concentración de contaminantes en el gas SF<sub>6</sub>, debido a la presencia a la descomposición de gases

producto del arco de interrupción. Estos contaminantes que generalmente se producen, se han determinado en base a muestras analizadas, y un ejemplo de ellas se detalla a continuación:

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>Resultados de análisis de la muestra de gas</b>
<i>Contenido de agua, en ppm</i>	3,7
<i>Fluoruro Hidrolizable, % en peso del gas</i>	0,03
<i>CF<sub>4</sub>, % en peso del gas</i>	0,018
<i>Acidez, % en peso del gas</i>	0,6
<i>Pureza, % en peso del gas</i>	99.7

**Tabla 3.4** – Resultados del análisis de una muestra de gas SF<sub>6</sub> del compartimento de un interruptor después de 10000 operaciones.

- El contenido de agua se hace presente desde el momento del montaje, situación en la cual se hace factible su ingreso en pequeñas proporciones, a pesar del cuidado empleado durante el proceso. El valor de 3,7 de la tabla, está muy por debajo del máximo recomendado por la norma, el cual corresponde a 10ppm.
- El contenido de fluoruro hidrolizable corresponde a la concentración de compuestos con fluoruro producto de la hidrólisis del SF<sub>4</sub>, como reacción secundaria entre el gas descompuesto por el arco y los metales vaporizados de los contactos u otras partes estructurales del interruptor. El valor de 0,03 de la tabla, esta muy por debajo del máximo recomendado por la norma, el cual corresponde a 1%.

- El contenido de  $\text{CF}_4$  es originado en el espacio del arco debido a los compuestos de carbono, tales como, compuestos orgánicos y  $\text{CO}_2$ . El  $\text{CO}_2$  es formado por la oxidación de material orgánico presente en el interruptor. El valor de 0,018 de la tabla, esta muy por debajo del máximo recomendado por la norma, el cual corresponde a 0.05%.
- El contenido de acido corresponde a la suma de  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , HF (originados por la hidrólisis del  $\text{SF}_4$ ) y  $\text{SF}_4$ . El valor de 0,6 de la tabla, esta muy por encima del máximo recomendado por la norma, el cual corresponde a 0.3%.

*En conclusión, significativa contaminación del gas  $\text{SF}_6$  por humedad, no es común en los equipos encapsulados, debido a su total operación hermética y a la restricción de las inspecciones periódicas internas, que podría ser la única fuente más probable de su ingreso. Sólo correspondería poner especial cuidado en el compartimento del interruptor, donde el arco de interrupción, incide sobre las propiedades dieléctricas del gas aislante, tal como se explica en el literal 3.3.2.1. Además, este último es el más propenso a ser abierto para trabajos de mantenimiento en los contactos, luego de cierto número de operaciones, recomendado por el fabricante.*

### **3.5 FACTORES DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS BUSHING'S Y AISLADORES EN GENERAL**

#### **3.5.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Los bushing's y aisladores en general, a pesar de cumplir similar función básica de brindar al ambiente una distancia segura de aislamiento entre puntos energizados y tierra, poseen una importante diferencia en cuanto a su funcionalidad.

Los *bushings* en servicio son recorridos en su interior por una corriente eléctrica, la cual crea un campo magnético que aporta en la fijación de partículas y óxidos metálicos en la superficie de la porcelana. En tanto que, los *aisladores* no son recorridos por alguna corriente eléctrica y no están sujetos a este tipo de fenómeno.

Esta característica contribuye considerablemente a los efectos de la contaminación radicada especialmente en la superficie exterior de la porcelana expuesta al ambiente, que es por donde se crean los caminos preferenciales de descargas.

#### **3.5.2 AGENTES CONTAMINANTES**

Los agentes contaminantes del ambiente pueden ser *inorgánicos* y *orgánicos*. Los primeros son considerados como los principales agentes de la contaminación de los bushing's y aisladores.

*Los agentes inorgánicos*, pueden ser: cenizas, partículas de carbón y metálicas, sales inorgánicas (cloruro de sodio, sulfato de sodio, cloruro de magnesio), ácidos, polvo de cemento, polvo de arcilla, polvo de piedra calcárea, arena, fertilizantes y otros.

Cuando se combinan con el agua, las sales minerales liberan iones y el electrolito formado es propicio para conducir la corriente superficial. Los polvos de cemento, arcilla y piedra calcárea, y los fertilizantes orgánicos no son conductores, pero pueden ser hidrofílicos y mantener húmeda la superficie del aislador. Si la humedad es elevada, pueden pasar de no conductores a conductores y crear la situación crítica de descarga superficial.

*Los agentes orgánicos*, pueden ser: polen, esporas de vegetales, bacterias y otros. Estos no son conductores, aunque adicionalmente se combinen con agua.

### **3.5.3 PROCESO DE LA CONTAMINACIÓN**

Se considera que el movimiento de los vientos y el depósito de humedad, son los dos factores más influyentes en el proceso de contaminación de los bushing's y aisladores en general.

Investigaciones realizadas coinciden en que los bushing's y aisladores más próximos a la fuente de contaminación no son efectivamente contaminados en

comparación con los situados a distancias mayores. Por tanto, la causa probable de este fenómeno es el régimen de los vientos.

*La dirección de los vientos es un factor importante en la contaminación de los bushing's y aisladores.*

La condensación de la humedad en la superficie de un aislador es otro factor que contribuye en la contaminación. Esta ocurre cuando la temperatura del aislador alcanza el punto de rocío, apreciable por lo general en las horas frías de la madrugada.

*La humidificación de los bushing's y aisladores por la lluvia y la neblina favorece la adherencia de partículas extrañas en su superficie.*

Es de conocimiento, que muchas explosiones de los bushing's, han sido consecuencia de infiltración de humedad en su parte interna, ocurriendo descargas francas del conductor al flange con rompimiento del dieléctrico (porcelana). Este hecho puede ser explicado, considerándose que los bushing's con aislamiento no condensivo presentan un proceso de pequeñas descargas entre la parte interna de la porcelana y el conductor. Tales descargas pueden con el tiempo ocasionar la oxidación del conductor, bien como, la oxidación del aire interno en el bushing. Así en el caso de infiltración podrá haber una descarga en esta región, por tratarse del punto de mayor gradiente de potencial.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. LOS ENSAYOS DIELECTRICOS Y SU APLICACIÓN EN EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN**

#### **4.1 DEFINICIÓN DE ENSAYOS DIELECTRICOS**

Se define como ensayos dieléctricos, al conjunto de mediciones y verificaciones que se efectúan para determinar las características del sistema de aislamiento de un equipo.

El término “sistema de aislamiento” se refiere al subconjunto total de materiales aislantes que se involucran en la construcción de un equipo eléctrico, con la finalidad de interactuar entre sí y brindar una barrera de aislamiento entre sus partes conductoras y entre estas con respecto a la masa sólidamente aterrizada.

Someter los materiales aislantes de los equipos de alta tensión a determinados ensayos dieléctricos, es demostrar si ellos son aptos para soportar los requisitos especificados. De esta forma, se tiene una cierta garantía de que los materiales eléctricos de alta tensión podrán operar satisfactoriamente en las condiciones reales del sistema, simuladas durante los ensayos.

## **4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS**

### **1) En cuanto al tipo de tensión utilizada**

- a. Tensión AC (Sinusoidal)
- b. Tensión DC
- c. Tensión de Sobrevoltaje

### **2) En cuanto a la finalidad u objetivo**

- a. Ensayos de aceptación
  - Ensayo de aceptación en fábrica
  - Ensayo de aceptación en campo
- b. Ensayos de mantenimiento (periódicos)
- c. Ensayos después de una falla

### **3) En cuanto a las condiciones ambientales**

- a. Ensayos en ambiente seco
- b. Ensayos sobre lluvia artificial
- c. Ensayos de polución artificial

#### **4) En cuanto al nivel de sollicitación dieléctrica**

- a. Ensayos destructivos
- b. Ensayos no destructivos

### **4.3 PRINCIPIO BÁSICO DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS**

#### **4.3.1 ENSAYOS AC**

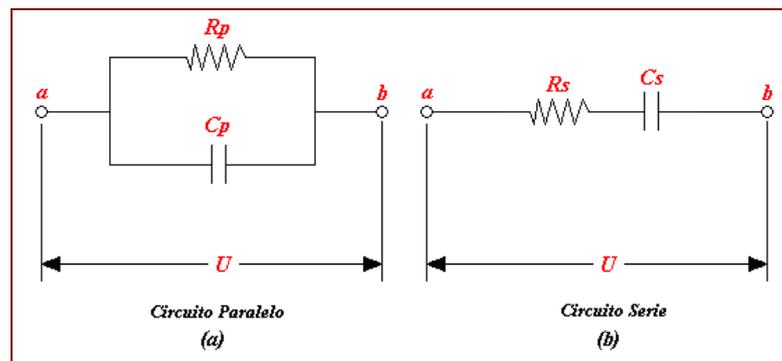
##### **4.3.1.1 Ensayo para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Pérdidas del aislamiento**

###### **4.3.1.1.1 Teoría fundamental en la que se basa este ensayo**

El sistema de aislamiento asociado con los diferentes equipos de alta tensión, frecuentemente consiste de una mezcla de partes componentes no homogéneas. Una representación esquemática exacta de este sistema como tal, puede ser completamente compleja y difícil de componer, talvez consistiendo de un número de elementos resistores y capacitores arreglados de muchas formas.

Para discusión y análisis, es conveniente representar un espécimen de aislamiento por un solo capacitor combinado con un solo resistor. El elemento capacitor representa la capacitancia fundamental del espécimen (es decir, su

habilidad para almacenar eléctricamente cargas separadas), mientras que el elemento resistor representa las pérdidas (en Watts) disipadas en el aislamiento cuando un voltaje es aplicado. De este modo, existen dos formas posibles para combinar estos elementos, según se muestra en la siguiente figura:



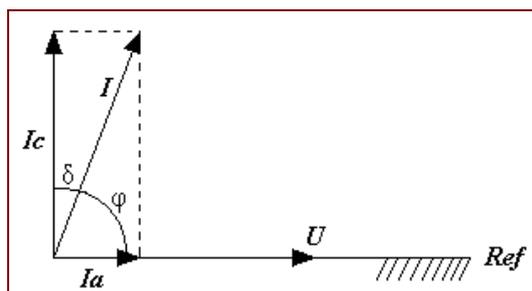
**Figura 4.1** - Circuitos equivalentes simplificados de un espécimen de aislamiento

Por lo tanto, un espécimen de aislamiento que tiene un factor de potencia dado como medida entre sus terminales, puede ser representado igualmente por un circuito serie ( $C_s$  y  $R_s$ ) o paralelo ( $C_p$  y  $R_p$ ).

El sistema de aislamiento de los equipos de alta tensión es seleccionado en parte por su bajo factor de potencia, y el instrumento empleado para su determinación, normalmente basa su análisis en el circuito equivalente en paralelo ( $C_p$  y  $R_p$ ); siendo  $U$ , la diferencia de potencial aplicada durante el ensayo.

Un *aislamiento ideal* se comporta como un capacitor sin pérdidas, que ante la presencia de un voltaje alterno será recorrido por una corriente de carga  $I_c$ , adelantada en  $90^\circ$  respecto a la tensión aplicada. En tanto que, con un *aislamiento real*, adicionalmente a la corriente de carga aparece una corriente activa  $I_a$  en fase con la tensión aplicada, originando una fuga de potencia activa a través del aislamiento, la que se manifiesta produciendo calentamiento debido al efecto Joule.

Así, al someter el dieléctrico a una tensión alterna  $U$ , fluirá una corriente  $I$  en su interior (corriente de fuga), mayor o menor dependiendo de la rigidez dieléctrica del material. Esta corriente puede ser subdividida en una componente reactiva capacitiva ( $I_c$ ) y una componente activa ( $I_a$ ). El ángulo  $\delta$  formado entre  $I$  e  $I_c$  es llamado el *ángulo de pérdidas dieléctricas*, el mismo que se lo aprecia en la siguiente figura:



**Figura 4.2** - Diagrama fasorial simplificado de las corrientes presentes en el dieléctrico

De este diagrama vectorial se puede definir lo siguiente:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{I_a}{I_c} \quad (4.1)$$

la misma expresión que en términos porcentuales se expresaría como:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{I_a}{I_c} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

*Para un aislamiento ideal,  $I_a$  es igual a cero, y de acuerdo a la expresión anterior la  $\operatorname{tg}(\delta)$  también sería igual a cero; pero en la práctica  $I_a$  es mayor que cero y la  $\operatorname{tg}(\delta)$  toma diferentes valores, de acuerdo con la calidad del aislamiento, siendo estos crecientes a medida que se produce su deterioración o envejecimiento.*

La magnitud  $I_a/I_c$  conocida como “la tangente de delta” ( $\operatorname{tg}(\delta)$ ) se denomina “**Factor de Pérdidas del aislamiento**” o “**Factor de Disipación**”, y esta permite verificar las condiciones iniciales de un aislamiento y de igual forma detectar las variaciones en las características de este a lo largo de su vida útil.

Considerándose el ángulo  $\delta$  un ángulo muy pequeño, se tiene que aproximadamente:

$$\cos(\varphi) = \operatorname{tg}(\delta) \quad (4.3)$$

Siendo  $\varphi$  el ángulo entre la tensión aplicada  $U$  y la corriente de fuga resultante  $I$ , se define el  $\cos(\varphi)$  como el “**Factor de Potencia del aislamiento**”. En otros términos el  $\cos(\varphi)$ , también es equivalente a la relación entre la potencia en Watt (W) disipada en el material y el producto de la tensión sinusoidal eficaz  $U$  y la corriente de fuga  $I$ , en Volt-ampere (VI).

$$\cos(\varphi) = \frac{\text{Watts}}{VI} \quad (4.4)$$

*Debido a que para ángulos  $\delta$  pequeños, el factor de potencia del aislamiento es aproximadamente igual al factor de pérdidas, el  $\cos(\varphi)$  también puede utilizarse para calificar las condiciones del aislamiento.*

Cabe recalcar, que aunque el factor de potencia sea definido por la misma expresión matemática que la de un circuito de corriente alterna, los conceptos no deben ser confundidos. Mientras que en un circuito de corriente alterna el factor de potencia debe asumir valores altos; en el caso del dieléctrico, este deberá ser lo menor posible.

Las pérdidas por calentamiento que surgen en el dieléctrico, cuando este es sometido a un campo eléctrico producido por la tensión aplicada de ensayo, pueden ser calculadas a través de la siguiente expresión:

$$P_{di} = U^2 \omega C \operatorname{tg}(\delta) \quad (4.5)$$

donde:

$P_{di}$ : pérdidas en el dieléctrico, (Watts);

$U$ : tensión aplicada, (Voltios);

$\omega$ : frecuencia angular  $2\pi f$  (rd/s), siendo  $f$  la frecuencia de la tensión aplicada;

$C$ : capacitancia del dieléctrico, (faradios);

$\operatorname{tg}(\delta)$ : tangente de pérdidas.

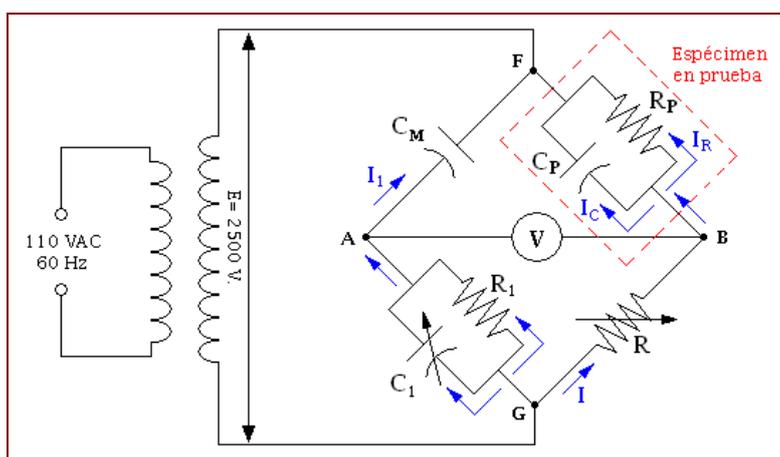
*El factor de potencia siempre será la relación de los watts de pérdida entre la carga en voltios-amperios, y el valor obtenido será independiente del área o espesor del aislamiento y dependerá únicamente de la humedad, la ionización y la temperatura.*

No existe hasta el presente momento una relación de valores límites que pueda traducir de inmediato las condiciones dieléctricas de un equipo, siendo que cada uno posee su factor de potencia específico. Debido a este hecho, se debe obtener un primer factor de potencia en el momento de la recepción del equipo y las demás mediciones deben ser periódicamente hechas y comparadas con los valores anteriores.

#### 4.3.1.1.2 Principio de funcionamiento del instrumento utilizado para el ensayo

El instrumento utilizado para la determinación del factor de potencia del aislamiento de un equipo, normalmente basa su análisis en la determinación de los Volt-amperes y las pérdidas en Watts que se generan en el mismo durante el ensayo, esto para una tensión de ensayo AC de acuerdo al modelo utilizado.

Su principio de funcionamiento, se basó en el uso de varios circuitos básicos conocidos como “PUENTES”. El primero de ellos es el “PUENTE SCHERING” fabricado por HARTMANN & BRAUN, y se lo empleó para la medición de capacitancias y resistencias del sistema de aislamiento de los equipos, siendo su esquema básico el siguiente:



**Figura 4.3** - Circuito básico de un Puente Schering

Dos de las ramas de este circuito, constituida la una por el condensador de aire sin pérdidas  $C_M$  y la otra por el espécimen en prueba ( $C_p$  y  $R_p$ ), se hallan sometidas a la alta tensión; en tanto que las otras dos, formadas por las resistencias de precisión  $R_I$  y  $R$ , y el condensador regulable  $C_I$ , se hallan conectadas a bajo voltaje.

La medición se efectúa variando  $C_I$ ,  $R_I$  y  $R$ , hasta conseguir el equilibrio del puente, marcando cero el instrumento, es decir  $V_{AB}=0$ . En este instante se tiene que:

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{R_p + jC_p w}\right)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{R_I + jC_I w}\right)} = R \cdot \left(\frac{1}{jC_M w}\right) \quad (4.6)$$

de donde:

$$C_p = \left(\frac{R_I}{R}\right) \cdot \left(\frac{C_M}{1 + (R_I C_I w)^2}\right) \quad (4.7)$$

$$R_p = \left(\frac{R}{R_I}\right) \cdot \left(\frac{1 + (R_I C_I w)^2}{(R_I C_I C_M w)^2}\right) \quad (4.8)$$

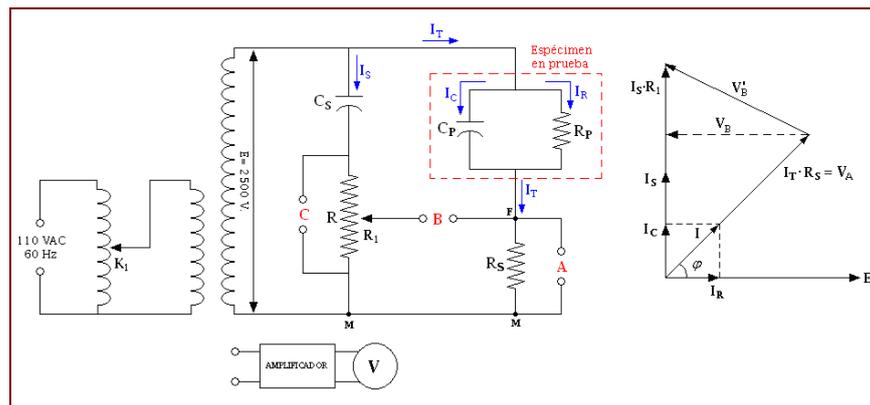
Con estos valores, finalmente es posible calcular el factor dieléctrico de disipación por:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{(R_p C_p \omega)} \quad (4.9)$$

donde  $\omega = 2\pi f$

Posteriormente, el factor de potencia del aislamiento, también pudo ser determinado utilizándose instrumentos especiales construidos por la DOBLE ENGINEERING COMPANY, conocidos por el nombre de “PUENTES DOBLE”. De estos, existen dos tipos en el mercado y se diferencian por la tensión de ensayo aplicada, la cual puede ser de 2500 o 10000 Voltios AC.

El primer Puente Doble puede ser utilizado en cualquier equipo eléctrico cuyo aislamiento soporte por lo menos 2500 Voltios y su circuito básico es el siguiente:



**Figura 4.4** - Circuito básico y diagrama fasorial de un Puente Doble de 2500 Voltios.

donde:

$E$ : es el voltaje de ensayo (2500 Voltios)

$C_S$ : es un capacitor padrón (de aire), propio del instrumento, colocado en serie con el resistor  $R$  variable.

$I_T$ : corriente total del espécimen bajo ensayo, compuesta de sus componentes capacitiva  $I_C$  y activa  $I_R$ .

$R_S$ : es un resistor padrón, fijo, del instrumento;

$V$ : es un voltímetro graduado en MVA y MW, de 0 a 100, acoplado a un amplificador, que puede ser conectado en A, B o C.

$C_P$  y  $R_P$ : representan el equivalente en paralelo de la capacitancia y la resistencia del espécimen bajo ensayo.

El instrumento es construido de tal modo que:

$$\frac{1}{C_S \cdot \omega} \gg R \qquad \frac{1}{C_P \cdot \omega} \gg R_S \qquad (4.10)$$

El valor de la capacitancia del capacitor  $C_S$  es mucho mayor que el de la resistencia del resistor  $R$  y de igual forma con el capacitor  $C_P$  y el resistor  $R_S$ .

Por esta razón, las corrientes  $I_S$  e  $I_C$  están prácticamente adelantadas de  $90^\circ$  y la corriente  $I_R$  en fase con la tensión  $E$ , que es la tensión aplicada al espécimen bajo ensayo.

Cuando el amplificador es conectado en **A**, queda sometido a la diferencia de potencial  $R_S \cdot I_T$ , siendo por lo tanto, su indicación  $V_A$  proporcional a  $I_T$ , una vez que  $R_S$  es fija. La lectura será en la escala graduada en mVA, debido a que corresponde a la corriente total que recorre el espécimen bajo ensayo.

Cuando el amplificador es conectado en **B**, la resistencia  $R$  es variada hasta que el indica un valor mínimo correspondiente al fasor  $V_B$  del diagrama, teniendo las siguientes relaciones

$$V_B = R_S \cdot I_T \cos(\varphi) \quad (4.11)$$

$$I_R = I_T \cos(\varphi) \quad (4.12)$$

De las cuales al reemplazar la ecuación (4.12) en la ecuación (4.11), se tiene finalmente que:

$$V_B = R_S \cdot I_R \quad (4.13)$$

Esta expresión muestra que  $V_B$  es proporcional a la componente activa  $I_R$ , debiendo por lo tanto, ser efectuada la lectura en la escala graduada en mW en esta posición.

Del diagrama fasorial mostrado en la figura 4.4, se verifica que el factor de potencia  $\cos(\varphi)$  está dado por:

$$\cos(\varphi) = \frac{V_B}{V_A} = \frac{R_S \cdot I_R}{I_T \cdot R_S} = \frac{I_R}{I_T} \quad (4.14)$$

Es decir:

$$\cos(\varphi) = \frac{mW}{mVA} \quad (4.15)$$

El segundo Puente Doble cuya tensión aplicada es de 10000 V, es utilizado en equipos de mayor tensión (mayores a 138KV) y su circuito básico es el siguiente:

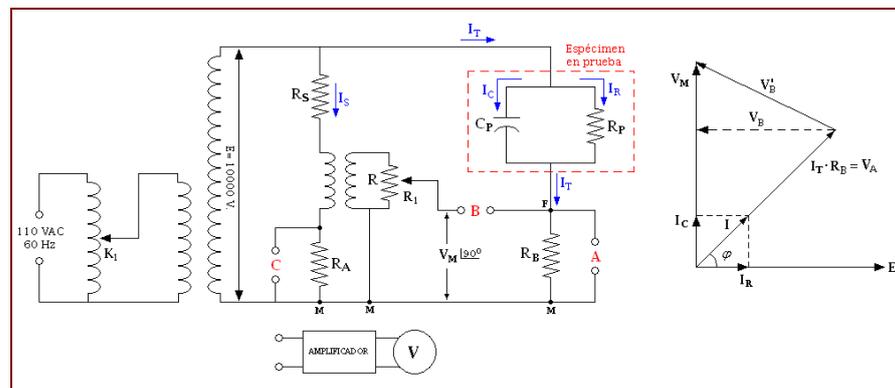


Figura 4.5 - Circuito básico y diagrama fasorial de un puente Doble de 10000 Voltios

donde:

$E$ : es el voltaje de ensayo (10000 Voltios)

$I_T$ : corriente total del espécimen bajo ensayo, compuesta de sus componentes capacitiva  $I_C$  y activa  $I_R$ .

$R_s$ : es un resistor patrón de alta resistencia ohmica, propio del instrumento.

$R_B, R_A$ : son resistores patrón propios del instrumento.

$C_P$  y  $R_P$ : representan el equivalente en paralelo de la capacitancia y la resistencia del espécimen bajo ensayo.

$V$ : es un voltímetro graduado en mVA y mW, de 0 a 100, acoplado a un amplificador, que puede ser conectado en A, B o C.

Cuando el amplificador es conectado en la posición **C**, permite ajustar el puntero al final de la escala por medio de un dispositivo de control, es decir, el instrumento amplificador se normaliza, esto con la finalidad de chequearlo.

Si el amplificador es conectado en **B**, el instrumento indicará la diferencia entre las tensiones de  $V_A$  y  $V_M$ . Variándose  $R$ , varía la tensión  $V_M$  y se consigue para  $V_A$  un valor mínimo. Este valor, multiplicado por el factor de multiplicación correspondiente, es igual a las pérdidas dieléctricas en Watts del espécimen bajo ensayo. Además, con el amplificador en esta posición se puede obtener la capacitancia.

Cuando el amplificador es conectado en la posición **A**, la indicación en el instrumento dependerá de la caída de tensión en el resistor  $R_B$ , que es igual al producto de su resistencia por la corriente, esto es:

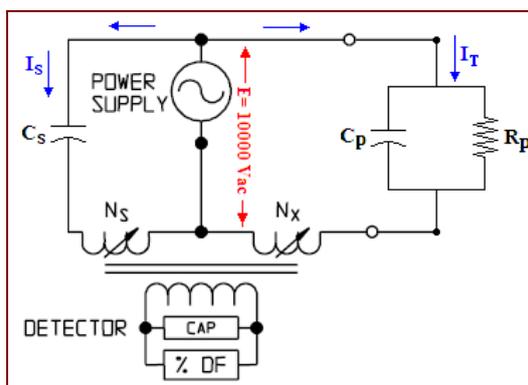
$$V_A = R_B \cdot I_T \quad (4.16)$$

Con el amplificador en esta posición el instrumento indicará el valor de la corriente total del espécimen bajo ensayo (en miliamperios).

Por lo tanto, al obtener los valores de pérdidas dieléctricas en Watts y de la corriente total del espécimen bajo ensayo, se podrá determinar al factor de potencia del mismo, aplicándose la formula ya mencionada:

$$FP = \cos \varphi = \frac{\text{Watts}}{E \cdot I_T} = \frac{E \cdot I_R}{E \cdot I_T} = \frac{I_R}{I_T} \quad (4.17)$$

Finalmente, la MEGGER Company crea un instrumento basado en la determinación del Factor de Disipación del aislamiento, cuyo circuito puente básico comprende de un transformador de corriente diferencial de tres arrollamientos, como muestra la siguiente figura:



**Figura 4.6** - Circuito básico y diagrama fasorial de un puente Megger de 10000 Voltios

donde:

$E$ : es el voltaje de ensayo (0 a 10000 Voltios AC)

$I_T$ : corriente total del espécimen bajo ensayo, compuesta de sus componentes capacitiva  $I_C$  y activa  $I_R$ .

$C_P$  y  $R_P$ : representan el equivalente en paralelo de la capacitancia y la resistencia del espécimen bajo ensayo.

$C_S$ : capacitancia padrón, propia del instrumento

$N_S$ ,  $N_X$ : número de vueltas de arrollamiento variable.

Los amperios-vueltas debido a la corriente  $I_T$  a través del espécimen bajo ensayo ( $C_P$ ) son balanceados por los amperios-vuelta debido a la corriente  $I_S$  pasando a través del capacitor de referencia  $C_S$ . El mismo voltaje es aplicado a los dos capacitores por la fuente de voltaje. Un balance amperio-vuelta es obtenido por la componente de cuadratura de la corriente (debido a la capacitancia), por ajuste automático de las vueltas  $N_x$  y  $N_s$ .

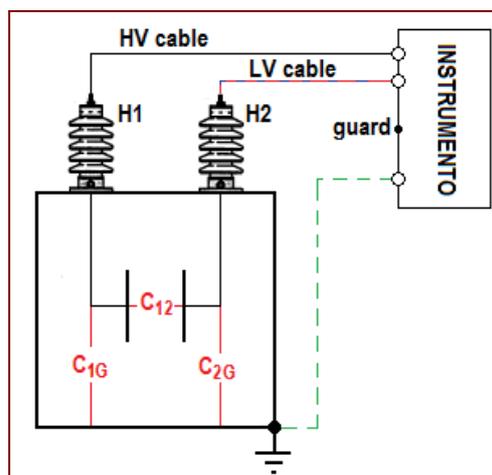
Desde que la corriente del espécimen  $I_T$  incluye una componente en fase debido a pérdidas y una componente en cuadratura debido a la capacitancia del aislamiento, una corriente residual aparecerá en el tercer arrollamiento después de que la capacitancia ha sido balanceada. Esta última representa la componente de pérdidas de la corriente de ensayo, la cual es automáticamente balanceada para producir el factor de disipación.

En las *figuras anexas 4.1.A,B,C,D,E,F,G,H,I* se presentan en detalle los instrumentos de ensayo actualmente usados para la determinación tanto del Factor de Potencia como del Factor de Disipación del aislamiento de los equipos de alta tensión, además sus principales componentes y accesorios.

### **MODOS DE ENSAYO**

Independientemente del fabricante o modelo (antiguo o moderno), estos instrumentos de ensayo presentan como particularidad en común, disponer en su diseño la selección del tipo de modo de ensayo a aplicar, designados como: *modo UST, modo GSTground o modo GSTguard*.

Para entender el significado de cada uno de estos modos partimos del análisis del ensayo aplicado a un capacitor normal como muestra la siguiente figura:



*Figura 4.7 - Esquema de análisis de un capacitor para interpretar los modos de ensayo*

### 1) Modo UST

En este modo se analiza exclusivamente la corriente que circula a través del aislamiento del capacitor  $C_{12}$ , efectuando la medición entre los bushing's  $H1$  y  $H2$ . Adicionalmente el instrumento de ensayo discrimina de la medición la corriente de fuga que circula entre el bushing  $H1$  y tierra, conectando internamente a guarda la masa sólidamente aterrizada del equipo en análisis.

### 2) Modo GSTground

En este modo el instrumento internamente conecta a tierra el cable LV (de bajo voltaje) y efectúa la medición entre el bushing  $H1$  de aplicación de alto voltaje y la masa del equipo sólidamente aterrizada, analizándose con el ensayo las corrientes que circulan a través de los aislamientos  $C_{1G}$  y  $C_{12}$  en paralelo.

### 3) Modo GSTguard

En este modo el instrumento internamente conecta a guard el cable LV (de bajo voltaje), para discriminar del análisis la corriente que circula a través del aislamiento  $C_{I2}$ . De esta forma, se analiza exclusivamente la corriente que circula a través del aislamiento  $C_{IG}$  involucrado entre el bushing **HI** de aplicación de alto voltaje y la masa del equipo sólidamente aterrizada.

*En conclusión, la función de cada uno de estos modos de ensayo es determinar la sección de aislamiento a analizar tomando como referencia principal el punto de aplicación de alto voltaje (que para este caso fue el bushing HI).*

#### 4.3.1.1.3 Factor de Potencia versus Factor de Disipación

El *factor de potencia* y el *factor de disipación* son casi iguales hasta un valor de 10%, valor por debajo del cual se hallan la mayoría de los resultados de ensayos de aislamiento de equipos de alta tensión. Dentro de este rango de valores, no se puede suponer que una terminología sea “mejor” que la otra para indicar la calidad del aislamiento.

Sin embargo, la ventaja de utilizar el factor de potencia, es que éste permite analizar el rango total de valores posibles del aislamiento de un equipo, el cual esta enmarcado entre “0” y “1”. Es decir, un espécimen con factor de potencia

“0” (sin pérdidas) es puramente capacitivo, mientras que con “1” (100%) significa que este es puramente resistivo. Por otro lado, la desventaja del factor de disipación, radica en su tendencia al infinito en el caso de un espécimen puramente resistivo. De esta forma, el factor de potencia es considerado como una mejor guía para la evaluación.

La mayoría de los instrumentos de ensayo que miden factor de disipación y que se encuentran disponibles comercialmente, tienen especificados valores máximos de  $\tan(\delta)$  los cuales van de 40% a 200% (estos corresponden a ángulos  $\delta$  de 22° y 63°, respectivamente); estos instrumentos no son apropiados para ensayos de diagnósticos generales para las cuales una capacidad de 90° es esencial. Entre los especímenes altamente resistivos más comunes, se encuentran, los pararrayos de bajo voltaje y aparatos de potencial tipo resistivos.

Potencialmente, todos los sistemas de aislamiento con pérdidas bajas pueden convertirse en altamente conductivos cuando se desarrollan situaciones de falla no deseables, haciendo necesaria la capacidad de medir exactamente las características de impedancia a lo ancho del rango desde capacitor hasta una resistencia pura.

Un ejemplo de lo explicado anteriormente se muestra en la siguiente tabla, que compara el porcentaje de Factor de Potencia (%FP) con el porcentaje de Factor de Disipación (%FD) para varios ángulos.

$\varphi^\circ$	<i>%FP</i> ( <i>%cos(<math>\varphi</math>)</i> )	$\delta^\circ$	<i>%FD</i> ( <i>%tan(<math>\delta</math>)</i> )
90.00	0.00	0.00	0.00
84.26	10.00	5.74	10.05
81.37	15.00	8.63	15.18
78.46	20.00	11.54	20.42
72.54	30.00	17.46	31.45
66.42	40.00	23.58	43.65
53.13	60.00	36.87	75.00
45.00	70.71	45.00	100.00
0.00	100.00	90.00	infinito

**Tabla 4.1** – Relaciones entre factor de potencia y factor de disipación

#### 4.3.1.1.4 Factores que afectan las lecturas del ensayo

##### *a) Influencia de la temperatura*

Las características eléctricas de la mayoría de los materiales aislantes varían con la temperatura. En general, el factor de pérdidas y/o factor de potencia, aumenta con el incremento de la temperatura. Debido a este fenómeno, es de vital importancia determinar en lo posible la temperatura del espécimen en análisis, durante la ejecución de los ensayos.

Para los efectos de comparar los resultados de las mediciones obtenidas sobre un mismo equipo a diferentes temperaturas, es necesario conocer la curva de variación propia de este en particular y referir todas las medidas a una temperatura común, la cual normalmente es 20°C. En estas condiciones, la variación de los valores de la  $tg(\delta)$  y el  $cos(\varphi)$  se pueden atribuir exclusivamente a alteraciones en las características del aislamiento.

***b) Influencia de la inducción***

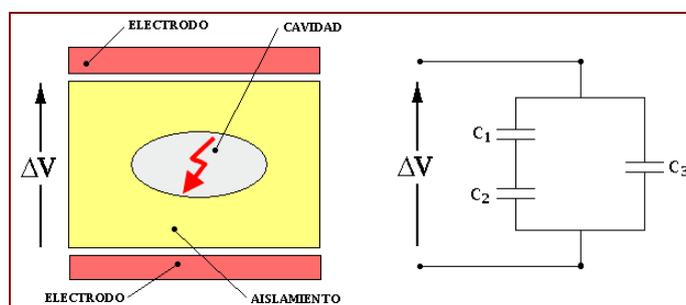
Cuando los ensayos se efectúan en las proximidades de equipos energizados, los valores que se obtienen pueden resultar influenciados por las tensiones inducidas en el instrumento o en el circuito de ensayo. Para reducir esta influencia, los instrumentos y cables de ensayo deberán tener un blindaje electrostático, el mismo que será conectado a tierra durante las mediciones. Este blindaje contribuye además a la protección del operador, ya que despeja cualquier tensión que pudiera aparecer por fallas de aislamiento en el circuito de ensayo, o por contactos fortuitos con fuentes externas de alta tensión. Si a pesar del blindaje se tiene la duda de la aparición de tensiones inducidas, se deben aplicar métodos correctivos.

### 4.3.1.2 Ensayo para medición de Descargas Parciales en el aislamiento

#### 4.3.1.2.1 Teoría fundamental en la que se basa este ensayo

Las descargas parciales es un fenómeno que esta constituido por descargas con poca energía localizadas exclusivamente en el dieléctrico, que no provocan su perforación completa, pero pueden conllevarlo a su deterioración. Los centros de localización de tales descargas, son principalmente pequeñas burbujas gaseosas en el dieléctrico tanto sólido como líquido, en los cuales el gradiente de potencial puede superar la rigidez dieléctrica, provocando el surgimiento de pequeñas descargas localizadas. Cualquiera que sea el origen de la burbuja, la presencia de las descargas parciales provoca la descomposición del medio impregnante con formación de gas, que como primera consecuencia produce el aumento de la misma.

Considerando un medio aislante formado por dos superficies planas y suponiéndose que existe una única burbuja en su interior, tendremos:



**Figura 4.8** - Esquema eléctrico de un dieléctrico con presencia de una burbuja gaseosa

donde:

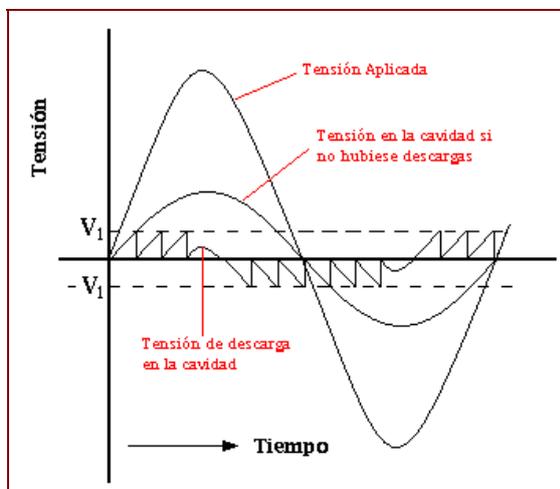
$C_1$ : Capacidad de la burbuja donde se produce la descarga parcial

$C_2$ : Capacidad del aislante en la región de la burbuja en serie con  $C_1$

$C_3$ : Capacidad del resto del dieléctrico (prácticamente igual a la capacidad  $C$  del capacitor sin la burbuja).

$\Delta V$ : Tensión aplicada al dieléctrico.

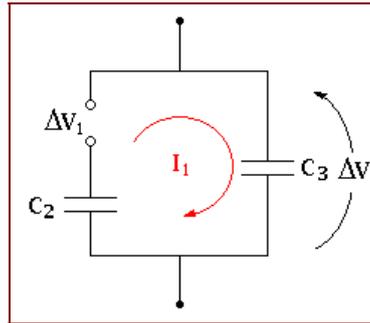
Cuando la tensión  $V_1$ , a la cual se encuentra sometida la burbuja  $C_1$ , fuera instantáneamente superior a su rigidez dieléctrica, esta será cortocircuitada. En el caso de que esa tensión sea elevada, aumentará también el número de descargas, de acuerdo a lo mostrado en la siguiente figura:



**Figura 4.9** - Trayectoria de la tensión en el circuito de la figura #4.8, cuando existen las descargas parciales

A cada descarga parcial, la tensión decrece casi instantáneamente de  $V_1$ , diferencia entre el valor de inicio y de extinción de descarga.

En el instante de la descarga, el capacitor correspondiente a la cavidad o burbuja ( $C_1$ ) es cortocircuitado, inyectando una corriente  $I_1$  en el circuito, cuya representación sería la siguiente:



**Figura 4.10** - Circuito equivalente del dieléctrico en presencia de una descarga parcial

de donde:

$$I_1 = \frac{\Delta V_1}{XC_3 + XC_2} \quad (4.18)$$

$$\Delta V = XC_3 \cdot I_1 \quad (4.19)$$

Reemplazando la ecuación (4.18) en la ecuación (4.19), se tiene lo siguiente:

$$\Delta V = \frac{XC_3}{XC_2 + XC_3} \cdot \Delta V_1 \quad (4.20)$$

$$\Delta V = \frac{1}{\frac{1}{\omega C_2} + \frac{1}{\omega C_3}} \cdot \Delta V_1$$

Por tanto, en el instante que ocurre la descarga parcial, la tensión en los terminales de  $C$  varía conforme a:

$$\Delta V = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \cdot \Delta V_1 \quad (4.21)$$

La carga aparentemente transferida en el capacitor total ( $C$ ) durante la descarga de la burbuja es:

$$q = C \cdot \Delta V \quad (4.22)$$

Mientras que, la carga real transferida durante la descarga parcial es:

$$q_1 = C_1 \cdot \Delta V_1 \quad (4.23)$$

En el momento de la descarga en la cavidad, se tiene que:

$$C = C_2 + C_3 \quad (4.24)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones (4.21) y (4.24) en la ecuación (4.22) se concluye que la carga aparente es igual a:

$$q \cong \frac{C_2}{C_1} \cdot q_1 \quad (4.25)$$

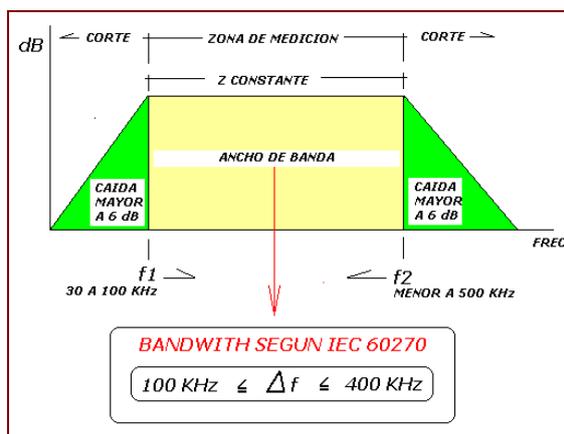
Observando esta expresión final, desde el punto de vista eléctrico sería interesante conocer la carga real transferida ( $q_1$ ) durante la descarga parcial del condensador  $C_1$ . Sin embargo, esta carga no puede ser medida, debido a que las mediciones solamente pueden ser realizadas en los terminales del capacitor  $C$ . De igual manera, no se conoce la relación  $C_2/C_1$ .

*En términos de ensayo podemos trabajar apenas con la carga que es denominada **carga aparente** ( $q$ ).*

#### **4.3.1.2.2 Instrumentos utilizados para este ensayo**

La variable más significativa que puede ser medida para indicar la presencia y la magnitud de las descargas parciales, es la ***carga aparente de la descarga de mayor amplitud***.

Para poder medir esta variable pueden ser utilizados instrumentos de banda ancha (50 a 200KHz) o de banda estrecha (10KHz), adecuadamente acoplados en los circuitos de medida. La característica de las descargas parciales y su sistema de propagación, aconsejan efectuar una medición con frecuencia central de banda comprendida entre 100 y 400KHz.



**Figura 4.11** - Ancho de banda y frecuencias de corte para la medición de descargas parciales

*El ancho de banda se define como el intervalo de frecuencia en donde la impedancia de transferencia  $Z$  se mantiene constante (caída no mayor a 6dB).*

En el comercio existen diversos instrumentos de banda ancha fabricados especialmente para este ensayo, que muestran los resultados directamente en pico-coulomb. Algunos instrumentos indican valores de descargas parciales en decibeles (dB), pudiendo ser usados para la determinación de la carga aparente, si son debidamente calibrados en pico-coulomb.

También son utilizados instrumentos para la medida de RIV (Radio Interference Voltaje) que presentan banda pasante en torno de 10KHz y frecuencia de medición variable (Siemens). Estos instrumentos, que generan valores de  $\mu\text{V}$  también pueden ser utilizados para la determinación de la carga aparente, si son debidamente calibrados en pico-coulomb.

El instrumento de medida se complementa con un osciloscopio que permite individualizar la presencia de interferencias proveniente de la red de alimentación o captadas por vía electromagnética. Además, permite en algunos casos identificar el tipo de descarga que está siendo observada.

*Diversos especialistas en descargas parciales no recomiendan la utilización de instrumentos de banda estrecha, principalmente cuando los valores a ser medidos fueran muy pequeños (por ejemplo en ensayos de bushing's y transformadores para instrumentos).*

La medición de descargas parciales en el aislamiento en general de los equipos de alta tensión, involucra el uso de varios instrumentos básicos acoplados entre sí para su determinación; siendo estos los siguientes:

- 1) **Capacitor de acoplamiento (COUPLER):** Cumple la función de un divisor capacitivo y su voltaje nominal se elige en base al equipo a ensayar. Esto, debido a que la alta tensión es aplicada en paralelo tanto al capacitor de acople como el objeto bajo ensayo.
  
- 2) **Dispositivo de acoplamiento (CUADRIPOLLO ó impedancia de medición):** Permite realizar mediciones sincronizadas de las descargas y reproducir la forma de onda de la tensión de ensayo. Es conocido como de “barra

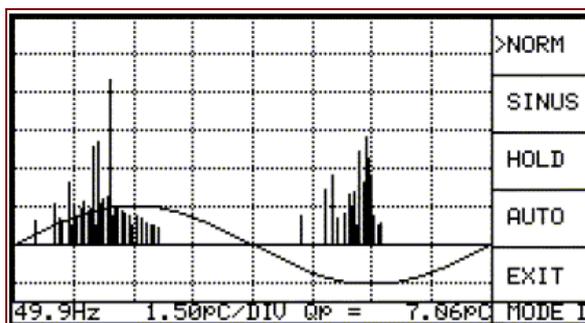
pasante”, por permitir el paso de eventos que ocurren dentro de la banda de frecuencia establecida.

Cuando un cuadripolo y un capacitor de acoplamiento son conectados juntos constituyen el sistema de acople de la señal de las descargas.

- 3) **Pre-amplificador:** Eleva las señales de salida (señales de descargas) del cuadripolo (1000 a 1500 veces), las mismas que se dirigen a su destino final que es el monitor o instrumento de medición.
- 4) **Instrumento de Medición:** Permite la visualización de las descargas parciales, determinado la carga aparente de la mayor descarga generada.

Las descargas tienen una frecuencia de repetición que depende del calor que se está generando. Por lo tanto, mientras más calor se haga presente, las descargas se darán con más frecuencia. El instrumento de medición permite visualizar las descargas de las siguientes formas:

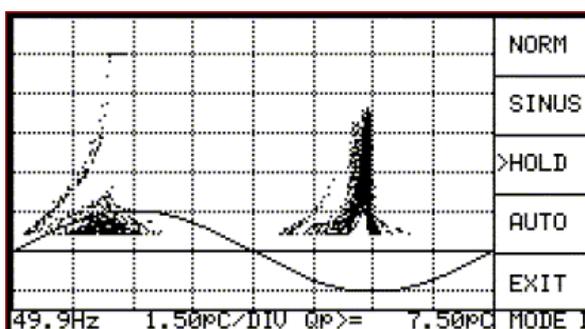
- a. **Modo fase resuelta:** las descargas se representan en forma de bastones y cada uno de ellos depende del cambio de capacidad producto del cortocircuito en las cavidades o burbujas existentes.



**Figura 4.12** - Visualización de las descargas parciales en modo “fase resuelta”

Del grafico en referencia:  $49.9\text{Hz}$  indica la frecuencia de repetición,  $1.50\text{pC/div}$  la escala de medición y  $7.06\text{pC}$  la carga aparente de la mayor descarga.

- b. Modo registro de repetición:** las descargas se representan en forma de puntos y de igual forma, cada uno de ellos depende del cambio de capacidad producto del cortocircuito en las cavidades o burbujas existentes.



**Figura 4.13** - Visualización de las descargas parciales en modo “registro de repetición”

De la figura en referencia:  $49.9\text{Hz}$  indica la frecuencia de repetición,  $1.50\text{pC/div}$  la escala de medición y  $7.50\text{pC}$  la carga aparente de la mayor descarga.

- c. **Modo NQS:** representa el número de descargas por unidad de tiempo y la magnitud de la carga aparente de la mayor descarga.

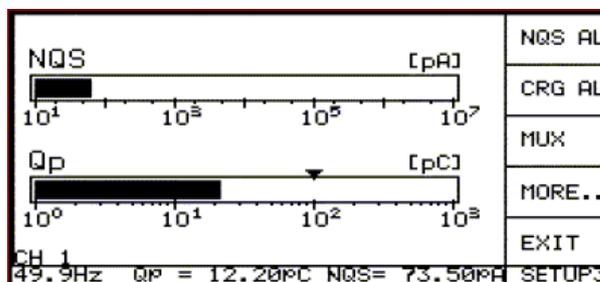
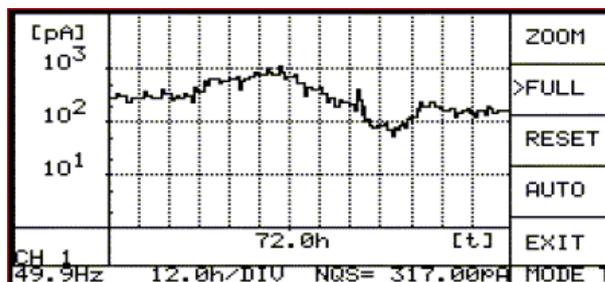


Figura 4.14 - Visualización de las descargas parciales en modo "NQS"

De la figura en referencia:  $49.9\text{Hz}$  indica la frecuencia de repetición,  $12.20\text{pC}$  la carga aparente de la mayor descarga y  $73.50\text{pA}$  el número de descargas por unidad de tiempo.

- d. **Modo registro histórico:** que representa el número de descargas parciales generadas durante un periodo de tiempo en el que se efectuó una medición en línea (o tipo ON-LINE). Por lo general se debe considerar un periodo de 30 días como mínimo, dentro del cual se presentan distintas condiciones de carga del equipo bajo ensayo.



**Figura 4.15** - Visualización de las descargas parciales en modo “registro histórico”

De la figura en referencia:  $49.9\text{Hz}$  indica la frecuencia de repetición,  $12.0\text{h/div}$  la escala de medición y  $317.00\text{pA}$  el número de descargas por unidad de tiempo.

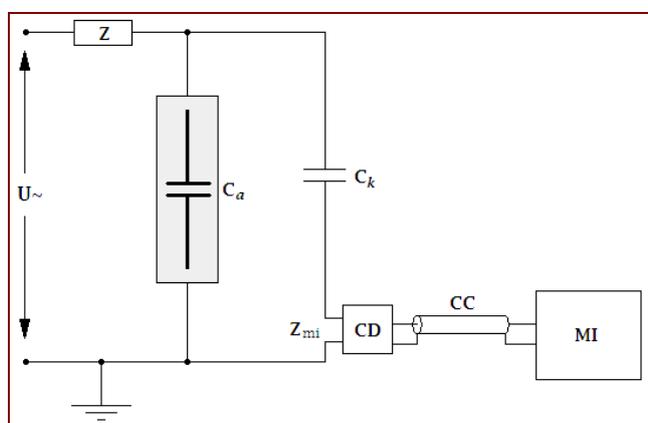
Para facilitar la interpretación de los resultados, en el osciloscopio se debe plasmar paralelamente la onda sinusoidal de la tensión de ensayo. La lectura de los valores con este instrumento permite identificar el tipo de descarga detectada y la experiencia del especialista en ensayos permite su interpretación. Un ejemplo de señales típicas de descargas parciales y su interpretación se presenta en las *figuras anexas 4.2.A, B, C*

- 5) **Calibrador:** Permite poner el instrumento de medición en sincronismo con la frecuencia de la luz.

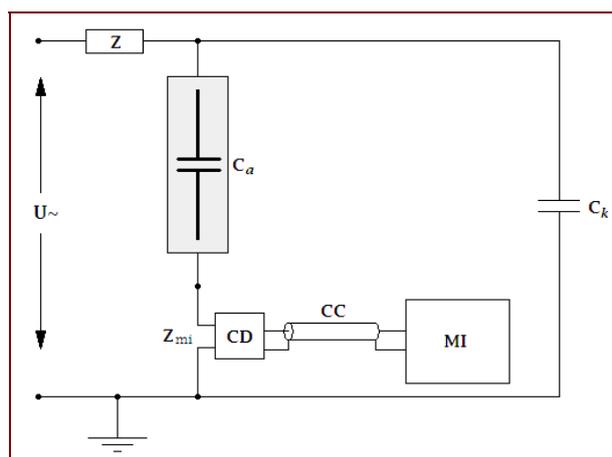
El detalle sobre cada uno de estos instrumentos utilizados para la determinación de la presencia de descargas parciales en el sistema de aislamiento de un equipo, se presentan en las *figuras anexas 4.2.D, E, F, G, H, I.*

### 4.3.1.2.3 Circuitos fundamentales de medición (conexión de instrumentos básicos)

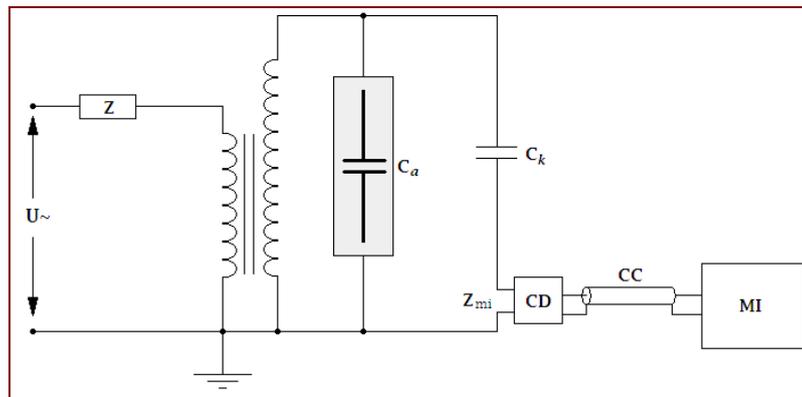
Según la norma IEC 60270 / 2000, los circuitos fundamentales para la medición de descargas parciales presentes en el aislamiento de un equipo, pueden darse de las tres formas siguientes:



*Figura 4.16a - Impedancia de medición en serie con el capacitor de acoplamiento*



*Figura 4.16b - Impedancia de medición en serie con el espécimen bajo ensayo*



**Figura 4.16c** - Circuito de medición bajo tensión inducida

donde:

$U_{\sim}$ : Fuente de alto voltaje AC

**Z**: **Filtro** para impedir que los impulsos provocados por las descargas parciales sean cortocircuitados por la fuente de alta tensión y para reducir las interferencias provenientes de la fuente de tensión.

$C_a$ : Capacitancia del espécimen bajo ensayo

$C_k$ : Capacitor de acoplamiento “Coupler”

$Z_{mi}$ : Impedancia de medición. Varía de acuerdo con el valor de la capacitancia del objeto bajo ensayo.

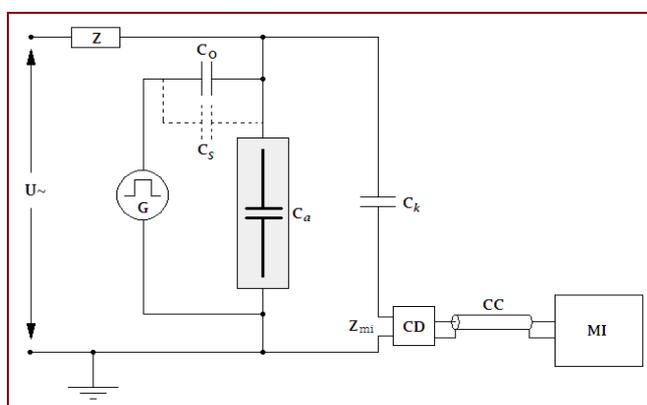
**CD**: Dispositivo de acoplamiento “Cuadripolo”

**CC**: Cable (coaxial) de conexión

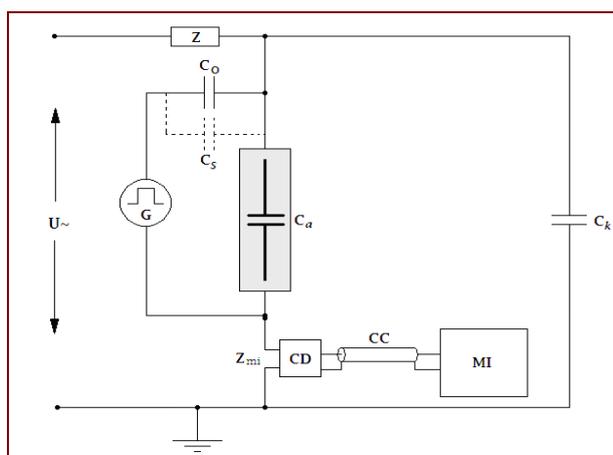
**MI**: Instrumento de medición

En la *figura anexa 4.2.J* se muestra un esquema de conexión real de los instrumentos básicos para medición, de referencia con estos circuitos de ensayo.

Después del implementar circuito de medición, este debe ser calibrado según la misma norma IEC 60270 / 2000, de modo que se establezcan sus características en función de valores conocidos de cargas en  $pC$ . Esta calibración se efectúa sin tensión, y los esquemas de conexiones se muestran en las figuras 4.16a y 4.16b. Para esto, se utiliza adicionalmente un generador de tensión en pasos  $G$ , cargando un capacitor de baja tensión  $C_0$ .



**Figura 4.17a** - Calibración del circuito de medición de Descargas Parciales con impedancia de medición en serie con el capacitor de acoplamiento



**Figura 4.17b** - Calibración del circuito de medición de Descargas Parciales con impedancia de medición en serie con el equipo bajo ensayo

Para que se efectúe una buena calibración, es necesario que su capacitancia  $C_o$  no sobrepase  $0,1(Ca+Ck)$ . El impulso de calibración es equivalente a una descarga de amplitud  $q_o=C_oU_o$  y es aplicado en los terminales del equipo bajo ensayo, simulando las descargas que deberán ser medidas. En el caso de equipos de grandes dimensiones, el calibrador debe ser colocado en las proximidades del terminal de alta tensión, evitando errores en consecuencia de capacitancias parásitas entre  $C_o$  y el terminal de alta tensión.

En la calibración deben ser verificadas las características de las respuestas de los instrumentos de medición para cargas conocidas, siendo normalmente aplicadas cargas de 5, 50, 500, 5000  $pC$ . Las respuestas de los equipos de medición pueden ser directas en  $pC$ , en  $dB$  o  $\mu V$  y la amplitud correspondiente en el osciloscopio en  $pC/división$ .

Después de la calibración del circuito de medición, este calibrador debe ser retirado antes de la aplicación de la tensión de ensayo. Existen instrumentos que poseen calibrador incorporado, cuya señal puede ser verificada durante el ensayo, para comparación con los resultados que están siendo medidos.

#### **4.3.1.2.4 Constatación de Descargas Parciales por métodos no eléctricos**

La mayor dificultad para la realización del ensayo de descargas parciales en equipos de alta tensión instalados en campo, es la eliminación de las

interferencias externas existentes. En laboratorio estas interferencias son eliminadas por el blindaje de las paredes y puertas, además por la instalación de filtros en todas las alimentaciones eléctricas, inclusive las fuentes auxiliares.

Por tales razones, las empresas eléctricas utilizan métodos no eléctricos alternativos para la determinación de descargas parciales en campo, y estos pueden ser los siguientes:

1) Método por Detecciones Acústicas

Consiste en la utilización de transductores eléctricos dispuestos externamente al objeto bajo ensayo, que combinados con receptores de sonido u osciloscopios pueden dar informaciones sobre la existencia y localización de las fuentes de descargas parciales. En el caso de usar gran número de transductores, las señales pueden ser gravadas en instrumentos especiales acoplados a computadores que después del ensayo muestran los resultados y grafican la probable localización de las descargas parciales en el equipo bajo análisis.

2) Método por Análisis Cromatográfico

Consiste en el análisis de gases disueltos en el aceite de inmersión de un equipo, para determinar la presencia de descargas parciales en el.

A pesar de ser métodos alternativos, estos son aplicados como complemento del ensayo normal de descargas parciales, con la finalidad de observar sus consecuencias a través del análisis cualitativo del fenómeno.

#### 4.3.1.2.5 Tipos de ensayos de descargas parciales

La medición de descargas parciales puede realizarse de dos maneras, en línea (ON-LINE) o fuera de línea (OFF-LINE). La medición en línea involucra un seguimiento del equipo bajo ensayo durante su operación y la segunda se la realiza con el equipo fuera de servicio. Sus ventajas y desventajas se las presenta en la siguiente tabla:

<b>MEDICIÓN</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>OFF-LINE</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Se puede analizar el comportamiento de cada fase</li> <li>2) Baja interferencia en Tensión aplicada</li> <li>3) Facilidad para discriminación de ruidos</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Maquina Fuera de Servicio</li> <li>2) No intervienen factores propios del servicio (temperatura, vibraciones, gas aislante)</li> <li>3) Necesidad de Fuente externa</li> </ol>
<b>ON LINE</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Diagnostico diario</li> <li>2) Detección de tendencias crecientes</li> <li>3) Reduce salidas de servicio preventivo</li> <li>4) <b>COSTOS</b></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Difícil discriminación de Ruidos</li> </ol>

**Tabla 4.2** – Ventajas y desventajas de los ensayos de descargas parciales según el tipo de medición

### 4.3.1.3 ENSAYO PARA EVALUAR LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE UN AISLAMIENTO

#### 4.3.1.3.1 Teoría fundamental en la que se basa el ensayo

Como ya se ha explicado anteriormente, cuando se aplica una tensión entre las dos caras de una pieza aislante, esta es atravesada por una pequeña corriente de fuga. Con ello, el material aislante se calienta localmente y ese calentamiento permite el paso de más corriente, por motivos de disminución de la resistividad transversal. Este efecto es acumulativo y, si la tensión alcanza un valor suficientemente elevado, puede producirse la perforación del aislamiento con las consiguientes perturbaciones o averías si se trata de un material aislante en servicio.

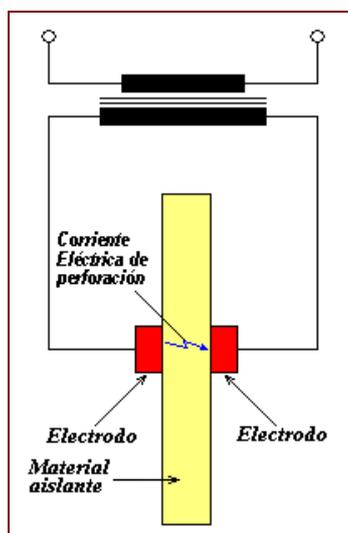


Figura 4.18 - Perforación de un material aislante

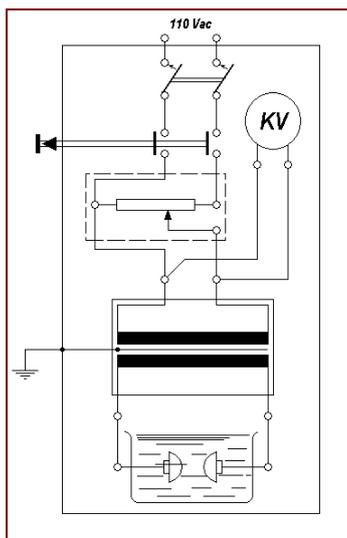
La rigidez dieléctrica es la propiedad de un material aislante de oponerse a ser perforado por la corriente eléctrica. Su valor se expresa por la relación entre la tensión máxima que puede apreciarse sin que el aislamiento se perfora (llamada tensión de perforación) y el espesor de la pieza aislante, por eso sus unidades de medida se dan en kV/mm.

Siempre debe considerarse el espesor del material en el que se efectuará el ensayo de rigidez dieléctrica, ya que esta no es constante, sino que varía con la distancia entre electrodos. Es decir, el valor de la tensión de perforación no es proporcional al espesor de la lámina.

#### **4.3.1.3.2 Principio de funcionamiento y características del instrumento utilizado para el ensayo**

En campo, la evaluación de la rigidez dieléctrica se ve limitada solo al análisis de una muestra de material aislante en estado líquido, por ser esta, la única en permitir su extracción de un equipo de alta tensión que normalmente se encuentra en servicio. Por tales razones, mi explicación sobre este punto, hace referencia al principio de funcionamiento del único instrumento para evaluar la rigidez dieléctrica del material aislante líquido más utilizado, el aceite dieléctrico.

El instrumento para la determinación de la rigidez dieléctrica de un aceite dieléctrico, está constituido básicamente por el esquema mostrado en la siguiente figura:



*Figura 4.19 - Esquema básico de un instrumento medidor de rigidez dieléctrica*

Este esquema, se encuentra compuesto de varios elementos importantes, cuyas características se detallan a continuación:

- 1) **Transformador elevador**, el mismo que energizado por una fuente de frecuencia industrial y de baja tensión (normalmente 120 Voltios AC), permite que la tensión de ensayo sea progresivamente aumentada de 0 a 50kV.

Este transformador y su respectivo elemento de control deben ser de una forma tal, que con el espécimen bajo ensayo en el circuito, el factor de

cresta (relación entre los valores máximos y eficaces) de la tensión a 60Hz, no difiera por más de  $\pm 5\%$  de una onda sinusoidal encima de la mitad superior de la faja de tensión de ensayo.

Si esta forma de onda no pudiera ser convenientemente determinada, se puede utilizar un transformador de potencia nominal igual o mayor a 0.5kVA, en la tensión común de ruptura. Transformadores de potencia mayor pueden ser usados, siempre y cuando la corriente de cortocircuito del circuito del espécimen, no quede fuera de los límites de la faja de 1 a 10mA/kV de tensión aplicada. La limitación de corriente puede ser obtenida con un resistor externo adecuado o con un transformador cuya reactancia sea suficiente.

- 2) ***Dispositivo de interrupción***, que instalado en el circuito primario del transformador permita interrumpir la corriente de ruptura del espécimen bajo ensayo, en 3 ciclos o menos.

*Puede ser usado un dispositivo que interrumpa la corriente en hasta 5 ciclos, con la condición de que la misma no exceda 0.2 amperios.*

El elemento sensor de corriente, que acciona el disyuntor debe operar cuando la corriente del espécimen estuviera en la faja de 2 a 20 mA. Una corriente más prolongada, en el momento de la ruptura, causa la

carbonización del líquido, la microfisuración (puntos de corrosión) y el calentamiento de los electrodos, inconvenientes que influirán en el tiempo de duración de los ensayos y en el mantenimiento de la célula y los electrodos.

- 3) ***Dispositivo de control de tensión***, el cual permite controlar la tasa de aumento de tensión de ensayo, que según el método ASTM D-877 o D-1816, esta debe ser de  $3\text{kV/s} \pm 20\%$  y  $0.5\text{kV/s} \pm 20\%$  respectivamente. Esta tasa de elevación debe ser calculada de medidas de tiempo necesario para aumentar la tensión entre dos valores previamente escogidos.

El control de la tensión debe ser asegurado por el autotransformador variable accionado por motor, y se debe dar preferencia para el equipo que tenga una curva aproximadamente recta de tensión-tiempo dentro de la faja de tensión deseada. El accionamiento a motor es preferible al manual, por el hecho de que con este último, se hace difícil el mantener una tasa de variación uniforme de la tensión.

*Cuando fuera usado el accionamiento a motor, el control de la velocidad del reóstato deberá ser calibrado en términos de la tasa de elevación para el transformador de prueba en uso.*

- 4) **Un voltímetro**, para la medición de la tensión de ensayo. Medición que debe efectuarse de cualquiera de las siguientes formas:
- Con el voltímetro conectado al secundario de un transformador de potencial separado.
  - Con el voltímetro conectado a una bobina terciaria adecuada del transformador de prueba.
  - Con el voltímetro conectado al enrollamiento de baja tensión del transformador de prueba.
- 5) **Dos Electrodos**, los cuales deben ser de cobre pulido y su forma depende del método ASTM aplicado para el ensayo. El detalle de sus dimensiones y demás características, se muestran en las *figuras anexas 4.3.A, B*.
- 6) **Una Célula de muestreo**, hecha de un material de alta resistencia dieléctrica, insoluble e inatacable por los líquidos bajo ensayo o de limpieza. Su forma es cúbica y para que la ruptura pueda ser observada es normalmente de material transparente. Con el fin de impedir que el aire sea agitado con el espécimen bajo ensayo, ésta contiene una tapa del mismo material.

*La corriente de fuga o de carga de la célula debe ser menor que 200mA sobre 20kV, 60 Hz, estando llena de aceite de buena calidad.*

Los electrodos deben ser rígidamente montados en ambos lados de la célula con sus ejes en posición horizontal y coincidentes, además deben tener el espaciamiento lo mas centrado posible. Una célula con una capacidad de 0.95 litros es considerada satisfactoria para un espaciamiento de 2mm entre electrodos y una célula de 0.5 litros para un espaciamiento de 1mm.

La distancia entre cualquier punto de los electrodos y la célula, inclusive el propulsor de aceite, debe ser en lo mínimo de 13 mm. Para el método ASTM D-877 se debe considerar que la parte superior de la célula debe estar cerca de 32mm encima de la parte superior de los electrodos.

La célula de prueba puede estar equipada con propulsor de dos hélices de ángulo de 20°, las cuales deben medir aproximadamente 35mm entre sus extremidades y tener un eje de longitud de cerca de 40mm. Este debe operar con una velocidad entre 200 y 300 rpm y debe localizarse por debajo de los electrodos y girar en una dirección tal que el flujo del líquido se dirija hacia el fondo de la célula.

El detalle de las características generales de un instrumento para la medición de rigidez dieléctrica de los líquidos aislantes y fotografías sobre uno de los modelos actualizado y sus accesorios, se presentan en las *figuras anexas 4.3 C, D.*

## 4.3.2 ENSAYOS DC

### 4.3.2.1 ENSAYO PARA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

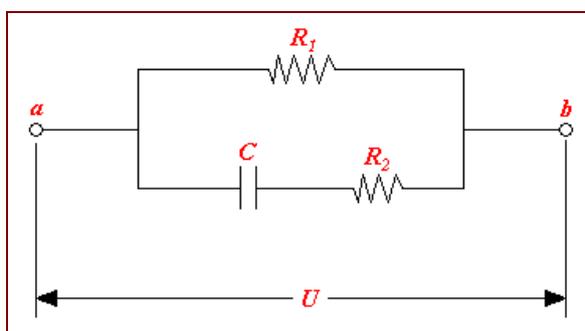
#### 4.3.2.1.1 Teoría fundamental en la que se basa este ensayo

Cualquier componente a ser conectado a un sistema eléctrico de potencia, bajo ciertas circunstancias, estará sujeto a sobretensiones de diversos orígenes, creándose la necesidad de conocer o prever el desempeño de su aislamiento ante estos eventos. El proceso más simple para tener una idea del estado en que se encuentra el material aislante, consiste en la medida de la *resistencia del aislamiento*, considerándose que éste debe ser efectuado antes de los ensayos dieléctricos de tensión inducida, tensión aplicada y de impulso.

La medición de la *resistencia de aislamiento* del conjunto de materiales aislantes de un equipo de alta tensión, consiste en la medición de la resistencia que opone el paso de la corriente eléctrica a través de él, medida en la dirección en que deba asegurarse el aislamiento, durante un tiempo dado de aplicación de tensión de corriente continua.

Al aplicar tensión de corriente continua al aislamiento de un equipo, entre dos puntos de ensayo, este quedará sometido a una diferencia de potencial

originando un campo eléctrico. De esta forma, se puede considerar, en términos prácticos, que el conjunto puntos de ensayo y aislamiento se torna una especie de capacitor. Por tanto, para entender con claridad lo mencionado, se puede representar simplificadaamente un dieléctrico bajo estas sollicitaciones como muestra el circuito en la siguiente figura:



*Figura 4.20 - Circuito equivalente simplificado de un espécimen de aislamiento bajo ensayo*

donde:

$R_1$ : es la resistencia eléctrica a la corriente de fuga

$C$ : es la capacitancia del dieléctrico

$R_2$ : es la resistencia eléctrica representando las pérdidas por absorción

$U$ : es la diferencia de potencial aplicado

De esta forma, la corriente que circula por el aislamiento posee tres componentes distintas:

a) Corriente de carga capacitiva

Esta corriente tiene la misma función que una corriente de carga de un capacitor y depende del tamaño y la forma del material. Inicialmente, al aplicar tensión en los puntos de ensayo, ella asume el valor máximo, decreciendo a un valor despreciable (aproximadamente cero) en un tiempo muy corto (aproximadamente de 15 segundos), siendo la responsable del bajo valor inicial de la resistencia de aislamiento.

b) Corriente de dispersión o de fuga a través del dieléctrico

Esta corriente fluye por la superficie y por el interior de la masa del dieléctrico y es de carácter irreversible. Una corriente de dispersión constante, con una tensión de corriente continua (C.C) aplicada también constante a lo largo del tiempo, es una indicación de que el aislamiento tiene capacidad de resistirlo. Si esta corriente aumenta con el tiempo de aplicación de tensión, es indicativo que el aislamiento podrá fallar, a no ser que sea suspendida la aplicación de tensión.

Por lo tanto, esta se constituye en la componente más importante cuando se desea medir el estado en que se encuentra el aislamiento, por la aplicación de tensión continua.

*La cuantificación de la dificultad que el aislamiento ofrece al establecimiento de esta corriente es objeto de este ensayo, o sea, la medición llamada resistencia de aislamiento (resistencia  $R_1$ ).*

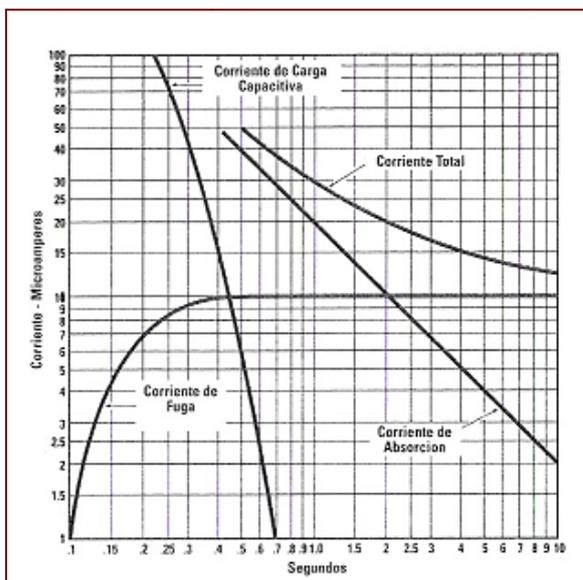
c) Corriente de absorción dieléctrica

Esta corriente es atribuida principalmente al fenómeno de polarización en las interfases de los dieléctricos heterogéneos. Al igual que la corriente de carga capacitiva esta también asume un valor máximo cuando se aplica tensión en los puntos de ensayo, y decrece a un valor despreciable, pero en un intervalo entre 10 minutos y varias horas. Generalmente, los valores de resistencia obtenidos en los primeros minutos del ensayo, son influenciados en gran parte por la corriente de absorción.

*Se observa que la tensión que reaparece en un capacitor después de la remoción de un cortocircuito para descargarlo es atribuida al fenómeno de la absorción dieléctrica; siendo así, que el aislamiento bajo ensayo debe permanecer cortocircuitado por un tiempo suficiente para que desaparezca completamente la tensión.*

Como se observa en la siguiente figura, la corriente total es la suma de estas tres componentes, la misma que puede medirse directamente en

términos de megaohms con un voltaje particular por medio de un instrumento para ensayo.



*Figura 4.21 – Curvas que muestran las componentes de la corriente medida durante un ensayo de aislamiento con tensión de corriente directa*

#### 4.3.2.1.2 Principio de funcionamiento del instrumento utilizado para el ensayo

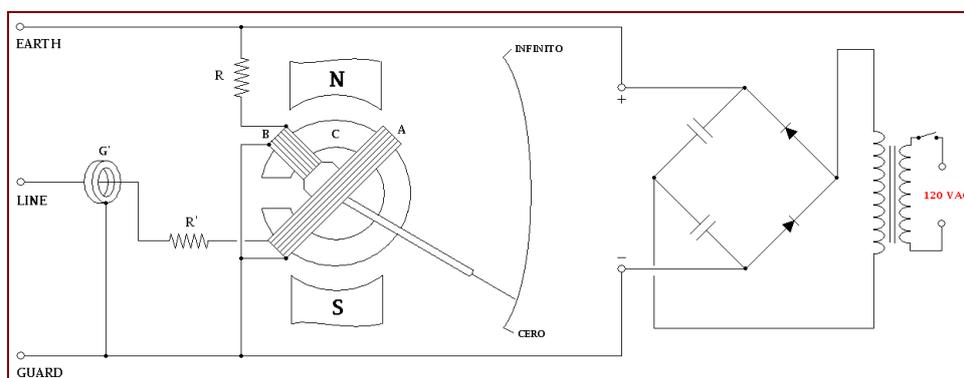
El instrumento utilizado para la medición de la resistencia de aislamiento de un equipo de alta tensión, es conocido como MEGOHMMETRO, debido a que los valores de resistencia de aislamiento medidos por el mismo se dan en su mayoría en magnitud de megaohms. Se acostumbra a llamar a este instrumento también con el nombre de MEGGER, siendo esta la marca registrada de uno de sus mayores fabricantes a nivel mundial.

Cabe recalcar que, el instrumento Megger para medir la resistencia de aislamiento es llamado “Megger de aislamiento” y no debe ser confundido con el “Megger de tierra”, utilizado para medir la resistencia o la resistividad de un terreno.

Existen diversos tipos de megóhmmetros, que dependiendo de su accionamiento pueden ser los siguientes:

- a) Megohmmetros de accionamiento manual.
- b) Megohmmetros de accionamiento motorizado.
- c) Megohmmetros electrónicos con rectificador y alimentación AC.

*Los tres modelos presentados, son similares en su principio de funcionamiento, no así el tercero fue considerado como el modelo incentivador de los diseños actuales.*



**Figura 4.22** – Diagrama eléctrico del Megger de aislamiento con fuente de alimentación AC y rectificador a DC

Para medir correctamente la resistencia de aislamiento, lo ideal sería que la fuente de alimentación del instrumento tenga una tensión que no pueda ser inferior a la nominal del equipo bajo ensayo, pues el defecto que aparecería con esta podría no manifestarse con valores más bajos. No así, en la realidad es difícil obtener un megohmmetro con estas características de tensión, debido a las dificultades en su construcción y al alto costo que este demandaría. Por tanto, para resolver en parte este inconveniente, los megohmmetros incluyen en su diseño una fuente de corriente continua que genera tensiones de ensayo del orden de hasta los 5000 a 10000Vdc.

En principio, el megohmmetro consiste fundamentalmente de dos bobinas cruzadas designadas como *A* y *B*, montadas juntas en un sistema móvil común formando un ángulo conveniente de 60° a 80°, además acoplado a ellas una aguja indicadora que tiene la libertad de girar en un campo producido por un imán permanente *C*.

La señal de alimentación para las bobinas es llevada a través de conductores flexibles que ofrecen la mínima restricción posible, en tal forma, que cuando el instrumento está nivelado y no se le está alimentando corriente, la aguja indicadora podrá permanecer en equilibrio en cualquier posición de la escala.

La deflexión de la aguja depende de las corrientes que recorren las bobinas cruzadas y no de sus valores independientemente. En términos generales este instrumento se considera como una fuente de tensión conectada en serie con un amperímetro. Como la corriente registrada es proporcional a la resistencia a ser medida, la graduación del amperímetro es directamente hecha en megaohm, según sea el caso.

El circuito del megohmmetro contiene dos resistencias: una resistencia invariable  $R$  puesta en serie con la bobina  $B$  (bobina de control) y una resistencia limitadora  $R'$ , conectada en serie con la bobina  $A$  (bobina deflectora), cuya función es la de limitar la corriente y evitar que se dañe el aparato cuando se ponen en cortocircuito las terminales de ensayo.

Como parte del circuito del megohmmetro también se tiene un anillo de material conductor  $G'$  que circunda el terminal de línea  $L$ , sin hacer contacto eléctrico con él. Su finalidad es desviar de las bobinas cruzadas las corrientes que puedan circular a través de la propia caja aislante que contiene el instrumento, cuando este está en operación. Básicamente lo que se hace, es proporcionar a la corriente de fuga un camino en derivación hacia la fuente de alimentación, que no pase por la bobina deflectora del aparato, evitando errores en las lecturas.

Haciendo un análisis al circuito de la figura 4.21, se puede concluir que cuando el aislamiento es casi perfecto o cuando no se conecta nada a las terminales de ensayo no habrá flujo de corriente en la bobina *A*. Sin embargo, por la bobina *B* circulará un flujo de corriente, y por tal razón girará la aguja indicadora en contra de las manecillas del reloj hasta posicionarse en el entrehierro del núcleo de hierro *C*, indicando la posición de infinito.

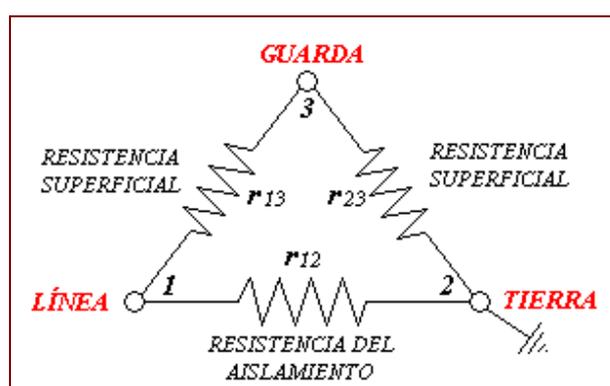
Con los terminales de ensayo en cortocircuito fluirá una corriente mayor en la bobina *A* que en la bobina *B*, por tal motivo un par mayor en la bobina *A* desplazará el sistema móvil en sentido de las manecillas del reloj, hasta posicionar la aguja indicadora en el cero de la escala.

Cuando se conecta una resistencia entre los terminales línea (**L**) y tierra (**E**) del aparato, fluirá una corriente en la bobina deflectora *A* y el par correspondiente, desplazará el sistema sacándolo de la posición de infinito hacia un campo magnético que aumenta gradualmente hasta que se alcance un balance entre los pares de las dos bobinas. Esta posición depende del valor de la resistencia externa que controla la magnitud relativa de la corriente de la bobina *A*. Debido a que los cambios en el voltaje afectan a las dos bobinas en la misma proporción, la posición del sistema móvil es independiente del voltaje.

### Uso del terminal de guarda en el megohmetro

Generalmente todos los megohmmetros de rango mayor a 1000 megaohms están equipados con terminal de guarda “GUARD (G)” adicional a los terminales de tierra “EARTH (E)” y de línea “LINE (L)”. El propósito de este terminal es el de desviar de las bobinas cruzadas cualquier corriente extraña a la medición, eliminando los efectos de dispersión adyacentes y midiendo la verdadera resistencia de aislamiento.

Concretamente puede decirse que la corriente de fuga de toda componente de un sistema de aislamiento conectada al terminal de guarda no interviene en la medición. Así en el caso de la figura 4.22, usando las conexiones indicadas, se medirá la resistencia  $R_{12}$  directamente ya que las otras dos no entran en la medición por estar conectadas al terminal 3 de guarda.



**Figura 4.23** – Representación esquemática de un ensayo utilizando un megohmmetro con terminal de guarda

*En conclusión, el terminal “GUARD” excluye de la lectura los valores de aquellas resistencias que no interesan en el momento de la medición.*

Al usar el terminal de guarda, deberá tenerse cuidado de que no existan posibilidades de que se produzca un brinco eléctrico entre los terminales de la muestra bajo ensayo conectadas a guarda y tierra, ya que tal situación podría causar arqueo indeseable en el conmutador del generador del instrumento.

El detalle sobre dos tipos diferentes de instrumentos para medición de la resistencia de aislamiento y sus principales accesorios, se presentan en las *figura anexa 4.4.A y 4.4.B.*

#### **4.3.2.1.3 Factores que afectan las lecturas del ensayo**

Existen distintos factores que afectan la corriente total que circula a través del aislamiento, entre estas están principalmente su temperatura y la humedad presente.

##### ***a) Efecto de la humedad***

La presencia de humedad en el aislamiento produce un efecto muy marcado sobre los valores de resistencia. Si el equipo opera regularmente arriba de la temperatura del punto de rocío (temperatura a la que el vapor

de la humedad en el aire se condensa como líquido), la lectura del ensayo normalmente no se afectará mucho por la humedad. Esto asume que las superficies del aislamiento están libres de contaminantes, tales como ciertas pelusas y ácidos o sales, que tienen la propiedad de absorber humedad.

En el equipo eléctrico nos interesan principalmente las condiciones de las superficies expuestas donde se condensa la humedad y afecta la resistencia total del aislamiento. Sin embargo, los estudios muestran que se formará rocío en las fracturas y grietas del aislamiento antes de que sea evidente en la superficie. Por lo tanto, las mediciones del punto de rocío darán un indicio de si existen tales condiciones invisibles, que alteran los resultados de los ensayos.

***b) Efecto de la temperatura***

La resistencia de los materiales aislantes decrece marcadamente con un incremento en la temperatura. Si se desea hacer comparaciones confiables entre lecturas, se las debe corregir a una temperatura base, por ejemplo a 20° C, o tomar todas sus lecturas a la misma temperatura aproximadamente. Por lo tanto, se pueden seguir las siguientes guías generales para la corrección de la temperatura:

- **La regla del dedo:** Por cada 10°C de incremento de temperatura, dividir la resistencia para dos; o por cada 10°C de disminución de temperatura, duplicar la resistencia. Por ejemplo, una resistencia de 2 megaohms a 20° C se reduce a ½ megaohms a 40° C.
- **Factores de corrección por temperatura:** Cada tipo de material aislante tendrá diferente grado de cambio de su resistencia de aislamiento con la temperatura. Sin embargo, se han desarrollado factores para simplificar la corrección de los valores obtenidos de un ensayo. La *tabla anexa 4.A1*, da un ejemplo de los factores de referencia, establecidos para corregir los valores de resistencia de aislamiento a 20°C, para un transformador inmerso en aceite.

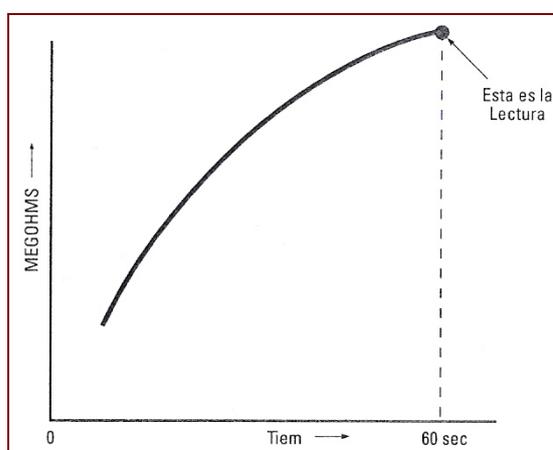
#### 4.3.2.1.4 Métodos para la medición de la resistencia de aislamiento

Debido a la influencia del tiempo en el significado de las lecturas del instrumento, se consideran tres métodos comunes de ensayos de resistencia de aislamiento:

##### 1) Ensayo de corto tiempo o lectura puntual

En este método, se conecta el instrumento a través del aislamiento bajo ensayo y se lo opera por un periodo corto de tiempo específico

(generalmente 60 segundos). Como se muestra en la figura 4.23, simplemente se toma un punto en una curva de valores crecientes de resistencia (con frecuencia el valor sería menor para 30 segundos y mayor para 60 segundos). Se debe considerar que la temperatura y la humedad, así como también la condición del aislamiento afectan la lectura.



**Figura 4.24** – Curva típica de resistencia de aislamiento (en megaohms) con tiempo para el método de “corto tiempo” o “lectura puntual”

Este método es normalmente aplicable en equipos que tienen una capacitancia muy pequeña; pero como la mayoría son altamente capacitivos y así su primera lectura puntual, sin ensayos previos, puede ser solamente una guía burda de que tan bueno o que tan malo se encuentra el aislamiento.

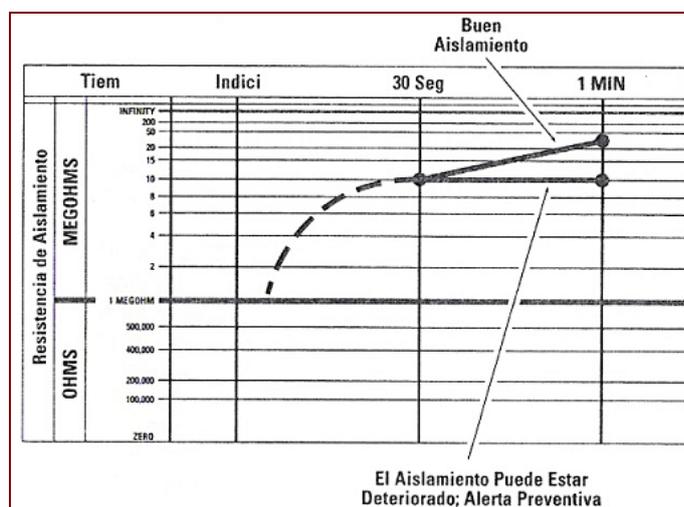
## 2) Método tiempo – resistencia

Este método es casi independiente de la temperatura y con frecuencia puede dar información concluyente sin registros de ensayos anteriores. Se basa en el efecto de absorción de buen aislamiento. Simplemente se toman lecturas sucesivas de resistencia de aislamiento en tiempos específicos y se traza una curva en papel log-log graficando los valores de resistencia del aislamiento versus tiempo. A la curva obtenida se le denomina “*curva de absorción dieléctrica*”, ya que su forma se da de acuerdo con las condiciones de absorción dieléctrica del aislamiento. Su pendiente indicará el grado relativo de secado o suciedad del aislamiento.

Si el aislamiento contiene mucha humedad o contaminantes, el efecto de absorción se enmascara por una corriente de fuga alta que permanece en un valor casi constante, manteniendo baja la lectura de resistencia. Se alcanzará un valor estable en aproximadamente uno a dos minutos después de iniciado el ensayo, y se obtendrá una curva con baja pendiente.

Si un aislamiento está en buenas condiciones, dará valores de resistencia que aumentan progresivamente en un periodo de tiempo de 5 a 10 minutos. Esto es ocasionado por la corriente de absorción de la que se habló anteriormente; el buen aislamiento se observa en un periodo de tiempo mucho más largo que el requerido para cargar su capacitancia.

La figura 4.24 muestra cómo un ensayo de 60 segundos aparecería para buen y tal vez mal aislamiento.



**Figura 4.25** – Trazo típico de una prueba tiempo – resistencia o de doble lectura

Cuando el aislamiento está en buenas condiciones, la lectura a 60 segundos es mayor que a la de 30 segundos.

Una ventaja más de este ensayo de doble lectura, es que nos da una imagen más clara, aún cuando una lectura puntual diga que el aislamiento esta bien.

### **Determinación de los Índices de Absorción Dieléctrica y Polarización**

El “índice de polarización” es una medición de la variación de la resistencia del aislamiento con el tiempo de aplicación de tensión constante de ensayo; en otras palabras, de la manera que la corriente de absorción

influye en la resistencia del aislamiento. Este índice es definido por la siguiente expresión:

$$IP = \frac{R_i(10 \text{ min.})}{R_i(1 \text{ min.})} \quad (4.26)$$

donde:

**$R_i(10 \text{ min.})$** : es la resistencia del aislamiento medida con el megohmmetro a los 10 minutos.

**$R_i(1 \text{ min.})$** : es la resistencia del aislamiento medida con el megohmmetro al primer minuto.

Para los casos en que no sea posible obtener el índice de polarización, es común determinar el “índice de absorción”, el cual consiste en la relación de las medidas de resistencia de aislamiento obtenidas a 1 minuto y 30 segundos, es decir:

$$IA = \frac{R_i(1 \text{ min.})}{R_i(30 \text{ seg.})} \quad (4.27)$$

donde:

**$R_i(1 \text{ min.})$** : es la resistencia del aislamiento medida con el megohmmetro al primer minuto

**$R_i(30seg.)$ :** es la resistencia del aislamiento medida con el megohmmetro a los treinta segundos.

La pendiente de la curva de absorción dieléctrica puede expresarse mediante la relación de las dos lecturas de resistencia de aislamiento tomadas a los diferentes intervalos de tiempo, correspondientes tanto a la determinación del Índice de Polarización (IP), como a la determinación del Índice de Absorción (IA). La relación de dos lecturas tiempo-resistencia, se conoce como una “Relación de Absorción Dieléctrica”.

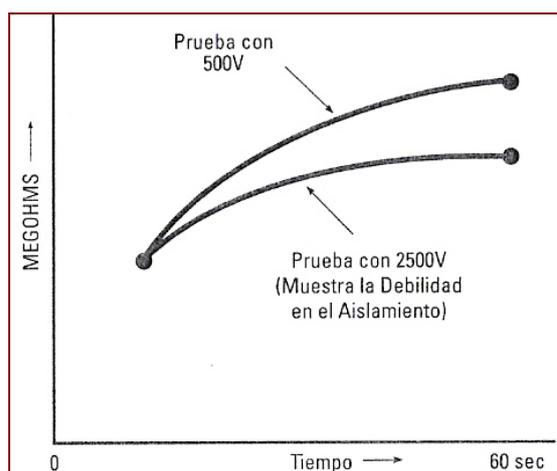
En la *tabla anexa 4.B1* se muestra un cuadro referencial sujeto a la experiencia, el cual permite juzgar las condiciones del aislamiento en general, basado en las relaciones de absorción dieléctrica.

### **3) Método de voltajes por pasos (Aplicación de tensión CC variable para el ensayo)**

Este método involucra la aplicación de dos o más voltajes de CC, y la observación crítica de cualquier reducción de la resistencia de aislamiento con el voltaje más alto.

Una reducción marcada o inusual de la resistencia de aislamiento para un incremento prescrito del voltaje aplicado, es una indicación de debilidad incipiente y una advertencia para investigación futura.

A medida que las condiciones dentro de la muestra se deterioran, el trazo de voltaje más alto, como se muestra en la figura 4.25, se reducirá en megaohms en comparación con el voltaje menor y su pendiente ascendente será menor.



**Figura 4.26** – Curvas típicas con el ensayo de “Voltajes por Pasos”

Cabe enfatizar que la curva indica el cambio de la resistencia debido a la corriente de fuga solamente y no a la corriente de absorción que puede aparecer por un periodo de tiempo con cada cambio de voltaje. Puede ser necesario esperar una cantidad apreciable de tiempo después de cada cambio de voltaje para que la corriente de absorción desaparezca antes de tomar una lectura.

La humedad y la suciedad en el aislamiento son reveladas usualmente por ensayos a voltajes más bajos que aquellos esperados en servicio. Sin embargo los efectos por envejecimiento o daños mecánicos en el aislamiento confiablemente limpios y secos podrían no ser revelados a tales esfuerzos.

Este método es particularmente útil en la determinación de la presencia excesiva de humedad en el aislamiento del equipo con capacidad de voltaje equivalente a/o mayor que el voltaje más grande disponible en el instrumento que se utiliza.

Los voltajes aplicados deben estar preferentemente en relación de 1 a 5 o mayor (por ejemplo 500 a 2500V), durante un minuto cada vez. Una disminución del valor de la resistencia de aislamiento de 25% con la tensión más elevada en relación a la más baja, es un indicativo de presencia de una cantidad excesiva de humedad u otro contaminante en el aislamiento. Este fenómeno es atribuido al hecho de que el agua tiene polaridad positiva y será atraída para las áreas con elevado potencial negativo.

En el ensayo, el borne negativo del megohmmetro es conectado al conductor de cobre y el borne positivo a tierra. Por tanto, el agua será

atraída para el área del conductor de cobre, habiendo la disminución de la resistencia de aislamiento. El fenómeno es conocido como *electroendosmosi o efecto Evershed*. Con poca o nada de humedad en el aislamiento, los valores de las dos lecturas serán prácticamente iguales.

#### 4) Aplicación de potencial CC elevado

Este ensayo consiste en la aplicación de una tensión CC progresivamente aumentada a partir de cero hasta un valor máximo elevado. El valor de la tensión CC máxima a ser aplicada al aislamiento puede ser determinado por la siguiente ecuación, en el caso de no existir información del fabricante u otras fuentes especializadas.

$$ET = (2EN + 1000)1,6 \times 0,65 \quad (4.28)$$

donde:

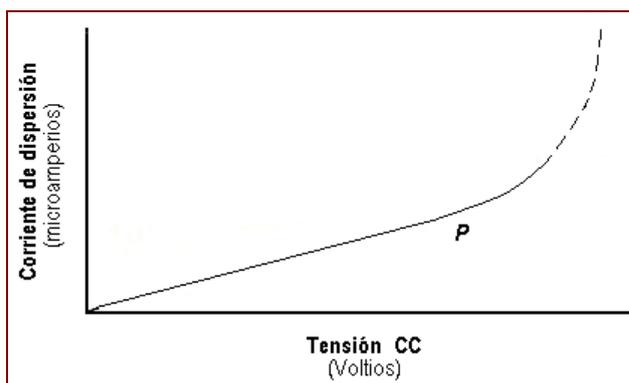
**ET:** tensión máxima CC a ser aplicada, en voltios

**EN:** tensión nominal del transformador registrada en la placa de identificación, en voltios.

**1,6:** factor de conversión de corriente alterna en corriente continua

**0,65:** factor de reducción para equipos envejecidos

La tensión CC aplicada al aislamiento, es aumentada progresivamente con cerca de diez valores iguales, anotándose su valor y el de la corriente de dispersión. A medida que el ensayo prosigue, se traza una curva con los valores de tensión y corriente, conforme la siguiente figura:



*Figura 4.27 – Curva de evaluación de las pruebas de potencial*

La tensión deberá ser aumentada cada vez de un valor pequeño, para que sea posible verificar con claridad el punto **P** en que la curva cambia de dirección. En este punto, el ensayo es interrumpido porque la tensión del punto **P** es muy próxima de la tensión de ruptura del dieléctrico ensayado. Si su valor en el punto **P** fuera mayor que el máximo previsto, las condiciones del aislamiento podrán ser consideradas satisfactorias. Este ensayo podrá revelar una falla eminente.

Tomando lecturas periódicamente y registrándolas, se tiene una mejor base para juzgar las condiciones reales del aislamiento. Una tendencia persistente a la baja, generalmente es una advertencia de problemas

posteriores, aún cuando las lecturas sean más altas que los valores mínimos de seguridad sugeridos. Igualmente cierto es, en tanto que sus lecturas periódicas sean consistentes, pueden estar bien, aún cuando sean menores que los valores recomendados.

### **4.3.3 ENSAYOS DE SOBREVOLTAJE**

#### **4.3.3.1 ENSAYO A VOLTAJE DE IMPULSO**

##### **4.3.3.1.1 Consideraciones Básicas**

Todo equipo de alta tensión instalado en las subestaciones de transmisión está sometido durante su operación a sobrevoltajes de tipo interno y externo.

*Los sobrevoltajes de tipo interno*, se refieren a los que se originan en las instalaciones por operaciones, fallas u otros motivos propios de la red. En forma general, estos se clasifican en:

- a) Sobrevoltajes por ocurrencia de fallas (línea a tierra, dos líneas a tierra, línea a línea y trifásica).
  
- b) Sobrevoltajes por operaciones de maniobra (Switchéo)

- Operaciones de maniobra en circuitos inductivos (desconexión de transformadores en vacío y apertura de bobinas de compensación alimentadas por transformadores)
- Por desconexión y cierre de circuitos capacitivos (líneas largas, bancos de capacitores y otros)

c) Sobrevoltajes por pérdida brusca de carga.

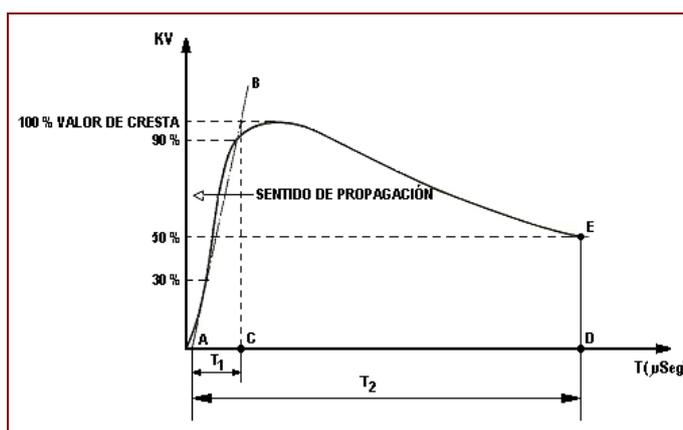
d) Sobrevoltajes por efecto ferranti en las líneas de transmisión.

e) Sobrevoltajes por operación de interruptores.

*Los sobrevoltajes de tipo externo*, se refiere a los que se originan producto de las descargas atmosféricas, caracterizadas por corrientes del orden de 10 a 200 kA.

De acuerdo a las normas, los equipos de alta tensión y en especial sus aislamientos, deberán soportar sin cualquier daño durante un cierto intervalo de tiempo, un valor de sobretensión compatible con su clase de tensión. Por lo tanto, el *ensayo a voltaje de impulso* busca fundamentalmente, la verificación de tales condiciones.

Este ensayo se efectúa en laboratorio y para su realización se procura experimentalmente determinar el formato de la onda de una descarga, que de acuerdo a mediciones experimentales, corresponde aproximadamente a la mostrada en la figura 4.28. Para su producción se utiliza un generador de impulsos, que nada más es un circuito que contiene capacitores y resistencias, de tal modo que la descarga de los condensadores origina la onda deseada, siendo que su valor de cresta (definido posteriormente) puede ser controlado por la carga de los capacitores.



**Figura 4.28** - Normalización de la onda de sobretensión

Vale recalcar que tal onda podrá ser (+) o (-), es decir, con los valores de  $V$  positivos o negativos en relación al eje de referencia. Naturalmente, para una perfecta padronización de la onda de impulso, se debe definir algunas características, pues, teniéndose apenas el formato, se podría realizarla de diversos modos.

Las características que determinan la onda, son presentadas a continuación:

a) Valor de cresta

Es el mayor valor de tensión para la onda. Su valor es padronizado para cada clase de tensión y puede ser constatado en la segunda columna de la *tabla anexa 4.C1*.

b) Tiempo de subida

Tomándose un valor de 30% en la frente de onda y otro de 90% en la misma, se traza un segmento de recta **AB**, como se muestra en la figura 4.27. En el punto de intersección de la recta **AB** con una paralela al eje X, trazada por los 100% de la tensión de cresta, se baja una perpendicular al eje de los tiempos. La intersección de la perpendicular con el eje de los tiempos origina el punto **C**. Se define como el *tiempo de subida ( $T_1$ )* al segmento **AC**.

c) Tiempo de descenso

Se traza una paralela al eje de los tiempos, marcada por los 50% de la tensión de cresta, hasta encontrar la cola de la onda en un punto **E**. Por ese punto se traza una perpendicular al eje de los tiempos al punto de

intersección llamado de **D**. Se define el *tiempo de descenso* ( $T_2$ ) al segmento **ED**.

Con la finalidad de padronizar los tiempos  $T_1$  y  $T_2$ , la Comisión Internacional de Electrotécnica (IEC) recomienda fijarlos en  $1.2 \mu\text{s}$  y  $50\mu\text{s}$  respectivamente, siendo admisibles errores de hasta 30%. Por tanto, es común representar estos valores por la relación:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1,2}{50} \left( \frac{\mu\text{s}}{\mu\text{s}} \right) \quad (4.29)$$

La onda con tales características de tiempo, reproduce la mayoría de los efectos más severos por sobrevoltajes debidos a descargas atmosféricas; un frente de onda rápido que da una distribución de voltaje no lineal y una larga cola de onda que conduce a reflexiones de voltaje que producen altos voltajes en algún equipo.

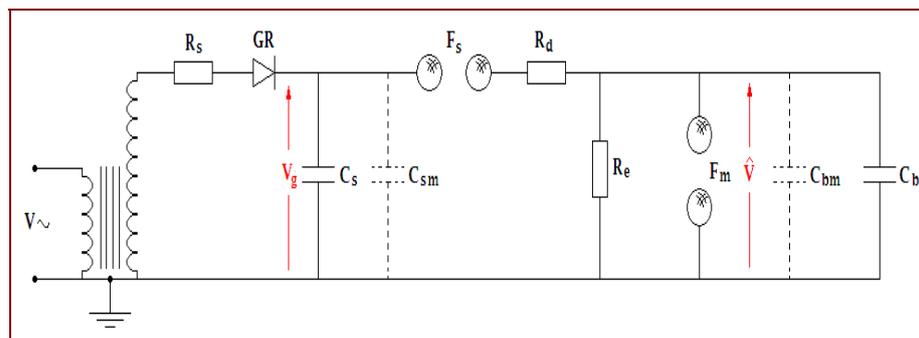
Cabe recalcar que, la onda normalizada por la IEC para este ensayo, ha sido usada por muchos años, considerando que la principal causa de los sobrevoltajes en un equipo de alta tensión eran las descargas atmosféricas; sin embargo, con el incremento de voltaje en los sistemas, los sobrevoltajes por operaciones de maniobra han venido a incrementar los problemas.

Como existe un gran rango de ondas de voltaje por operaciones de maniobra, no ha sido normalizada una forma de onda para determinar la capacidad del aislamiento de un equipo, por tanto, el ensayo en este caso está basado en la misma onda de  $1.2/50\mu\text{Seg.}$ , y la capacidad del aislamiento para soportar tales sollicitaciones se ha estimado entre el 75 y 85% de dicho tipo de onda.

#### 4.3.3.1.2 Circuitos generadores de voltajes de impulso

El impulso es generado mediante la descarga de un condensador sobre un circuito RC que incluye el espécimen bajo ensayo y básicamente se adapta a los siguientes circuitos o diagramas de conexiones:

##### CIRCUITO #1



*Figura 4.29 – Esquema de un generador de impulso con resistencia de puesta a tierra (descarga) posterior a la de amortiguamiento*

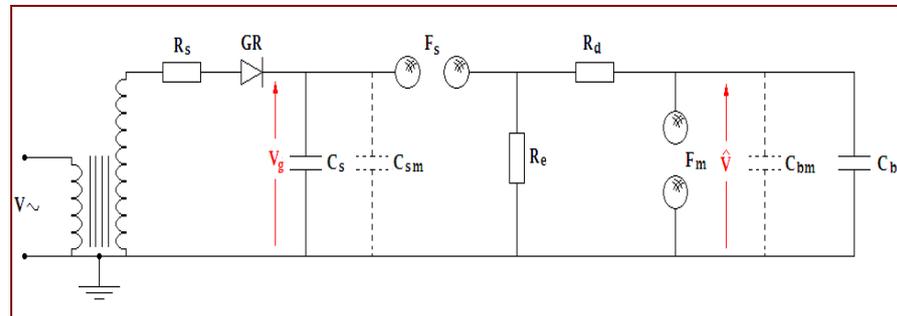
Donde sus componentes son:

- T:** Transformador (capaz de cargar el condensador  $C_s$ )
- R<sub>s</sub>:** Resistencia limitadora de corriente (Controla carga de  $C_s$ )
- GR:** Rectificadores de selenio (forman circuito rectificador en la producción de altos voltajes continuos)
- C<sub>s</sub>:** Condensador de choque (sirve para aplanamiento de la onda rectificada) mínimo de  $1\mu\text{F}$ , según las normas VDE
- C<sub>sm</sub>:** Medidor del voltaje de carga de condensador  $C_s$
- F<sub>s</sub>:** Descargador de conexión o esferas espinterométricas de encendido
- R<sub>d</sub>:** Resistencia de amortiguamiento (limita la corriente)
- R<sub>e</sub>:** Resistencia de descarga
- C<sub>b</sub>:** Capacitancia del espécimen bajo ensayo
- F<sub>m</sub>:** Esferas espinterométricas para medida del voltaje de cresta

Las formulas aproximadas para el tiempo de subida  $T_1$  y el tiempo de descenso  $T_2$  derivadas de este circuito, son las siguientes:

$$T_1 = \left(\frac{2}{b}\right) \cdot R_d \frac{R_e}{(R_d + R_e)} \cdot C_b \frac{C_s}{(C_b + C_s)} (\mu\text{Seg}) \quad (4.30)$$

$$T_2 = \left(\frac{1}{a}\right) \cdot (R_d + R_e) \cdot (C_b + C_s) (\mu\text{Seg}) \quad (4.31)$$

**CIRCUITO #2**

**Figura 4.30** - Esquema de un generador de impulso con resistencia de puesta a tierra (descarga) junto al espacio disruptivo.

La descarga de  $C_s$ , sobre  $R_e$  y la combinación en paralelo de  $R_d$  y  $C_b$ , se produce justamente en el momento en que el voltaje  $C_s$  rebasa la tensión  $V_g$  de alimentación (voltaje de carga del condensador  $C_s$ ), para la cual se ha ajustado el espacio disruptivo  $F_s$ .  $C_b$  queda sometido como máximo, a la tensión  $V$ , y la velocidad de establecimiento depende principalmente, de  $R_d$  y  $C_b$  (siendo  $C_b$  pequeña con respecto a  $C_s$ ).

Las formulas aproximadas para el tiempo de subida  $T_1$  y el tiempo de descenso  $T_2$  derivadas de este circuito, son las siguientes:

$$T_1 = \left(\frac{2}{b}\right) \cdot R_d C_b \frac{C_s}{(C_b + C_s)} (\text{microsegundos}) \quad (4.32)$$

$$T_2 = \left(\frac{1}{a}\right) \cdot R_e (C_b + C_s) (\text{microsegundos}) \quad (4.33)$$

*El ensayo de impulso se efectúa hoy casi exclusivamente como ensayo de tensión soportable, es decir, el objeto bajo ensayo no debe ser perforado ni experimentar descarga superficial bajo la tensión especificada.*

#### **4.4 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

##### **4.4.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Como todas las máquinas eléctricas, los transformadores trabajan según una serie de recomendaciones, consideradas por motivo de seguridad y mejor funcionamiento. Entre estas especificaciones se cita el aterrizamiento del tanque, el núcleo y todas las partes metálicas inactivas, de tal modo, que durante su operación, además de la diferencia de potencial entre los arrollamientos de alta y baja tensión, se genere también una diferencia de potencial entre estos con respecto a las partes metálicas que se encuentran sólidamente aterrizadas.

Por lo tanto, si el sistema de aislamiento no fuera el adecuado para soportar estos gradientes de tensión, podrán surgir las ya mencionadas corrientes de fuga, que se establecen por los materiales aislantes que lo conforman, ocasionando pérdidas de potencia, formación de arcos voltaicos y su progresiva deterioración.

De igual forma en el arrollamiento de alta tensión, la diferencia de potencial que se genera entre espiras es considerable, exigiendo un buen aislamiento, pues caso contrario, podrá surgir un arco entre espiras que dañe el arrollamiento.

*La figura anexa 4.5* muestra en detalle los puntos dentro de un transformador de potencia, donde se producen estos diversos gradientes de potencial que requieren indispensablemente de un buen aislamiento que pueda soportarlos.

*De todas maneras, podrá ocurrir que los materiales aislantes utilizados no presenten las características deseadas o el mismo que con el paso del tiempo, o debido a cualquier disturbio, pueda debilitarse en un punto cualquiera. Si el transformador fuera puesto en servicio en estas condiciones, además de la pérdida de potencia habrá el serio riesgo de un cortocircuito interno. Estos hechos llevan a concluir en la necesidad de ensayos que comprueben el estado del aislamiento del transformador.*

#### **4.4.2 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS EN CAMPO**

##### **4.4.2.1 Ensayo para determinar el Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

Debido a que el factor de potencia y/o factor de disipación es el principal criterio utilizado para juzgar las condiciones del aislamiento de un equipo de alta

tensión, su determinación bajo ensayos permite detectar la presencia de humedad, carbonización y otras formas de contaminación en los arrollamientos, bushing's y líquidos aislantes de los transformadores de potencia.

Además, distorsiones en los arrollamientos pueden revelarse por cambios en la capacitancia medida, la cual es analizada a la par con este ensayo.

#### 4.4.2.1.1 Voltajes aplicados para el ensayo

Los voltajes aplicados para el ensayo de factor de potencia en transformadores inmersos en líquido mineral aislante, recomendados por la Doble Engineering Co., de acuerdo a los estándares ANSI/IEEE C57.12.00-1987 y ANSI/IEEE C57.12.90.1987, son los siguientes:

<i>Voltaje nominal del arrollamiento (línea-línea kV)</i>	<i>Voltaje de ensayo (línea-tierra kV)</i>
<i>Mayor a 12</i>	<i>10</i>
<i>5.04 a 8.72</i>	<i>5</i>
<i>2.4 a 4.8</i>	<i>2</i>
<i>Menor a 2.4</i>	<i>1</i>

**Tabla 4.3** - *Voltajes aplicados en el ensayo de factor de potencia recomendados para transformadores inmersos en aceite*

En ciertos casos especiales, cuando los resultados obtenidos se consideren anormales, se hace útil realizar investigaciones efectuando una serie de ensayos a diferentes voltajes que estén dentro del rango recomendado en la tabla, para

determinar si su origen se debe a la no linealidad o sensibilidad del voltaje inicial aplicado. Esto, puede implicar inclusive, el incremento del voltaje de ensayo más allá de la norma, es decir, utilizar un voltaje de 12kV en el caso de arrollamientos normalmente probados a 10KV.

Es posible que el ensayo de factor de potencia se ejecute en transformadores con ausencia de líquido aislante o nivel reducido del mismo. Esta técnica es usualmente utilizada para evaluar el aislamiento durante el proceso de secado cuando el núcleo y bobina está en su propio tanque o en una cámara de secado. En tales situaciones, la Doble Engineering Co., de acuerdo a los estándares ANSI/IEEE C57.12.00-1993 y ANSI/IEEE C57.12.90.1993, recomienda las siguientes magnitudes de voltaje para los ensayos:

<i><b>Voltaje nominal del arrollamiento (línea-línea kV)</b></i>	<i><b>Voltaje de ensayo (línea-tierra kV)</b></i>
<i><b>Arrollamientos en delta y estrella no aterrizada</b></i>	
<i>Mayor a 161</i>	<i>10</i>
<i>115 a 138</i>	<i>5</i>
<i>34 a 69</i>	<i>2</i>
<i>12 a 25</i>	<i>1</i>
<i>Menor a 12</i>	<i>0.5</i>
<i><b>Arrollamientos en estrella aterrizada y monofásico con neutro</b></i>	
<i>Mayor a 12</i>	<i>1</i>
<i>Menor a 12</i>	<i>0.5</i>

**Tabla 4.4** – Voltajes aplicados en el ensayo de factor de potencia para transformadores tipo inmersos en aceite, ensayados en ausencia del líquido aislante y bajo presión atmosférica o gran presión absoluta.

Cabe recordar que en tales condiciones, si existiera la presencia de oxígeno, los vapores del aceite y gases combustibles pueden inflamarse por una fuente de energía, tales como, un arco eléctrico o chispa. Por lo tanto, para efectuar este ensayo especial, es recomendable tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) En cualquier nivel reducido que se ubique el aislamiento líquido en un transformador, no se debe aplicar el voltaje de ensayo antes de determinar por medición directa que el espacio de gas y líquido, contenga niveles seguros de gases combustibles, según datos del fabricante.

En el caso de transformadores de condiciones desconocidas, para minimizar el riesgo de inflamación asociado con la presencia de oxígeno en el tanque, este se debe reducir a niveles menores del 2% en el gas. Para esto, durante el proceso de drenaje del aceite del transformador, se debe compensar el espacio de gas con inyección de nitrógeno seco. Si se conoce que el transformador estuvo sometido a un daño por falla eléctrica, es recomendable no efectuar el ensayo o si fuese posible, remover los gases combustibles con aplicación de alto vacío.

- 2) Un bajo voltaje de ensayo es suficiente para evaluar el nivel general de secado del sistema de aislamiento de un transformador.

- 3) Nunca se debe aplicar el voltaje de ensayo a un transformador cuyos devanados estén bajo vacío. La presión interna del tanque debe ser igual o mucho mayor que la externa (presión absoluta de una atmósfera o más). El nivel de vacío asequible dentro de un transformador no asegura la suficiente rigidez dieléctrica del ensayo a ejecutarse.
- 4) No aplicar voltajes de ensayo que excedan los recomendados. Para transformador con sospecha de fallas, siempre ejecutar el primer ensayo con voltaje lo más bajo posible, y luego en ausencia de signos adversos, incrementar gradualmente al voltaje máximo permisible.

#### **4.4.2.1.2 Ensayos aplicados**

Los ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del sistema de aislamiento de un transformador, dependen primordialmente de su configuración, es decir, del número de arrollamientos accesibles y la disposición de los mismos. Por lo tanto, tres tipos generales de transformadores de potencia son considerados para este análisis:

- ✓ Los transformadores de dos arrollamientos
- ✓ El autotransformador (con o sin arrollamiento terciario)
- ✓ Los transformadores de tres arrollamientos.

Los diferentes ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, según el tipo de transformador, se detallan en los *apéndices 4.A1, 4A2 y 4A3*.

#### **4.4.2.1.3 Criterio para la corrección de las lecturas en base a la temperatura**

Todas las mediciones realizadas son corregidas a la temperatura estándar de 20°C, usando los multiplicadores listados en las *tablas anexas 4.D1 y 4.E1*, recomendaciones de los fabricantes MEGGER y DOBLE respectivamente. Se considera la temperatura del aceite medida (durante la ejecución del ensayo) por el instrumento ubicado en la parte superior del transformador (fijado a la tapa de la cuba), como la temperatura a ser aplicada para la corrección.

En casos donde dicho instrumento, se encontrara defectuoso o ausente, esta temperatura debe ser aproximada. Por tanto, el método para determinar esta aproximación, consiste en medir la temperatura del aire ambiente y la temperatura de la pared del tanque en la vecindad del instrumento. Siendo la temperatura del aceite en la parte superior del transformador, asumida como *la temperatura de la pared del tanque (cuba) más dos tercios de la diferencia entre la temperatura del tanque y la del ambiente*, ambas medidas en campo.

Hay que resaltar que los factores de corrección varían para cada tipo de transformador de potencia, siendo diferente para uno tipo sellado con colchón

de gas nitrógeno que para uno tipo conservador con respiración libre o con célula de expansión. Esto, se puede apreciar en las dos columnas de la tabla anexa ya mencionada.

***Ejemplo:***

***Transformador de potencia inmerso en aceite aislante (tipo conservador 230/69/13.8 kV).***

*Temperatura del Aire= 20°C*

*Temperatura de la pared del tanque= 26°C*

*Temperatura del aceite en la parte superior=  $26 + 2/3(26-20) = 30°C$*

*Factor de corrección para 20°C (según tabla anexa 4.4.A)= 0.63*

*Medición de Factor de Potencia= 0.61%*

*Factor de Potencia Corregido=  $0.61 \times 0.63 = 0.384\%$*

#### **4.4.2.1.4 Criterios para la evaluación de los resultados**

La interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos de factor de potencia y/o factor de pérdidas, implica la valoración de las condiciones de servicio de los aislamientos, basados en investigaciones a través del tiempo, en datos de ensayos de campo correlativos y en valores límites proporcionados por los fabricantes.

- *Según la DOBLE Engineering Company :*

*El sistema de aislamiento integro de un transformador de potencia moderno (nuevo) del tipo inmerso en aceite, debe tener un factor de potencia de 0,5% o menos, a una temperatura de 20°C.*

*Los transformadores de potencia viejos del tipo inmerso en aceite, pueden tener un factor de potencia entre 0,5% y 1.5%.*

- *Según la MEGGER Company:*

*El sistema de aislamiento integro de un transformador de potencia moderno (nuevo) del tipo inmerso en aceite, y de voltaje mayor o igual a 115kV, debe tener un factor de disipación de entre 0,25% a 1%, a una temperatura de 20°C.*

*Transformadores de potencia con 15 años de operación, deben presentar un factor de disipación de entre 0.75% y 1.5%.*

Debe existir una justificación razonable por parte del fabricante en el caso de valores más altos, y asegurar que ellos no son el resultado de una posible contaminación del aislamiento. Si un alto factor de potencia es causado por el uso de materiales que tienen propiamente dicho parámetro inherentemente alto,

debe considerarse su reemplazo por un material que tenga buenas características eléctricas, mecánicas, térmicas, compatible con los requerimientos del diseño del transformador, y especialmente con bajo factor de potencia.

*Se recomienda que los datos sean analizados en base a ensayos anteriores en la misma unidad, y comparados con resultados de ensayos en unidades similares.*

Las capacitancias (corriente de carga) analizadas paralelamente con los ensayos de factor de potencia y/o factor de disipación, deben ser comparadas con los datos de fabrica (datos de placa), con resultados de ensayos anteriores, y con los resultados de ensayos en unidades similares. La capacitancia es una función de la geometría del devanado, y es estable de acuerdo a la temperatura y la vida útil del aislante. Por tanto, un cambio en ella es una indicación de que existe movimiento de los arrollamientos producto de una falla. Los aislamientos entre el arrollamiento de alta con respecto a tierra y entre el arrollamiento de alta y baja, son donde más frecuentemente se producen estos cambios.

Factores de potencia anormales (altos o bajo/negativo) son ocasionalmente registrados para el aislamiento entre arrollamientos de transformadores de dos devanados. Este puede ser el resultado de un inapropiado aterrizamiento del tanque del transformador (alta resistencia), o el uso de una pantalla

electrostática aterrizada entre sus arrollamientos. En este último caso, la capacitancia entre arrollamientos prácticamente no existe y se registran valores bajos de corriente y watts. Por lo tanto, debe verificarse la existencia de esta pantalla para emitir algún criterio al respecto.

*Un incremento del factor de potencia acompañado de un marcado incremento de la corriente de carga, usualmente indica excesiva humedad o deterioración térmica acrecentada por la humedad.*

#### **4.4.2.2 Ensayo para la medición de la Resistencia de Aislamiento**

Este ensayo no constituye un criterio de aprobación o desaprobación del transformador. La resistencia determinada, no obstante sujeta a grandes variaciones debido a la temperatura, a la humedad y a la calidad del aceite empleado, es un valor que da idea del estado del aislamiento y especialmente de la existencia de cortocircuitos francos en el transformador, antes de someterlo a los ensayos dieléctricos de tensión aplicada, tensión inducida y tensión de impulso, los cuales permitirán la identificación de los defectos menos pronunciados. Cabe destacar adicionalmente, la importancia de este ensayo para un seguimiento del proceso de secado del transformador.

#### 4.4.2.2.1 Voltajes aplicados para el ensayo

Las normas brasileras ABNT, recomiendan que la tensión aplicada para el ensayo de resistencia de aislamiento de un transformador de potencia, debe estar acorde con la tensión nominal del equipo. Para lo cual, se estableció la siguiente tabla de referencia:

<i>Tensión nominal del transformador bajo ensayo (Voltios)</i>	<i>Tensión del Megohmetro (Voltios)</i>
440 000 / 230 000 / 138 000 345 000 / 230 000 / 138 000 345 000 / 138 000 / 13 800 230 000 / 138 000 230 000 / 88 000	5000
138 000 / 88 000 138 000 / 69 000 138 000 / 33 000 138 000 / 13 800	2500

*Tabla 4.5 – Tensiones aplicadas para el ensayo de resistencia de aislamiento, en base a la tensión nominal del transformador*

#### 4.4.2.2.2 Ensayos aplicados

Los ensayos aplicados para la medición de la resistencia de aislamiento de los transformadores, al igual que los aplicados para la determinación de factor de potencia, dependen de la configuración del equipo. Por lo tanto, su análisis se basa igualmente en transformadores de dos y tres arrollamientos, incluyendo el autotransformador.

Los diferentes ensayos aplicados para la medida de la resistencia de aislamiento, según el tipo de transformador, se detallan en los *apéndices 4.B1, 4.B2 y 4.B3*.

#### **4.4.2.2.3 Criterios para la evaluación de los resultados**

Para el análisis correcto de las lecturas y la anticipación de fallas, se requiere tener criterio y experiencia personal básicos. En general, las lecturas de resistencia de aislamiento deberán considerarse como relativas, ya que sus valores varían sensiblemente dependiendo del esquema del transformador, del líquido aislante usado, la temperatura y otros factores. Para una simple medición sin valores de referencia, sólo se puede verificar si existen fallas en el aislamiento, tales como, cortocircuitos entre los arrollamientos o entre estos con respecto a la masa del equipo.

Como una confirmación a la relatividad de las lecturas de resistencia de aislamiento, valores considerablemente más bajos en relación a mediciones anteriores en condiciones idénticas, no indican necesariamente irregularidades en el aislamiento, no obstante será aconsejable optar por elevar la resistencia de aislamiento mediante el secado del transformador. Por otro lado, valores más altos que los obtenidos por los criterios a mencionar, no representan una garantía en cuanto al comportamiento del aislamiento si los mismos fueran

inferiores a los valores obtenidos en mediciones anteriores a condiciones idénticas.

De esta forma, se verifica que el valor absoluto de la resistencia de aislamiento no tiene mucho significado, siendo buena práctica su medición periódica (anual o semestral) y la comparación con resultados anteriores, efectuando un análisis completo de la tendencia de estos valores mediante gráficos estadísticos.

*Para que el análisis comparativo sea efectivo, todos los ensayos deberán hacerse al mismo potencial, las lecturas deberán corregirse a una misma temperatura base y en lo posible bajo las mismas condiciones. Si fuesen constatadas alteraciones, es probable que problemas estén por ocurrir.*

Para verificar si el aislamiento ha absorbido humedad, existen los criterios mostrados a continuación, los mismos que están basados en formulas empíricas o datos estadísticos resultados de varios años de experiencia:

### **CRITERIO I**

Los valores mínimos admisibles de la resistencia de aislamiento están dados en base a los siguientes criterios de referencia:

<b>TRANSFORMADOR</b>	<b>CRITERIO</b>	
	<b>Temperatura de operación cerca de 30°C</b>	<b>Temperatura de operación cerca de 80°C</b>
<b>Tipo inmerso en aceite aislante</b>	Cerca de 30 MΩ por kV de la clase de aislamiento	Cerca de 1 MΩ por kV de la clase de aislamiento
<b>Tipo inmerso en askarel</b>	Cerca de 3 MΩ por kV de la clase de aislamiento	Cerca de 0,1 MΩ por kV de la clase de aislamiento

**Tabla 4.6** – Valores mínimos de resistencia de aislamiento

## **CRITERIO II**

Los valores mínimos admisibles de la resistencia de aislamiento están dados en base a las siguientes expresiones:

<b>TIPO DE AISLAMIENTO</b>	<b>RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A 75°C (<math>R_{i75°C}</math>)</b>	
	<b>MONOFÁSICOS</b>	<b>TRIFÁSICOS</b>
<b>ACEITE</b>	$R_{i75°C} = \frac{3 \cdot 2.65 \cdot V_i}{\sqrt{S_n / f}}$	$R_{i75°C} = \frac{2.65 V_i}{\sqrt{S_n / f}}$
<b>ASKAREL</b>	$R_{i75°C} = \frac{3 \cdot 0.265 \cdot V_i}{\sqrt{S_n / f}}$	$R_{i75°C} = \frac{0.265 V_i}{\sqrt{S_n / f}}$

**Tabla 4.7** – Formulas para determinar valores mínimos de resistencia de aislamiento

donde:

$R_{i75°C}$ : Resistencia mínima del aislamiento a 75°C, para cada fase (en MΩ);

$V_i$ : Clase de aislamiento del arrollamiento de mayor tensión, considerado en el momento de la medición (en kV);

$S_n$ : Potencia nominal del transformador (en kVA).

Para poder comparar los valores calculados en estas expresiones con los obtenidos en campo mediante el uso del megohmetro, ambos deberán referirse a una misma temperatura. Por tanto, será necesario seguir una de las siguientes recomendaciones:

- ✓ Corregir la resistencia mínima calculada de 75°C a la temperatura (del aislamiento) del registro en campo. O
- ✓ Corregir la resistencia medida con el megohmetro de la temperatura dada a 75°C.

La corrección de temperatura se la realiza en base a la siguiente expresión:

$$R_{i\theta} = R_{i75^{\circ}\text{C}} \cdot fc \quad (4.34)$$

donde:

**$R_{i\theta}$** : Resistencia de aislamiento obtenida en campo mediante el uso del megohmetro (en  $M\Omega$ );

**$fc$** : Factor de corrección de temperatura para 75°C

El valor del factor de corrección  **$fc$**  se lo obtiene mediante la siguiente expresión:

$$fc = 2^a \quad (4.35)$$

donde:

$$a = \frac{75^{\circ}\text{C} - \theta}{10} \quad (4.36)$$

siendo  $\theta$ , la temperatura del espécimen bajo ensayo, en el instante que se tomo la lectura.

En la *tabla anexa 4.F1* se muestran los factores de corrección calculados para la determinación de la resistencia de aislamiento mínima en temperaturas diferentes de 75°C.

### **CRITERIO III**

Los valores de los índices de polarización y absorción pueden dar una idea del estado del aislamiento, tomando como referencia la *tabla anexa 4.B1*.

## **4.4.3 ENSAYOS DIELECTRICOS ESPECIALES APLICADOS EN FÁBRICA**

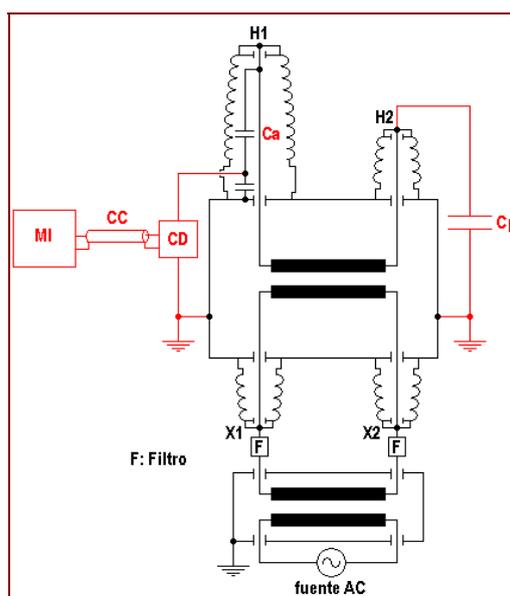
### **4.4.3.1 Ensayo de Descargas Parciales**

#### **4.4.3.1.1 Metodología del ensayo**

Existe una gran dificultad en la medición y localización de las descargas parciales en el interior de un transformador de potencia, debido a la irregularidad en la propagación de las señales.

Por lo tanto, para mejorar la precisión de este ensayo fue desarrollado el “*método de las múltiples mediciones*”, que tiene como principio básico la localización de las descargas parciales en diversos puntos, procurando evaluar su valor más correcto y su probable localización.

Este método debe ser aplicado en todos los arrollamientos de un transformador y las mediciones son realizadas en los terminales de los bushing's de alta tensión y en el terminal del bushing del neutro.



**Figura 4.31** - Esquema de medición de descargas parciales de un transformador mediante un bushing tipo capacitivo.

Por tanto, la implantación de los esquemas de medición y calibración del circuito de medición deberán realizarse conforme lo detallado en el literal 4.3.1.2.3 de este capítulo.

Según la norma brasilera ABNT NBR 05356/81, para la ejecución del ensayo de descargas parciales en un transformador, se debe considerar lo siguiente:

- a) Excitar el transformador como en funcionamiento normal. Siendo en el caso de transformadores trifásicos con aplicación de tensión trifásica.
- b) La frecuencia de la tensión aplicada puede ser aumentada con relación a la nominal de tal forma que se evite la saturación del circuito magnético.
- c) Si el transformador cuenta con un conmutador bajo carga, este debe estar conectado en la derivación de máxima relación.
- d) Antes y después del ensayo, debe ser medida la intensidad de ruido ambiente, no debiendo ser superior a 150pc o 50μV.
- e) Cumplir la siguiente secuencia de aplicación de tensión para la toma de lecturas del ensayo:

$$V_1 = V_m \qquad V_2 = \frac{1,5V_m}{\sqrt{3}} \qquad (4.37)$$

donde:  $V_m =$  Tensión máxima de operación

1. Energizar el transformador con una tensión no superior a  $1/3$  de  $V_2$ .
2. Elevar la tensión hasta  $V_2$  y mantener el nivel durante 5 minutos.
3. Elevar la tensión hasta  $V_1$  y mantener el nivel durante 5 segundos.
4. Bajar la tensión hasta  $V_2$  y mantener el nivel durante 1 hora.
5. Bajar la tensión hasta un valor inferior a  $1/3$  de  $V_2$  y desenergizar.

#### **4.4.3.1.2 Criterio para la evaluación de los resultados**

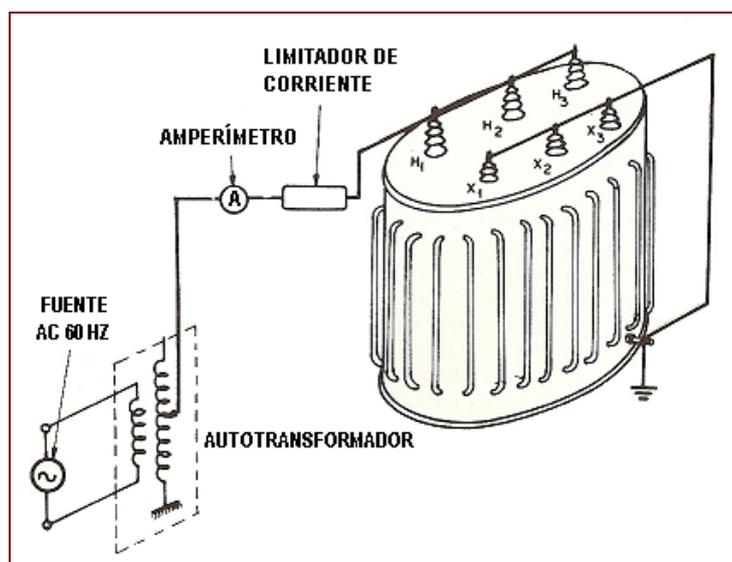
El transformador es considerado aprobado si: NO ocurrieran descargas durante el ensayo; ó si estas se presentaran a la tensión  $V_2$ , NO deban exceder el valor de  $300\text{pC}$  (o  $100\mu\text{V}$ ) sin mostrar tendencia acentuada de crecimiento durante el intervalo de 1 hora.

#### **4.4.3.2 Ensayo de Tensión Aplicada**

Como ya se mencionó anteriormente, un megohmmetro con una tensión de ensayo igual o superior a la nominal de un transformador de potencia, sería difícil de obtenerse. No obstante, para que se haga un análisis real del aislamiento entre arrollamientos y entre estos con respecto a la masa, se necesita aplicar al transformador una tensión tal que corresponda en lo mínimo a la nominal, a una frecuencia también nominal.

#### 4.4.3.2.1 Metodología del ensayo

El ensayo de tensión aplicada en un transformador de potencia, es realizado como indica la figura 4.31. El conjunto a ser utilizado consistirá en una fuente de tensión de frecuencia igual a la nominal del transformador, que alimenta un transformador de salida variable. La tensión de salida es graduada para un valor que está relacionado con la clase de aislamiento del transformador, según se verifica por la tercera columna de la *tabla anexa 4.C1*.



*Figura 4.32 - Esquema de conjunto para ensayo de tensión aplicada*

La tensión debe ser aplicada inicialmente con un valor no superior a un tercio de la tensión de ensayo y elevada posteriormente hasta el valor máximo tan rápido cuanto fuera compatible con la lectura correcta de los instrumentos. La tensión máxima de ensayo debe ser mantenida durante 60 segundos y debe ser reducida rápidamente a menos de un tercio de este valor y desconectada.

En la primera fase del ensayo, los terminales de los arrollamientos son cortocircuitados y la alimentación es hecha inicialmente por el lado de alta tensión, aterrizándose los terminales de baja tensión y la masa del equipo. En la segunda fase del ensayo, la alimentación es realizada por el lado de baja tensión, aterrizándose los terminales de alta tensión y la masa del equipo. Se debe observar que las tensiones son diferentes en las dos etapas del ensayo, pues el valor de tensión depende de la clase de tensión del arrollamiento bajo ensayo, la cual es diferente para alta y baja tensión.

*Se constata que, para cada fase del ensayo, los terminales del arrollamiento bajo ensayo están en cortocircuito. Esto implica que todos los puntos de la bobina están al mismo potencial. Este hecho lleva a la conclusión de que este ensayo solo permite analizar el aislamiento entre las bobinas de alta tensión, baja tensión y la masa. Por lo tanto el aislamiento entre espiras no es verificado.*

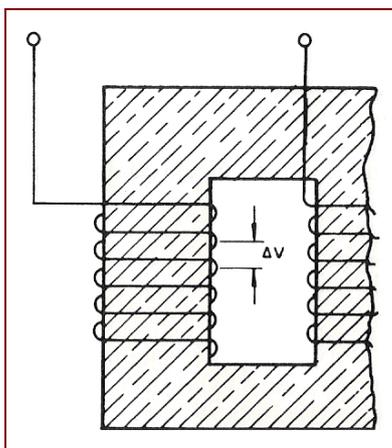
#### **4.4.3.2.2 Criterio para la evaluación de los resultados**

En relación a la manera de constatar la existencia o no de defectos, el amperímetro indicado en el esquema de la figura 4.31 ya lo detectaría, pues una sola indicación de corriente sólo ocurriría si hubiese un circuito cerrado a través del aislamiento.

*Se especifica que la lectura en el amperímetro no debe ser superior a 1mA, o que el aislamiento mínimo entre las partes constituyentes citadas debe ser de  $1000\Omega$  para cada 1 Voltio de tensión aplicada. Por ejemplo, en transformadores ensayados con 10000 voltios, la resistencia mínima del aislamiento debe ser 10 M  $\Omega$ .*

#### 4.4.3.3 Ensayo de Tensión Inducida

Como ya se ha mencionado anteriormente, los ensayos de resistencia de aislamiento y de tensión aplicada, tienen por finalidad la verificación del aislamiento entre los arrollamientos de alta y baja tensión, y entre estos con respecto a masa. Por otro lado, es un hecho conocido que pueda ocurrir defectos de aislamiento entre las propias espiras de un arrollamiento. Como se indica en la figura 4.32, de acuerdo con el gradiente  $\Delta V$ , podrá haber un rompimiento del dieléctrico entre espiras, desde que el aislante no lo soporte.



**Figura 4.33** – Ensayo de tensión inducida. Análisis del aislamiento entre espiras

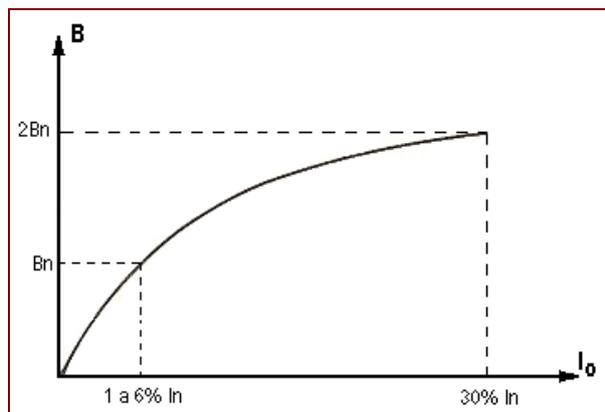
#### 4.4.3.3.1 Metodología del ensayo

Para la realización de este ensayo, se emplea el transformador en la condición de vacío, aplicándose entre los terminales del lado de baja, una tensión igual al doble de la nominal durante un tiempo correspondiente a 7200 ciclos. En el lado de alta tensión, habrá el doble de la nominal y con eso el gradiente de potencial entre espiras también se duplicará, de tal modo que, si hubiera un defecto en el aislamiento, el mismo se revelaría dentro del tiempo implícitamente fijado en términos del número de ciclos citado.

Una nota importante respecto a este ensayo es que debe ser observado un valor máximo de corriente de excitación igual a 30% de la corriente nominal del arrollamiento al cual se aplica la fuente. Un alto valor de corriente calentaría el arrollamiento y la temperatura afectaría al aislamiento. Se sabe que el valor de la tensión inducida es del tipo.

$$V \cong K_1 \cdot B \cdot f \quad (4.38)$$

Se concluye que para doblar la tensión, se podría doblar  $B$ , por lo tanto, como se muestra en la figura 4.33, la saturación sería muy grande y por consecuencia la corriente de excitación sería alta. Lo que se hace entonces es aumentar la frecuencia.



**Figura 4.34** – Obtención del doble de la tensión nominal por el aumento de la inducción magnética

En muchos casos, el aumento llega al doble de la frecuencia nominal, y la inducción continua igual a aquella de funcionamiento nominal así como la corriente de vacío.

Conocida la frecuencia, para el cálculo de la duración del ensayo en segundos, se tiene:

$$T = \frac{7200}{f} (\text{segundos}) \quad (4.39)$$

Que en el caso de  $f=120$  Hz, es igual a 1 minuto.

En relación al esquema de ensayo, sería similar al implantado para el ensayo a vacío y el problema de la detección de los defectos sería efectuado de acuerdo a la práctica del ejecutor, siendo que: las características para un defecto de

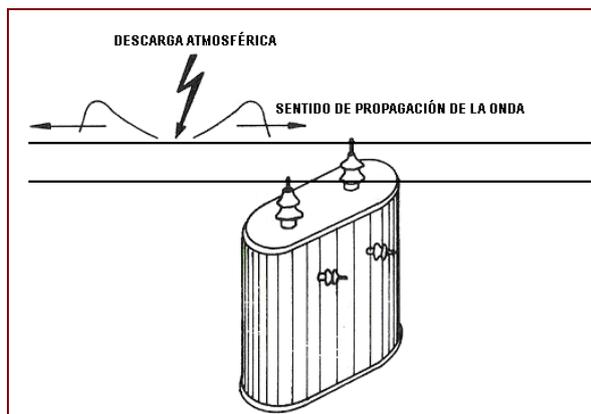
magnitud, sería la alteración de la relación de transformación, y para un defecto menor, las burbujas en la superficie del aceite.

#### **4.4.3.4 Ensayo de Impulso de Tensión**

Los transformadores deberán por norma, soportar sin cualquier daño, durante un cierto intervalo de tiempo, un valor de sobretensión compatible con su clase de tensión. El ensayo de impulso en transformadores, trata fundamentalmente, la verificación de la rigidez dieléctrica a lo largo de los arrollamientos (entre espiras, capas y bobinas) con una distribución de sobretensiones análogas a las que aparecen en servicio.

Siendo los arrollamientos sometidos a este tipo de sobretensión, en caso de que haya problemas de fabricación o de otro origen desde el punto de vista del aislamiento, se podría tener, su rompimiento tanto entre espiras de una bobina o entre espiras de arrollamientos de alta y baja tensión. Como se sabe, tales arrollamientos normalmente se encuentran superpuestos uno al otro y en una misma columna del núcleo.

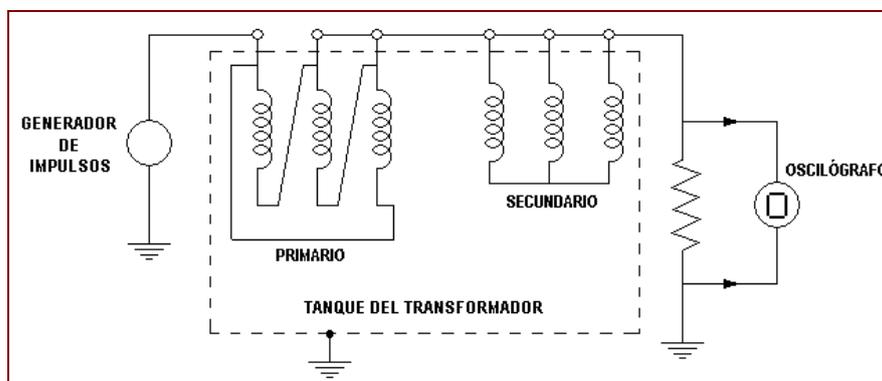
En la figura 4.34 se indica que la descarga atmosférica incidiendo sobre una línea se divide en dos partes, originando dos ondas de sobretensión que se propagan en sentidos opuestos. De esta forma, se puede observar el sentido de la onda que incide sobre el transformador.



*Figura 4.35 – Sentido de propagación de la onda de tensión*

#### 4.4.3.4.1 Metodología del ensayo

De modo general, el ensayo de impulso debe ser efectuado en todos los arrollamientos de un transformador, de tal forma, que al aplicarse la onda a uno de sus terminales, se recomienda que los demás sean aterrizados directamente o por medio de resistores especiales. Es decir, el arrollamiento bajo ensayo deberá tener uno de sus terminales aterrizado, estando el otro conectado al generador de impulso. (Ver la siguiente figura)



*Figura 4.36 – Esquema de ensayo en un transformador, para aplicación de onda de impulso*

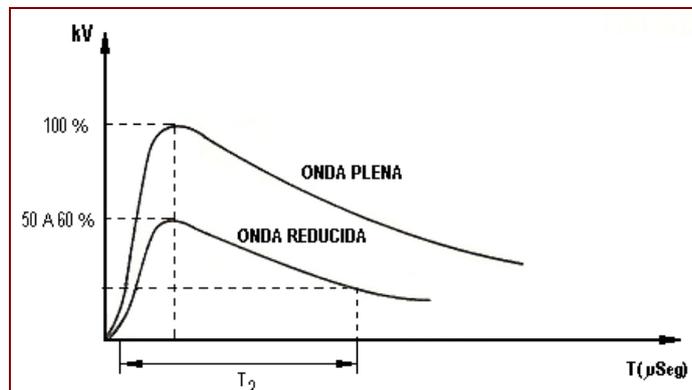
De acuerdo con las normas, el siguiente orden debe ser observado en la aplicación del impulso en cada terminal del transformador, excepto el neutro: (1ro) Una onda plena reducida, (2do) Dos ondas cortadas y (3ro) Una onda plena.

Estas ondas de impulso deben satisfacer las condiciones establecidas por las normas cuando el transformador sea parte del circuito generador de impulsos. Para un análisis más fácil de los oscilogramas, se debe tomar simultáneamente, las ondas de tensión y corriente, tanto de las ondas reducidas como de la plena.

a) Ondas reducidas

Al ensayarse un transformador, se puede prever la existencia de defectos en el aislamiento, en mayor o menor escala. De este modo, con el propósito de no afectar totalmente al equipo, en el caso de que existan defectos de gran magnitud, las normas recomiendan que la primera onda a ser aplicada debe tener el formato normal pero con un valor de cresta correspondiente a la faja de 50% a 60% de lo estipulado para la clase de tensión del espécimen bajo ensayo.

Esta onda no solicita tanto el transformador (debido al valor de tensión reducida), pero si hubiese defectos acentuados en el aislamiento, estos serían evidenciados. La siguiente figura ilustra la forma de onda reducida:

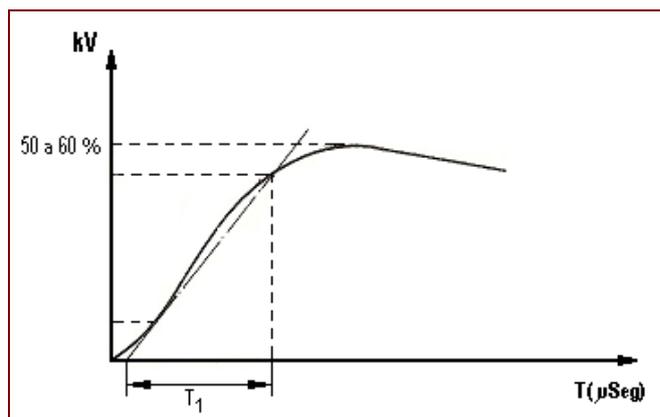


**Figura 4.37** - Primera onda aplicada, reducida, utilizada para la verificación de defectos acentuados y del tiempo  $T_2$

Los valores de los tiempos  $T_1$  y  $T_2$  pueden sufrir eventuales alteraciones. Siendo el transformador colocado en serie con el circuito del generador de impulsos, el mismo puede afectar en la forma de las ondas, a través de una alteración de los parámetros del circuito formado, pues, principalmente en los instantes iniciales se destaca el efecto capacitivo del transformador.

Del oscilograma referente a la primera onda aplicada, se puede obtener fácilmente el tiempo  $T_2$ , determinándolo de acuerdo con su definición. La determinación del tiempo  $T_1$  por el mismo oscilograma empleado para el cálculo de  $T_2$ , no es aplicable debido a la pequeña precisión que ofrece. Es interesante recordar que mientras  $T_2$  es del orden de  $50\mu s$ ,  $T_1$  será del orden de  $1,2\mu s$ .

Con el propósito de calcularse el tiempo de subida  $T_1$ , se aplica otra onda reducida, registrando su formato con una escala de tiempo bastante ampliada, tal como se representa en la figura 4.37:



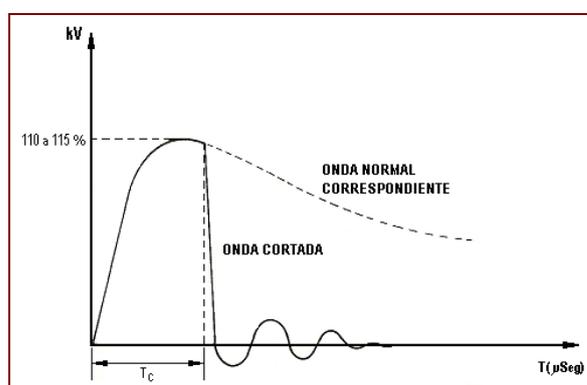
**Figura 4.38** – Segunda onda aplicada, reducida, utilizada para la determinación del tiempo  $T_1$

#### b) Ondas cortadas

Es común que una onda de sobretensión del tipo convencional sufra bruscos cortes debido a la actuación de pararrayos o descargas en los mismos aisladores de los transformadores. La onda resultante, que mucho solicitará el aislamiento, tendrá un formato del tipo indicado en la figura 4.38 donde se notan dos características importantes:

1. La onda cortada es proveniente de una onda de impulso normal, que presenta un valor de cresta del orden de 110% a 115% del indicado por la *tabla anexa 4.C1*.

2. El corte puede ser realizado en la frente, en la cresta o en la cola de la onda. Generalmente, este es efectuado para un tiempo largo encima del cual ocurre la tensión de cresta, y se lo denomina **Tiempo de Corte ( $T_c$ )**. Cabe recalcar que el origen de este tiempo no es marcado de acuerdo al criterio establecido anteriormente para los tiempos  $T_1$  y  $T_2$ .



**Figura 4.39** – Tercera y cuarta ondas aplicadas: cortada

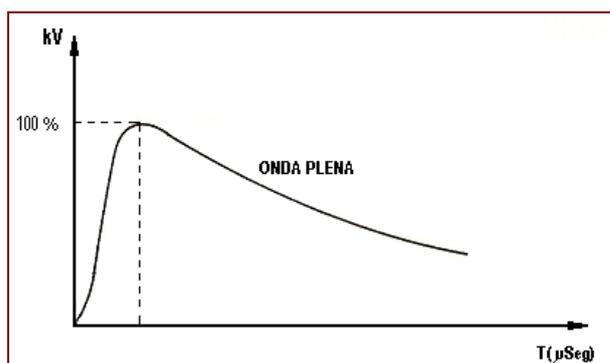
*Al aplicarse siempre una segunda onda cortada, se verifica si la primera no altero el transformador, comparando los oscilogramas en los dos casos.*

Para transformadores mayores a 15KV, se consiguen valores de  $T_c$  situados entre 1,8 a 3 $\mu$ s. Para la determinación del tiempo de corte  $T_c$  para diferentes niveles de tensión del transformador, basta observar la quinta columna de la **tabla anexa 4.C1**.

Respecto al equipo necesario para efectuar el corte, un centellador común lo conseguirá apenas perciba el valor de tensión para el cual fue calibrado.

c) Onda Plena

En continuación al ensayo, se aplica al transformador una onda plena semejante a la primera, pero con el valor de cresta de 100% del estipulado para la clase de tensión del transformador bajo ensayo.



*Figura 4.40 – Quinta onda aplicada: plena*

d) Segunda Onda reducida

Como sexta y última onda aplicada, se tiene otra onda reducida, cuyo objetivo sería el de comparar su oscilograma con aquel obtenido al inicio del ensayo. El análisis permitirá afirmar si el transformador sufrió algún daño con los impulsos aplicados.

*La combinación transformador-generador de impulso, determina oscilaciones características para cada tipo de transformador. Estas oscilaciones permanecerán fijas en periodo para un impulso dado hasta que se rompa el aislamiento del transformador.*

#### **4.4.3.4.2 Criterios para la evaluación de los resultados**

En gran escala, los defectos podrán evidenciarse según las características perceptibles al elemento que se este realizando el ensayo. Mientras que, con pequeños defectos el problema se vuelve más serio, siendo que estos podrán ser identificados por los formatos de las ondas de tensión y corriente que deberán ser registrados y analizados por un especialista. El análisis de mayor sensibilidad es efectuado en la onda de corriente y el de menor sensibilidad en la onda de tensión. Es en base a este último que aquí se hará referencia.

*En el caso que se tengan referencias de resultados de ensayos de un transformador similar y en buenas condiciones, se podría llegar a una conclusión al comparar las ondas obtenidas en este con las del equipo bajo ensayo.*

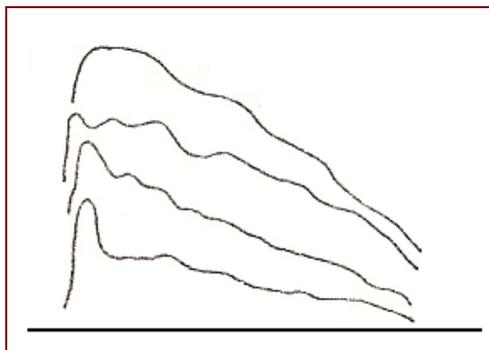
Para la detección de defectos, la onda más usada es la onda plena, la cual es definida por el nivel básico de aislamiento (BIL) del equipo ensayado. La onda reducida inicial servirá de referencia para las ondas siguientes.

*Si la última onda reducida puede ser comparada a la onda plena aplicada después de las cortadas, el arrollamiento es considerado bueno. El criterio de la comparación de las ondas plenas y reducidas es un criterio seguro en el análisis de defectos.*

El circuito combinado del generador de impulsos es generalmente muy complicado y pequeñas variaciones se originan debido a este hecho. Así, algunas de estas pueden ocurrir en la subida y en la cresta de la onda.

*Si a pesar de estas pequeñas variaciones, la onda plena puede todavía ser comparada a la onda reducida, el transformador aún será considerado bueno. No obstante, las modificaciones en la forma de onda, a pesar de ser pequeñas, deben ser investigadas, ya que pueden indicar algún defecto en el transformador. Este criterio incluye también pequeñas oscilaciones en la cola de la onda.*

El hecho de que una onda presentara oscilaciones o amortiguamientos, no significa que el transformador tuviera algún defecto. No siempre se consigue con el transformador en el circuito generador de impulsos, una onda igual a 1,2/50 libre de oscilaciones. Mientras los oscilogramas puedan ser comparados en tiempo y amplitud, podemos afirmar que el transformador está bueno.



**Figura 4.41** – Oscilogramas obtenidos en transformadores diferentes y todos están buenos

*Si hubiera fallas, las modificaciones en el dieléctrico van a alterar los oscilogramas por causa de la modificación de la impedancia del transformador o por la presencia de corona.*

Tales fallas de aislamiento pueden traducirse generalmente como: descarga interna en el arrollamiento y en el aceite para tierra, falla en el bushing, cortocircuito de los cables de conexión para tierra o para un arrollamiento adyacente. Fallas obvias podrán ser detectadas por humo, burbujas, ruidos y grandes cambios en las oscilaciones. Grandes defectos aparecerán como colapso parcial o total en la onda plena, generalmente antes de los  $50\mu\text{s}$  y siempre simultáneamente, en los oscilogramas de la onda de corriente.

Ejemplos de referencia sobre interpretación de fallas, a partir del análisis de ondas de tensión obtenidas en los oscilogramas durante los ensayos de impulsos aplicados en transformadores de potencia, se muestran en detalle en la *figuras anexas 4.6.A,B,C,D,E,F,G,H.*

Un análisis cuidadoso debe efectuarse en los oscilogramas, porque un examen visual puede no percibir ciertos detalles importantes. Cabe recalcar, que los desvíos en las ondas pueden ser provocados por factores externos al transformador.

*Una manera simple de verificar si las modificaciones en los oscilogramas no son debidas al transformador, es tomar una serie de ondas reducidas con valores cada vez menores. Si todas ellas pudieran ser superpuestas entonces el defecto no es del transformador, sino externo.*

En el caso de la indicación de defecto, un buen diagnóstico puede ser obtenido aplicándose una serie de ondas de 50, 60, 70, 80 y 90% de la onda plena y después la onda plena, pudiendo ser seguidas de las ondas escarpadas (ondas con gran pendiente), cortadas y nuevamente la onda plena.

*La verificación del aislamiento del transformador con tensión inducida y tensión aplicada luego del ensayo de impulso, permitirá revelar los defectos provocados por este último. Entretanto, como los esfuerzos provocados por estos 3 ensayos son diferentes, puede ser que todavía prevalezca algún defecto. Los defectos deben ser analizados separadamente en cada ensayo, con sus técnicas propias*

#### 4.4.4 PRINCIPALES RECOMENDACIONES A SEGUIR PARA LA APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS EN CAMPO

Para analizar en campo el estado del aislamiento en conjunto de un transformador de potencia, se efectúan dos tipos de ensayos: el ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento y el ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del mismo. De esta forma, las principales recomendaciones a seguir para la aplicación de tales ensayos, se exponen a continuación:

- 1) Verificar con un higrómetro en sitio, que existan las condiciones ambientales favorables para la realización de los ensayos, considerándose como valores aceptables: una temperatura no menor a **20°C** en conjunto con una humedad relativa no mayor al **75%**. Es decir, se recomienda un ambiente totalmente seco (no lluvioso), soleado y/o nublado.
- 2) Preparar previamente los recursos estrictamente indispensables para la realización de los ensayos, tales como:
  - ✓ Personal especializado de ayuda con su respectivo equipo de seguridad (casco, guantes aislantes, botas dieléctricas, gafas y otros)
  - ✓ Accesorios varios de seguridad (cinta delimitadora con anuncio de "PELIGRO", conos reflectivos y otros)

- ✓ Instrumentos de ensayo y sus accesorios.
  - ✓ Herramientas menores (llaves, ratches, escaleras telescópicas y otros)
  - ✓ Accesorios de limpieza (tela pañal, cepillos de cerdas de acero y bronce, alcohol, agua y otros)
  - ✓ Formularios para registro de las lecturas de los ensayos a realizarse.
  - ✓ Formularios de registros de ensayos anteriores (historial del equipo en análisis) y/o protocolos de ensayos en fábrica, según sea el caso (ensayo de recepción o rutinario). Estos, con el fin de ayudar a establecer un pre-diagnóstico en campo.
- 3) Como norma de seguridad estrictamente indispensable, se debe preparar el área de trabajo, delimitándola y cercándola con el objetivo de evitar el paso de personas ajenas al ensayo.
- 4) Preparar el transformador para el ensayo, tomando en cuenta lo siguiente:
- a) Aislar el transformador de toda fuente de alimentación, dado el caso de que este se encontrara ya en servicio. Por lo general, en los sistemas de transmisión, este equipo cuenta con interruptores y seccionadores adyacentes, por lo tanto, se recomienda su apertura y como medida de precaución su respectivo bloqueo operacional.

- b) Desconectar todos los conductores externos (aéreos) en los terminales de los bushing's del transformador, incluyendo la conexión a tierra del terminal neutral. Realizar a la vez, la limpieza de dichos terminales, para permitir un buen contacto con los conectores de los cables de interconexión al instrumento de ensayo.

*NOTA: Poner particular atención a los conductores por desconectarse y asegurarse de que estos hayan sido apropiadamente aislados de cualquier fuente de voltaje. Probar los voltajes extraños o inducidos y aplicar las tierras locales de seguridad.*

- c) Limpiar minuciosamente la superficie de la porcelana de los bushing's y realizar a la vez una inspección visual de la misma, para detectar alguna anomalía que posiblemente influya en el ensayo.
- d) Como el objetivo principal de los ensayos dieléctricos en campo, es la determinación de las condiciones del aislamiento entre arrollamientos y entre los mismos con respecto a la masa del equipo, es conveniente uniformizar el potencial en toda la bobina, por tanto, se requiere cortocircuitar los terminales (derivaciones) de un mismo arrollamiento, incluyendo el terminal neutral. Cabe resaltar, que esto permite eliminar algún efecto de inductancia durante las mediciones

- e) Si existieran transformadores de corriente toroidales, instalados en los bushing's del transformador, se recomienda que los terminales de sus arrollamientos secundarios disponibles en los gabinetes de control local, sean cortocircuitados.
  - f) Si la unidad es equipada con un cambiador de TAP bajo carga (OLTC), este debe ser fijado en la posición neutral
  - g) Aterrizar los arrollamientos por un periodo de 10 minutos, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual del aislamiento que pudiera afectar la medición.
- 5) Ubicar los instrumentos de ensayo sobre una superficie plana y firme, a una distancia del transformador tal que, permita el buen uso de los cables de interconexión.
- 6) Definir previamente el método de ensayo a ser aplicado, analizarlo gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones
- Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, hacer referencia a los métodos expuestos en los *apéndices 4.A1, 4.A2 y 4.A3.*

- Para el ensayo de medición de la resistencia de aislamiento, hacer referencia a los métodos expuestos en los *apéndices 4.B1, 4.B2 y 4.B3*.
- 7) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar lo siguiente:
- Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento:
    - a) Aterrizar correctamente el instrumento de ensayo, de ser posible a los mismos puntos de conexión de la cuba del transformador a la red principal de tierra de la instalación.
    - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.4.2.1.1.
    - c) Operar adecuadamente el o los interruptores de seguridad del instrumento de ensayo, según lo recomiende el fabricante.
    - d) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los métodos de ensayo a ser aplicados, cuyo modelo depende del tipo de transformador en análisis (de dos o tres arrollamientos).

- Para el ensayo de medida de resistencia de aislamiento:
  - a) Definir el método de análisis a ser aplicado, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4.
  - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.4.2.2.1.
  - c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los métodos de ensayo a ser aplicados, cuyo modelo depende del tipo de transformador en análisis (de dos o tres arrollamientos).
  
- 8) Después de finalizar el primer ensayo, se debe descargar la capacitancia del espécimen por un periodo aproximado de cuatro veces el tiempo que se aplicó el voltaje en el ensayo previo. Esto, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual que pueda afectar la próxima medición.

**NOTA:** *NO desconectar los cables de interconexión por lo menos antes de 30 a 60 segundos después del ensayo, para permitir la descarga normal de la capacitancia.*

## **4.5 ENSAYOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL ACEITE DIELECTRICO COMO PARTE DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA**

### **4.5.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Un aceite mineral aislante debe ser sometido a ciertos ensayos básicos recomendados por la norma ASTM-D3487, esto con el objetivo de verificar que sus propiedades cumplan con las especificaciones dadas por dicha norma, de tal forma que se garantice su normal funcionamiento.

Es importante distinguir tres situaciones diferentes en las que se recomienda analizar una muestra de aceite aislante, estas son:

#### ***1) Durante su recepción en campo.***

Es posible que por negligencia en el manejo de los tanques de almacenamiento durante su transporte, el aceite haya receptado humedad, partículas y gases. Por tal motivo, es recomendable conocer el estado del aceite receptado en campo mediante la ejecución de ciertos ensayos. Para este caso, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 1), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus valores límites de aceptación expuestos en la *tabla anexa 4.G1*.

**2) *Inmerso en un transformador nuevo, posterior a 48 horas de reposo, previo a la energización.***

Por motivo del primer caso expuesto, los fabricantes de transformadores recomiendan someter el aceite a un proceso de tratamiento previo a su llenado, siendo objetivo principal el ingresar un aceite con contenido reducido de gases, partículas y agua. Esto ocasiona una primera influencia en sus características. La segunda influencia se da con el aceite ya en reposo dentro del transformador, ya que este entra en contacto con sus partes internas, especialmente con el aislamiento celulósico, con el cual interactúa hasta lograr un equilibrio de humedad, la cual fue absorbida posiblemente durante el periodo de montaje y que pasó desapercibida en el proceso de secado.

Para este caso, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 2, table 3), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus valores límites de aceptación expuestos en las *tablas anexas 4.H1 y 4.H2*.

**3) *Posterior a la energización del transformador, anualmente como inspección rutinaria.***

Las normas recomiendan que a partir de la puesta en servicio del transformador, se deberá muestrear el aceite anualmente para ser sometido a

ciertos ensayos que permitan controlar la evolución de sus características, tomando una acción inmediata en el caso de comprobar alguna anomalía.

Para este caso, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 7), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus valores límites de aceptación expuestos en la *tabla anexa 4.II*. Por tanto, en la evaluación de los resultados acorde con dicha tabla, se clasifica a los aceites en servicio en tres clases que son:

- a) CLASE I: en este grupo se encuentran los aceites en condiciones satisfactorias para continuar en servicio. Los resultados de ensayos se ubican dentro de los límites referenciales de la *tabla anexa 4.II*.
- b) CLASE II: en este grupo se encuentran los aceites que presentan una baja rigidez dieléctrica y alto contenido de agua, tomando como referencia los valores límites recomendados en la *tabla anexa 4.II*. En este caso, se recomienda someter el aceite a procesos de reacondicionamiento con filtro-prensado o deshidratación al vacío.
- c) CLASE III: en este grupo se encuentran los aceites que presentan baja tensión interfacial, alto factor de potencia y número de neutralización, tomando como referencia los valores límites recomendados en la *tabla*

*anexa 4.II*. En este caso, se recomienda someter el aceite a un proceso de regeneración con tierra fuller u otro método similar.

## 4.5.2 ENSAYOS FÍSICO – QUÍMICOS

### 4.5.2.1 Contenido de Agua (Método Karl Fischer)

El contenido de humedad en el aceite se presenta en *partes por millón (ppm)* o expresado también en *miligramos de humedad por kilogramo de liquido aislante*. La determinación del contenido de agua en el aceite dieléctrico, puede dar una idea del estado de evolución del proceso de deterioración no solo del aceite, sino que también del aislamiento sólido.

El riesgo de falla dieléctrica incrementado por la presencia de humedad en el aceite, esta directamente relacionado con *la saturación relativa porcentual del aceite con agua*. Mientras que, el prematuro envejecimiento permanente del aislamiento sólido, esta directamente relacionado con *el contenido de humedad porcentual del aislamiento sólido*. Estos dos efectos se tratan según como utilizemos los valores de humedad para evaluar su contenido en los transformadores inmersos en aceite.

#### 4.5.2.1.1 Metodología del ensayo

Existen varios métodos para su determinación, pero el más adecuado es el correspondiente a la norma **ASTM D.1533**, conocido como el “método Karl Fischer por titulación coulométrica”.

Consiste en un amperímetro con corriente sobre tensión constante, el punto final de la titulación es reconocido por el paso de corriente ocasionado por ligero exceso de yodo y se dará cuando la adición de un exceso de 0,02 ml del reactivo de Fischer hace aparecer una corriente de 15 a 20 microamperes, que debe persistir por 30 segundos en lo mínimo, entre dos electrodos de platina sumergidos en la solución conteniendo el líquido bajo ensayo.

El yodo en el reactivo de Fischer reacciona con el agua presente en la muestra de aceite, terminándose la reacción en el momento en que se consume la totalidad del agua presente. El instrumento de ensayo detecta y mide la carga electrostática (en coulombios) generada por la reacción y transforma dicho valor a ppm (partes por millón) de agua, dándole la información al instrumento del peso de la muestra.

Interpretando químicamente la reacción producida en el ensayo, se podría decir que este método consiste en la oxidación del dióxido de azufre por el yodo en

presencia de agua, la piridina y el alcohol metílico, conforme la siguiente ecuación:



Por tanto, son necesarias 3 moléculas-gramo de yodo para 2 de agua. Cabe recalcar que la presencia de agua es fundamental para la oxidación del dióxido de azufre.

El esquema básico y fotografías del instrumento utilizado en laboratorio para la determinación del contenido de agua en base a este método, se muestran en las *figuras anexas 4.7.A, B, C*.

#### 4.5.2.1.2 Criterio para la evaluación de resultados

La interpretación de los resultados obtenidos puede darse de dos formas diferentes, que de cierta forma guardan relación directa:

- 1) El valor directo en ppm obtenido en el instrumento de Karl Fischer, es comparado con los valores límites referenciales recomendados por la IEEE Std.C57.106-2002 que se muestran en las *tablas anexas 4.G1, 4.H1, 4.H2 y 4.J1*

*El aceite es considerado con contenido de humedad ACEPTABLE cuando el resultado del ensayo en ppm, se encuentre por debajo del límite recomendado en las tablas.*

- 2) El valor en ppm obtenido en el ensayo es expresado en términos de *porcentaje de saturación de agua en el aceite*, siendo este comparado con los valores límites referenciales recomendados por la IEEE Std.C57.106-2002 que se muestran en la *tabla anexa 4.JI*.

*El aceite es considerado con contenido de humedad ACEPTABLE cuando el resultado del ensayo en %, se encuentre por debajo del límite recomendado en la tabla.*

En base a la misma publicación en referencia de la IEEE, se presenta la *tabla anexa 4.KI*, donde se establecen rangos de valores de porcentaje de saturación de agua en el aceite, en relación con las condiciones cualitativas de contenido de humedad en el aislamiento celulósico.

*El agua es formada por la deterioración de la celulosa y del aceite, o proveniente del exterior del transformador. Cuanto más bajo es el contenido de agua en el aceite, menor serán las pérdidas dieléctricas y la corrosión metálica, y más larga la vida útil del transformador.*

*Un contenido de humedad de 50ppm en el aceite del tope del transformador es considerado crítico e indica la necesidad de su eliminación. Con un aceite en este estado, seguramente el aislamiento sólido del transformador, constituido de papel, estará con exceso de humedad.*

### **Saturación de agua en el aceite**

La humedad no es muy soluble en presencia de un aceite limpio y nuevo. La solubilidad aumenta a temperaturas más altas. El resultado de comparar cuanta humedad hay disuelta en el aceite con cuanta humedad puede contener este a una temperatura cualquiera, es lo que se conoce como *la saturación relativa del aceite o saturación de agua en el aceite*. La misma que expresada en términos porcentuales, se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\%saturación = \frac{ppm(mg / kg)}{S_o} \cdot 100\% \quad (4.40)$$

$$\log_{10} S_o = \left( -\frac{1567}{T} \right) + 7.0895 \quad (4.41)$$

donde:

***ppm***: contenido de agua en el aceite determinada por el método de Karl Fischer.

***So***: Solubilidad de agua en el aceite

***T***: Temperatura absoluta del aceite (en grados Kelvins)

Si la humedad del aceite es mayor que la cantidad de saturación relativa deseada y el transformador se enfría significativamente, parte del agua disuelta se separa de la solución en forma de gotas de agua libre. Estas gotas generan una condición que puede causar falla dieléctrica inmediata, si se ponen en contacto con un conductor energizado en el interior del equipo.

#### **4.5.2.2 Examen Visual y Color**

La determinación del color del aceite dieléctrico, puede dar una idea del estado de evolución de su deterioración. Esto se debe a que con su envejecimiento, irá a perder su coloración líquida e tomará una tonalidad más oscura, presentándose finalmente de color marrón bien oscuro.

##### **4.5.2.2.1 Metodología del ensayo**

Los métodos de ensayo normalmente aplicados corresponden a las normas **ASTM D.1500** y **ASTM D.1524**. Ambos tienen por finalidad verificar el color del aceite y la existencia de partículas sólidas y gotas de agua en suspensión.

El método **ASTM D.1500**, conocido como “el método de colorímetro”, es aplicado únicamente en laboratorio y se lo utiliza en la determinación del color de los derivados del petróleo.

El método **ASTM D.1524** está dirigido a la apreciación visual del aceite aislante en campo, el cual incluye la estimación del color según la ASTM y la verificación de la existencia de partículas sólidas y gotas de agua en suspensión.

La clasificación del color se efectúa comparándose la tonalidad del aceite muestreado con los colores de una escala padrón estándar numerada del 0,5 (el más claro) a 18,0 (el más oscuro), siendo un extracto de esta, la clasificación detallada en la siguiente tabla:

<b>NÚMERO DE COLOR</b>	<b>COLOR PADRÓN</b>
<i>1</i>	<i>Lirio</i>
<i>1,5</i>	<i>Crema claro</i>
<i>2</i>	<i>Amarillo pálido</i>
<i>2,5</i>	<i>Sidra extra pálido</i>
<i>3</i>	<i>Sidra pálido</i>
<i>3,5</i>	<i>Naranja extra pálido</i>
<i>4</i>	<i>Naranja pálido</i>
<i>4,5</i>	<i>Rojo pálido</i>
<i>5</i>	<i>Rojo claro</i>
<i>6</i>	<i>Rojo oscuro</i>
<i>7</i>	<i>Vino</i>
<i>8</i>	<i>Marrón</i>

**Tabla 4.8** – Clasificación de colores conforme a la norma ASTM

Esta escala corresponde a un comparador cuyos colores padrón son representados por placas de vidrio dispuestas en un disco rotativo. La muestra del aceite a someterse bajo ensayo, es ingresada en un tubo rectangular colocado en el comparador, luego el disco de colores es girado hasta que los colores del aceite y de la escala sean coincidentes. El número del color del disco será el del aceite. Si el color del aceite estuviera en el intermedio de dos

colores del disco, el resultado será también intermedio y estimado por interpolación.

*La observación no debe prolongarse por más de 10 a 15 segundos. El ejecutor del ensayo debe descansar la vista entre los intervalos de preferencia sobre una superficie de color gris.*

La observación de las partículas en suspensión es efectuada por el método de la luz reflejada (efecto Tyndall). Un haz de luz es proyectado sobre la muestra de aceite, en un ambiente oscuro. Si existieran partículas en suspensión, ellas reflejaran la luz tornándose visibles.

Fotografías de los instrumentos utilizados tanto en campo como en laboratorio para la determinación del color e inspección visual del aceite, se muestran en las *figuras anexas 4.8.A, B, C*.

#### **4.5.2.2.2 Criterio para la evaluación de resultados**

El color del aceite nuevo según la escala-padrón, debe ser menor o igual al límite máximo recomendado por la IEEE Std.C57.106-2002 en las *tablas anexas 4.G1, 4.H1 y 4.H2*. De igual forma su aspecto debe ser claro, limpio sin partículas en suspensión y/o sedimento.

Al aceite en operación contenido en transformadores de cualquier tensión nominal, le debe corresponder un valor máximo de 4 en la escala-padrón, con aspecto: limpio, sin partículas en suspensión y/o sedimento. No obstante, se considera que un límite medio para servicio continuo es de 2.7 de la escala padrón.

*Un cambio acentuado del color del aceite de un año para otro indica la existencia de anormalidad. Las partículas metálicas, de aislamiento, carbón y otras serán bien visibles.*

*El aceite se puede presentar turbio. En este caso, si la rigidez dieléctrica fuera buena, la tensión interfacial baja y la acidez elevada, indicarán que dicho aspecto se puede deber a productos de oxidación del aceite en suspensión. Es decir que, el color por si solo no corresponde en todos los casos a un determinado nivel de degradación del aceite, se requiere tener información adicional. Por lo tanto, el sedimento deberá ser analizado para determinar su naturaleza (borra, partículas metálicas u orgánicas y otras).*

#### **4.5.2.3 Densidad Relativa (Gravedad Específica)**

Generalmente se hace referencia a la densidad relativa como “gravedad específica”. Es una relación calculada y no cuenta con unidades de medida específicas.

#### 4.5.2.3.1 Metodología del ensayo

La densidad del aceite aislante puede ser determinada por el método correspondiente a la norma **ASTM D.1298 (80)**, conocido como el “Método del Densímetro”.

Este método consiste en determinar dicha densidad con el uso de un densímetro de vidrio que tenga una graduación de 0,600 a 1,100 y divisiones de 0,050. Como la temperatura del aceite debe ser medida a la vez, se requiere un termómetro de mercurio, con escala de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $+215^{\circ}\text{C}$  y divisiones de  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

El aceite es colocado en una probeta, sin que se formen burbujas de aire. El densímetro y el termómetro deben ser cuidadosamente sumergidos en el aceite; dado que son dispositivos de cierto peso, se hunden parcialmente en el líquido. La temperatura del medio ambiente no debe variar más de  $2^{\circ}\text{C}$  durante la medición. El líquido es suavemente agitado con el termómetro, evitando humedecer el asta del densímetro encima del punto de inmersión. La superficie del aceite cruza al densímetro en una de las dimensiones marcadas en su escala.

Cuando la temperatura fuera estable y el densímetro estuviera flotando libremente apartado de las paredes laterales de la probeta, se considerará como punto de definición o de lectura, a la división marcada en la parte inferior de

una porción curva de la superficie denominada “menisco”. Conforme indican los gráficos de la *figura anexa 4.9*.

*Si la diferencia entre las temperaturas anterior y posterior al ensayo fuera mayor que 0,5°C, se repite el ensayo hasta que esa diferencia sea en lo máximo igual a este valor.*

#### **4.5.2.3.2 Criterio para la evaluación de resultados**

El aceite nafténico para transformadores tiene una densidad relativa entre 0,84 y 0,91. La mayoría de los aceites que están en servicio caen en el rango mas estrecho de aproximadamente 0,86 a 0,89. Los valores menores de 0,84 típicamente indican que el aceite es parafínico, algunos aceites sintéticos entran en este rango.

*Cabe recordar que la faja de densidad relativa de los productos derivados del petróleo se encuentran entre 0,700 a 1,050. Valores diferentes de los citados pueden indicar contaminación del aceite por líquidos extraños.*

La ASTM recomienda interpretar los resultados de este ensayo según la siguiente clasificación:

<i>Acceptable</i>	<i>Cuestionable</i>	<i>Inacceptable</i>
<i>0,84 a 0,91</i>	<i>&lt;0,84</i>	<i>&gt;0,91</i>

Normalmente el aceite nuevo tiene una densidad aproximada de 0,9 a 20/4 °C. Para el caso de una medida por encima de 0,91, tenemos un indicio muy certero de la posible presencia de compuestos PCB's.

*Por lo general, la densidad relativa no cambia cuando el aceite esta en servicio puesto que el envejecimiento y la oxidación le afectan muy poco. No obstante, esta si varía con la presencia de contaminantes.*

Debe ser motivo de preocupación y de investigación de las causas si los valores se encuentran fuera del rango aceptable o se producen cambios significativos entre los intervalos normales de monitoreo.

#### **4.5.2.4 Número de Neutralización o de Acidez**

El aceite aislante sufre un proceso de degradación o deterioración, que es importante monitorear periódicamente, y el Número de Neutralización es uno de los ensayos fundamentales para lograr este objetivo.

Cuando el aceite se oxida y envejece en servicio, algunos de los productos de descomposición que se forman son de naturaleza ácida, lo que significa que reaccionarán y serán neutralizados por una sustancia básica (alcalina). Los métodos normalizados para el número de acidez utilizan hidróxido de potasio (KOH) para producir tal reacción con los compuestos ácidos del aceite. La

cantidad de KOH necesaria para producir la reacción se considera el indicativo de este ensayo, por tanto, el número de acidez se presenta en miligramos de KOH por gramos de muestra de aceite (mg KOH/g)

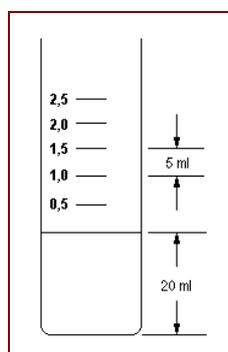
#### 4.5.2.4.1 Metodología del ensayo

El Número de Neutralización del aceite puede ser determinado por dos métodos: el primero correspondiente a la norma **ASTM D.974**, conocido como el “Método de titulación”, y el segundo correspondiente a la norma **ASTM D.1534**, conocido como el “Método aproximado”

El método de ensayo **ASTM D.974**, es de aplicación en laboratorio y el número total de ácido en el aceite aislante es determinado disolviéndose un cierto volumen del aceite (normalmente 20gr.) en una mezcla solvente compuesta de tolueno, alcohol isopropílico y pequeña cantidad de agua. La solución resultante es titulada en la temperatura ambiente con una solución alcohólica de *0,1 Normal* de hidróxido de potasio (KOH) en presencia del indicador p-naftolbenzina, cuyo color cambia de anaranjado en medio ácido para verde o azul en medio alcalino (base).

La *figura anexa 4.10* muestra la implantación de este método en laboratorio.

El método de ensayo **ASTM D.1534**, es de aplicación en campo y sirve para la determinación aproximada del número total ácido de líquidos aislantes eléctricos en general, cuya viscosidad sea menor que 4 Cst a 40°C. Para el análisis se necesita un tubo de vidrio de 50ml de capacidad, con tapa, graduado conforme la siguiente figura:



**Figura 4.42** – Tubo graduado para la determinación de la acidez del aceite

Los reactivos utilizados para el análisis son: el agua destilada; alcohol etílico; solución alcohólica de fenolftaleína (fenolftaleína 10g, alcohol etílico 100 ml y para facilitar la disolución calentar levemente); solución de KOH  $0,031 \pm 0,003$ . El KOH debe ser disuelto en una mezcla de alcohol etílico y agua en partes iguales. Verificar la normalidad con cierta frecuencia. Excedida la tolerancia de  $\pm 0,003$ , la solución debe ser despreciada.

El proceso de ensayo comprende de: (1) enjuagar el tubo con alcohol y enseguida con el líquido a ensayar. (2) Despejar el aceite a ensayar en el tubo graduado hasta la marca de 20 ml. (3) Juntar dos gotas de la solución indicadora

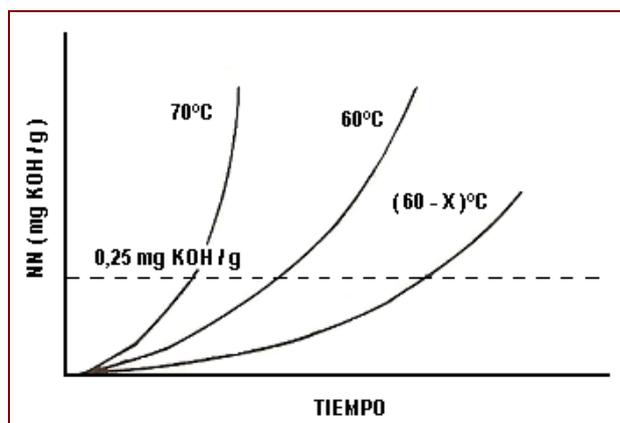
de fenolftaleína. (4) Adicionar un pequeño volumen de la solución de KOH, tapar el frasco y agitar vigorosamente. Dejar que se separen el aceite y la solución titulada de KOH, y observar el color de la capa superior. Repetir esta operación cuantas veces sean necesarias hasta que la capa superior sea de color rosa.

El número total de ácido (número de neutralización) es igual al producto de 0,1 por el volumen de solución titulada de KOH usado, en mililitro (mgKOH/g de aceite). El cálculo es basado en una densidad del aceite igual a 0,88 (la solución 0,031 N de KOH tiene 1,736 mg de KOH por litro; 20 ml de aceite de 0,88 de densidad pesan 17,6 g., luego 1 ml de solución 0,031 N de KOH corresponde a 0,1 número de neutralización).

#### **4.5.2.4.2 Criterio para la evaluación de resultados**

El resultado de Número de Neutralización obtenido en el ensayo de una muestra de aceite nuevo o en servicio, debe ser menor o igual al límite máximo recomendado por la IEEE Std.C57.106-2002 en las *tablas anexas 4.G1, 4.H1, 4.H2 y 4.II*, según sea el caso.

El valor de 0,25 mg KOH/g es considerado crítico, ya que por encima de este valor, la acidez del aceite crece exponencialmente, conforme se puede observar en las curvas del siguiente gráfico.



**Figura 4.43** – Relación NN/tiempo-temperatura del aceite aislante mineral

El número de neutralización indica el grado de acidez del aceite: cuanto más bajo, menor conducción eléctrica, menor corrosión metálica y más larga la vida útil del aislamiento del transformador.

*Los ácidos tienen acción catalítica y aceleran la deterioración del aceite y el inhibidor contenido en el mismo, es rápidamente consumido. A su vez, el aislamiento celulósico también tiene su deterioración acelerada.*

#### 4.5.2.5 Tensión Interfacial

Los materiales que no se mezclan forman una superficie o interfaz cuando se ponen en contacto. Si el agua y el aceite del transformador se ponen en contacto, se separan y se creará un interfaz entre ambos líquidos. Al igual que la superficie del agua en contacto con el aire, la interfaz entre el aceite y el agua es una barrera real que obliga a ejercer cierta fuerza para mover un objeto de una fase a otra a

través de ella. La resistencia que ejerce la barrera entre el aire y el agua se conoce con el nombre de *Tensión Superficial*, mientras que la barrera entre el aceite y el agua se conoce con el nombre de *Tensión Interfacial*. Esta, se mide y se presenta en miliNewtons por metro (mN/m) o dinas por centímetro (dinas/cm) como una unidad equivalente.

La determinación de la tensión interfacial es muy importante en la detección de la fase inicial de la deterioración del aislamiento. Es un ensayo adecuado para evaluar el aceite, aunque no permita diferenciar los diversos contaminantes.

Este ensayo es muy útil porque todas las sustancias extrañas con probabilidad de ser encontradas, tienen una tendencia de disminuir la tensión interfacial entre el aceite y el agua. Permite detectar cualitativamente la presencia de productos intermedios de oxidación tales como ALCOHOLES y ALDEHIDOS, los cuales no se detectan con el ensayo de número de neutralización, lo que nos indica que un bajo valor de éste parámetro no necesariamente implica que el proceso de oxidación del aceite no se haya iniciado.

Es un ensayo muy sensible a la aparición de compuestos hidrofílicos o contaminantes polares solubles, productos del proceso de oxidación que se está desarrollando en el aceite. Estos compuestos tienen afinidad tanto con moléculas del aceite como las del agua y su presencia hace bajar la Tensión Interfacial.

#### 4.5.2.5.1 Metodología del ensayo

La Tensión Interfacial del aceite puede ser determinada por dos métodos: el primero correspondiente a la norma **ASTM D.971**, conocido como el “Método del anillo”, y el segundo correspondiente a la norma **ASTM D.2285**, conocido como el “Método de la gota de agua”.

El método de ensayo **ASTM D.971**, es de aplicación en laboratorio y consiste en medir con un tensiómetro la fuerza en *dinas/cm* necesaria para arrancar un anillo plano de platina (de dimensiones conocidas) de la interfaz agua-aceite. La fuerza así obtenida es convertida en unidades de tensión interfacial, multiplicándose su valor por un factor determinado empíricamente y dependiente de la fuerza aplicada, de las densidades del aceite y del agua, y de las dimensiones del anillo.

El tensiómetro es formado por un alambre de torsión tensionado, teniendo una de sus extremidades presa a un puntero que se desplaza sobre un disco graduado en *dinas/cm* y que puede ser movido manualmente. El anillo de platina queda suspendido de un brazo preso al otro extremo del alambre de torsión.

Un recipiente con agua destilada es colocado sobre un soporte, que puede ser movido verticalmente por intermedio de un tornillo. (ver *figura anexa 4.11.A*).

Con el disco en la posición cero, el soporte es movido hacia arriba hasta que el anillo se sumerja en el agua cerca de 6mm, en el centro del recipiente. La temperatura debe ser de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , es decir, entre  $24^{\circ}\text{C}$  y  $26^{\circ}\text{C}$ . El soporte es lentamente bajado y el puntero va siendo reconducido para la posición cero, en la medida en que de ella se apartara. En el momento que hubiera el desprendimiento del anillo de la superficie del agua, el puntero debe estar en cero. Con el valor leído en la escala, es calculada la tensión superficial del agua, que debe ser de 71 a 72 dina/cm. Valores menores indican que: el tensiómetro no fue ajustado correctamente, el recipiente no se lo limpió correctamente, el agua destilada no tuvo el grado de pureza necesario, o falta de limpieza en el anillo de platina.

Corregidos estos factores, el procedimiento debe ser nuevamente aplicado con una nueva muestra de aceite, luego de 30 segundos de reposo. Con el valor leído en la escala y los factores de corrección se determina la tensión interfacial agua-aceite.

El método de ensayo **ASTM D.2285**, es de aplicación en campo y consiste en medir el volumen de una gota de agua en el interior de la masa de aceite. La tensión interfacial es tanto mayor cuanto mayor fuera la gota de agua que el aceite puede soportar.

El tensiómetro en este caso es formado por una aguja presa a un recipiente semejante a una jeringa de inyección y que permite medir el volumen de la gota de agua formada en la punta de la aguja, por medio de un cilindro graduado fijo al émbolo del tensiómetro. La graduación del tensiómetro es en dinas/cm. (ver *figura anexa 4.11.B*)

Se determina el número de divisiones de la escala del tensiómetro, correspondiente al volumen de una gota de agua formada en el aire a  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . En seguida se repite la misma operación con la punta de la aguja sumergida 12,7 mm en el aceite. Se exhala una gota experimental en el aceite, para así tener la idea de su volumen.

Se exhala  $\frac{3}{4}$  del volumen de la nueva gota, manteniéndola en la punta de la aguja por 30 segundos. Luego se exhala cuidadosamente de la jeringa el resto de la gota, de manera que esta se desprende de la aguja entre 40 y 60 segundos de iniciado el ensayo. Con el número de divisiones leído en la escala del tensiómetro, se obtiene la tensión interfacial correspondiente a un aceite de densidad media.

#### **4.5.2.5.2 Criterio para la evaluación de los resultados**

El resultado de Tensión Interfacial obtenido en el ensayo de una muestra de aceite nuevo o en servicio, debe ser mayor o igual al límite mínimo

recomendado por la IEEE Std.C57.106-2002 en las *tablas anexas 4.G1, 4.H1, 4.H2 y 4.II*, según sea el caso.

El aceite nuevo y bien refinado, por lo general, presenta una tensión interfacial que se encuentra en el rango de 45mN/m a 50mN/m. Al colocar el aceite en el equipo, esta disminuirá aproximadamente, entre 5mN/m a 10mN/m, a medida que el aceite se mezcla con los elementos contaminantes en el interior del equipo nuevo. A partir de este momento, la tensión interfacial se reducirá gradualmente a medida que el aceite envejezca.

Los compuestos polares que se forman producto de la deterioración del aceite y de la descomposición del aislamiento sólido y de los cuerpos con los cuales entra en contacto, provocan la disminución de la tensión interfacial del aceite. Esto ocurre debido a que las moléculas polares son parcialmente solubles tanto en aceite como en agua, por lo que las moléculas individuales se orientan en toda la interfaz, debilitándola.

*Un valor de tensión interfacial bajo, indica la presencia de borra en el aceite y de contaminantes indeseables. Por lo tanto, mediante este ensayo se puede detectar el inicio del proceso de oxidación y su avance antes de llegar a niveles de degradación críticos.*

#### 4.5.2.6 Índice de Calidad

Es la relación entre la tensión interfacial y el número de neutralización, conocido también como “el índice de Myers”. Se considera un indicativo importante para clasificar los aceites en operación y determinar la necesidad del mantenimiento, siendo necesario realizar una limpieza del papel de productos ácidos del aceite o lodos impregnados y establecer también la severidad del proceso que debe aplicarse.

##### 4.5.2.6.1 Criterio para la evaluación de los resultados

La emisión de un criterio sobre las condiciones del aceite dieléctrico mediante análisis de esta relación, se basa en la *tabla anexa 4.L1*, establecida por la S.D. Myers en base a la experiencia.

Examinando dicha tabla se puede observar que hay cierta superposición en los rangos de las tres primeras categorías. El aceite debe cumplir ambos criterios, el mínimo de tensión interfacial y el máximo de número de neutralización, dentro del rango dado por el índice de calidad. Por ejemplo, un aceite con un índice de calidad de 318 deberá ser clasificado como marginal si la tensión interfacial es 27 o menos, o el número de neutralización es 0,11 o más.

#### 4.5.2.7 Análisis de Compuestos Furánicos

El análisis de compuestos furánicos, ha cobrado importancia recientemente toda vez que es un promisorio método útil para la detección del deterioro térmico, hidrolítico y oxidativo del aislamiento sólido (papel) del transformador. Este ensayo se considera un formidable complemento para la cromatografía de gases disueltos en el aceite, cuando de la descomposición del papel aislante se trata.

##### 4.5.2.7.1 Metodología del ensayo

El método de ensayo aplicado para determinar la cantidad de compuestos furánicos en el aceite aislante, corresponde a la norma **ASTM D.5837**.

Este método consiste en determinar los cinco compuestos furánicos más prevalentes de la degradación de la celulosa, que se encuentran disueltos en una muestra de aceite extraída en campo, Estos son: 2-furaldehído (2FAL), 2-furil alcohol, 2-acetil furano, 5-metilo-2-furaldehído y 5-hidroximetilo-2-furaldehído.

Para la determinación de dichos compuestos furánicos, se utiliza un equipo de cromatografía líquida de alta resolución (*High Performance Liquid Chromatography - HPLC*). Los cinco compuestos furánicos mencionados son separados en columnas de aluminio y cada uno es detectado por el uso de un

detector de radiación ultravioleta que se ajusta automáticamente a la longitud de onda apropiada para cada compuesto. Los resultados del equipo son reportados similarmente a un cromatógrama de gases y la magnitud de cada compuesto es dada en partes por billón (ppb).

*Varios autores en base a la experiencia, coinciden en afirmar que el furano más abundante con ventaja muy alta sobre los demás, es el 2-furaldehído, razón por la cual la mayoría de las investigaciones consideran el resto de compuestos furánicos como un total del furanos, sin distinguir individualmente cada uno de ellos, dado que sería impráctico.*

En la *figura anexa 4.12* se presenta la implementación en laboratorio de los instrumentos para analizar la cantidad de compuestos furánicos en muestras de aceite, entre ellos el cromatógrafo líquido de alta resolución.

#### **4.5.2.7.2 Criterio para la evaluación de los resultados**

El valor práctico indicativo de contenido de furanos, lo han dado los resultados de diferentes investigaciones, al tomar una muestra representativa de varios transformadores y analizando las diversas interrelaciones con ensayos convencionales como los análisis de la degradación del aceite y la cromatografía de los gases CO y CO<sub>2</sub>.

Los investigadores de la S.D. Myers sugieren que se tengan en cuenta los siguientes criterios de calificación de contenido total de furanos:

<i>Menos de 100 ppb</i>	<i>ACEPTABLE</i>
<i>De 100 a 250 ppb</i>	<i>CUESTIONABLE</i>
<i>Mas de 250 ppb</i>	<i>INACEPTABLE</i>

Sin embargo, para el caso del análisis de contenido de furanos como para la cromatografía de gases, también es muy importante calcular la velocidad de generación, para tener un diagnóstico más certero del caso que se este estudiando.

El cambio en el contenido furánico (la cantidad de compuestos furánicos generados durante el intervalo entre ensayos) es el parámetro más importante para determinar si hay posibilidad de una falla en proceso que amerite atención. Para un primer análisis, cuando no se tienen datos previos o cuando estos datos son tan viejos que ya no tienen valor, se utilizan los patrones siguientes para interpretar los resultados:

- *De 0 a 20 ppb total de furanos – **Inicial**, representa básicamente un transformador nuevo.*
- *De 21 a 100 ppb total de furanos – **Acceptable**, representa un ritmo de envejecimiento normal.*

- *De 101 a 250 ppb total de furanos – **Cuestionable**, representa la probabilidad de un ritmo acelerado de envejecimiento.*
- *Valores mayores a 251 ppb total de furanos – **Inaceptable**, representa un ritmo muy acelerado de envejecimiento.*

Niveles por encima de 1000 ppb indican daño grave e irreversible al aislamiento sólido. Este nivel se puede considerar el inicio de la “zona de peligro”, pues es común que los transformadores fallen cuando se encuentran en el rango de 1000 a 1500 ppb de total de furanos.

El rango de aceptabilidad se corresponde con la zona de operación “libre de lodos” en los parámetros de calidad del aceite. Sobre el límite superior de referencia, los productos de la oxidación comienzan a causar daño en el papel. Un total de contenido furánico de 100 ppb corresponde a una descomposición del papel casi equivalente a una pérdida de vida útil de 10%, debido a la disminución de su rigidez.

Igualmente, el extremo del rango cuestionable es equivalente al punto en el que ocurre un daño considerable y cuantificable al aislamiento sólido. Un total de contenido furánico de 250 ppb corresponde a una pérdida de vida útil de casi 25%.

*Una recomendación que resulta de mucha utilidad, es que cuando se tienen niveles altos de CO y CO<sub>2</sub>, y/o un aceite con Índice de Calidad bajo, se efectúe un análisis de furanos y así tener un diagnóstico mas completo y poder tomar decisiones mas acertadas.*

#### **4.5.2.7.3 Cálculo del Grado de Polimerización (GP) y vida remanente a partir de los resultados de contenido de furanos**

El grado de polimerización se puede obtener mediante la aplicación directa del método normalizado **ASTM D.4243**. Este consiste en el ensayo de una pequeña muestra de papel aislante tomada del transformador, la cual se disuelve en una solución especial y luego se mide su viscosidad al hacerlo pasar por un pequeño orificio. La viscosidad medida en esta forma guarda relación directa con el grado de polimerización del papel.

Este es un método mas práctico para medir la vida remanente al papel en comparación con el ensayo de tensión mecánica de ruptura, pues para este último se requiere una muestra de papel de mayor tamaño. Sin embargo, aun hay dificultades, ya que el proceso de ensayo por el método en referencia exige que se realice una parada del equipo, que se lo abra y que se drene el aceite para obtener dicha muestra. Además, no se dispone de una práctica normalizada de donde se puede obtener una muestra representativa.

*Por lo explicado, se puede decir que el ensayo para determinar el Grado de Polimerización (GP) no es práctico para un transformador que se supone debe seguir en servicio. La principal utilidad de este ensayo, es la de evaluar los transformadores que estén fuera de servicio, pudiendo definir las necesidades de rebobinado y reconstrucción del mismo.*

No obstante, el grado de polimerización se puede calcular a partir de los resultados del contenido de furanos. Dado que es más fácil obtener una muestra de aceite que una muestra de papel, y que el contenido de furanos en el aceite ofrece un mejor valor **promedio** del grado de polimerización, siendo estos resultados más útiles y representativos.

El grupo que no cuenta con papel mejorado térmicamente forma una mayor concentración de furanos que el otro grupo que si cuenta con este. Los compuestos furánicos son de alguna manera más propensos a la descomposición en presencia de los aditivos usados para mejorar térmicamente el papel.

Para aquellos transformadores que no cuentan con papel mejorado térmicamente, el mejor estimado del Grado de Polimerización se obtiene mediante el contenido de 2-furaldehído (2FAL). Para aquellos transformadores que cuentan con papel mejorado térmicamente, el cálculo se basa en el

contenido total de furanos. La *tabla anexa 4.M1* resume varios valores de referencia que relacionan el contenido de furanos con el grado de polimerización y porcentaje remanente de vida útil del transformador.

#### **4.5.2.8 Azufre Corrosivo**

Este ensayo describe la detección cualitativa de los compuestos de azufre corrosivo en aceites aislantes.

##### **4.5.2.8.1 Metodología del ensayo**

Los métodos de ensayo normalmente aplicados corresponden a las normas **ASTM D.1275-A** y **ASTM D.1275-B**. Esta última derivada de la primera.

El método **ASTM D.1275-A** consiste en utilizar una lámina de cobre de 99.9% de pureza (dimensiones 6 x 25 x 0.127-0.254 mm) totalmente pulida (libre de manchas), la cual debe ser sumergida en forma vertical dentro de un frasco (de 270 a 280 ml.) limpio de vidrio con 250ml de aceite a ensayar. Por el periodo de un minuto se debe burbujear nitrógeno a través del aceite contenido en el frasco, a una velocidad de 0.5 lt/min. mediante un tubo de vidrio o aluminio (de diámetro interno 1/16"), con sus respectivas reducciones y acoples (debe

evitarse el uso de accesorios de caucho que contengan azufre). Al finalizar se debe colocar inmediatamente el respectivo tapón especial tipo rosca con o-ring.

El frasco herméticamente sellado, debe ser ingresado en un horno que permita calentarlo a una temperatura de 140°C . Cuando el aceite en el frasco haya alcanzado dicha temperatura, el tapón debe ser reajustado. El frasco debe ser retirado del horno después de unas 19 horas ( $\pm 10$  minutos) con una temperatura de 140°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ).

Luego de que este se enfríe, se debe retirar cuidadosamente la lámina de cobre, para luego ser sometida a un lavado con acetona u otro disolvente adecuado que permita remover el aceite.

Finalmente, se somete dicha lámina a un proceso de secado con aire seco (no usar aire a presión). Si la superficie no se presenta clara, tomar un papel de ceda de laboratorio y limpiarla haciendo alta presión. Cualquier material adherido a la superficie que sea removido, es corrosivo y debe ser reportado como tal.

*La lámina de cobre debe ser inspeccionada visualmente, de forma tal que la luz sea reflectada a un ángulo de 45°.*

El método **ASTM D.1275-B** es más riguroso que el anterior. Tanto los instrumentos utilizados como el procedimiento de aplicación son similares y se diferencian únicamente en los siguientes parámetros de aplicación:

- 1) El proceso de burbujeo del aceite con nitrógeno debe realizarse por un periodo de 5 minutos.
- 2) La temperatura aplicada en el horno debe ser de  $150^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  y por un periodo de 48 horas  $\pm$  20 minutos.

#### **4.5.2.8.2 Criterio para la evaluación de los resultados**

Para calificar un aceite aislante de corrosivo o no-corrosivo, se aplica el método normalizado **ASTM D.130**, que consiste en la comparación de la tira de cobre ensayada con una plantilla de varias tiras de cobre a distintos niveles de corrosión establecidos por la ASTM (Ver *figura anexa 4.13*), cuya interpretación según la empañadura de la superficie de la respectiva lámina, se interpreta en la *tabla anexa 4.N1*.

## 4.5.3 ENSAYOS ELÉCTRICOS

### 4.5.3.1 Rigidez Dieléctrica

#### 4.5.3.1.1 Metodología del ensayo

El ensayo de tensión de ruptura dieléctrica o rigidez dieléctrica del aceite aislante, se lo realiza según los métodos normalizados **ASTM D-1816** y **ASTM D-877**.

Cada método se diferencia de su tasa de elevación de tensión para el ensayo y de los tipos de electrodos utilizados, tal como se describió anteriormente en el numeral 4.3.1.3.2.

El método normalizado **ASTM D-877** es recomendado para ensayos de aceptación de líquidos aislantes no procesados, recibidos de vendedores en camiones-tanque y/o tambores. Puede ser incluido en los ensayos de rutina de los equipos con tensiones nominales de 230kV o menores. Este método no es recomendado para ensayos de aceites filtrados, desgasificados y deshidratados, antes, durante y después del llenado de equipos eléctricos de potencia con tensiones nominales mayores que 230 kV.

*La utilidad del ensayo por este método es limitada, debido a que este no es sensible a la humedad, a menos que el contenido exceda 60% el nivel de saturación. Tampoco es sensible a los productos de oxidación del aceite aislante envejecido en servicio.*

Anteriormente, la aplicación de este método era ampliamente aceptada y no existían límites. En el transcurso de los últimos años, se ha terminado por reconocer sus limitaciones y en la publicación de la norma IEEE C57.106-2002, se eliminaron todas las referencias a este ensayo como aplicable al aceite mineral de transformadores en servicio inmersos en aceite y se favoreció al uso del ensayo según método normalizado ASTM D.1816.

El método normalizado **ASTM D-1816** es más sensible a los efectos dieléctricos de la humedad en solución que el método según norma ASTM D-877, especialmente cuando están presentes fibras celulósicas en el aceite.

Este método es recomendado para ensayo de aceites filtrados, desgasificados y deshidratados antes, durante y después del llenado de equipos de sistemas de potencia con tensión nominal mayor a 230kV, y para el ensayo del aceite de estos aparatos después de su llenado.

Para equipos con tensión nominal menor o igual a 230 kV, ambos métodos son aplicables tanto para ensayos de recepción como de rutina y la evaluación de la muestra se la realiza de la siguiente manera:

a) Ensayo de recepción

Este consiste en determinar la rigidez dieléctrica de líquidos aislantes nuevos con la finalidad de verificar sus condiciones de recepción en campo, previo al llenado de un equipo de alta tensión.

En este caso, la célula es llena, sucesivamente por cinco veces, con la muestra del espécimen a ensayar, determinándose cada vez un único valor de la tensión de ruptura. Los resultados deben satisfacer el “Criterio de Consistencia Estadística”, del cual se hace referencia más adelante.

Si el criterio mencionado fuera satisfecho, el valor de rigidez dieléctrica del espécimen será la media de los valores obtenidos en las mediciones. En el caso de que no lo fuera, determinar la tensión de ruptura del dieléctrico una vez en cinco nuevas muestras. Por lo tanto, la rigidez dieléctrica del espécimen será la media de los diez valores encontrados en las dos series de ensayos. Ningún valor debe ser despreciado.

b) Ensayo de rutina

En este tipo de ensayo, se llena la célula con una muestra del espécimen y se determina por cinco veces la tensión de ruptura del dieléctrico, guardándose un intervalo aproximado de un minuto (puede variar según el método) entre cada determinación.

Si los valores encontrados no cumplieran con el criterio de consistencia estadística, se despreciará el líquido de la célula y se llenará con una nueva muestra, tomándose cuidado de invertir lentamente el frasco que contiene el líquido a ser ensayado varias veces, para que las impurezas que pudieran existir queden en suspensión. Posteriormente, se debe medir por cinco veces la tensión de ruptura del dieléctrico observando un minuto de intervalo entre cada medición. El valor medido de los diez valores encontrados, sin despreciar ninguno de ellos, es el valor de la rigidez dieléctrica del espécimen.

***Los criterios aplicados para el análisis de los resultados obtenidos con este ensayo, son los siguientes:***

## a) Criterio de la Consistencia Estadística

Este criterio es dado por la relación entre la desviación estándar y la media de cinco valores individuales en los que se dio la tensión de ruptura; para lo cual se emplean las siguientes fórmulas:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i \quad (4.42)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]} \quad (4.43)$$

donde:

$\bar{X}$  : Media de los cinco valores individuales

$X_i$  : Tensión de ruptura de orden  $i$

$s$  : Desviación estándar

*Si esta relación fuera mayor que 0,1 es probable que la desviación estándar de los cinco valores encontrados, sea excesivo y, por lo tanto, el error probable de su media también sea excesivo.*

## b) Criterio alternativo

Este criterio consiste en calcular la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la tensión de ruptura y multiplicar el resultado por tres. Si el valor obtenido fuera mayor que el más próximo del menor valor,

la desviación estándar de los cinco valores de tensión de ruptura y el error probable de su media serán excesivos.

#### **4.5.3.1.2 Criterio para la evaluación de resultados**

La rigidez dieléctrica obtenida en el ensayo de una muestra de aceite nuevo o en servicio, debe ser mayor o igual al límite mínimo recomendado por la IEEE Std.C57.106-2002 en las *tablas anexas 4.G1, 4.H1, 4.H2 y 4.II*, según sea el caso.

*La contaminación del aceite por causa de elementos como fibras del aislamiento sólido, partículas conductoras (partículas metálicas), contaminación por elementos extraños, suciedad y agua en suspensión, pueden afectar su rigidez dieléctrica.*

#### **4.5.3.2 Factor de Potencia y/o Factor de Disipación**

La determinación del factor de potencia y/o factor de disipación de un líquido aislante es adecuada para ensayos de recepción. No obstante, su aplicación también se da para ensayos de rutina, cuando no se exigen resultados muy exactos, más si aproximados. Es suficiente determinar el factor de potencia de una sola muestra.

#### 4.5.3.2.1 Métodos aplicado para el ensayo

El método normalmente aplicado para la realización de este ensayo, corresponde a las norma **ASTM D.924**.

La determinación del factor de potencia y/o factor de disipación de los aceites dieléctricos, puede ser realizada con el auxilio de los instrumentos DOBLE, los cuales, cuentan con una célula metálica para el análisis de la muestra y otros accesorios que se detallan en *la figura anexa 4.14.A*

*La célula, por su forma constructiva, representa esencialmente a un capacitor utilizando líquido aislante como dieléctrico.*

El esquema básico del ensayo se lo implementa de acuerdo al detalle de la *figura anexa 4.14.B* y el modo de ensayo seleccionado en el equipo, corresponde al UST. El voltaje de aplicación para el ensayo debe ser gradualmente elevado hasta 10kV.

Como el espacio entre las placas cilíndricas de la célula es aproximadamente de 3/16", la muestra no debe sufrir una ruptura dieléctrica, al menos que esta se encuentre en condiciones críticas. No obstante, el equipo DOBLE interrumpirá el ensayo con su protección y se deberá ejecutar el ensayo a otro nivel de voltaje, tal como 2500 Voltios.

El instrumento de ensayo aplicado puede dar la lectura de factor de potencia y/o factor de disipación, no obstante, esta se puede calcular a partir de la expresión 4.4 del literal 4.3.1.1, a través de las lecturas de corriente de fuga y pérdidas en watts. Inmediatamente después del ensayo de la muestra, su temperatura debe ser registrada y el factor de potencia corregido a una temperatura estándar de 20°C según la *tabla anexa 4.D2* de factores de conversión.

#### **4.5.3.2.2 Criterio para evaluación de los resultados**

##### **Aceite Mineral**

El valor de factor de potencia obtenido en el ensayo de una muestra de aceite nuevo o en servicio, debe ser menor o igual al límite máximo recomendado por la IEEE Std.C57.106-2002 en las *tablas anexas 4.G1, 4.H1, 4.H2 y 4.II*, según sea el caso.

No obstante, la DOBLE Engineering, sugiere aplicar la siguiente guía de criterios para la evaluación de aceites nuevos y en servicio:

- ✓ El factor de potencia de un aceite nuevo en buenas condiciones es de 0,05% o menos, a una temperatura de 20°C.

- ✓ Aceite usado, teniendo un factor de potencia menor que 0,5% a 20°C, es usualmente considerado satisfactorio para continuar en servicio.
- ✓ Aceite usado, teniendo un factor de potencia mayor que 0,5% a 20°C, debe considerarse de condiciones dudosas y realizarse algún tipo de investigación, pudiendo ser recomendable el ensayo de rigidez dieléctrica y los ensayos físico-químicos (especialmente el de contenido de agua).
- ✓ Aceite usado, teniendo un factor de potencia mayor que 1,0% a 20°C, debe ser investigado y posteriormente reacondicionado o reemplazado.

*Un factor de potencia alto indica deterioración y/o contaminación del aceite con humedad, carbón u otras sustancias conductoras; o con barniz, jabones metálicos, compuestos asfálticos, o productos de la deterioración. Carbón o asfalto en el aceite pueden causar la decoloración del mismo. Carbón en el aceite no necesariamente incrementará su factor de potencia, al menos que la humedad también se haga presente.*

### **Askarel**

La DOBLE Engineering, sugiere seguir la siguiente guía de criterios para la evaluación de aceites nuevos y en servicio:

- ✓ El factor de potencia de un askarel nuevo en buenas condiciones es de 0,05% o menos, a una temperatura de 20°C.
- ✓ Askarel usado, teniendo un factor de potencia menor que 0,5% a 20°C, es usualmente considerado satisfactorio para continuar en servicio.
- ✓ Askarel usado, teniendo un factor de potencia mayor que 0,5% a 20°C, debe considerarse de condiciones dudosas y realizarse algún tipo de investigación, pudiendo ser recomendable el ensayo de rigidez dieléctrica.
- ✓ Askarel usado, teniendo un factor de potencia mayor que 2,0% a 20°C, debe ser investigado para determinar la causa de su valor alto. Si este es causado por agua u otras sustancias conductoras, ácidos libres o alto número de neutralización; es posible que se encuentre en riesgo de operación. Si no se debiera a estas causas, probablemente no se encuentra en riesgo y dicho valor alto puede resultar de un excesivo calentamiento del equipo en el cual está siendo usado.

*Un factor de potencia alto en el askarel, indica contaminación con humedad, carbón u otras sustancias conductoras, o con compuestos asfálticos, barniz y/u otras sustancias ajenas, productos de su deterioración.*

## 4.5.4 ENSAYO PARA EL ANÁLISIS DE LOS GASES DISUELTOS

### 4.5.4.1 Generalidades

El análisis de los gases disueltos en el aceite permite detectar eventuales fallas o defectos asociados a los dieléctricos presentes, inclusive antes que el equipo sufra daños, tales como: existencia de arco, sobrecalentamiento, descargas eléctricas y pirolisis de los materiales de la celulosa. De tal modo que este tipo de análisis puede ser útil para:

- Auxiliar en la detección de eventuales alteraciones provocadas por ensayos dieléctricos, como por ejemplo, los ensayos de tensión inducida y de generación de impulsos.
- El control y acompañamiento del desempeño del equipo en operación, realizándose ensayos periódicos.

Es importante la **tasa y cantidad de gas generado**. El proceso de envejecimiento normal genera gases; sin embargo, estos se generan a una tasa extremadamente lenta. Las condiciones de falla incipiente o de falla de formación reciente, ocasionan cambios inmediatos y observables en el contenido de gases disueltos en el aceite del transformador.

Como ya se mencionó en la unidad anterior, los aceites en operación pueden contener disueltos gases combustibles y no combustibles. Entre los gases combustibles se encuentran: el monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) y acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>); y entre los gases no combustibles que pueden ser encontrados están: el Oxígeno (O<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

*El análisis cromatográfico, es considerado el método más efectivo de los que se dispone actualmente para el análisis de los gases disueltos en el aceite del transformador. La cromatografía de gases supone tanto un análisis cualitativo como cuantitativo de dichos gases.*

#### **4.5.4.2 Análisis cromatográfico de los gases disueltos en el aceite**

La técnica moderna de la cromatografía de gases se ha basado en estudios de casos implicando la correlación entre el tipo de falla incipiente o avanzada presente en transformadores similares y los gases asociados a ella en su mayoría; interrelacionando también algunos gases entre sí y con el apoyo de la estadística, tipificar a manera de conclusión la tendencia específica de cada grupo de casos similares.

El análisis cromatográfico de los gases disueltos en el aceite comprende de dos etapas que son:

- 1) La toma de la muestra de aceite en campo, según la norma **ASTM D.923**.
  
- 2) La extracción de los gases de dicha muestra en laboratorio, y su respectivo análisis que consiste en la separación e identificación de cada uno de ellos en el instrumento cromatógrafo.

#### **4.5.4.2.1 Extracción de los gases de la muestra**

Los gases disueltos en el aceite de la muestra remitida deben ser extraídos para poder ser analizados. El método normalizado ASTM D.3612 describe tres métodos diferentes de extracción:

- a) **Método A:** Utiliza un procedimiento de laboratorio de extracción al vacío. Este enfoque hace uso de un aparato de vidrio con un pistón de mercurio para concentrar y retomar a presión atmosférica los gases extraídos en la parte superior de la columna de vidrio.
  
- b) **Método B:** Se conoce con el nombre de “extracción de columna” y es un método de inyección directa. Utiliza un conjunto multi-puerto de válvulas en el propio cromatógrafo de gases en donde se realiza la extracción.

- c) **Método C:** Se conoce como análisis del espacio superior y fue aprobado en el año 2000. En este método la muestra se coloca en un frasco pequeño en el que los gases disueltos se equilibran con el espacio para gases por encima de la muestra.

Cabe resaltar que, con las variaciones de temperatura durante el transporte de la muestra hacia el laboratorio, se pueden formar burbujas de gases en el recipiente. En este caso, se debe calentar levemente la muestra para disolver la burbuja nuevamente en el aceite, o inyectar en el aparato desgasificador el aceite con la burbuja. La muestra es sometida a vacío y los gases recogidos son reconocidos en una bureta graduada.

Las *figuras anexas 4.15.A,B* muestran la implantación del **Método A** para la extracción de gases disueltos en el aceite aislante, mediante la disposición de instrumentos convencionales de laboratorio.

#### 4.5.4.2.2 El Instrumento utilizado para el ensayo

El instrumento utilizado para este ensayo se lo conoce como “cromatógrafo”, y está constituido de las siguientes partes:

- 1) **Fuente regulable de gases de arrastre o transporte**, compuesta por una botella con gas nitrógeno o helio, los cuales, a través de un regulador de

presión y contador de flujo, escurren suave y continuamente para arrastrar los gases de la muestra.

- 2) **Dispositivo de introducción**, que permite la inyección de la muestra de gases para el análisis. Contiene un termostato que está en contacto con los gases de transporte y sirve de referencia para eliminar los efectos de las variaciones de temperatura y presión ambientales.
- 3) **Columna cromatográfica o columna de adsorción**, que permite separar los gases de la muestra. Está constituida de un tubo de acero inoxidable lleno de material granular fino formando un cedazo molecular. La velocidad de escurrimiento de los gases en la columna depende del tamaño de sus moléculas. Cuanto menor fuera la molécula del gas, tanto mayor será su velocidad de escurrimiento.

*La molécula del hidrógeno es pequeña, por eso pasa rápidamente por la columna.*

- 4) **Detector**, que permite la detección de los gases componentes de la muestra que salen de la columna cromatográfica. Este consiste esencialmente en un termostato calentado por corriente eléctrica encima de la temperatura del gas de transporte. Los gases componentes de la muestra separados por la

columna cromatográfica poseen diferentes conductividades térmicas, por tanto, modifican de modo diferente la temperatura del termostato y como consecuencia su resistencia eléctrica.

5) **Registrador y microprocesador**, con impresora para imprimir los resultados.

6) **Cromatograma**, que permite graficar los resultados obtenidos.

La representación tanto esquemática como real de este instrumento y un ejemplo de los resultados impresos por el cromatograma, se detalla en las *figuras anexas 4.15.C, D, E.*

#### 4.5.4.2.3 Metodología del ensayo

El volumen mínimo de gas necesario para el análisis es de 1mL. Una primera muestra de gas de 0,25 mL es colectada de la bureta del extractor de gases con el auxilio de una jeringa, cuya aguja perfora el septo de la bureta, y luego es inyectada en la columna de cedazo molecular del cromatógrafo, teniendo el nitrógeno como gas de arrastre. Esta operación dará el pico de hidrógeno.

Una segunda muestra de 0,25mL de gas es tomada del extractor e inyectada en la columna de cedazo molecular 5A del cromatógrafo, cuyo gas de arrastre es el helio. Los picos obtenidos en esta operación son del orden de: oxígeno, nitrógeno, metano y monóxido de carbono.

La tercera muestra de 0,25 mL de gas es inyectada en otra columna del cromatógrafo, cuyo gas de arrastre es nuevamente el helio. Los nuevos picos serán, en el orden: dióxido de carbono, etileno, etano y acetileno. Siendo finalmente impresos los resultados.

El tiempo requerido para este análisis oscila entre 8 y 30 minutos. La precisión de los resultados del cromatógrafo depende del cuidado que se haya tenido al tomar la muestra de gases, la selección del detector y la calibración del instrumento para asegurar resultados confiables.

Los límites de detección van de 5 a 20 ppm para el hidrogeno, 1 ppm para los gases de los hidrocarburos y de 2 a 25 ppm para el oxido de carbono. Los límites de detección varían en función del tipo de gas transportador, el contenedor usado para la muestra y el método de extracción.

#### 4.5.4.3 Interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados del análisis cromatográfico de gases disueltos en una muestra de aceite aislante, hasta la actualidad se ha considerado como un arte, pues no llega a ser una ciencia conforme la opinión generalizada. La técnica del análisis cromatográfico es un recurso importante del cual dispone un ingeniero eléctrico de potencia, pues esto le permite detectar de una forma más precisa y consistente las fallas incipientes presentes en el equipo, y con probabilidades de determinar su localización.

Los valores del análisis en el inicio de la operación del transformador servirán de valores referenciales con los cuales serán comparados los que se obtendrán en análisis posteriores.

*Existen diversas técnicas para el diagnóstico de los resultados del análisis cromatográfico, que permiten evaluar el envejecimiento natural del aislamiento, además de la detección y caracterización de las fallas incipientes y en evolución.*

#### **Técnicas de Diagnóstico**

Las técnicas de diagnóstico aplicadas para el análisis del total de gases combustibles presentes en una muestra de aceite aislante, nos permiten determinar el tipo de falla presente en el equipo, dado que estas pueden ser de origen térmico

o eléctrico. Las primeras corresponden al sobrecalentamiento de papel o del aceite, y las últimas a la presencia de un arco o efecto corona.

Existen varias técnicas para el diagnóstico y su confiabilidad aumenta con la disponibilidad de informaciones anteriores y la experiencia del laboratorio encargado del análisis. Las principales técnicas adoptadas para el diagnóstico, son:

- 1) Método del gas llave o gas característico,
- 2) Método de las relaciones de Rogers
- 3) Método de las relaciones de Dornenburg.
- 4) Método del triangulo de Duval

#### **4.5.4.3.1 Método del gas llave o gas característico**

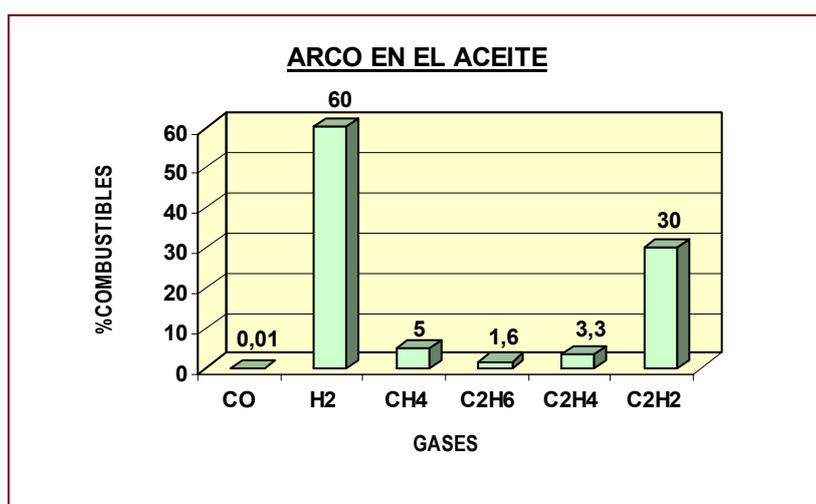
Este método se basa en el hecho de que cuando hay una falla incipiente en evolución dentro del transformador, la concentración de los gases a ella asociada sobrepasan los valores normales de degradación del aislamiento de los establecidos en ensayos de laboratorio.

El gas que caracteriza el tipo de falla incipiente es llamado “*el gas llave*”. Los perfiles típicos de composición expuestos a continuación, corresponden a la norma NBR.7274/1982 de la ABNT.

## 1) GAS LLAVE: EL ACETILENO ( $C_2H_2$ )

*Indica la existencia de descargas eléctricas producto de arcos francos (de alta energía).*

Se producen grandes cantidades de hidrógeno ( $H_2$ ) y acetileno ( $C_2H_2$ ) con pequeñas cantidades de metano ( $CH_4$ ) y etileno ( $C_2H_4$ ). Dióxido y monóxido de carbono ( $CO_2$  y  $CO$ ) también pueden ser formados en el caso que la falla involucre la celulosa. El aceite podrá ser carbonizado.

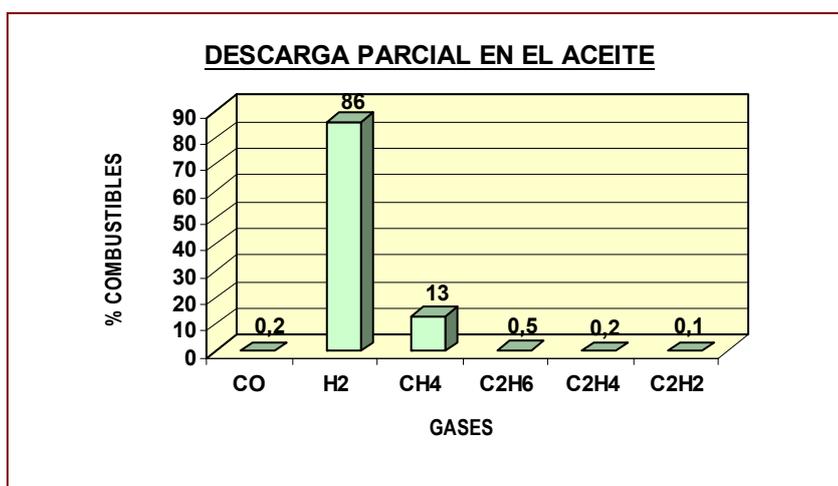


*Figura 4.44 – Representación esquemática del gas característico  $C_2H_2$*

## 2) GAS LLAVE: EL HIDRÓGENO ( $H_2$ )

*Indica la presencia de descargas eléctricas de baja energía o descargas parciales.*

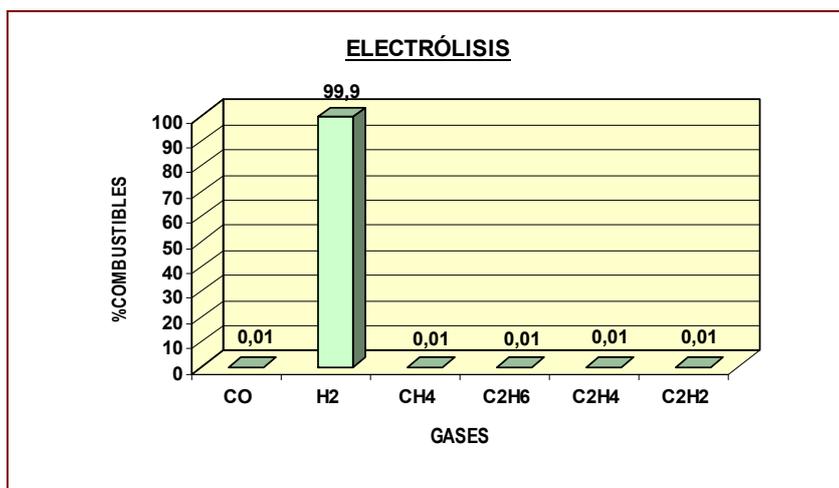
Se producen grandes cantidades de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) con pequeñas cantidades de etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) y etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). Cantidades comparables de monóxido y dióxido de carbono ( $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ ) pueden resultar de descargas en la celulosa.



*Figura 4.45 – Representación esquemática del gas característico  $\text{H}_2$*

Se puede concluir fácilmente de las figuras 4.44 y 4.45, que cuando se tienen fallas de tipo eléctrico (arco o descargas parciales), siempre está presente el hidrógeno. Entonces, una ayuda muy práctica e inmediata es poder medir en sitio la concentración de este gas, para lo cual existen instrumentos portátiles con dispositivos de fácil implementación, que nos permiten monitorear permanentemente la presencia y velocidad de generación del gas hidrógeno, particularmente en situaciones de emergencia, o como un primer diagnóstico.

La descomposición electrolítica del agua o la descomposición del agua asociada con el óxido, también resulta en la formación de grandes cantidades de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), pero con pequeñas cantidades de los demás gases combustibles.

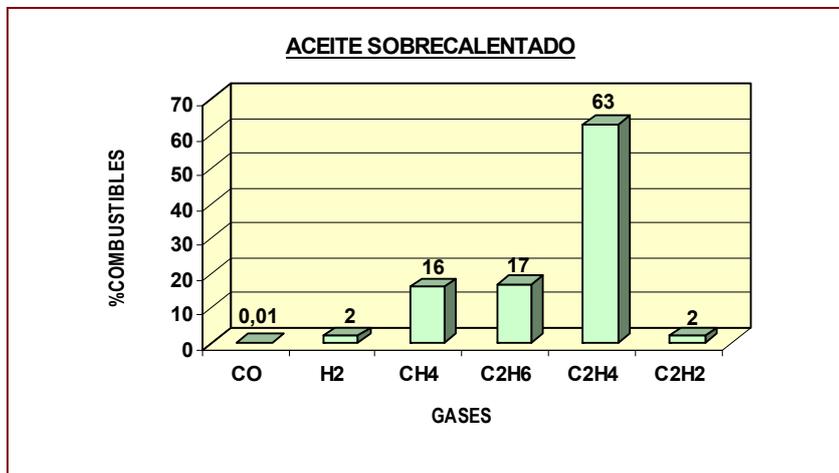


*Figura 4.46 – Representación esquemática del gas característico  $\text{H}_2$*

### 3) GAS LLAVE: EL ETILENO ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )

*Indica la existencia de sobrecalentamiento en el aceite aislante.*

Se producen grandes cantidades de etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), y etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), juntamente con cantidades menores de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ). Trazos de acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) pueden ser formados si la falla es severa o se involucra contactos eléctricos.

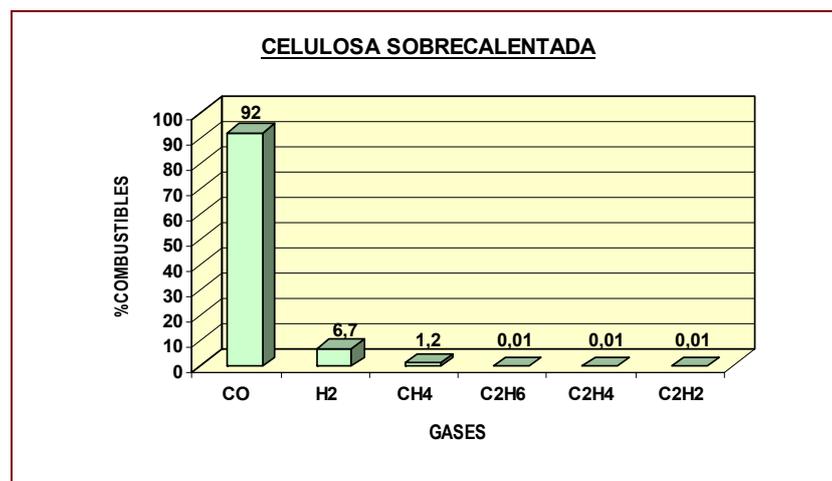


*Figura 4.47 – Representación esquemática del gas característico C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>*

#### 4) GAS LLAVE: EL MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

*Indica sobrecalentamiento de la celulosa en el transformador.*

Cuando se produce sobrecalentamiento del papel, se desprenden grandes cantidades de monóxido y dióxido de Carbono (**CO** y **CO<sub>2</sub>**). Cuando la falla involucra una estructura impregnada en aceite, se forman adicionalmente hidrocarburos gaseosos como metano (**CH<sub>4</sub>**) y etileno (**C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>**).



*Figura 4.48 – Representación esquemática del gas característico CO*

Teniendo en cuenta que la celulosa se carboniza completamente a 150°C, no es sorprendente encontrar cierta degradación que tiene lugar a la temperatura de operación normal del transformador. El monóxido de carbono (CO) se presenta predominantemente, cuando existe la descomposición del papel a temperaturas muy elevadas, especialmente en situación de ocurrencia de arcos.

Cabe destacar, que tanto el CO como el CO<sub>2</sub> están presentes ante el envejecimiento normal del aceite y principalmente la celulosa. Sin embargo, a pesar de una amplia variación en la rata de producción de CO y CO<sub>2</sub>, la relación CO/CO<sub>2</sub> normalmente se mantiene en una estrecha banda entre 0,1 y 0,3. Una temperatura alta tiende a aumentar la relación indicada, especialmente ante la presencia de un arco o descargas parciales.

*Por tanto, niveles altos de los gases que indican la presencia de una falla eléctrica acompañados de una alta relación de CO/CO<sub>2</sub> es un claro indicio de que la celulosa está involucrada.*

#### **4.5.4.3.2 Método de las relaciones de Rogers**

Se basa en relacionar los cinco gases (combustibles) primarios de la descomposición del aceite de acuerdo a su aparición, según sea la temperatura relativa de la falla. Este método tiene un esquema más preciso, pues establece la severidad de condiciones de fallas incipientes.

El diagnóstico depende de si las diferentes relaciones son mayores o menores que 1 y su interpretación se basa en los criterios presentados en la *tabla anexa 4.01*.

#### **4.5.4.3.3 Método de diagnóstico conforme la “CEBG”**

Este método representa a otra manera de obtener un diagnóstico rápido a partir de las correlaciones hechas por la GECB (Central Electricity Generation Board of Great Britain), de igual manera, en base a los cinco gases combustibles producto de la descomposición del aceite.

El diagnóstico depende de si las diferentes relaciones son mayores o menores que 1 y su interpretación se basa en los criterios presentados en la *tabla anexa 4.PI*.

#### 4.5.4.3.4 Método de las relaciones de Dornenburg

Este método establece que, con base a las relaciones de los gases combustibles  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/CH_4$ ,  $C_2H_6/C_2H_2$  y  $C_2H_2/C_2H_4$ , se puede diagnosticar con alguna certeza los tres tipos de fallas incipientes: degradación térmica, arco eléctrico y las descargas parciales (corona). Existen dos formas de aplicar este método, tanto gráficamente como tabularmente.

##### 1) Aplicación tabular del método de Dornenburg

Consiste en determinar el tipo de falla que está ocurriendo en el transformador, en base a los valores directos de las relaciones de los gases.

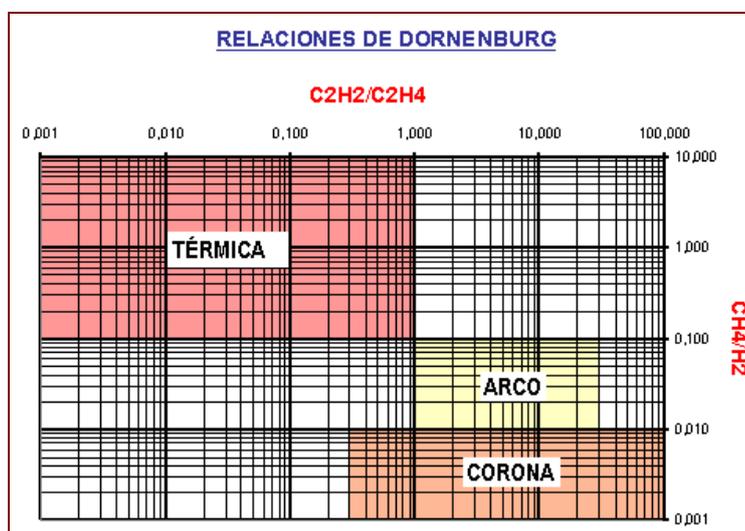
<b>TIPO DE FALLA</b>	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_6}{C_2H_2}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$
<i>Descomposición Térmica (puntos calientes)</i>	>1.0	<0.75	>0.4	<0.3
<i>Descargas Eléctricas (excepto corona)</i>	>0.1 <1.0	>0.75	<0.4	>0.3
<i>Efecto Corona</i>	<0.1	<i>No es significativo</i>	>0.4	<0.3

**Tabla 4.9** – Diagnóstico de fallas en base a la aplicación tabular de las relaciones de Dornenburg

*Es necesario enfatizar que solo las relaciones de los gases no pueden ser utilizadas como un único criterio para evaluar la condición del transformador, puesto que ellas no contienen la información en cuanto la severidad de la falla. Se requiere tener en cuenta otras consideraciones como el total de gases combustibles, la velocidad de generación de gases y otros.*

## 2) Aplicación gráfica del método de Dornenburg

Consiste en relacionar en un gráfico logarítmico  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  vs  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ; donde la intersección de ambos valores en el gráfico indica el tipo de falla que está ocurriendo en el transformador.

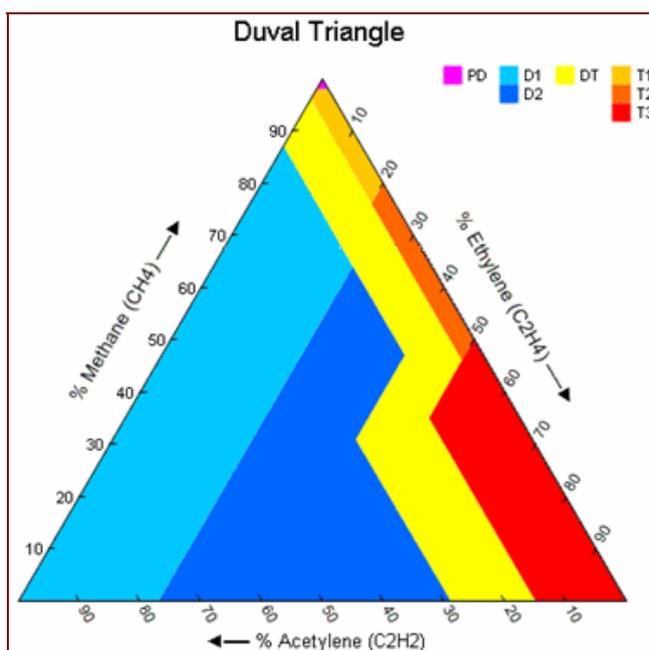


**Figura 4.49** – Gráfico de diagnóstico de fallas en transformadores según las relaciones de Dornenburg

#### 4.5.4.3.5 Método del triángulo de Duval

Este método fue desarrollado por Michael Duval de Hydro Québec, a partir de una base de datos de más de 10000 transformadores. En la actualidad se está utilizando mucho y ha probado ser un método muy preciso.

Consiste en relacionar los tres gases, metano ( $\text{CH}_4$ ), etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) y acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ); los cuales deben sumar 100% y sus cantidades se trazan en un gráfico de ejes triangular, como muestra la siguiente figura:



**Figura 4.50** – Triángulo de Duval, para el diagnóstico de los resultados de ADGD

Dentro del área total del triángulo existen sub-áreas que representan el tipo de diagnóstico clave que se interpreta de la siguiente manera:

<b>CLAVE</b>	<b>DIAGNÓSTICO</b>
<i>PD</i>	<i>Descargas Parciales</i>
<i>D1</i>	<i>Descargas de alta energía</i>
<i>D2</i>	<i>Descargas de baja energía</i>
<i>T1</i>	<i>Fallas térmicas &lt; 300°C</i>
<i>T2</i>	<i>Fallas térmicas 300°C &lt; T &lt; 700°C</i>
<i>T3</i>	<i>Fallas Térmicas &gt; 700°C</i>

**Tabla 4.10** – Diagnóstico de fallas según el área clave de referencia del triángulo de Duval

Las coordenadas y límites de las zonas de falla tanto de descargas como térmicas, se indican en el triángulo. La zona DT corresponde a la zona donde se superponen ambas fallas.

Las coordenadas del triángulo correspondientes a los resultados de ADGD (Análisis de Gases Disueltos), en ppm, pueden calcularse según las siguientes ecuaciones:

$$\%C_2H_2 = \frac{100x}{(x + y + z)} \quad (4.44)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100y}{(x + y + z)} \quad (4.45)$$

$$\%CH_4 = \frac{100z}{(x + y + z)} \quad (4.46)$$

Donde:  $x=C_2H_2$ ,  $y=C_2H_4$ ,  $z=CH_4$

*El área donde se cruzan las líneas representa el diagnóstico*

#### **4.5.5 ENSAYOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL ACEITE DIELECTRICO DEL CAMBIADOR DE TOMAS BAJO CARGA (LTC) DE UN TRANSFORMADOR**

Debido a la continua contaminación a la que se ve expuesto el aceite aislante en servicio dentro del cilindro que abarca la llave conmutadora del cambiador de tomas bajo carga de un transformador de potencia, se crea la necesidad de efectuar ensayos que permitan realizar un seguimiento de sus condiciones desde la primera puesta en servicio del equipo. De esta forma, al ser el aceite aislante aquí utilizado, de similares características al que se emplea en la inmersión de la cuba del transformador, este podrá ser sometido a los mismos ensayos básicos recomendados por la ya mencionada norma ASTM-D3487, dándose su aplicación en las siguientes situaciones:

***1) Con el aceite aislante reacondicionado e inmerso dentro del cilindro de la llave conmutadora, posterior a 48 horas de reposo, previo a la energización.***

Para lo cual, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 11), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus respectivos valores límites de aceptación expuestos en la *tabla anexa 4.Q1*.

- 2) ***Posterior a la energización del transformador, anualmente como inspección rutinaria.*** Para lo cual, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 12), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus respectivos valores límites de aceptación expuestos en la *tabla anexa 4.R1.*

La metodología referente a cada uno de los ensayos recomendados por la IEEE para este caso, ya se explico detalladamente en los literales 4.5.2 y 4.5.3 de este capítulo. No así, los criterios aplicados en la evaluación de los resultados obtenidos, varían y se ajustan a las tablas anexas aquí referenciadas.

*En base a la experiencia y a criterios expuestos por varios fabricantes, se puede recomendar el reemplazo del aceite aislante aquí utilizado, siempre que:*

- 1) *La rigidez dieléctrica del aceite fuera menor que 20kV y la acidez mayor que 0.3mgKOH/g.*

***NOTA:*** *Estos ensayos deben ser realizados cada año o cada 10000 operaciones del cambiador de tomas bajo carga.*

- 2) *Se haya completado el número de conmutaciones recomendado por el fabricante o cada cinco a seis años.*

#### **4.5.6 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO DEL ACEITE AISLANTE A SER SOMETIDO A ENSAYOS**

##### **4.5.6.1 Procedimiento para la toma de muestra del aceite aislante a ser sometido a ensayos físico-químico en laboratorio**

El procedimiento que se expone a continuación, es una adaptación de la norma ASTM D-923, aplicada en la toma de muestras del aceite aislante de un transformador, para posteriormente ser analizadas bajo ensayos físico-químicos de laboratorio:

- 1) Tomar en cuenta las siguientes precauciones generales:
  - a) Antes de extraer la muestra, se debe verificar que el transformador tenga presión positiva. Esto, para el caso de transformadores sellados.

*NOTA: No se debe intentar extraer una muestra de una unidad con presión negativa, ya que esto podría ocasionar el ingreso de una burbuja de aire a través de la válvula durante el muestreo, lo cual implicaría la ocurrencia de alguna descarga en ella.*

- b) Si la muestra va a ser tomada a una temperatura mayor que la ambiente, se debe minimizar la posibilidad de que estas absorban humedad del aire. No es recomendable tomar muestras bajo condiciones de lluvia o de alta humedad.

- c) A menos que se especifique lo contrario, las muestras de aceite se toman de la válvula de muestreo ubicada en la parte inferior del transformador.

*NOTA: Para el caso en que se requiera tomar dicha muestra del cilindro de la llave conmutadora, se tiene que primero analizar el respectivo diagrama de flujo de interconexión con el equipo purificador de aceite, para luego determinar las maniobras a realizarse y seleccionar la válvula adecuada que sirva para el muestreo.*

- 2) Colocar un contenedor (balde) debajo de la válvula de muestreo y retirar el tapón de seguridad.
- 3) Limpiar dentro de la válvula y la rosca con un trozo de tela que no desprenda hilos, luego dejar drenar por lo menos  $\frac{1}{2}$  litro de aceite en el balde para concluir la limpieza de la válvula.
- 4) Instalar el dispositivo de muestreo (adaptadores con reducciones, terminando en un acople con su respectiva manguera).
- 5) Llenar varias veces el frasco para toma de muestras, con el objetivo de enjuagar y permitir que este adquiera la temperatura del aceite. Se recomienda descartar el aceite de los enjuagues.

*NOTA:* Tomar una cantidad suficiente de aceite para cubrir los requerimientos de los ensayos que se van a realizar. Normalmente un frasco de ½ litro.

- 6) Permitir que el aceite resbale por las paredes del frasco o que se llene desde el fondo (evitar la aireación o formación de burbujas), dejar que el aceite rebose el frasco y que fluya por encima unos cuantos segundos. Tapar el frasco inmediatamente.
- 7) Identificar claramente la muestra con un rótulo que contenga todos los datos del transformador. Una muestra de dicho rótulo se presenta en la *figura anexa 4.16.A*.

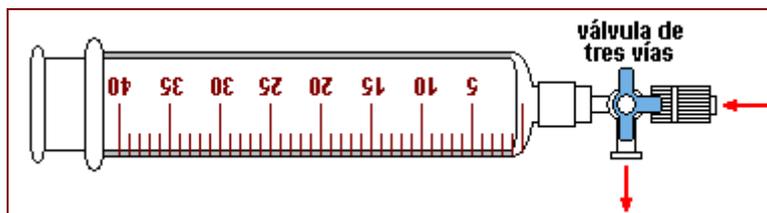
#### **4.5.6.2 Procedimiento para la toma de muestra del aceite aislante a ser sometido a ensayos cromatográficos (análisis de gases disueltos) en laboratorio**

El procedimiento que expongo a continuación, es una adaptación de la norma ASTM D-923, aplicada en la toma de muestras del aceite aislante de un transformador, para posteriormente ser analizadas bajo ensayo de análisis cromatográfico en laboratorio.

- 1) Tomar en cuenta las siguientes precauciones generales:
  - a) Debe ser hecha cuidadosamente la selección de los puntos en los cuales las muestras deben ser tomadas. Se recomienda tomar en un punto representativo del total del aceite del transformador y donde no existan cambios en la composición, tales como donde se ubican las bombas de recirculación para enfriamiento.
  - b) La muestra debe ser retirada con el equipo en la condición normal de funcionamiento (esto es importante para verificarse la tasa de producción del gas).
  - c) Después de tomada la muestra, la jeringa no debe contener aire, sin embargo, si aparece una burbuja después de transcurridos algunos minutos de haberse tomado la muestra, esta no se puede eliminar (es posible que el aceite estuviera saturado de gases) y debe analizarse dentro de la muestra.
  - d) Una parte del oxígeno disuelto presente en la muestra de aceite puede ser consumido por oxidación. Esta reacción puede ser retardada manteniéndose la muestra protegida de la luz, envolviendo por ejemplo, la jeringa en una hoja de papel de aluminio. La muestra no sólo debe

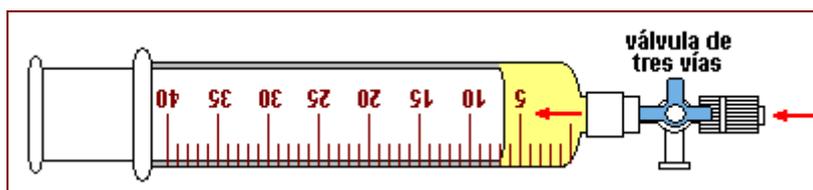
quedar protegida de la luz solar, sino que también de la luz de la lámpara fluorescente que emite radiación ultravioleta.

- e) Antes de extraer la muestra se debe verificar que el transformador tenga presión positiva, para el caso de transformadores sellados.
- 2) Colocar un contenedor (balde) debajo de la válvula principal de muestreo (inferior) y retirar el tapón de seguridad.
- 3) Limpiar dentro de la válvula y la rosca con un trozo de tela que no desprenda hilos, luego dejar drenar por lo menos  $\frac{1}{2}$  litro de aceite en el balde para concluir la limpieza de la válvula.
- 4) Instalar el dispositivo de muestreo (adaptadores con reducciones, terminando en un acople con su respectiva manguera).
- 5) Abrir la válvula de muestreo del transformador y permitir que el aceite fluya por el puerto de salida de la jeringa. Es decir, la válvula de tres vías debe ser ajustada para permitir que 1 a 2 litros de aceite puedan ser eliminados. Observar la figura.



**Figura 4.51** – Disposición de la válvula de tres vías para la evacuación del aceite

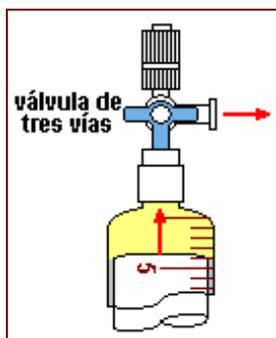
- 6) Girar la válvula de tres vías permitiendo la entrada (lenta) de aproximadamente 5-10 ml de aceite en la jeringa. El émbolo no debe ser forzado y sólo se debe permitir que sea desplazado por la presión del aceite. Observar la figura.



**Figura 4.52** – Disposición de la válvula de tres vías para el llenado de aceite de enjuague de la jeringa

- 7) Cerrar inmediatamente la válvula de tres vías con la punta indicadora hacia la jeringa, retirar la jeringa de la manguera y permitir que el fluido de aceite continúe dentro de un contenedor (balde).
- 8) Poner la jeringa en posición vertical y abrir la válvula de tres vías (tener cuidado con el émbolo de la jeringa, ya que puede resbalar y quebrarse), eliminar todas las burbujas que existan dentro de la jeringa empujando lentamente el émbolo. Dejar aproximadamente 2ml de aceite en la jeringa,

para evitar que en la próxima toma entre aire. Cerrar la válvula con el indicador apuntando a la jeringa. Observar la figura.



*Figura 4.53 – Disposición de la válvula de tres vías para el vaciado del aceite de enjuague de la jeringa.*

- 9) Repetir los pasos del 6) al 8) por lo menos dos veces para permitir un correcto enjuague de la jeringa.
  
- 10) Con la jeringa libre de burbujas y el colchón de 2ml de aceite, volver a conectar con la manguera. Para evitar la entrada de aire en la jeringa, deje fluir por unos segundos el aceite por el puerto lateral de la válvula de tres vías (referencia figura 4.51).
  
- 11) Abrir la válvula con el indicador apuntando al puerto lateral de la válvula de tres vías, permitir que el aceite entre en la jeringa. En este proceso el émbolo no debe ser forzado hacia ningún lado (atrás o adelante), ya que esto puede ocasionar la formación de burbujas (El llenado de la jeringa debe hacerse por la misma presión que ejerce el aceite sobre ella).

- 12) Cerrar la válvula de tres vías con el indicador apuntando hacia la jeringa.  
Revisar que la jeringa este libre de burbujas, si existen, descarte la muestra y repita el proceso.
  
  - 13) Cerrar la válvula de muestreo del transformador. La jeringa debe ser desconectada.
  
  - 14) Identificar claramente la muestra con un rótulo o etiqueta que contenga todos los datos del transformador. Una muestra de dicho rótulo se presenta en la *figura anexa 4.16.B*.
- NOTA: Ubicar dicho rótulo de tal manera que permita leer el volumen de aceite en la jeringa.*
- 15) Finalmente, la jeringa es colocada en un envase de cartón especial para su envío hacia el laboratorio.

#### **4.5.6.3 Procedimiento aplicado para el ensayo de rigidez dieléctrica del aceite.**

- 1) Realizar la limpieza del conjunto célula-electrodos, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Limpiar internamente utilizando papel de seda seco libre de hilachos o gamuza seca. No tocar los electrodos y las paredes internas de la célula con los dedos o con la parte del papel de limpieza que haya estado en contacto con las manos.
  - b) Lavar la célula internamente con queroseno seco u otro solvente hidrocarburo adecuado y seco (especificación D-484). El solvente para limpieza no debe ser fácilmente evaporable (de bajo punto de ebullición), pues esto causará la disminución de la temperatura de la célula creando condensación de agua en sus paredes y electrodos.
- 2) Realizar el ajuste de los electrodos según el método por aplicarse para el ensayo. Por tanto:
- a) Para el método ASTM D-877 (electrodos tipo disco o cilíndricos): La distancia entre electrodos debe ser de 2.5m
  - b) Para el método ASTM D-1816 (electrodos tipo semiesféricos): La distancia entre electrodos debe ser de 2mm, cuando fuera disponible una fuente de tensión de faja adecuada, o 1mm cuando la tensión máxima del transformador de ensayo fuera de cerca de 50kV

- 3) Verificar que la temperatura y la humedad relativa del ambiente, sean las adecuadas para efectuar el ensayo. Esto es, una temperatura no menor a 20°C y una humedad relativa no mayor al 75%.
- 4) Se realizan los mismos pasos del 1) al 6) del literal 4.5.5.1.

*NOTA: Es conveniente que el volumen de la muestra sea de 2 litros para ensayo de recepción y 1 litro para ensayos de rutina*

- 5) El frasco con la muestra es lentamente invertido y suavemente agitado por diversas veces antes de llenar la célula de muestreo. Esto permite que las partículas que puedan existir en el líquido, queden en suspensión y se obtenga una muestra representativa.
- 6) Inmediatamente después de la agitación, lavar la célula con una pequeña cantidad del líquido a analizar.
- 7) Llenar cuidadosamente la célula de muestreo, evitando el aprisionamiento de aire. Considerar que la superficie del líquido debe quedar en lo mínimo, 20mm encima de la parte superior de los electrodos.

- 8) Efectuar el primer ensayo operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar la metodología expuesta en el literal 4.5.3.1.1 de este capítulo, para la ejecución del respectivo ensayo según sea la norma.
- 9) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo en un formulario pre-establecido (ver ejemplo en capítulo V).

#### **4.5.6.4 Procedimiento aplicado para el ensayo de factor de potencia del aceite**

- 1) Realizar la limpieza de la célula de muestreo. Es recomendado el uso de los solventes triclorotrifluoroetano, éter de petróleo o pentano.
- 2) Verificar que la temperatura y la humedad relativa del ambiente, sean las adecuadas para efectuar el ensayo. Esto es, una temperatura no menor a 20°C y una humedad relativa no mayor al 75%.
- 3) Se realizan los mismos pasos del 1) al 6) del literal 4.5.5.1.

***NOTA:** Se recomienda llenar la célula hasta que el nivel de aceite se encuentre a 2cm aproximadamente del borde superior de la misma.*

- 4) Mantener la célula de muestreo tapada y ubicada sobre una superficie nivelada. Aguardar algunos minutos hasta que se dé la salida total de las burbujas de aire y haya la sedimentación de las partículas que estén en suspensión en el aceite.
- 5) Efectuar el primer ensayo operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar la metodología expuesta en el literal 4.5.3.2.1 de este capítulo.
- 6) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo en un formulario pre-establecido (ver ejemplo en capítulo V).

## **4.6 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTACIÓN**

### **4.6.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Manteniendo la misma filosofía del transformador de potencia, para el caso de los transformadores de tensión y de corriente, los ensayos dieléctricos aplicados ayudan a comprobar el estado de su aislamiento entre espiras, entre arrollamientos primario y secundario, entre arrollamientos secundarios y entre cada arrollamiento con respecto a la masa sólidamente aterrizada.

No así, en el caso de los transformadores de tensión tipo capacitivos, los ensayos dieléctricos van principalmente dirigidos a comprobar el estado del aislamiento involucrado en cada sección capacitiva que comprende las bobinas del capacitor. Adicionalmente, se analiza también el estado del aislamiento del transformador intermedio del cual se derivan los arrollamientos secundarios.

#### **4.6.2 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS EN CAMPO**

##### **4.6.2.1 Ensayo para determinar el Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

Este ensayo permite detectar la presencia de humedad, carbonización y otras formas de contaminación presente en el interior de los transformadores de instrumentación, manteniendo el mismo esquema de aislamiento aceite-papel que se da en los transformadores de potencia.

Adicionalmente a la verificación del estado del aislamiento, este ensayo permite determinar las características funcionales del equipo, mediante la medición de la capacitancia entre arrollamientos y/o entre cada sección capacitiva.

La porcelana que conforma el 80% del cuerpo de los transformadores de instrumentación, es otro elemento que juega un papel importante en su normal funcionamiento, por lo tanto, utilizando el mismo instrumento de ensayo, se puede

evaluar su estado mediante la medida de pérdidas en watts que se da sobre y/o a través de su cuerpo, esto a partir del uso de collares, cuya técnica de aplicación se expone con mayor detalle más adelante en el literal 4.10 de este capítulo. Este ensayo sería un importante complemento en el análisis total de las condiciones del aislamiento de estos equipos.

#### **4.6.2.1.1 Voltaje aplicado para el ensayo**

##### **Transformadores de tensión inmersos en líquido aislante y que operan con voltaje de línea a tierra**

En este tipo de transformadores de instrumentación para todas las clases de aislamiento, el voltaje a ser empleado en el ensayo está limitado al valor nominal del terminal neutral, esto debido a que uno de los principales requerimientos para la ejecución de este ensayo, es el cortocircuitar ambos extremos del arrollamiento primario con el fin de uniformizar el potencial a lo largo del mismo. Por lo cual, se recomienda la aplicación de un voltaje de 5kV o menor.

La excepción se da en los casos que se requiera evaluar el aislamiento progresivo del arrollamiento primario o del bushing, referenciado al terminal de alta tensión H1 (ensayos No.2 y No.6), dado que aquí no se requiere algún

cortocircuito en tal arrollamiento, se puede aplicar tranquilamente un voltaje de 10kV.

### **Transformadores de tensión inmersos en líquido aislante y que operan con voltaje de línea a línea**

En este tipo de transformadores de instrumentación con clase de aislamiento mayor a 15kV, el ensayo es ejecutado a un voltaje de 10kV. Mientras que en unidades con clase de aislamiento menor a 15kV, se selecciona el voltaje a ser aplicado en el ensayo que sea igual o preferiblemente menor al indicado en la placa de identificación del equipo.

### **Transformadores de corriente inmersos en líquido aislante**

En este tipo de transformadores de instrumentación con clase de aislamiento igual o mayor a 15kV, el voltaje aplicado para el ensayo es de 10kV. Siendo útil en ciertas ocasiones, aplicar voltajes graduales que parten de un valor mínimo y pueden llegar hasta máximo 12kV; esto con el fin de investigar resultados anormales.

Para unidades con clase de aislamiento menor a 15kV, es conveniente seleccionar un voltaje para el ensayo, igual o menor al indicado en la placa de identificación del equipo.

### **Transformadores de tensión capacitivos inmersos en líquido aislante**

En este tipo de transformadores de instrumentación para todas las clases de aislamiento, todos los ensayos son ejecutados a 10kV excepto cuando se energice desde los terminales de potencial (POT) o carrier (CAR). El terminal POT es usualmente diseñado para resistir un voltaje de ensayo de 5kV, mientras que el terminal CAR no debe ser energizado con un voltaje mayor a 2kV; esto, al menos no especifique lo contrario el respectivo fabricante del equipo.

#### **4.6.2.1.2 Ensayos aplicados**

En *los transformadores de tensión*, los ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, dependen básicamente de su configuración constructiva, siendo diferentes para uno que opera con voltaje primario de línea a línea, que para uno que opera con voltaje primario de línea a tierra. En el caso de este último, adicionalmente existe otra diferencia en los ensayos aplicados, y esta se debe a si su arrollamiento primario se encontrara aterrizado internamente o externamente mediante la disposición de un bushing neutral.

*En las Subestaciones Eléctricas del Sistema Nacional de Transmisión, por lo general se encuentran instalados transformadores de tensión que operan con voltaje primario de línea a tierra y con disposición de un bushing neutral para*

*aterrizamiento externo de dicho arrollamiento. Por lo tanto, la descripción de los ensayos aplicados, expuestos en el **apéndice 4.C1**, se ve limitada a este tipo de equipo.*

En los *transformadores de corriente* su configuración constructiva no varía y los ensayos tienen una sola aplicación. La única variante que se presenta, corresponde al número de arrollamientos secundarios disponibles, lo cual es irrelevante en la metodología del ensayo. De esta forma, los ensayos aplicados en este tipo de transformador de instrumentación, se exponen en el **apéndice 4.C2**.

En los *transformadores de tensión capacitivos*, los ensayos aplicados para la medida del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento en conjunto con su capacitancia, dependen de la configuración constructiva del equipo, cuya diferencia se da en el tener o no acceso al terminal de potencial POT.

*En las Subestaciones Eléctricas del Sistema Nacional de Transmisión, por lo general se encuentran instalados transformadores de tensión capacitivos que no disponen de una toma externa del terminal de potencial POT, ya que este internamente se conecta a un transformador auxiliar cuyos arrollamientos secundarios se utilizan para conexión de equipos de medición y protección. Por*

*lo tanto, la descripción de los ensayos aplicados, expuestos en el **apéndice 4.C3**, se ve limitada a este tipo de equipo.*

Cabe recalcar que, el ensayo de factor de potencia y/o factor de disipación de una muestra de aceite aislante contenido en la cuba de todo tipo de transformador de instrumentación, es posible pero no aconsejable, ya que la cantidad dispuesta para la inmersión es muy reducida, siendo perjudicial su disminución.

#### **4.6.2.1.3 Criterio para la corrección de las lecturas en base a la temperatura**

Todas las mediciones realizadas son corregidas a la temperatura estándar de 20°C, usando los multiplicadores listados en la *tabla anexa 4.D1*.

Al igual que en los transformadores de potencia, para poder determinar el factor de corrección de los resultados de este ensayo, también se requiere la temperatura del aceite en su parte superior. Pero al conocer que los transformadores de instrumentación, por lo general NO disponen de sensores de temperatura en ningún lado, se hace necesario aplicar el método de aproximación recomendado en el literal 4.4.2.1.3.

#### 4.6.2.1.4 Criterios para la evaluación de los resultados

Un criterio útil para evaluar los resultados obtenidos para todo tipo de transformador de instrumentación, es que estos sean comparados con los registros de ensayos anteriores y con resultados de ensayos en otras unidades similares del sistema.

No así, en base a la experiencia, se puede establecer el siguiente criterio: *“En un transformador de tensión o de corriente para todo nivel de voltaje, debe considerarse como SATISFACTORIO, un factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento no mayor de 3%.*

Para el caso de los transformadores de tensión, la Doble Engineering Company recomienda establecer un criterio de evaluación a través del análisis comparativo de los resultados obtenidos en el *ensayo total* (método de ensayo No.1), con los resultados obtenidos en los *ensayos de aislamiento progresivo* referenciado a ambos extremos del arrollamiento primario (métodos de ensayo No.2 y No.3). Por ejemplo, si en el ensayo total se obtiene un factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento de valor muy elevado, luego los ensayos de aislamiento progresivo ayudaran a diferenciar si la condición causante es de carácter general o localizada en uno de los extremos del arrollamiento primario (especialmente en los bushing's).

En el caso de los transformadores de tensión capacitivos, los datos de capacitancia y de factor de potencia del aislamiento de las respectivas secciones capacitivas, vienen indicados en la placa informativa del equipo. Por tanto, los resultados de ensayos obtenidos en campo, especialmente durante la recepción del equipo, deben ser comparados con tales valores de placa para establecer un pre-diagnóstico adecuado.

La Doble Engineering Company aclara que los resultados obtenidos en el ensayo, dependen de los materiales aislantes usados en la construcción del equipo, por tanto establece los siguientes criterios de referencia:

- ✓ Si las columnas de secciones capacitivas, se encuentran inmersas en aceite aislante con sus bobinas aisladas en papel, se espera un factor de potencia y/o factor de disipación del orden de 0.25%. Un valor mayor a 0.5%, indica que el equipo debe ser removido de servicio; esto, siempre y cuando el fabricante no indique lo contrario.
  
- ✓ Si las columnas de secciones capacitivas, se encuentran inmersas en fluido sintético aislante con sus bobinas aisladas en papel, se espera un factor de potencia y/o factor de disipación del orden de 0.1%. Un valor mayor a 0.2%, indica que el equipo debe ser removido de servicio; esto, siempre y cuando el fabricante no indique lo contrario.

*Un incremento significativo en la capacitancia medida, indica la existencia de láminas capacitivas cortocircuitadas y por ende pérdida del aislamiento involucrado.*

*Un alto factor de potencia resultado del ensayo, será indicativo de que existe un deterioro en el transformador, ya sea en el aceite, bushing's o arrollamientos.*

#### **4.6.2.2 Ensayo para la medición de la Resistencia de Aislamiento**

Este ensayo al igual que el de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, permite detectar la presencia de humedad, carbonización y otras formas de contaminación presente en el interior de los transformadores de instrumentación.

##### **4.6.2.2.1 Voltaje aplicado para el ensayo**

El voltaje aplicado para este ensayo depende de la clase de aislamiento del transformador. No obstante, se recomienda que al arrollamiento primario se le aplique el máximo voltaje del instrumento de ensayo, que por lo general es 5000 o 10000 voltios DC; y a los arrollamientos secundarios, el más cercano a su capacidad nominal, que por lo general es de 500 voltios DC

#### **4.6.2.2 Ensayos aplicados**

Los ensayos aplicados para la medida de la resistencia de aislamiento de los transformadores de instrumentación, dependen básicamente de su tipo y configuración constructiva, sobre lo cual ya se hizo referencia en el literal 4.6.2.1.2 para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento. Por lo tanto, los diferentes ensayos aquí aplicados, se detallan en los *apéndices 4.D1, 4.D2 y 4.D3*.

#### **4.6.2.3 Criterios para la evaluación de los resultados**

En este tipo de equipo es difícil establecer criterios precisos de aceptación, que ni los propios fabricantes ofrecen. Por lo cual, se recomienda elaborar una propia estadísticas en base a resultados preliminares, comenzando desde los obtenidos en la recepción del equipo en fábrica y en campo.

En base a la experiencia de ensayos efectuados en varios mantenimientos y puestas en servicio dentro del Sistema Nacional de Transmisión, se podría decir que, para transformadores de instrumentación de voltajes nominales entre 69kV y 230kV, pueden considerarse ACEPTABLES valores de resistencia de aislamiento mayores a 1000 Megaohms.

*Adicionalmente, se recomienda analizar la tendencia de los resultados de resistencia de aislamiento con el tiempo de aplicación de la tensión DC de ensayo (normalmente 10 min.) y evaluar los respectivos índices de absorción (IA) y polarización (IP) obtenidos.*

### **4.6.3 ENSAYOS DIELECTRICOS ESPECIALES APLICADOS EN FÁBRICA**

#### **4.6.3.1 Consideración general**

Los transformadores de instrumentación al igual que los de potencia, son sometidos a ensayos dieléctricos especiales en fábrica, tales como: ensayos de tensión inducida, tensión aplicada al aislamiento, tensión de impulso eléctrico y descargas parciales.

No obstante, en el caso de los transformadores de instrumentación, deberá tomarse especial cuidado, identificando al grupo de conexión al que pertenecen, ya que de esto depende la máxima tensión empleada tanto en el ensayo de tensión aplicada como el de tensión inducida. Por tanto, de acuerdo con la norma ABNT, se estipula lo siguiente:

- 1) *Grupo de Conexión I (conexión fase-fase):* Transformador de instrumentación con aislamiento pleno, a ser conectado entre fases en un sistema aterrizado y/o aislado. Las tensiones de ensayo aplicadas son:

- Ensayo de Tensión Aplicada → Con la tensión de ensayo a Frecuencia Industrial recomendada en la columna (3) de la tabla anexa 4.C1.
- Ensayo de Tensión Inducida → Con el doble de la tensión nominal del sistema.

2) *Grupo de Conexión II (conexión fase-tierra):* Transformador de instrumentación a ser conectado entre fase y tierra, en un sistema aterrizado. Las tensiones de ensayo aplicadas son:

- Ensayo de Tensión Aplicada y Tensión Inducida → Con la tensión de ensayo a Frecuencia Industrial recomendada en la columna (3) de la tabla anexa 4.C1

3) *Grupo de Conexión III (conexión fase-tierra):* Transformador de instrumentación a ser conectado entre fase y tierra, en un sistema aislado. Las tensiones de ensayo aplicadas son:

- Ensayo de Tensión Aplicada y Tensión Inducida → Con la tensión de ensayo a Frecuencia Industrial recomendada en la columna (3) de la tabla anexa 4.C1.

#### **4.6.3.2 Ensayo de Tensión Aplicada**

Este ensayo es aplicado tanto en transformadores de tensión como de corriente, y permite la verificación del aislamiento de los arrollamientos entre sí y entre cada uno con respecto a la masa del equipo sólidamente aterrizada.

La metodología y los criterios de evaluación aplicados son similares a los expuestos en los ítems 4.4.3.2.1 y 4.4.3.2.2 respectivamente, para un transformador de potencia.

#### **4.6.3.3 Ensayo de Tensión Inducida**

Este ensayo es aplicado tanto en transformadores de tensión como de corriente, y permite la verificación del aislamiento entre espiras y entre las capas de sus arrollamientos.

La metodología aplicada es similar a la expuesta en el ítem 4.4.3.3.1 para un transformador de potencia. Cabe recalcar, que la duración del ensayo en este tipo de equipos, será tal que el número de ciclos aplicados NO sea mayor a 7200, correspondiendo para las frecuencias de ensayo normalmente aplicadas de 120, 180, 240 o 400 Hz, una duración de 60, 40, 30 y 18 segundos, respectivamente (Ver fórmula 4.39).

#### **4.6.3.4 Ensayo con Tensión de Impulso**

Este ensayo es aplicado tanto en transformadores de tensión como de corriente, y permite verificar la rigidez dieléctrica a lo largo de los arrollamientos, entre espiras, capas y bobinas.

La metodología y los criterios de evaluación aplicados son similares a los expuestos en los ítems 4.4.3.4.1 y 4.4.3.4.2 respectivamente, para un transformador de potencia.

#### **4.4.5 PRINCIPALES RECOMENDACIONES A SEGUIR PARA LA APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS EN CAMPO**

Para analizar en campo el estado del aislamiento en conjunto de un transformador de instrumentación, se efectúan dos tipos de ensayos: el ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento y el ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del mismo. De esta forma, las principales recomendaciones a seguir para la aplicación de tales ensayos, se exponen a continuación:

- 1) Se recomiendan los mismos tres primeros ítems del literal 4.4.4. sobre recomendaciones para la aplicación de los ensayos en campo de un transformador de potencia.

2) Preparar el transformador para el ensayo, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Aislar el transformador de toda fuente de alimentación, dado el caso de que este se encontrara ya en servicio. Para esto, se recomienda realizar la apertura de los respectivos interruptores y seccionadores adyacentes que operativamente permitan ponerlo fuera de servicio. Considerar adicionalmente el bloqueo funcional de tales equipos como medida de precaución.
  
- b) Desconectar todos los conductores externos (aéreos) en los terminales del bushing del transformador y la conexión a tierra del terminal neutral (sea este el caso de un transformador de tensión). Realizar a la vez, la limpieza de dichos terminales, para permitir un buen contacto con los conectores de los cables de interconexión al instrumento de ensayo.

***NOTA:** Poner particular atención a los conductores por desconectarse y asegurarse de que estos hayan sido apropiadamente aislados de cualquier fuente de voltaje. Probar los voltajes extraños o inducidos y aplicar las tierras locales de seguridad.*

- c) Limpiar minuciosamente la superficie de la porcelana del bushing y realizar a la vez una inspección visual de la misma, para detectar alguna anomalía que posiblemente influya en el ensayo.

- d) Desconectar los cables de control y protección que se conectan a los terminales de los arrollamientos secundarios del transformador.
- e) Para el caso de los transformadores de tensión y de corriente, como el objetivo principal de estos ensayos, es la determinación de las condiciones de su aislamiento entre arrollamientos y entre los mismos con respecto a la masa del equipo, es conveniente uniformizar el potencial en todo el arrollamiento primario, por tanto, se requiere que este sea cortocircuitado. En cuanto que a los arrollamientos secundarios se debe tomar en cuenta lo siguiente:
- En el caso de un transformador de corriente, cada uno de sus arrollamientos secundarios deben ser cortocircuitados en ambos extremos y aterrizados. Dependiendo del método de ensayo, en algunos casos sólo se requiere que sean cortocircuitados y no aterrizados.
  - En el caso de un transformador de tensión, cada uno de sus arrollamientos secundarios deben ser aterrizados en solo uno de sus extremos. Dependiendo del método de ensayo, en algunos casos se requiere que estos sean cortocircuitados.

- f) Aterrizar los arrollamientos por un periodo de 10 minutos, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual del aislamiento que pudiera afectar la medición. De igual forma, para el caso de los transformadores de tensión capacitivos, se recomienda aterrizar los terminales de cada una de las secciones capacitivas dispuestas en diferentes columnas aislantes de porcelana (una encima de otra).
- 3) Ubicar los instrumentos de ensayo sobre una superficie plana y firme, a una distancia del transformador tal que, permita el buen uso de los cables de interconexión.
- 4) Definir previamente el ensayo a ser aplicado, analizarlo gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones:
- Para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, hacer referencia a los tipos de ensayos expuestos en los *apéndices 4.C1, 4.C2 y 4.C3*.
  - Para la medición de la resistencia del aislamiento, hacer referencia a los tipos de ensayos expuestos en los *apéndices 4.D1, 4.D2 y 4.D3*.
- 5) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar lo siguiente:

- Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento:
  - a) Aterrizar correctamente el instrumento de ensayo, de ser posible a los mismos puntos de conexión de la cuba del transformador a la red principal de tierra de la instalación.
  - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.6.2.1.1.
  - c) Operar adecuadamente el o los interruptores de seguridad del instrumento de ensayo, según lo recomiende el fabricante.
  - d) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los ensayos a ser aplicados, cuyo modelo depende del tipo de transformador de instrumentación en análisis.
  
- Para el ensayo de medida de resistencia de aislamiento:
  - a) Definir el método de análisis a aplicarse, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4 de este capítulo.
  - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.6.2.2.1 de este capítulo.
  - c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los ensayos a ser aplicados, cuyo

modelo depende del tipo de transformador de instrumentación en análisis.

- 6) Después de finalizar el primer ensayo, se debe descargar la capacitancia del espécimen por un periodo aproximado de cuatro veces el tiempo que se aplicó el voltaje en el ensayo previo. Esto, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual que pueda afectar la próxima medición.

*NOTA: NO desconectar los cables de interconexión por lo menos antes de 30 a 60 segundos después del ensayo, para permitir la descarga normal de la capacitancia.*

## **4.7 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LOS SECCIONADORES DE POTENCIA**

### **4.7.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados permiten verificar el estado del aislamiento de las columnas de porcelana, sea este: individualmente, entre polos o entre cada polo con respecto a la bancada del seccionador sólidamente aterrizada.

## **4.7.2 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS EN CAMPO**

### **4.7.2.1 Ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento**

Este ensayo es útil para detectar la contaminación de la porcelana de cada columna aislante soporte de las cuchillas del seccionador. Contaminación que puede deberse a las reacciones producidas por los contaminantes orgánicos e inorgánicos que se asientan en su superficie, lo cual ayuda al paso de corrientes superficiales de fuga que van deteriorando la capa vitrificante y posteriormente causando problemas en la masa de porcelana.

#### **4.7.2.1.1 Voltaje aplicado para el ensayo**

Para efectuar el ensayo de resistencia de aislamiento en los seccionadores de potencia, se recomienda aplicar al terminal de la columna aislante soporte, el máximo voltaje del instrumento de ensayo, el cual normalmente es de 5000 o 10000 voltios DC.

#### **4.7.2.1.2 Ensayos aplicados**

De manera general, los ensayos aplicados varían de acuerdo al tipo de seccionador, sea este de un solo corte o de doble corte, lo cual influye en el número de columnas aislantes disponibles por polo. En sí, la variante del

número de ensayos aplicados se da en la cantidad de columnas aislantes individuales por ensayar, más no por el tipo de ensayo a aplicar.

*En las subestaciones del Sistema Nacional de Transmisión existen ambos modelos de seccionadores. No obstante, para cuestiones de explicación, en el **apéndice 4.E1** se hace solo referencia a los métodos de ensayos aplicados al seccionador de un solo corte.*

#### **4.7.2.1.3 Criterios para la evaluación de los resultados**

Es recomendable para la evaluación de los resultados, realizar la comparación en base al historial de ensayos anteriores registrados desde la puesta en servicio del equipo. Pero, para los casos en que se carezca de tales registros, se considera como práctica general, efectuar comparaciones entre unidades similares y entre polos (columnas aislantes) del mismo seccionador.

En base a la experiencia de ensayos efectuados en varios mantenimientos y puestas en servicio dentro del Sistema Nacional de Transmisión, se podría decir que, para seccionadores de voltajes nominales entre 69kV y 230kV, pueden considerarse ACEPTABLES valores de resistencia de aislamiento mayores a 50000 Megaohms.

### **4.7.3 ENSAYOS DIELECTRICOS ESPECIALES APLICADOS EN FÁBRICA**

#### **4.7.3.1 Consideración general**

Los ensayos dieléctricos especiales aplicados en fábrica, permiten determinar el estado del “aislamiento de seccionamiento”, lo cual está relacionado con la determinación del voltaje crítico de contorno (critical flashover) y el voltaje de resistencia dieléctrica (withstands).

El *voltaje crítico de contorno* es definido como el voltaje de cresta para el cual existe un 50% de probabilidad de ocurrencia de efluvios de contorno.

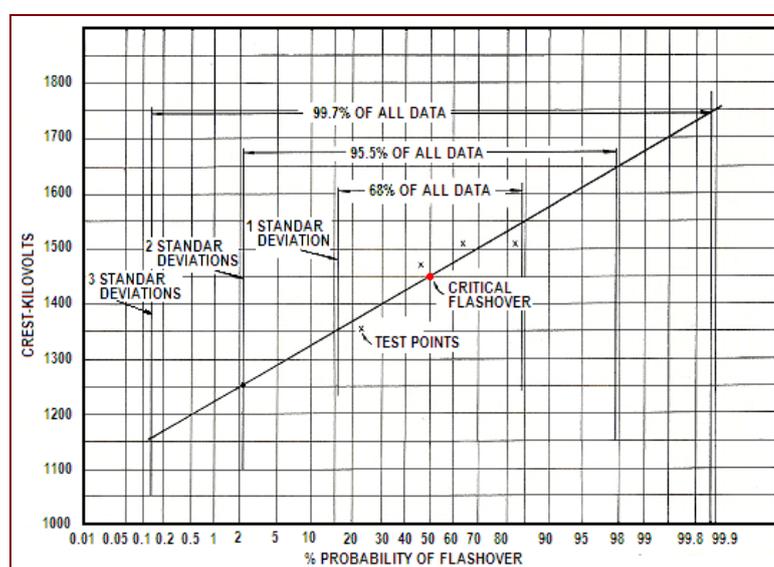
El *voltaje de resistencia dieléctrica* se lo define como el voltaje el cual podría ser repetidamente aplicado a un espécimen bajo ensayo sin causar efluvios de contorno.

#### **4.7.3.2 Ensayo para determinar el voltaje crítico de contorno y el voltaje de ruptura dieléctrica**

El seccionador se dispondrá montado completamente y en posición de funcionamiento con su cuchilla o brazo móvil en posición de apertura normal. En cada polo, se conectará uno de sus bornes a potencial de tierra y sobre el otro se aplicará una serie de 20 ondas de impulsos de maniobra tipo  $1/50\mu\text{seg}$ , en ambas

polaridades (positiva y negativa) y todas de mismo valor de cresta. Posteriormente, es escogido un segundo valor de cresta (superior al anterior) y se aplica nuevamente una serie de 20 impulsos de maniobra. Este proceso deberá seguirse hasta que cuatro ensayos realizados obtengan como resultado de probabilidad de presencia de efluvios de contorno entre el orden del 15% y 85%.

A partir de los resultados de los ensayos aplicados, se elabora un gráfico probabilístico “voltaje de cresta aplicado vs probabilidad de presencia de efluvios de contorno”, aplicando como herramienta clave la desviación estándar de los datos dispersos. Ver la siguiente figura:



**Figura 4.54** – Voltaje de cresta en kV vs % de probabilidad de presencia de efluvios

*Como se puede observar en el gráfico anterior, los resultados crean una línea recta. Esta línea permite mediante interpolación con el eje X, determinar la magnitud del voltaje correspondiente al 50% de probabilidad de presencia de efluvios.*

A pesar que la definición de voltaje de resistencia dieléctrica es claro, su determinación bajo el análisis gráfico de este ensayo es complicada, ya que para la curva obtenida no existe un voltaje para el cual repetidas aplicaciones puedan ser efectuadas al objeto bajo ensayo, sin obtener alguna probabilidad de presencia de efluvios de contorneo.

No así, para facilitar su determinación, se redefine a este como el voltaje en cual se da una probabilidad mínima (mayor a cero) de presencia de dichos efluvios. Por tanto, este parámetro se lo relaciona con el voltaje cresta que corresponde a la probabilidad mínima de presencia de efluvios de la segunda desviación estándar aplicada (haciendo referencia al gráfico anteriormente mostrado, este valor corresponde al mínimo de 2,3%).

Cabe recalcar que este método de ensayo en fábrica, se lo aplica simulando condiciones de ambiente tanto seco como húmedo. Por tanto, para el caso de simulación de ambiente húmedo, sobre la columna aislante del seccionador, se realiza aspersión de agua de resistencia 9,000-11,000 ohm/pie<sup>3</sup> suministrados

desde una fuente a una temperatura de 10°C de la temperatura ambiente en la vecindad del aislador bajo ensayo y directamente a un ángulo de 45°. El volumen de agua debe ser equivalente a la precipitación de 0.12 pulg/minuto. En estas condiciones la columna aislante debe resistir el voltaje especificado por un minuto.

*Como resultado de cuestionamiento ACEPTABLE, la columna aislante no debe presentar daños posterior a la ejecución de este ensayo.*

#### **4.7.4 PRINCIPALES RECOMENDACIONES A SEGUIR PARA LA APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS EN CAMPO**

Para analizar en campo el estado del aislamiento en conjunto de un seccionador de potencia, se aplica únicamente el ensayo de resistencia de aislamiento. Por lo tanto, las principales recomendaciones a seguir con el objetivo de realizar este ensayo, se exponen a continuación:

- 1) Se deben emplear los mismos tres primeros ítems del literal 4.4.4. sobre recomendaciones para la aplicación de los ensayos en campo de un transformador de potencia.
- 2) Preparar el seccionador para el ensayo, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Liberar el seccionador de toda fuente de alimentación, dado el caso que este se encuentre en servicio dentro de un sistema. Para esto, se recomienda realizar la apertura de los respectivos interruptores y seccionadores adyacentes que operativamente permitan ponerlo fuera de servicio (considerar adicionalmente el bloqueo funcional de tales equipos adyacentes).
- b) Desconectar todos los conductores externos (aéreos) en los terminales de los aisladores soporte de cada uno de los tres polos. A la vez realizar una limpieza de los terminales.

***NOTA:** Poner particular atención a los conductores por desconectarse y asegurarse de que estos hayan sido apropiadamente aislados de cualquier fuente de voltaje. Probar los voltajes extraños o inducidos y aplicar las tierras locales de seguridad.*

- c) Limpiar perfectamente la superficie de la porcelana de los aisladores soporte y realizar una inspección visual del mismo para detectar alguna anomalía que posiblemente influya en el ensayo.
- d) Asegurarse que el seccionador se encuentre operativo localmente para poder realizar maniobras de cierre y apertura, según lo requiera el método de ensayo a aplicarse.

- 3) Ubicar el instrumento de ensayo sobre una superficie plana y firme, a una distancia del seccionador tal que, permita el buen uso de los cables de interconexión.
- 4) Definir previamente el método de ensayo a ser aplicado, analizarlo gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones. Para este caso de aplicación únicamente del ensayo para la medida de la resistencia de aislamiento, hacer referencia a los métodos expuestos en el apéndice 4.E
- 5) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, para este caso de aplicación únicamente del ensayo para medición de la resistencia de aislamiento, se debe considerar lo siguiente:
  - a) Definir el método de análisis a aplicarse, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4 de este capítulo.
  - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.7.2.1.1 de este capítulo.
  - c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los ensayos a ser aplicados, cuyo modelo a escoger depende del tipo de seccionador (de doble o un solo corte).

## **4.8 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LOS INTERRUPTORES DE POTENCIA**

### **4.8.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Los ensayos dieléctricos permiten comprobar si el aislamiento del interruptor, sea este internamente entre contactos y/o entre estos con respecto a la masa del equipo sólidamente aterrizada, se encuentra dentro de los límites especificados para su normal funcionamiento, cumpliendo además con el rol de buen extintor del arco presente durante su operación.

### **4.8.2 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS EN CAMPO**

#### **4.8.2.1 Ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento en interruptores inmersos en gran volumen de aceite (tipo GVO)**

Este ensayo permite detectar la presencia de humedad, carbonización y otras formas de contaminación presente en el sistema de aislamiento del interruptor de potencia. Considerando principalmente, la continua descomposición a la que se encuentra sometido el aceite aislante de este equipo, debido al arco formado en la superficie de sus contactos durante la interrupción de corrientes de falla y de carga normal.

#### 4.8.2.1.1 Voltaje aplicado para el ensayo

Interruptores tipo inmerso en gran volumen de aceite aislante, con clase de aislamiento mayor o igual a 15kV, son ensayados con una tensión de 10kV. Mientras que estos equipos con clase de aislamiento menor a 15kV, pueden ser ensayados con un voltaje menor o igual al registrado en la placa. No obstante, la Doble Engineering Company, recomienda los siguientes voltajes para la aplicación de este ensayo:

<i>Clase de tensión del interruptor</i>	<i>Voltaje aplicado para el ensayo (kV)</i>
<i>Mayor o igual a 15KV</i>	<i>10</i>
<i>7.2 y 7.5 KV</i>	<i>5</i>
<i>Menor o igual a 5KV</i>	<i>2</i>

*Tabla 4.11 – Voltajes de ensayo de FP recomendados por la Doble Engineering Company*

#### 4.8.2.1.2 Ensayos aplicados

Existen tres tipos de ensayos aplicados por cada polo, donde, dos se realizan con el interruptor en posición “abierto” (uno por bushing) y uno en posición “cerrado”. Los primeros, con el fin de analizar el aislamiento en referencia de cada terminal por separado, y el último realizando un análisis total del aislamiento en referencia de ambos terminales en conjunto. Tales métodos, se detallan en el *apéndice 4.F1*.

El objetivo de esta metodología aplicada, es el establecer parámetros de comparación entre los resultados de pérdidas obtenidos en ambos procedimientos, con la finalidad de plantear criterios que permitan evaluar las condiciones del equipo, en cuestión de su sistema de aislamiento.

*Hay que considerar, que si el encapsulamiento es trifásico, los terminales de los polos que no están bajo ensayo, deben permanecer flotantes.*

Al efectuar el ensayo, conectando el cable de alta tensión del instrumento al terminal del bushing, se establece un campo eléctrico entre el conductor central y las partes aterrizadas del interruptor. Las pérdidas en cualquier parte aislante involucrada dentro de dicho campo, dependen del gradiente de potencial en la distancia que se encuentren.

Sabiendo por teoría básica, que el gradiente de potencial es dependiente de la forma y la medida de los electrodos y de su distancia de separación, se puede concluir que, éste será mucho mayor cerca del conductor central del bushing (electrodo a potencial 10kV) que cerca del tanque del interruptor (electrodo a potencial 0).

Como este tipo de interruptores por lo general dispone de bushing's capacitivos, su tap de derivación al permanecer aterrizado en servicio y encontrarse más

cerca del conductor central que el tanque del interruptor, permite que el gradiente de potencial en el aislamiento de dicho bushing sea más alto que en el aceite. Esto conlleva a que desde el punto de vista de aislamiento, los bushing's sean considerados como los más vulnerables, recomendándose así la aplicación del ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación de su aislamiento interno por separado.

*Mayor detalle sobre la metodología aplicada para el caso del ensayo de estos bushing's, se presenta en el literal 4.10 de este capítulo.*

De igual forma, al encontrarse inmersos en el aceite mineral del interruptor, varios elementos aislantes auxiliares, tales como: la varilla de operación con su ensamblaje guía, la cámara de interrupción y revestimiento interno del tanque; estos también se encuentran a un gradiente de potencial menor que el aislamiento del bushing.

Como parte de la metodología de aplicación de este ensayo, es recomendable construir diagramas esquemáticos del circuito dieléctrico del interruptor en sus dos posiciones. Esto nos ayudará en el entendimiento de lo que se está realizando con el ensayo y por consiguiente a interpretar los resultados obtenidos. Es así, que en las *figuras anexas 4.17.A, B* se muestran los principales diagramas considerados en este ensayo

#### **4.8.2.1.3 Criterio para la corrección de las lecturas en base a la temperatura**

La temperatura afectará las lecturas de pérdidas (en Watts) obtenidas en el ensayo. Es de conocimiento general que, el Índice de Pérdidas en el Tanque (Tank Loss Index - TLI) es mayor a altas temperaturas, por tanto, este hecho debe ser considerado cuando se analicen los resultados de ensayos. No obstante, por motivo de encontrarse involucradas muchas variables, no ha sido dividido todavía un buen método cuantitativo para corregir las pérdidas obtenidas por efecto de la temperatura. Por lo tanto, no existen factores de corrección establecidos.

#### **4.8.2.1.4 Criterios para la evaluación de los resultados**

Normalmente, es recomendable para la evaluación de los resultados, realizar la comparación en base al historial de ensayos anteriores registrados desde la puesta en servicio del equipo. Pero, para los casos en que se carezca de tales registros, se considera como práctica general efectuar comparaciones entre los valores de ensayos con el interruptor abierto y cerrado, para analizar las condiciones de aislamiento.

El ensayo con el interruptor abierto incluye únicamente el aislamiento del bushing del terminal analizado. Mientras que con el interruptor cerrado, se

incluye en el análisis el aislamiento de ambos bushing's. El campo eléctrico en estos aislamientos, es el mismo para ambos casos.

*Por tanto, las pérdidas en watts obtenidas con el ensayo de factor de potencia, para el interruptor cerrado, debe ser igual a la suma de las pérdidas en watts obtenidas ambos terminales con el interruptor abierto.*

Si esto no se da y existe una diferencia, se concluye que tal resultado se debe a pérdidas en los aislamientos auxiliares, los cuales no son sometidos a las mismas sollicitaciones en ambos ensayos. Por tanto, la magnitud de esta diferencia puede ser usada como un criterio de la condición del aislamiento auxiliar, y es referido como el “Índice de Perdidas en el Tanque” (Tank Loss Index-TLI).

$$(TLI) = (Watts interruptor cerrado) - (Suma de Watts interruptor abierto)$$

Esta formula algebraica puede asumir valores tanto positivos como negativos. Su resultado no es corregido por temperatura y los valores obtenidos en los tres polos de un mismo interruptor, deben ser comparados. Existen criterios que ayudan en la interpretación de los resultados obtenidos con este índice, los cuales se detallan en la *tabla anexa 4.SI*. Tales criterios deben ser tomados como información general, ya que ciertos tipos de interruptores pueden tener

índices normales a pesar de que estos difieren del rango dado en esta tabla. No obstante, es imperativo comparar los valores de TLI entre tanques de un interruptor dado y con resultados obtenidos de unidades similares.

*Siempre que los interruptores tengan índices ligeramente mayores al rango normal esperado, la condición debe ser monitoreada efectuando ensayos sobre una base más frecuente con el objetivo de mantener más amplios desarrollos.*

*Cuando los índices se encuentran más allá de lo normal, se requiere hacer una investigación efectuando ensayos por separado en los elementos internos de los interruptores.*

*Cuando el factor de potencia es mayor de 2% en cualquiera de los bushing's de un polo, este deberá ser investigado y en caso de ser posible, retirado para investigación más minuciosa.*

#### **4.8.2.2 Ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento en interruptores inmersos en gran volumen de aceite (tipo GVO)**

Este ensayo, al igual que el de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, permite detectar la presencia de humedad, carbonización y otras formas de contaminación presente en el sistema de aislamiento en conjunto del interruptor de potencia.

#### **4.8.2.2.1 Voltajes aplicados para el ensayo**

El ensayo para la medida de la resistencia de aislamiento en este tipo de interruptor de potencia, debe ser efectuado aplicando el máximo voltaje del instrumento de ensayo, el cual normalmente es 5000 o 10000 voltios DC.

#### **4.8.2.2.2 Ensayos aplicados**

Existen cuatro tipos de ensayos aplicados para cada polo, de los cuales tres se realizan con el interruptor en posición “abierto” y uno en posición “cerrado”. Tales ensayos se detallan en el *apéndice 4.G1*.

#### **4.8.2.2.3 Criterios para la evaluación de resultados**

Si uno de los resultados obtenidos en los cuatro tipos de ensayos aplicados, se encuentra por debajo de los 10000 Megaohms a una temperatura de 20°C, se deberá investigar las condiciones del aceite dieléctrico del tanque, para determinar si este se debe a su contaminación excesiva ya sea por humedad o partículas sólidas.

De esta forma, si después de corregir las condiciones aislantes del aceite mediante un proceso de reacondicionamiento, siguen habiendo valores menores a 10000 Megaohms, se deberá retirar dicho aceite y efectuar una inspección interna del interruptor para detectar y corregir las causas que originan las altas

pérdidas en el aislamiento. En el caso de que los valores de aislamiento del ensayo No.1, sean menores de 50000 Megaohms a 20°C, convendrá efectuar ensayos más frecuentes.

#### **4.8.2.3 Ensayos aplicados para el control del aceite dieléctrico como parte del sistema de aislamiento de un interruptor inmerso en gran volumen de aceite (tipo GVO)**

El aceite de un interruptor de potencia, al igual que el utilizado para la inmersión de un transformador, debe ser sometido a los mismos ensayos básicos recomendados por la norma ASTM-D3487, esto con el objetivo de verificar que sus propiedades cumplan con dicha norma, de tal forma que se garantice su normal funcionamiento. En este caso también se distinguen tres situaciones diferentes en las que se recomienda analizar una muestra de aceite aislante, estas son:

- 1) ***Durante su recepción en campo.*** Para lo cual, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 8), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus respectivos valores límites de aceptación expuestos en las *tabla anexa 4.T1.*
  
- 2) ***Reacondicionado e Inmerso en un interruptor nuevo, posterior a 48 horas de reposo, previo a la energización.*** Para lo cual, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 9), recomienda los principales ensayos a

ejecutarse y sus respectivos valores límites de aceptación expuestos en la *tabla anexa 4.U1*.

**3) Posterior a la energización del interruptor, anualmente como inspección rutinaria.** Para lo cual, la IEEE mediante la publicación Std.C57.106-2002 (table 10), recomienda los principales ensayos a ejecutarse y sus respectivos valores límites de aceptación expuestos en la *tabla anexa 4.V1*.

Cabe resaltar que la metodología referente a cada uno de los ensayos recomendados por la IEEE para este caso, ya se explico detalladamente en los literales 4.5.2 y 4.5.3 de este capítulo. No así, los criterios aplicados en la evaluación de los resultados obtenidos, varían y se ajustan a las tablas anexas aquí referenciadas.

El ensayo de rigidez dieléctrica es el de mayor recomendación para un seguimiento rutinario (en campo) del estado del aceite desde su puesta en servicio. La Mitsubishi Electric Corporation, uno de los mayores fabricantes de este tipo de equipos de alta tensión, establece que:

*Cuando la resistencia dieléctrica del aceite, cae a un valor igual a 20 kV (aplicando el método según norma ASTM D.877), este debe ser mirado con sospecha, y no debe permitirse que disminuya a menos de 16.5 kV.*

#### **4.8.2.4 Ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento en interruptores inmersos en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque muerto)**

##### **4.8.2.4.1 Voltajes aplicados para el ensayo**

Este tipo de interruptores son generalmente fabricados para clase de aislamiento superior a los 15kV, por lo tanto, todos los ensayos de factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, son ejecutados con una tensión de 10kV.

##### **4.8.2.4.2 Ensayos aplicados**

Existen tres tipos de ensayo aplicados para el análisis del aislamiento de cada polo, y todos se realizan con el interruptor en posición “abierto”. Tales ensayos se detallan en el *apéndice 4.F2*.

En el caso de un interruptor de este tipo, pero con doble cámara de interrupción, el ensayo debe ser aplicado con el equipo en posición “cerrado”, debido a que éste cuenta con una columna aislante soporte intermedia (que hace de unión de las dos cámaras de interrupción existentes), la cual debe ser incluida en el análisis. El ensayo No. 4 del apéndice 4.F2, hace referencia sobre esto.

*Hay que considerar, que si el encapsulamiento es trifásico, los terminales de los polos que no están bajo ensayo, deben permanecer flotantes.*

Este tipo de interruptores, al disponer de bushing's de porcelana tipo huecos, llenados internamente con el gas SF<sub>6</sub> del propio tanque, se recomienda realizar en ellos ensayos complementarios de collar caliente que permitan detectar contaminación a lo largo de su superficie interna y externa, así como también algún resquebrajamiento u otro problema de consideración.

Los ensayos pueden ser de collar simple o de múltiples collares. Por ser de gran longitud estos bushing's, se recomienda realizar un mínimo de tres ensayos de collar simple, tanto en la parte superior, como en la mitad y la parte inferior del bushing, o en su lugar, un ensayo de collares múltiples ubicados en las tres partes a la vez. En el caso de este último, no se permite determinar la falla localizada que produce algún resultado anormal.

*Mayor detalle sobre la metodología aplicada para el caso del ensayo de estos bushing's, se presenta en el literal 4.10 de este capítulo.*

#### **4.8.2.4.3 Criterio para la corrección de las lecturas en base a la temperatura**

La experiencia de ensayos en este tipo de equipos, ha permitido determinar que no es necesario aplicar factores de corrección a los resultados

obtenidos, ya que muy poco o nada, estos se ven influenciados por la variación de la temperatura.

#### **4.8.2.4.4 Criterios para la evaluación de resultados**

Los ensayos con el interruptor tanto en posición “abierto” como “cerrado”, son establecidos en base a la corriente de carga, los watts de pérdidas y factor de potencia. Si la corriente de carga es relativamente pequeña, entonces debe darse más énfasis a los watts de pérdidas que al factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento. Los datos deben ser comparados entre polos del mismo interruptor, con resultados de ensayos anteriores y con resultados registrados para interruptores similares en el sistema.

En algunos casos, estos interruptores son equipados con capacitores de línea a tierra, en el lado de la línea y/o de la carga. Cuando esto sucede, se recomienda analizar tanto su factor de potencia como capacitancia.

Valores altos de pérdidas y factor de potencia del aislamiento para los métodos de ensayos aplicados, pueden ser el resultado de excesiva humedad o productos del arco formado en el SF<sub>6</sub>, los cuales se han condensado o depositado en los elementos de aislamiento interno. La sospecha de humedad puede ser confirmada por las mediciones de punto de rocío en el gas (ver capítulo VI).

Si se ejecutaron ensayos de collar caliente en los bushing's del interruptor, los resultados de pérdidas obtenidos, deben ser comparados entre bushing's similares o con resultados de ensayos anteriores. No obstante, se recomienda que: *Bajo condiciones atmosféricas favorables, las pérdidas para un ensayo de collar caliente simple, debe ser igual o menor a 0.010 watts.*

#### **4.8.2.5 Ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento en interruptores inmersos en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque muerto)**

##### **4.8.2.5.1 Voltajes aplicados para el ensayo**

El ensayo para la medida de la resistencia de aislamiento en este tipo de interruptor de potencia, debe ser efectuado aplicando el máximo voltaje del instrumento de ensayo, que normalmente es 5000 o 10000 voltios DC.

##### **4.8.2.5.2 Ensayos aplicados**

Existen tres tipos de ensayo aplicados para cada polo y todos se realizan con el interruptor en posición “abierto”. Tales ensayos se detallan en el *apéndice 4.G2.*

#### **4.8.2.5.3 Criterios para la evaluación de resultados**

Para poder evaluar los resultados obtenidos, se recomienda realizar un análisis comparativo con registros de ensayos anteriores. No obstante, para los casos en que se carezca de tales registros, se considera como práctica general, efectuar comparaciones de los resultados obtenidos entre polos del mismo interruptor.

En base a la experiencia de ensayos efectuados en varios mantenimientos y puestas en servicio dentro del Sistema Nacional de Transmisión, se podría decir que, para interruptores de este tipo con voltajes nominales entre 69kV y 230kV, pueden considerarse ACEPTABLES valores de resistencia de aislamiento mayores a 10000 Megaohms.

#### **4.8.2.6 Ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento en interruptores inmersos en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque vivo)**

##### **4.8.2.6.1 Voltajes aplicados para el ensayo**

Este tipo de interruptores son generalmente fabricados para clase de aislamiento superior a los 15kV, por lo tanto, todos los ensayos de factor de

potencia y/o factor de disipación del aislamiento, son ejecutados con una tensión de 10kV.

#### **4.8.2.6.2 Ensayos aplicados**

Existen dos tipos de ensayos aplicados para cada polo y ambos se efectúan con el interruptor en posición “abierto”. Tales ensayos se detallan en el *apéndice 4.F3*.

#### **4.8.2.6.3 Criterio para la corrección de las lecturas en base a la temperatura**

La experiencia de ensayos en este tipo de equipos, ha permitido determinar que no es necesario aplicar factores de corrección a los resultados obtenidos, ya que muy poco o nada, estos se ven influenciados por la variación de la temperatura.

#### **4.8.2.6.4 Criterios para la evaluación de resultados**

Los resultados registrados en los ensayos, corresponden solo a la corriente de carga y pérdidas en watts. En vista de la baja corriente de carga, el factor de potencia y/o factor de disipación no es calculado.

No existen valores de referencia definidos, por lo tanto, un criterio para diagnosticar las condiciones del aislamiento de estos equipos, se basa en la

comparación de las lecturas obtenidas entre los polos del interruptor, con los resultados de ensayos anteriores y con resultados de unidades similares instaladas en el mismo sistema.

*Resultados de pérdidas altas en el ensayo No.1, pueden deberse a excesiva contaminación por humedad o partículas sólidas producto del arco generado en el SF<sub>6</sub>, las cuales se han condensado y/o depositado en los elementos internos de la cámara de interrupción. No obstante, bajo condiciones ideales, las pérdidas esperadas deben ser del orden de los 0.010 watts.*

#### **4.8.2.7 Ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento en interruptores inmersos en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque vivo)**

##### **4.8.2.7.1 Voltajes aplicados para el ensayo**

El ensayo para la medida de la resistencia de aislamiento en este tipo de interruptor de potencia, debe ser efectuado aplicando el máximo voltaje del instrumento de ensayo, que normalmente es 5000 o 10000 voltios DC.

##### **4.8.2.7.2 Ensayos aplicados**

Existen dos tipos de ensayos aplicados para cada polo y ambos se efectúan con el interruptor en posición “abierto”. Dichos métodos se detallan en el *apéndice 4.G3*.

#### 4.8.2.7.3 Criterios para la evaluación de resultados

Para poder evaluar los resultados obtenidos, se recomienda realizar un análisis comparativo con registros de ensayos anteriores. No obstante, para los casos en que se carezca de tales registros, se considera como práctica general, efectuar comparaciones de los resultados obtenidos entre polos del mismo interruptor

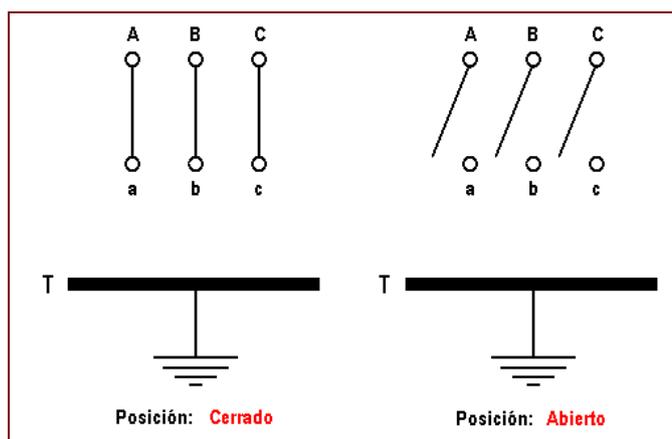
*En este tipo de interruptores las lecturas de resistencia de aislamiento que se obtienen, por lo general son muy altas y constantes, sin tener absorción ni polarización, por estar el aislamiento constituido en mayor parte por porcelana. Una lectura baja es indicación de una falla significativa en los aislamientos.*

En base a la experiencia de ensayos efectuados en varios mantenimientos y puestas en servicio dentro del Sistema Nacional de Transmisión, se podría decir que, para interruptores de este tipo con voltajes nominales entre 69kV y 230kV, pueden considerarse ACEPTABLES valores de resistencia de aislamiento mayores a 10000 Megaohms.

### 4.8.3 ENSAYOS DIELECTRICOS ESPECIALES APLICADOS EN FÁBRICA

#### 4.8.3.1 Generalidades

Los ensayos dieléctricos aplicados en interruptores de potencia, para su control en fábrica, se dividen en dos categorías: de impulso y de tensión aplicada. Para la ejecución de ambos, se deberá analizar el siguiente gráfico que representa esquemáticamente a un interruptor con sus contactos y su base:



*Figura 4.55 – Principal esquema de conexiones para un interruptor tripolar*

Con base al esquema anterior, la norma IEC 56-4 establece la siguiente tabla de referencia, donde se resume como deberán realizarse las conexiones para la aplicación de estos ensayos en interruptores con tensión nominal inferior a 300kV:

<i>Ensayo No.</i>	<i>Posición</i>	<i>Puntos de aplicación de tensión</i>	<i>Puntos de conexión a tierra</i>
1	Cerrado	A a	B C b c T
2	Cerrado	B b	A C a c T
3	Cerrado	C c	A B a b T
4	Abierto	A	B C a b c T (A)
5	Abierto	B	A C a b c T (A)
6	Abierto	C	A B a b c T (A)
7	Abierto	a	A B C b c T (A)
8	Abierto	b	A B C a c T (A)
9	Abierto	c	A B C a b T (A)

(A) Para los ensayos de impulso de maniobra, es necesario aislar convenientemente la base T y los terminales del interruptor, con excepción del terminal opuesto al energizado

**Tabla 4.12** – Datos de la tabla I de la norma IEC 56-4

#### 4.8.3.2 Ensayos de impulso

##### 4.8.3.2.1 Metodología del ensayo

Los ensayos de impulso atmosférico son ejecutados solamente en ambiente seco y la onda padrón usada corresponde a la plena de impulso (1,2/50).

Con el interruptor en posición “cerrado”, son aplicados 15 impulsos a la tensión nominal soportable para cada condición de ensayo indicada en la tabla correspondiente. Estos impulsos serán tanto negativos como positivos. Con los contactos abiertos, el ensayo es aplicado adoptando los mismos criterios que en el caso de los contactos cerrados.

Algunos usuarios exigen adicionalmente, el ensayo de impulso con onda cortada, aunque la norma IEC 56-4 no prevea este tipo de ensayo para interruptores. Esta forma de onda simula algunas situaciones reales en la línea, como por ejemplo, el caso de impulso de tensión atmosférica suprimido por un pararrayo.

#### **4.8.3.2.2 Criterios para la evaluación de los resultados**

Para ser aprobado, el interruptor no debe presentar más de dos descargas disruptivas entre fase a tierra o entre fases en fragmentos de aislamiento auto-regenerables (tales como el aceite y el gas SF<sub>6</sub>), y ninguna descarga en fragmentos de aislamiento no auto-regenerables (aislamientos sólidos como la porcelana).

#### **4.8.3.3 Ensayos de tensión aplicada**

##### **4.8.3.3.1 Metodología del ensayo**

Este ensayo tiene por objetivo comprobar el desempeño del aislamiento del interruptor al ser sometido a determinados niveles de tensión de valor constante y con frecuencia industrial, durante un minuto. La norma prevé este ensayo en ambiente seco y sobre lluvia. Los niveles de tensión especificados se encuentran en la norma IEC 56-2.

#### **4.8.3.3.2 Criterios para la evaluación de los resultados**

Para ser aprobado, el interruptor no deberá presentar ninguna descarga disruptiva. En el caso del ensayo sobre lluvia, es permitida una descarga en el fragmento de aislamiento auto-regenerable. Cuando esto sucediera, deberá ser repetido el ensayo, siendo que en esta repetición no deberá ocurrir ninguna descarga.

#### **4.8.4 PRINCIPALES RECOMENDACIONES A SEGUIR PARA LA APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS EN CAMPO**

Para analizar en campo el estado del aislamiento en conjunto de un interruptor de potencia, se efectúan dos tipos de ensayos: el ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento y el ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del mismo. De esta forma, las principales recomendaciones a seguir para la aplicación de tales ensayos, se exponen a continuación:

- 1) Se recomiendan los mismos tres primeros ítems del literal 4.4.4. sobre recomendaciones para la aplicación de los ensayos en campo de un transformador de potencia.
  
- 2) Preparar el interruptor para el ensayo, tomando en cuenta lo siguiente:

- a) Aislar el interruptor de toda fuente de alimentación, dado el caso de que este se encontrara ya en servicio. Por lo general, en los sistemas de transmisión, este equipo cuenta con seccionadores adyacentes, por lo tanto, se recomienda su apertura (luego de que el interruptor haya sido abierto) y como medida de precaución su respectivo bloqueo operacional.
- b) Desconectar todos los conductores externos (aéreos) en los terminales de sus bushing's, en cada uno de los tres polos. Realizar a la vez, la limpieza de dichos terminales para permitir un buen contacto con los conectores de los cables de interconexión al instrumento de ensayo.

***NOTA:** Poner particular atención a los conductores por desconectarse y asegurarse de que estos hayan sido apropiadamente aislados de cualquier fuente de voltaje. Probar los voltajes extraños o inducidos y aplicar las tierras locales de seguridad.*

- c) Limpiar minuciosamente la superficie de la porcelana de los bushing's y realizar a la vez una inspección visual de la misma, para detectar alguna anomalía que posiblemente influya en el ensayo.
- d) Asegurarse que el interruptor se encuentre operativo localmente para poder realizar maniobras de cierre y apertura, según lo requiera el método de ensayo a aplicarse.

- e) En el caso de interruptores de potencia inmersos en gran volumen de aceite (tipo GVO) e inmersos en gas SF<sub>6</sub> tipo tanque muerto, estos normalmente disponen de transformadores de corriente toroidales instalados en sus bushing's de entrada y salida. Por tanto, se recomienda que los terminales de sus arrollamientos secundarios disponibles en los gabinetes de control local, sean cortocircuitados.
  - f) Aterrizar los terminales de los bushing's por un periodo de 10 minutos, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual del aislamiento que pudiera afectar la medición.
- 3) Ubicar los instrumentos de ensayo sobre una superficie plana y firme, a una distancia del interruptor tal que, permita el buen uso de los cables de interconexión.
- 4) Definir previamente los ensayos a ser aplicados, analizarlo gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones:
- Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento, hacer referencia a los tipos de ensayos expuestos en los *apéndices 4.F1, 4.F2 y 4.F3*.

- Para el ensayo de medición de la resistencia de aislamiento, hacer referencia a los tipos de ensayos expuestos en los *apéndices 4.G1, 4.G2 y 4.G3*.
- 5) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar lo siguiente:
- Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento:
    - a) Aterrizar correctamente el instrumento de ensayo, de ser posible a los mismos puntos de conexión de la masa del interruptor a la red principal de tierra de la instalación.
    - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en los literales: 4.8.2.1.1 para el caso del interruptor inmerso en gran volumen de aceite, 4.8.2.4.1 para el caso del interruptor inmerso en gas SF<sub>6</sub> tipo tanque muerto y 4.8.2.6.1, para el caso del interruptor inmerso en gas SF<sub>6</sub> tipo tanque vivo.
    - c) Operar adecuadamente el o los interruptores de seguridad del instrumento de ensayo, según lo recomiende el fabricante.
    - d) En el caso de interruptores inmersos en gas SF<sub>6</sub>, si a pesar de haber efectuado una estricta limpieza de la superficie de la porcelana de los

bushing's o soportes aislantes de cada polo, se obtiene un valor alto en la lectura de pérdidas en watts del instrumento de ensayo, se recomienda el uso de collares referenciados a la guarda de dicho instrumento.

- e) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los ensayos a ser aplicados, cuyo modelo a escoger depende del tipo de interruptor en análisis.

➤ Para el ensayo de medida de la resistencia de aislamiento:

- a) Definir el método de análisis a aplicarse, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4 de este capítulo.
- b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en los literales: 4.8.2.2.1 para el caso del interruptor inmerso en gran volumen de aceite, 4.8.2.5.1 para el caso del interruptor inmerso en gas SF6 tipo tanque muerto y 4.8.2.7.1, para el caso del interruptor inmerso en gas SF6 tipo tanque vivo.
- c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con los ensayos a ser aplicados, cuyo modelo a escoger depende del tipo de interruptor en análisis.

- 6) Después de finalizar el primer ensayo, se debe descargar la capacitancia del espécimen por un periodo aproximado de cuatro veces el tiempo que se aplicó

el voltaje en el ensayo previo. Esto, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual que pueda afectar la próxima medición.

*NOTA: NO desconectar los cables de interconexión por lo menos antes de 30 a 60 segundos después del ensayo, para permitir la descarga normal de la capacitancia.*

## **4.9 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN LOS EQUIPOS ENCAPSULADOS**

### **4.9.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, permiten verificar el estado del aislamiento involucrado entre el circuito principal del equipo (compuesto de las barras conductoras) y la masa de su encapsulamiento sólidamente aterrizada.

### **4.9.2 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS EN CAMPO**

#### **4.9.2.1 Ensayo para medición de la resistencia de aislamiento**

Este ensayo es de gran importancia, especialmente para detectar algún camino preferencial de cortocircuito franco, dado sobre la superficie interna de los bushing's o aisladores soporte de barras del equipo encapsulado.

La metodología de este ensayo se basa en el análisis del aislamiento entre barras y entre cada una con respecto a tierra, y su aplicación varia dependiendo de la magnitud constructiva del equipo encapsulado y de los intereses del ingeniero ejecutor del ensayo. Siendo posible, que dicho ensayo se aplique tanto a una, como a varias secciones de interés, e inclusive la totalidad del equipo. De esta forma, en el *apéndice 4.HI* se detalla la metodología de ensayo aplicada a una bahía específica de una subestación encapsulada.

Debido a que estos equipos son construidos especialmente para altos voltajes de operación, se recomienda aplicar sin ningún riesgo el máximo voltaje del instrumento de ensayo, que normalmente es 5000 o 10000 voltios DC.

*La Mitsubishi Electric Corporation, recomienda como criterio de aceptabilidad de este ensayo, que los valores obtenidos de medida de la resistencia de aislamiento, deben ser mayores a 2000 Megaohms.*

### **4.9.3 ENSAYOS DIELECTICOS ESPECIALES APLICADOS EN FÁBRICA**

#### **4.9.3.1 Ensayo a tensión de impulso**

Los equipos encapsulados al igual que los demás equipos de potencia son sometidos a este ensayo especial y deberán por norma soportar sin cualquier daño durante un cierto intervalo de tiempo, un valor de sobretensión compatible con su

clase de aislamiento. El ensayo de impulso aplicado, trata fundamentalmente la verificación del nivel de aislamiento del equipo.

Según la metodología de ensayo empleada por la industria Italiana Nuova Magrini Galileo, se recomienda aplicar una onda plena con las características conocidas de  $T_2$  del orden de  $50\mu s$  y  $T_1$  del orden de  $1,2\mu s$ .

La secuencia de aplicación debe ser de quince impulsos consecutivos de polaridad positiva y negativa, entre las partes vivas y tierra. El ensayo es ejecutado en cada bahía del equipo encapsulado.

El impulso generado se aplica entre cada fase (conductor principal) y tierra, considerando que las otras dos fases que no se involucran en el ensayo, deben estar conectadas a potencial de tierra. Normalmente el impulso aplicado se da desde los bushing's de salida y puede existir otro punto de aplicación según lo disponga el fabricante del equipo, acorde con su diseño.

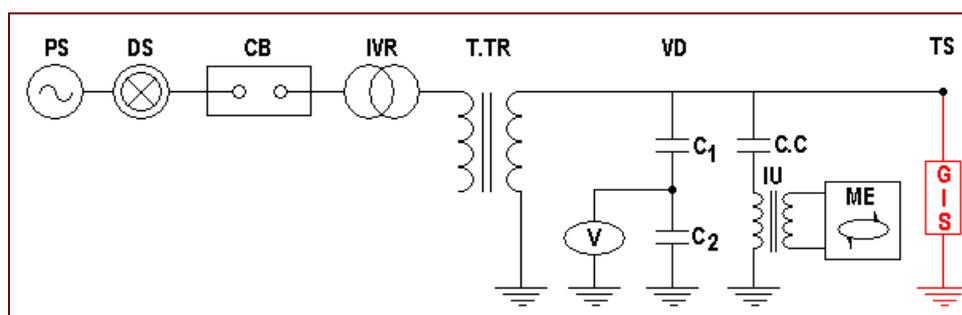
*Los resultados se consideran ACEPTABLES cuando las ondas registradas para los 30 impulsos aplicados, son similares y NO revelan alguna diferencia. Además, se debe observar durante el ensayo la aparición de descargas y/o algún otro fenómeno visible que sean indicio de algún problema presente.*

En las *figuras anexas 4.18.A, B* se muestra un ejemplo de las ondas registradas en el osciloscopio, durante un ensayo real de impulso aplicado a la bahía de un equipo encapsulado.

#### 4.9.3.2 Ensayo de descargas parciales

Este ensayo tiene como finalidad detectar la aparición de pequeñas descargas dentro del equipo encapsulado. El nivel de descargas parciales es medido en dos etapas, la primera durante la aplicación constante del voltaje nominal ( $V_n$ ) al equipo encapsulado por un periodo de 10 segundos, y la segunda cuando inmediatamente se disminuye el voltaje aplicado a una magnitud de  $1.1V_n/\sqrt{3}$ .

El circuito de ensayo aplicado, es como se muestra a continuación:



*Figura 4.56 – Esquema de ensayo para determinar la presencia de descargas parciales*

donde:

**PS:** Fuente de alimentación

**DS:** Switch

**CB:** Interruptor

**IVR:** Regulador de voltaje inducido

**T.TR:** Transformador de ensayo

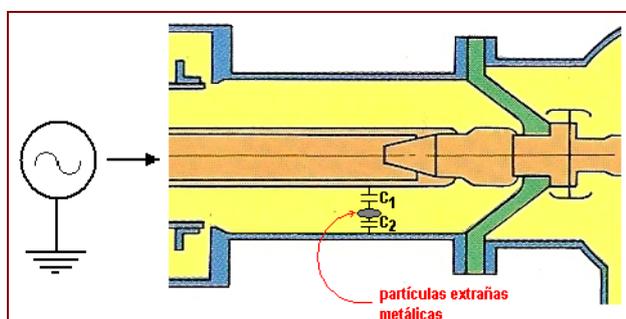
**VD:** Divisor de voltaje

**C.C.:** Capacitor de acoplamiento

**TS:** Espécimen bajo ensayo

**ME:** Equipo de medición

Hay que recalcar que las descargas parciales pueden originarse por la presencia de partículas extrañas, ya sea que estas se encuentren dispersas dentro de alguno de sus compartimentos y/o adheridas a la superficie de de los aisladores soportes de barra conductora o a la superficie interna de los bushing's de porcelana huecos. De esta forma, una situación de descarga parcial dentro del equipo encapsulado, bajo las causas anteriormente expuestas, puede presentarse de la siguiente manera:



*Figura 4.57 – Origen de descarga parcial por presencia de partículas extrañas*

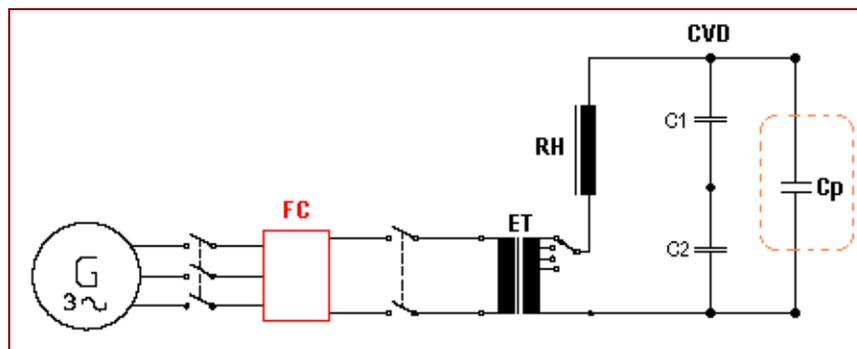
Por tanto, al encontrarse energizado el conductor central del equipo, se creará una diferencia de potencial con respecto a la partícula (involucrando una capacitancia C1) y otra entre esta última con respecto a la masa del equipo a potencial de tierra (involucrando una capacitancia C2). Si una de las dos capacitancias no resiste la diferencia de potencial presente, se origina una descarga producto de su cortocircuito, fenómeno que se conoce como *descarga parcial*.

*Los resultados del ensayo se consideran favorables cuando el nivel de descarga parcial se encuentra menor a 10pC.*

#### **4.9.3.3 Ensayo de resonancia AC en serie con frecuencia variable**

Este ensayo permite verificar el nivel de aislamiento requerido del equipo encapsulado. El mismo que por ser principalmente de características capacitivas, permite su acople a un circuito de resonancia en serie mediante el cual se obtiene un alto voltaje de ensayo.

El circuito de ensayo de resonancia en serie es implementado como se muestra a continuación:



*Figura 4.58 – Circuito de ensayo con resonancia en serie*

donde:

**G:** Generador de alimentación principal

**FC:** Convertidor de Frecuencia

**ET:** Transformador excitador

**RH:** Reactor de alto voltaje

**CVD:** Divisor de voltaje capacitivo

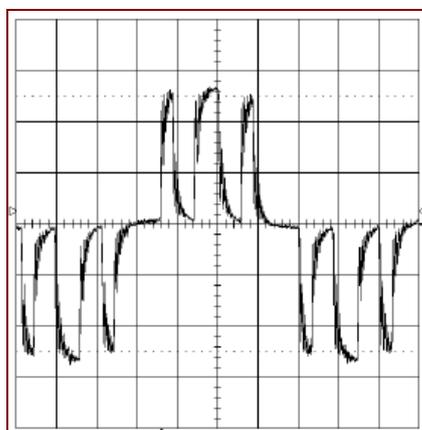
**Cp:** Capacitancia del aislamiento bajo ensayo

En este circuito, el convertidor de frecuencia juega un papel de mucha importancia, ya que es mediante este que se logra obtener el alto voltaje de ensayo sin necesidad de aumentar las dimensiones de los demás instrumentos empleados. Esto se refiere a que en principio, para lograr la afinación del circuito resonante debido al cambio de capacitancia de ensayo (**Cp**), era necesario variar la inductancia de **RH**, lo cual a su vez involucraba que dicho reactor y transformador excitador **ET** sean de mayor capacidad y por consiguiente de grandes dimensiones y peso, características las cuales aumentan acorde con la magnitud del alto voltaje

de ensayo requerido. Por tanto, este esquema de ensayo de resonancia en serie con frecuencia variable es de fácil implementación tanto en fábrica como en campo, este último imprescindible en la recepción del montaje del equipo.

*El circuito de ensayo mostrado, se encuentra disponible para generación de altos voltajes de un rango de hasta 800kV, una corriente de hasta 200 Amperios y frecuencia variable entre 30Hz. a 200Hz.*

El convertidor **FC** aplica un ancho de pulso modulado para ajustar la frecuencia y el voltaje de salida del circuito resonante. La señal de salida del convertidor de frecuencia es como muestra la siguiente figura:



**Figura 4.59** – Señal de salida del convertidor de frecuencia

Esta señal al salir del convertidor permite excitar el circuito resonante, para posteriormente volver a crear una onda de voltaje sinusoidal con un número de armónicos menor al 1% (de acuerdo con la IEC-60 deben ser menores al 5%).

Otra de las características principales de este ensayo es que, durante su ejecución, se puede incluir la medición de descargas parciales. Normalmente el circuito de ensayo convencional (sin convertidor de frecuencia), opera a niveles de ruido de fondo de descargas parciales menor que 2pC. En caso de contar este circuito con convertidor de frecuencia dichos niveles aumentan a un valor mucho mayor, por tanto, se requiere el uso de filtros (F) a la entrada del transformador excitador que logre la atenuación de armónicos a más de 100db.

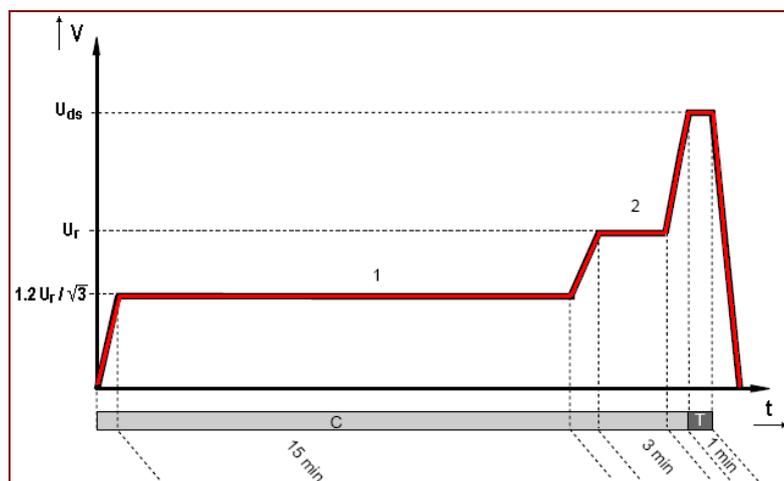
#### **4.9.3.3.1 Metodología del ensayo**

En el caso de equipos con encapsulamiento trifásico, el voltaje de este ensayo debe ser aplicado entre cada fase y tierra, considerando que las otras dos fases deben ser igualmente puestas a potencial de tierra del encapsulamiento. Si se tratara de un equipo con encapsulamiento monofásico se debe aplicar el voltaje de ensayo independientemente entre cada fase con respecto a tierra, sin necesidad de aterrizar las fases restantes. De esta forma, en el *apéndice 4.11* se detalla la metodología de ensayo aplicada a una bahía de una subestación encapsulada.

La aplicación del voltaje de ensayo se debe dar de acuerdo con la siguiente secuencia:

- 1) Incremento gradual del voltaje de ensayo hasta un valor correspondiente a 1.2 el voltaje nominal fase-tierra del equipo. Alcanzado dicho valor, se recomienda mantenerlo por 15 minutos.
- 2) Incremento gradual del voltaje de ensayo hasta un valor correspondiente al voltaje nominal fase-fase del equipo. Alcanzado dicho valor, se recomienda mantenerlo por 3 minutos.
- 3) Incremento gradual del voltaje de ensayo hasta un valor correspondiente al 80% del voltaje de breve duración (es decir 80% del valor dado en la columna #2 de las *tablas anexas 4.W1 y 4.X1* establecidas por la norma IEC 62271-203). Alcanzado dicho valor, se recomienda mantenerlo por 1 minuto.
- 4) Reducción inmediata del voltaje de ensayo a cero.

El gráfico *Voltaje de ensayo (V) vs Tiempo (t)* resultante de esta secuencia, debería ser como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 4.60** – Diagrama de voltaje de ensayo vs tiempo

donde:

**V:** Voltaje

**t:** tiempo

**U<sub>r</sub>:** Voltaje nominal fase-fase del equipo bajo ensayo

**U<sub>ds</sub>:** Máximo voltaje de ensayo correspondiente al 80% de la tensión alterna de breve duración (según IEC 517)

**T:** Ensayo principal

#### 4.9.3.3.2 Criterio para la evaluación de los resultados

El ensayo se dará como APROBADO, cuando las tres fases de la respectiva sección bajo ensayo del equipo encapsulado, hayan mantenido la máxima tensión  $U_{ds}$  aplicada durante un minuto, sin que se haya producido algún fallo.

#### **4.9.4 PRINCIPALES RECOMENDACIONES A SEGUIR PARA LA APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS EN CAMPO**

Para analizar en campo el estado del aislamiento en conjunto de un equipo encapsulado en gas SF<sub>6</sub>, se efectúan dos tipos de ensayos, que por lo general se aplican en el periodo de recepción, siendo estos: el ensayo para la medición de la resistencia de aislamiento y el ensayo de alta tensión de resonancia AC en serie con frecuencia variable. De esta forma, las principales recomendaciones a seguir para la aplicación de tales ensayos, se exponen a continuación:

- 1) Confirmar que todos los compartimentos del equipo encapsulado se encuentren con contenido de gas a presión normal de funcionamiento.
- 2) Comprobar la calidad del gas contenido en cada compartimento o grupo, tomando en cuenta los siguientes criterios: El gas SF<sub>6</sub> debe presentar un contenido mayor o igual que el 95% y una temperatura de punto de rocío menor de -5°C
- 3) Se recomiendan los mismos tres primeros ítems del literal 4.4.4. sobre recomendaciones para la aplicación de los ensayos en campo de un transformador de potencia
- 4) Preparar el equipo encapsulado para el ensayo:

- a) Seleccionar la sección del equipo encapsulado a ser sometida bajo ensayos, de forma tal que la energía en caso de una descarga eléctrica, sea lo más baja posible. Realizar las maniobras necesarias de cierre y/o apertura de los seccionadores e interruptores que permitan seleccionar únicamente tal sección.

**NOTA:** Dentro de la sección en análisis, los seccionadores de línea involucrados deben ser “cerrados”, y los seccionadores de puesta a tierra involucrados deben ser abiertos.

- b) Asegurarse que sus componentes seccionador e interruptor se encuentre operativos localmente para poder realizar maniobras de cierre y apertura, según lo requiera el método de ensayo a aplicarse.
- c) Limpiar perfectamente la superficie de la porcelana de los bushing's involucrados y realizar una inspección visual del mismo para detectar alguna anomalía que posiblemente influya en el ensayo.
- d) Si existieran transformadores de corriente toroidales dentro de la sección bajo ensayo, se recomienda que los terminales de sus arrollamientos secundarios disponibles en los gabinetes de control local, sean cortocircuitados.

- e) Especialmente para el ensayo de alta tensión, si existieran transformadores de tensión involucrados dentro de la sección en análisis, se recomienda que estos sean aislados si la frecuencia de resonancia fuera menor a 80Hz.
- 5) Definir previamente los tipos de ensayos a ser aplicados, analizarlos gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones:
- Para el ensayo de medición de la resistencia de aislamiento, hacer referencia a los tipos de ensayos expuestos en el *apéndice 4.HI*
  - Para el ensayo de alta tensión de resonancia AC en serie con frecuencia variable, hacer referencia a los tipos de ensayos expuestos en el *apéndice 4.II*.
- 6) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar lo siguiente:
- Para el ensayo de alta tensión de resonancia AC en serie con frecuencia variable:
    - a) El circuito de ensayo puede ser acoplado directamente en uno de los extremos de las barras principales del equipo encapsulado, mediante acoples especialmente diseñados por el mismo fabricante del equipo.

También existe la posibilidad de que dicho circuito se acople directamente a los bushing's de salida del equipo encapsulado mediante cables conectados a sus respectivos terminales.

- b) La aplicación del alto voltaje de ensayo deberá cumplir con lo expuesto anteriormente en el literal 4.9.3.3.1
- c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con las secciones del equipo encapsulado a ser analizadas.

➤ Para el ensayo de medida de resistencia de aislamiento:

- a) Definir el método de análisis a aplicarse, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4 de este capítulo.
- b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada el literal 4.9.2.1.

Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con las secciones del equipo encapsulado a ser analizadas.

- 7) Después de finalizar el primer ensayo, se debe descargar la capacitancia del espécimen por un periodo aproximado de cuatro veces el tiempo que se aplicó el voltaje en el ensayo previo. Esto, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual que pueda afectar la próxima medición.

***NOTA:** NO desconectar los cables de interconexión por lo menos antes de 30 a 60 segundos después del ensayo, para permitir la descarga normal de la capacitancia.*

## **4.10 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS PARA EL CONTROL DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS BUSHING'S COMO ELEMENTO PRINCIPAL DE LOS EQUIPOS DE ALTA TENSION**

### **4.10.1 GENERALIDADES**

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, permiten la detección de defectos, contaminación y/o deterioración presente en el aislamiento tanto de bushing's capacitivos como no capacitivos.

### **4.10.2 ENSAYOS DIELECTRICOS APLICADOS EN CAMPO**

#### **4.10.2.1 Ensayos para determinar el factor de potencia y pérdidas en el aislamiento**

##### **4.10.2.1.1 Ensayos de Collar**

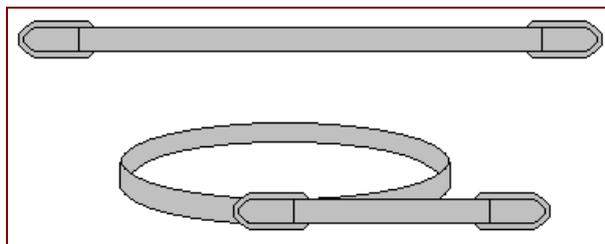
Este ensayo es aplicable tanto en bushing's capacitivos como no capacitivos. Con mayor aplicación en estos últimos, por ser este el único método que permite evaluar las condiciones de su aislamiento.

El ensayo de collar ha sido diseñado especialmente para detectar defectos en las cámaras de bushing's llenos de masa aislante, en bushing's de porcelana sólida tipo seco y en bushing's llenos con aceite o gas SF<sub>6</sub>. Adicionalmente, este permite detectar niveles bajos de aceite o masa aislante, siendo esta técnica útil para determinar si el indicador de nivel se encuentra en perfectas condiciones.

Es un hecho que una de las principales características de falla en los bushing's, especialmente los de masa aislante, se deba a fugas en su parte superior, las mismas que a su vez permiten la entrada de humedad al interior de la cámara, afectando su aislamiento íntegro. Por tales razones, el ensayo de collar permite detectar la humedad y la deterioración en sus tempranas etapas, antes que estas hayan progresado lo suficientemente para ser detectados por los ensayos totales del sistema de aislamiento del equipo involucrado.

Los ensayos son realizados utilizando uno o múltiples collares conductores dispuestos en distintos puntos (parte inferior, media y superior) alrededor de la superficie externa de la porcelana, a través de los cuales se aplica una tensión de ensayo de 10kV con la ayuda del equipo para la determinación del factor de potencia del aislamiento. Aplicando los modos de ensayo GSTground (como estándar) y UST (bajo algunas condiciones y aplicaciones), se determinan las pérdidas en el aislamiento del bushing.

El material del collar puede ser caucho conductor o metálico (trenzado o en lámina) y su forma se muestra en la siguiente figura:



*Figura 4.61 – Collares de caucho conductor*

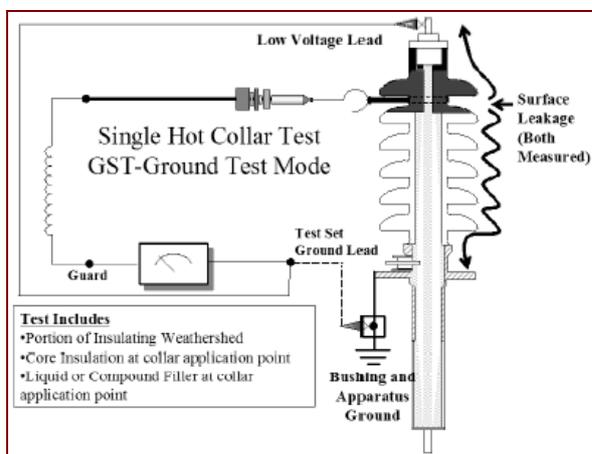
Existen dos tipos de ensayos con collar:

- ✓ *Collar caliente*, cuando se energiza el collar aterrizando el conductor central.
- ✓ *Collar frío*, cuando se energiza el conductor central y el collar se conecta a tierra.

### **1) Ensayo de collar caliente simple (un solo collar)**

#### **Aplicando el modo de ensayo GSTground**

Este ensayo es realizado como se muestra en la figura, con la aplicación de un voltaje de 10 kV al collar, a través del terminal de alto voltaje del instrumento de ensayo.

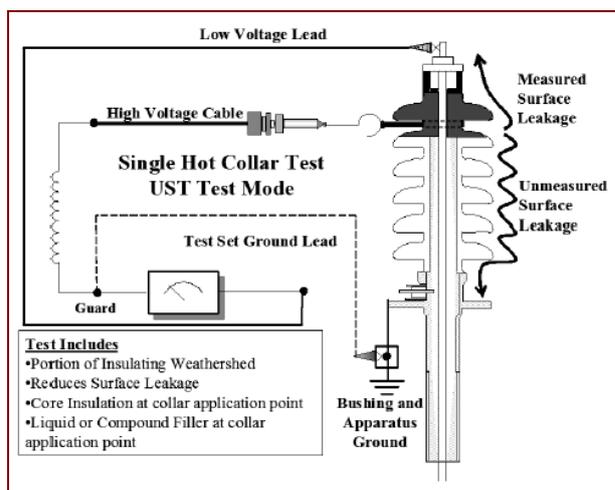


*Figura 4.62 – Ensayo de collar caliente simple, en modo de ensayo GSTground*

En la medición se incluyen todas las corrientes superficiales de fuga, tanto entre el collar energizado y el conductor central como entre el collar energizado y el flange aterrizado. Se debe tomar en cuenta la influencia de la humedad atmosférica y la condición de toda la superficie del bushing bajo ensayo.

### **Aplicando el modo de ensayo UST**

Este ensayo es realizado como se muestra en la figura, con la aplicación de un voltaje de 10 kV al collar, a través del terminal de alto voltaje del instrumento de ensayo.

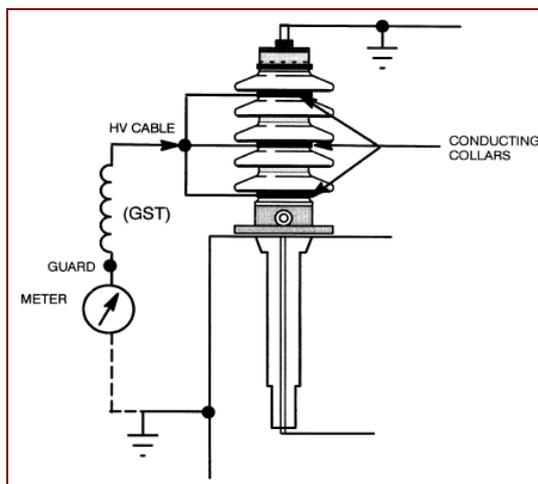


*Figura 4.63 – Ensayo de collar caliente simple, en modo de ensayo UST*

A diferencia del anterior método, en esta medición sólo se toma en cuenta las corrientes superficiales de fuga que circulan entre el collar energizado y el conductor central del bushing. Es decir las corrientes que circulan únicamente sobre la superficie de la primera falda.

## 2) Ensayo de collar caliente múltiple (varios collares)

Este ensayo es un complemento del ensayo de collar simple y se lo aplica de similar manera (modos GSTground y UST), pero esta vez utilizando dos o más collares (normalmente 3) ubicados en diferentes puntos a lo largo del bushing. Los collares son conectados y energizados juntos.



**Figura 4.64** – Ensayo de collar caliente múltiple en modo de ensayo GSTground

### 3) Ensayo de collar frío

El conductor central del bushing debe ser energizado a 10kV, a través del terminal de alto voltaje del instrumento de ensayo.

Ambos modos de ensayo son aplicables, el GSTground y el UST. En la aplicación del primero, el collar prácticamente es aterrizado y las pérdidas medidas se basan en las corrientes de fuga que circulan a través y sobre el todo el aislamiento involucrado entre el conductor central del bushing y tierra. Mientras que, en la aplicación del ensayo en el segundo modo, las pérdidas analizadas comprenden sólo el aislamiento localizado entre el conductor central y el collar.

Esta técnica de ensayo es poco aplicable, ya que el solo hecho de energizar el conductor central para el ensayo, involucra energizar también otras partes a él conectado. Situación que no se da con el ensayo de collar caliente.

#### **4.10.2.1.2 Criterios para la evaluación de los resultados de ensayos con collar simple**

##### **En bushing's tipo no capacitivos, llenos de compound**

- El ensayo es usualmente ejecutado con el collar localizado alrededor de la primera falda superior del bushing. Las pérdidas registradas deben ser menor que 0.10 Watts. Si la corriente o pérdidas son considerablemente más altas que lo normal, se debe efectuar un segundo ensayo ubicando el collar una falda más abajo. Este procedimiento puede continuar cuantas veces fuera necesario para determinar que tanto la falla ha progresado.
- Cuando las pérdidas se encuentren entre 0.11 y 0.30 watts, el bushing debe ser sometido a investigación. Por lo tanto, se recomienda remover el terminal y realizar una inspección interna para determinar si existe humedad contenida en la parte superior de la cámara de compound.

- Cuando las pérdidas bajo la primera falda superior se encuentren entre 0.31 y 0.50 watts, y las pérdidas con el collar localizado bajo la segunda falda caen a un valor normal, de igual manera se recomienda una inspección interna. Si se comprueba el ingreso de humedad, en el compound de la cámara, se recomienda su reemplazo.
- Si las pérdidas con el collar bajo la primera falda superior están sobre 0.30 watts y se obtienen también altas pérdidas en ensayos efectuados bajos las siguientes faldas sucesivamente, esto es evidencia de que la falla es distribuida a través del compound contenido en la cámara. En tales casos el bushing debe ser sometido a reacondicionamiento o descartado.
- Cuando las pérdidas se encuentran sobre el valor de 0.50 Watts con el collar bajo la primera falda superior, y normal o cercanamente normal con el collar desde bajo la segunda falda hasta la primera falda inferior, es posible que exista algún defecto en la porcelana. Por tanto, se recomienda reemplazar la unidad.

### **En bushing's tipo no capacitivos, sólidos de porcelana**

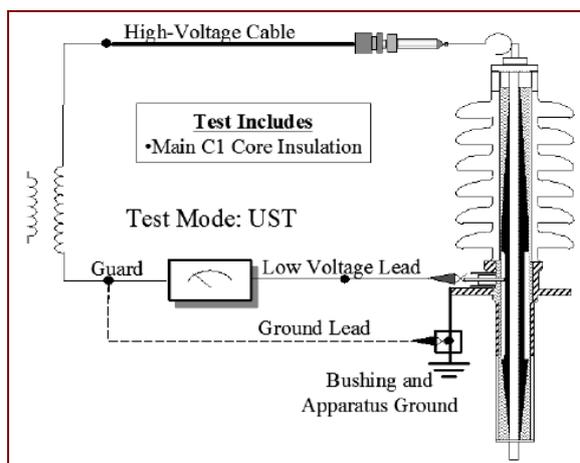
En este tipo de bushing's se recomienda realizar una comparación de resultados con unidades similares. Por tanto, un bushing que muestre pérdidas apreciablemente más altas que las otras unidades, este debe ser sometido a investigaciones

#### **4.10.2.1.3 Ensayos a través del tap de derivación**

Este ensayo es aplicable solo en bushing's tipo capacitivos, ya que en estos únicamente se dispone de tap de derivación para ensayo de factor de potencia y/o factor de disipación, mediante el cual se puede analizar el aislamiento principal "C1" y el aislamiento del Tap "C2". Ambos ensayos se realizan sin necesidad de que el bushing sea separado del equipo en el cual se encuentra instalado.

##### **1) Ensayo del aislamiento principal "C1" (Conductor central – Tap de derivación)**

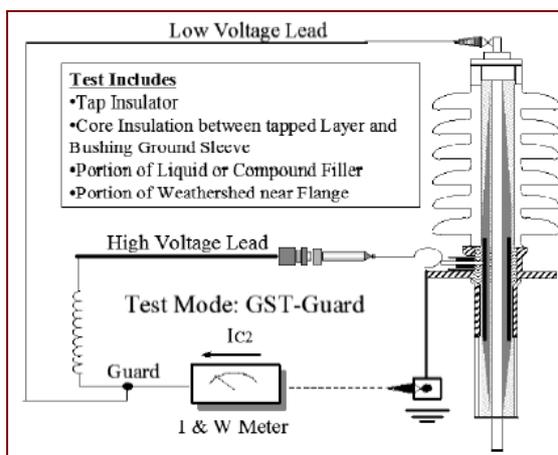
Este ensayo es realizado como se muestra en la figura, con la aplicación de un voltaje de 10kV al conductor central, a través del terminal de alto voltaje del instrumento de ensayo. El modo de ensayo utilizado es el UST.



*Figura 4.65 – Ensayo UST de bushing capacitivo*

## 2) Ensayo de aislamiento del tap (tap a flange, C2)

Este ensayo es realizado como se muestra en la figura, con la aplicación de un voltaje de entre 500 a 2000 voltios al Tap de ensayo (dependiendo del voltaje nominal especificado por el fabricante), a través del terminal de alto voltaje del instrumento de ensayo. El modo de ensayo utilizado es el GSTguard.



*Figura 4.66 – Ensayo GST-guard de bushing capacitivo*

#### **4.10.2.1.4 Criterios para la evaluación de los resultados de ensayos a través del tap del bushing**

El factor de potencia y la capacitancia registrados en los ensayos de C1 y C2, son comparados con los datos de placa, con resultados de ensayos anteriores (incluyendo los de fábrica) y/o con resultados de ensayos en unidades similares. No obstante, se puede considerar que el factor de potencia para un bushing capacitivo, generalmente se debe encontrar en el orden del 0.5% después de ser corregido a una temperatura de 20°C. De igual forma, La capacitancia medida en el ensayo, debe estar entre 5% y 10% de diferencia con respecto al valor de placa.

*Un incremento del factor de potencia indica contaminación o deterioración del aislamiento. Mientras que, un incremento en la capacitancia indica la posibilidad de cortocircuito entre láminas capacitivas. Un decrecimiento de la capacitancia determinado en el ensayo, indica la posibilidad de desprendimiento o mala conexión del tap de ensayo.*

#### **4.10.2.1.5 Criterios para la corrección de las lecturas en base a la temperatura**

La determinación de la temperatura del bushing en el momento de ejecutar el ensayo debe considerar el hecho de si el equipo ha estado o no operando inmediatamente antes de su ejecución.

Si se va a efectuar el ensayo de factor de potencia y/o factor de disipación, en bushing's instalados en equipos que han estado desenergizados por largo tiempo, o en bushing's almacenados libremente, se puede adoptar la temperatura ambiente como temperatura del bushing.

Al tratarse de equipos que han estado en servicio inmediatamente antes del ensayo, se debe considerar que al existir una parte del bushing del equipo en servicio al aire libre y otra parte (parte inferior) dentro del tanque inmerso en aceite aislante, sus temperaturas serán diferentes. Por tanto, la temperatura del bushing a ser tomada corresponderá a la media entre la temperatura del aceite de la parte superior de la cuba y la del ambiente en el instante del ensayo.

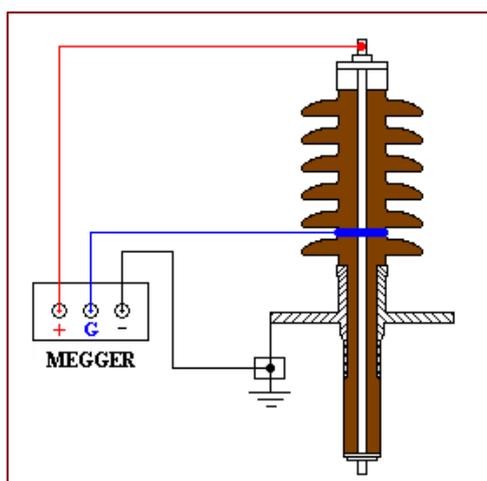
Cabe recordar que el factor de potencia varía con la temperatura. Cuanto más elevada es la temperatura del bushing, mayor es su factor de potencia. Los valores del factor de potencia solo serán comparables, si la temperatura del bushing fuera la misma en cada ensayo. Como es muy difícil satisfacer esta

condición, se toma una temperatura base de 20°C, convirtiéndose a ella los valores obtenidos en temperaturas diferentes.

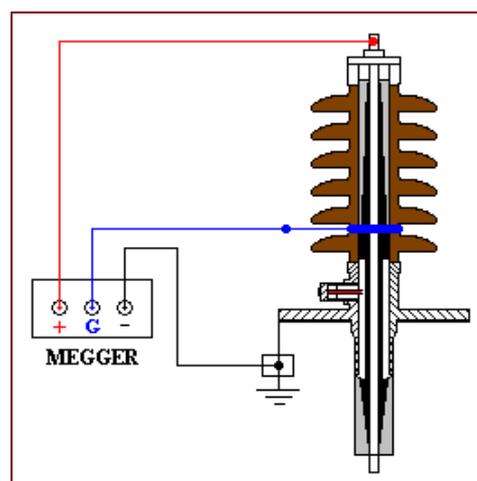
Para convertir el valor del factor de potencia de un bushing obtenido a determinada temperatura, para la temperatura básica (20°C), se multiplica el factor de conversión encontrado en *la tabla anexa 4.D3* por el factor de potencia obtenido en la medición.

#### 4.10.2.2 Ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento en bushing's

El ensayo de resistencia de aislamiento se realiza tanto en bushing's tipo capacitivos como no capacitivos, aplicando una tensión de 5000 Vdc según los esquemas básicos mostrados a continuación:



*Figura 4.67a*



*Figura 4.67b*

*Figura 4.67a y 4.67b – Métodos de ensayos de Resistencia de Aislamiento en bushing's tipo No Capacitivo (a) y Capacitivo (b)*

Como se puede apreciar en ambas figuras, el método empleado utiliza un collar semiconductor para conexión al terminal de Guarda del instrumento, esto con el fin de eliminar los efectos de fuga superficial en el ensayo.

*Se considera el valor de  $5000M\Omega$  como valor mínimo de aceptabilidad de los resultados de este ensayo.*

#### **4.10.3 PRINCIPALES RECOMENDACIONES A SEGUIR PARA LA APLICACIÓN DE LOS ENSAYOS DIELECTRICOS EN CAMPO**

Aquí hay que resaltar dos situaciones importantes que se pueden dar en el momento de analizar el aislamiento correspondiente a los bushing's instalados en los equipos eléctricos de alta tensión; tales situaciones hacen referencia a la posibilidad de efectuar los respectivos ensayos con o sin necesidad de desacoplar los bushing's del equipo en el cual se encuentran instalados.

*Los bushing's del tipo capacitivos, al disponer de una toma de derivación externa para conexión de los instrumentos de ensayo, hacen posible el análisis en campo del estado de su aislamiento interno sin necesidad de ser desacoplados del equipo de alta tensión en el cual se encuentran instalados. De esta forma, son aplicados los ensayos tanto para la medida de la resistencia de aislamiento como para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación con medida de pérdidas y capacitancia del mismo.*

Es común que este tipo de bushing's se encuentren instalados en los transformadores e interruptores de potencia inmersos en gran volumen de aceite mineral aislante. Por tanto, a continuación se hacen referencia las principales recomendaciones a seguir para la aplicación de estos ensayos en tales bushing's:

- 1) En el caso de que los bushing's se encuentren instalados en un transformador de potencia, se recomienda aplicar previamente los ítems del 1 al 5 expuestos en el literal 4.4.4. Mientras que, en el caso de que los bushing's se encuentren instalados en un interruptor de potencia, se recomienda aplicar previamente los ítems del 1 al 3 expuestos en el literal 4.8.4.
- 2) Definir previamente el método de ensayo a ser aplicado, analizarlo gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones:
  - Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento (con medida de pérdidas y capacitancia), hacer referencia a los métodos expuestos en el literal 4.10.2.1.2.
  - Para el ensayo de medida de resistencia de aislamiento, hacer referencia al método expuesto en el literal 4.10.2.2
- 3) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar lo siguiente:

- Para el ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento:
- a) Aterrizar correctamente el instrumento de ensayo, de ser posible a los mismos puntos de conexión de la masa del equipo a la red principal de tierra de la instalación.
  - b) Se debe retirar el tapón de aterrizamiento de la toma o derivación capacitiva, para en su lugar colocar un adaptador especial que permita realizar la conexión con el respectivo instrumento de ensayo.
  - c) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.4.2.1.1 para el caso de un bushing instalado en un transformador de potencia y 4.8.2.1.1 para el caso de un bushing instalado en un interruptor de potencia. Adicionalmente, cabe recalcar la importancia del voltaje de ensayo aplicado a la toma de derivación, siendo que este debe cumplir con lo expuesto en el ítem 2 del literal 4.10.2.1.3
  - d) Operar adecuadamente el o los interruptores de seguridad del instrumento de ensayo, según lo recomiende el fabricante.
  - e) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con el equipo en el cual se encuentren instalados.

- Para el ensayo de medida de la resistencia de aislamiento:
  - a) Definir el método de análisis a aplicarse, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4 de este capítulo.
  - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.4.2.2.1 para el caso de un bushing instalado en un transformador de potencia y 4.8.2.2.1 para el caso de un bushing instalado en un interruptor de potencia.
  - c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con el equipo en el cual se encuentren instalados.
  
- 4) Después de finalizar el primer ensayo, se debe descargar la capacitancia del espécimen por un periodo aproximado de cuatro veces el tiempo que se aplicó el voltaje en el ensayo previo. Esto, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual que pueda afectar la próxima medición.

**NOTA:** *NO desconectar los cables de interconexión por lo menos antes de 30 a 60 segundos después del ensayo, para permitir la descarga normal de la capacitancia.*

La característica constructiva de *los bushing's tipo No capacitivos*, no ayuda en el desenvolvimiento de los ensayos para la verificación interna de sus condiciones operativas, mientras estos se encuentren instalados en un equipo de alta tensión. Siendo así, los únicos ensayos que han mostrado eficiencia relativa en el control del aislamiento de estos bushing's en campo, los aplicados para la medida de la resistencia de aislamiento y determinación de las pérdidas en el mismo.

Es común que este tipo de bushing's se encuentren instalados en los transformadores de potencia inmersos en aceite mineral aislante (en los terminales de los arrollamientos de menor tensión), en los interruptores de potencia y equipos encapsulados a gas SF<sub>6</sub>. Por tanto, a continuación se hacen referencia las principales recomendaciones a seguir para la aplicación de estos ensayos en tales bushing's:

- 1) En el caso de que los bushing's se encuentren instalados en un transformador de potencia, se recomienda aplicar previamente los ítems del 1 al 5 expuestos en el literal 4.4.4. Mientras que, en el caso de que los bushing's se encuentren instalados en un interruptor de potencia, se recomienda aplicar previamente los ítems del 1 al 3 expuestos en el literal 4.8.4.
- 2) Definir previamente el método de ensayo a ser aplicado, analizarlo gráficamente y luego realizar las respectivas conexiones

- Para el ensayo de medida de pérdidas en el aislamiento, hacer referencia a los métodos expuestos en el literal 4.10.2.1.1 (ensayos de collar)
- Para el ensayo de medida de resistencia de aislamiento, hacer referencia al método expuesto en el literal 4.10.2.2

*NOTA: Cabe resaltar que, al no existir toma de derivación en estos bushing's, ambos ensayos exigen con mayor razón el uso de collares, los cuales deben ser correctamente empleados*

3) Efectuar los ensayos operando el instrumento según lo recomendado por su fabricante. No obstante, se debe considerar lo siguiente:

- Para el ensayo de medida de pérdidas en el aislamiento:
  - a) Hacer referencia a los mismos literales a), b) y c) expuestos en la aplicación del ensayo de factor de potencia y/o factor de disipación en bushing's capacitivos.
  - b) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con el equipo en el cual se encuentren instalados.
- Para el ensayo de medida de la resistencia de aislamiento:

- a) Definir el método de análisis a aplicarse, según lo expuesto en el literal 4.3.2.1.4 de este capítulo.
  - b) Seleccionar el voltaje de ensayo a ser aplicado por el instrumento, según la referencia indicada en el literal 4.4.2.2.1 para el caso de un bushing instalado en un transformador de potencia y 4.8.2.2.1 para el caso de un bushing instalado en un interruptor de potencia.
  - c) Registrar las lecturas obtenidas por el instrumento de ensayo, en un formulario establecido acorde con el equipo en el cual se encuentren instalados.
- 4) Al igual que en el caso anterior, después de finalizar el primer ensayo, se recomienda descargar la capacitancia del espécimen por un periodo aproximado de cuatro veces el tiempo que se aplicó el voltaje en el ensayo previo. Esto, con el objetivo de eliminar cualquier carga residual que pueda afectar la próxima medición.

## **CAPÍTULO V**

### **5. CASOS DE ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO EN CAMPO DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN INSTALADOS EN VARIAS DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN (SNT)**

#### **5.1 CONSIDERACIÓN BÁSICA**

El análisis del estado del aislamiento de un equipo de alta tensión en campo, es posible mediante la ejecución de los ensayos dieléctricos, y su aplicación se justifica en los tres siguientes casos:

- 1) En la recepción del equipo en campo, previo a su energización o puesta en servicio, con el objetivo de verificar anomalías posibles provenientes de fábrica, u originadas durante su transporte y/o ensamblaje. Adicionalmente, aquí se pueden establecer valores referenciales para futuros ensayos.
- 2) En las inspecciones periódicas programadas (dependiendo de las recomendaciones del fabricante), con el objetivo de llevar un historial de la evolución de su estado con los años de operación.

- 3) En las inspecciones posteriores a una falla del equipo, con el objetivo de determinar la magnitud del daño, su localización y las posibles causas. Esto ayuda a establecer si dicho equipo puede ser reparado en sitio o necesariamente debe ser transportado hacia su fábrica.

*Indiferentemente del caso que se presente, el ingeniero responsable de la ejecución de los ensayos, deberá estar en la capacidad de analizar adecuadamente el espécimen bajo ensayo, interpretar correctamente los resultados obtenidos y emitir un diagnóstico final 100% acertado.*

Es así que en este capítulo, se pondrá en práctica toda la información básica presentada en los capítulos anteriores, para analizar y diagnosticar varios casos reales de evaluación del estado del sistema de aislamiento de los principales equipos de alta tensión que se encuentran instalados dentro de las subestaciones eléctricas que conforman el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), actualmente mantenido y operado por la Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica TRANSELECTRIC S.A.



**C.I.B.**

## **5.2 CASO I – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Potencia**

### **5.2.1 Descripción**

Este primer caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un transformador de potencia recientemente instalado, como parte de su recepción y previa puesta en servicio en la posición de “reserva” del único banco de transformadores (signado como ATK) existente en la Subestación Dos Cerritos, localizada en la provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, van dirigidos tanto al análisis total del sistema de aislamiento en conjunto del transformador, como al análisis localizado de sus principales componentes aislantes, tales como el aceite y los bushing's.

### **5.2.2 Características del transformador**

El transformador de potencia en referencia, corresponde a uno del tipo monofásico con disposición de tres arrollamientos (AT, BT y terciario). Siendo, sus demás características tanto técnicas como físicas, las que se detallan en las *figuras anexas 5.1.A, B, C, D, E* del presente capítulo.

### **5.2.3 Análisis y diagnóstico del estado del aislamiento total del transformador**

#### **5.2.3.1 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total del transformador en referencia a través de este ensayo, se utilizó el instrumento megohmmetro modelo S1-5001 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.2*.

##### **5.2.3.1.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.B3* del capítulo anterior y considerando la configuración física del transformador en referencia, se plantea en el *apéndice 5.A1* del presente capítulo, el análisis completo de seis posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.A1* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

*Para el caso en referencia, se aplicaron los seis ensayos planteados en el apéndice 5.A1.*

### 5.2.3.1.2 Método de medición aplicado

De los métodos recomendados en el ítem 4.3.2.1.4 para la medición de la resistencia de aislamiento en general, se escogió el método de “**tiempo-resistencia**”, que de acuerdo con las características del instrumento de ensayo, este se lo realizó aplicando una tensión constante de 5000 voltios DC a cada espécimen durante un periodo de 10 minutos.

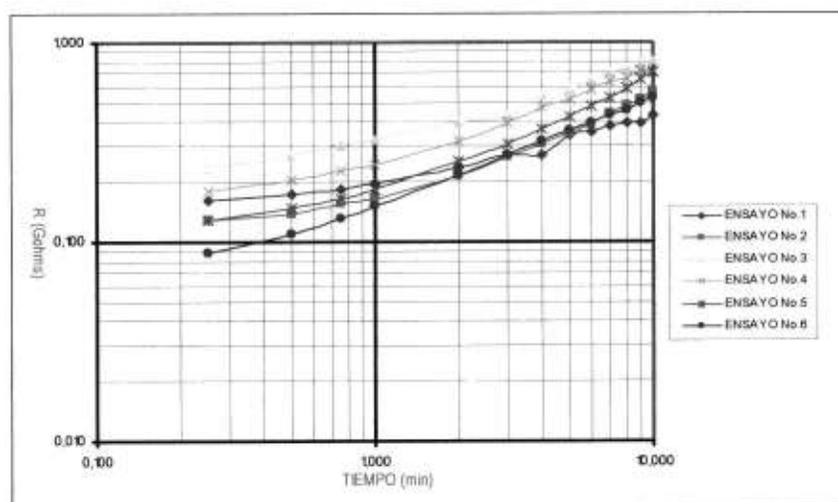
### 5.2.3.1.3 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico

A partir de las lecturas de resistencia de aislamiento, medidas y registradas en el *formulario anexo 5.A1*, para cada uno de los ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis:

#### 1) *Análisis de la interpretación gráfica de las curvas de absorción dieléctrica:*

Para efectuar una evaluación en conjunto de las curvas de absorción dieléctrica, es necesario referir todas las lecturas de resistencia de aislamiento obtenidas en campo, a una sola temperatura estándar. De esta forma, aplicando el método de corrección expuesto en el CRITERIO II del literal 4.4.2.2.3, todas las lecturas registradas en campo fueron corregidas a la temperatura de 75°C, siendo estos nuevos valores asentados en el mismo *formulario anexo 5.A1*.

Por lo tanto, representando cada ensayo realizado con su respectiva curva de absorción, obtenemos la siguiente figura:



*Figura 5.1 – Curvas de absorción de los ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento CASO I*

De este gráfico se puede concluir, que los seis ensayos realizados revelan una ascendencia de sus valores de resistencia de aislamiento con el aumento del tiempo de aplicación de la tensión constante de ensayo.

Recordando la figura 4.21 sobre el comportamiento de la corriente total de ensayo, sabemos que, un aislamiento en buenas condiciones establece una componente de corriente de fuga constante y una componente de corriente de absorción decreciente con el tiempo. De este modo, la resultante de la suma de ambas componentes, que no es más que la corriente total del ensayo, revela un comportamiento parabólico descendente con el tiempo.

Por tanto, al conocer que la resistencia medida del aislamiento es determinada por el voltaje aplicado y la corriente resultante del ensayo, nos valemos de la ley de ohm  $R=V/I$  para concluir que:

*Si para un buen aislamiento la corriente total del ensayo se comporta de manera descendente con el tiempo de aplicación de tensión constante, la resistencia por otro lado se comportaría de manera inversa. Por tanto, las curvas de absorción obtenidas de los seis ensayos aplicados, al revelar un crecimiento continuo con respecto al tiempo, interpretan un aislamiento en BUENAS condiciones.*

2) ***Análisis de los criterios expuestos en el literal 4.4.2.2.3:***

**CRITERIO I**

De acuerdo con los criterios de referencia de la Tabla 4.6, al ser este transformador del tipo inmerso en aceite mineral aislante y con temperatura de operación cercana a los 60°C, el valor mínimo referencial de resistencia de aislamiento sería de ***“1MΩ por kV de clase de aislamiento del arrollamiento de mayor tensión involucrado en el ensayo”***. Por lo tanto, relacionando este criterio con los datos técnicos del transformador bajo ensayo, se obtiene la siguiente tabla de referencia:

<i>Ensayo</i>	<i>Arrollamiento de mayor tensión</i>	<i>Clase de aislamiento (en kV)</i>	<i>Resistencia de Aislamiento mínima (en MΩ)</i>
#1	AN	950	950
#2	AN	950	950
#3	AN	950	950
#4	an	325	325
#5	an	325	325
#6	3a3b	95	95

**Tabla 5.1** – Valores mínimos referenciales de Resistencia de Aislamiento (Criterio I)

Al comparar cada una de las lecturas no corregidas de resistencia de aislamiento registradas en el *formulario anexo 5.A1*, con las referencias dadas en esta tabla, se puede concluir que:

- 1) **De los ensayos #1, #2 y #3:** Todas las lecturas de resistencia de aislamiento registradas se encuentran por encima del valor mínimo referencial de  $950\text{M}\Omega$  ( $0,950\text{G}\Omega$ ).
- 2) **De los ensayos #4 y #5:** Todas las lecturas de resistencia de aislamiento registradas se encuentran por encima del valor mínimo referencial de  $325\text{M}\Omega$  ( $0,325\text{G}\Omega$ )
- 3) **Del ensayo #6:** Todas las lecturas de resistencia de aislamiento registradas se encuentran por encima del valor mínimo referencial de  $95\text{M}\Omega$  ( $0,095\text{G}\Omega$ )

*Por tanto, de acuerdo a este criterio se puede concluir, que “el aislamiento involucrado en cada uno de los seis ensayos aplicados, se encuentra en BUENAS condiciones”.*

## **CRITERIO II**

De acuerdo con la tabla 4.7 del capítulo anterior, siendo este transformador uno de tipo monofásico e inmerso en aceite aislante, el valor mínimo referencial de resistencia de aislamiento corregido a 75°C ( $R_{75^{\circ}\text{C}}$ ), correspondería al valor calculado con la siguiente expresión:

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = \frac{3 \cdot 2.65 \cdot V_i}{\sqrt{S_n / f}}$$

Donde los parámetros requeridos son los siguientes:

$V_i$ : Clase de aislamiento del arrollamiento de mayor tensión, considerado en el momento de la medición (en kV)

$S_n$ : Potencia nominal del transformador (en kVA).

$f$ : Frecuencia nominal del transformador (en Hz).

Por lo tanto, relacionando este criterio con los datos técnicos del transformador bajo ensayo, se obtiene la siguiente tabla de referencia:

<i>Ensayo</i>	<i>Arrollamiento de mayor tensión</i>	$V_i$ (en kV)	$S_n$ (en kVA)	<i>Resistencia de Aislamiento mínima</i> (en M $\Omega$ )
#1	AN	950	55000	249.45
#2	AN	950	55000	249.45
#3	AN	950	55000	249.45
#4	an	325	55000	85.34
#5	an	325	55000	85.34
#6	3a3b	95	18300	43.25

**Tabla 5.2** – Valores mínimos referenciales de Resistencia de Aislamiento (Criterio II)

Al comparar cada una de las lecturas corregidas (a 75°C) de resistencia de aislamiento registradas en el *formulario anexo 5.A1*, con las referencias dadas en esta tabla, se puede concluir que:

- 1) *De los ensayos #1, #2 y #3: Todas las lecturas de resistencia de aislamiento registradas se encuentran por encima del valor mínimo referencial de 249.45M $\Omega$  (0,249G $\Omega$ ).*
- 2) *De los ensayos #4 y #5: Todas las lecturas de resistencia de aislamiento registradas se encuentran por encima del valor mínimo referencial de 85.34M $\Omega$  (0,085G $\Omega$ ).*
- 3) *Del ensayo #6: Todas las lecturas de resistencia de aislamiento registradas se encuentran por encima del valor mínimo referencial de 43.25M $\Omega$  (0,043G $\Omega$ ).*

*Por tanto, de acuerdo a este criterio se puede concluir que “el aislamiento involucrado en cada uno de los seis ensayos se encuentra en BUENAS condiciones”.*

### **CRITERIO III**

De la relación de las lecturas de resistencia de aislamiento registradas a los 60 y 30 segundos, se obtienen los siguientes Índices de Absorción (IA) para cada ensayo aplicado, cuya interpretación del estado del aislamiento según la *tabla anexa 4.B1*, se da de la siguiente manera:

<i>Ensayo</i>	<i>Índice de Absorción (IA)</i>	<i>Condiciones del aislamiento</i>
#1	1.131	CUESTIONABLE
#2	1.200	CUESTIONABLE
#3	1.187	CUESTIONABLE
#4	1.190	CUESTIONABLE
#5	1.237	SATISFACTORIO
#6	1.382	SATISFACTORIO

**Tabla 5.3 – Condiciones del aislamiento según el Índice de Absorción**

De la relación de las lecturas de resistencia de aislamiento registradas a los 10 y 1 minutos, se obtienen los siguientes Índices de Polarización (IP) para cada ensayo aplicado, cuya interpretación del estado del aislamiento según la *tabla anexa 4.B1*, se da de la siguiente manera:

<i>Ensayo</i>	<i>Índice de Polarización (IP)</i>	<i>Condiciones del aislamiento</i>
#1	1.131	SATISFACTORIO
#2	1.200	BUENO
#3	1.187	SATISFACTORIO
#4	1.190	SATISFACTORIO
#5	1.237	BUENO
#6	1.382	BUENO

**Tabla 5.4** – *Condiciones del aislamiento según el Índice de Polarización*

Comparando ambas tablas (5.3 y 5.4), se puede observar que con los Índices de Polarización se revela una mejor condición del aislamiento que con los Índices de Absorción. Por lo tanto, *Cuál de los dos Índices se debe considerar??..*

Analizando nuevamente el comportamiento de las componentes de la corriente total de ensayo mostradas en la figura 4.21 del capítulo anterior, se puede observar que en el primer minuto las lecturas de resistencia de aislamiento se ven influenciadas fuertemente por la componente de la corriente de carga capacitiva, la misma que va decayendo rápidamente con el tiempo de aplicación de la tensión constante de ensayo y que con seguridad a los 10 minutos esta casi no afecta a la corriente total.

Por lo tanto, al ser el aislamiento del transformador de grandes características capacitivas, la componente de la corriente de carga influiría de manera significativa en los primeros minutos. De esta forma, se

considera que los Índices de Polarización obtenidos, revelan con mayor certeza el estado del aislamiento bajo ensayo, ya que las lecturas de resistencia de aislamiento aplicadas para su determinación, dependen mayormente de las componentes de absorción y de fuga de la corriente total de ensayo.

*A partir de este análisis, se puede concluir que “el aislamiento involucrado en cada uno de los seis ensayos se encuentra en BUENAS condiciones”.*

Unificando los resultados obtenidos en cada uno de estos análisis, se llega a una sola conclusión, de que el sistema de aislamiento total del transformador de potencia en referencia, se encuentra en BUENAS condiciones.

*Esto por lo tanto, nos permite diagnosticar que: “Todas las secciones de aislamiento involucradas en este tipo de ensayo, se encuentran libres de contaminación, especialmente por presencia de alto contenido de humedad”.*

#### **5.2.3.2 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total del transformador en referencia, a través de este ensayo, se utilizó el instrumento analizador de

aislamiento modelo M4100 de la Doble Engineering Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.3*.

#### **5.2.3.2.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.A3* del capítulo anterior y considerando la configuración física del transformador en referencia, se plantea en el *apéndice 5.A2* del presente capítulo, el análisis completo de nueve posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.A2* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

*En el análisis de este caso, se aplicaron los nueve ensayos planteados en el apéndice 5.A2. Para cada uno, el instrumento permitió hallar: las pérdidas por calentamiento (en Watts o miliWatts), la capacitancia (en picofaradios) y el factor de potencia (en %) de la respectiva sección de aislamiento en análisis.*

#### **5.2.3.2.2 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

Para aplicar los diferentes criterios de evaluación de los resultados, es necesario que los registros de factor de potencia obtenidos en campo, sean corregidos a una temperatura referencial de 20°C.

Por lo tanto, considerando el tipo de transformador en referencia (inmerso en aceite mineral y con disposición de conservador en su diseño), nos ubicamos en la *tabla anexa 4.D1* (de recomendación de la Doble Engineering Company) y determinamos los respectivos factores de corrección para cada uno de los registros, según la temperatura de ensayo. Es así, que en el *formulario anexo 5.A2*, se especifica adicionalmente el correspondiente valor de factor de potencia corregido a 20°C.

De esta forma, a partir de los resultados obtenidos y corregidos, para cada uno de los nueve ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis:

***1) Análisis a partir de los criterios recomendados en el literal 4.4.2.1.4 del capítulo IV:***

***Según criterio de la DOBLE Engineering Company :***

*Los registros de valores de factor de potencia obtenidos en campo y corregidos a una temperatura referencial de 20°C (mostrados en el formulario anexo 5.A2), cumplen con el criterio recomendado por la DOBLE, de ser menores a 0.5%.*



3.1

**Según criterio de la MEGGER (AVO) :**

Los registros de valores de factor de disipación obtenidos en campo y corregidos a una temperatura referencial de 20°C (mostrados en el formulario anexo 5.A2), cumplen con el criterio recomendado por la MEGGER, de ser menores o encontrarse dentro del rango de entre 0.25% a 1%.

**2) Análisis a partir de la comparación de los registros de ensayos en campo con los realizados en fábrica:**

Para poder realizar este análisis comparativo, es necesario que los registros obtenidos en campo de este ensayo, sean corregidos a una sola temperatura referencial similar a la de los ensayos en fábrica (20°C). Por lo tanto, la presentación de los registros obtenidos en ambos ensayos, se da en la siguiente tabla:

<b>ENSAYO No.</b>	<b>Factor de Potencia a 20°C (%)</b>	
	<b>Ensayo en Fábrica</b>	<b>Ensayo en Campo</b>
1	0.249	0.1289
2	0.188	0.1543
4	0.211	0.1666
5	0.352	0.3270
7	0.227	0.1604
8	0.209	0.1604

**Tabla 5.5** – Cuadro comparativo entre registros de ensayos de Factor de Potencia obtenidos en fábrica y en campo

*De este cuadro se puede concluir que, no existe una diferencia significativa entre los registros de campo y los de fábrica, es más, los registros obtenidos en campo resultaron menores, lo cual es un indicativo de que el aislamiento íntegro del transformador se mantiene en BUENAS condiciones y dicha mejora registrada pudo haberse dado por la aplicación de los métodos de preservación del aislamiento posterior al montaje electromecánico del equipo.*

Para mayor detalle, el protocolo de este ensayo en fábrica se muestra en la *tabla anexa 5.A1.*

**3) *Análisis de los registros de pérdidas por calentamiento en el aislamiento bajo ensayo:***

Según el formulario anexo 5.A2, los registros de pérdidas por calentamiento en el aislamiento se encuentran en el orden de 0 a 1 watt. No existe criterio alguno basado en valores referenciales, no obstante hay que considerar que los valores registrados para cada ensayo guardan relación y ninguno se puede considerar como excesivamente diferente a los demás. Por tanto, se concluye que el aislamiento íntegro del transformador se encuentra en BUENAS condiciones.

Con el análisis de los diferentes criterios aplicados en la evaluación de los resultados del ensayo para la determinación del Factor de Potencia del aislamiento del transformador en referencia, se llega a una sola conclusión de que el aislamiento íntegro de dicho equipo se encuentra en BUENAS condiciones.

*Esto por lo tanto, nos permite diagnosticar que: “Todas las secciones de aislamiento involucradas en este ensayo, se encuentran libres de contaminación (dada por presencia de humedad, carbonización y otros) y/o deterioración alguna acrecentada por la humedad presente”.*

#### **5.2.4 Análisis y Diagnóstico del estado del aislamiento de los bushing's por separado**

Del transformador en referencia, se analizó únicamente el estado del aislamiento de los bushing's tipo capacitivo en él instalados, uno correspondiente al lado de alta tensión (230kV), signado como bushing “A”; y otro correspondiente al lado de baja tensión (69kV), signado como bushing “a”.

Las características físicas de estos bushing's, se detallan en las *figuras anexas 5.4.A, B.*

Para el análisis del estado del aislamiento de tales bushing's, se utilizó el mismo instrumento modelo M4100 de la Doble Engineering Company, aplicado para la determinación del factor de potencia del aislamiento total del transformador.

#### **5.2.4.1 Ensayos aplicados**

Se aplicaron los dos únicos ensayos recomendados en el literal 4.10.2.1.2 del capítulo anterior. Previamente a su implementación en campo, cada uno de estos ensayos fue analizado conforme lo descrito en el *apéndice 5.A3*. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.A3* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

Para cada ensayo aplicado el instrumento permitió hallar: las pérdidas por calentamiento (en Watts o miliWatts), la capacitancia (en picofaradios) y el factor de potencia (en %) de la respectiva sección de aislamiento en análisis.

#### **5.2.4.2 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

Para aplicar los diferentes criterios de evaluación de los resultados, es necesario que los registros de factor de potencia obtenidos en campo, sean corregidos a una temperatura referencial de 20°C.

Por lo tanto, considerando el tipo de bushing en referencia (GOB), nos ubicamos en la *tabla anexa 4.D3* (de recomendación de la Doble Engineering Company) y determinamos los respectivos factores de corrección para cada uno de los registros, según la temperatura de ensayo. Es así, que en el *formulario anexo 5.A3*, se especifica adicionalmente el correspondiente valor de factor de potencia corregido a 20°C.

De esta forma, a partir de los resultados obtenidos y corregidos, para cada uno de los dos ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis:

***1) Análisis a partir de los criterios recomendados en el literal 4.10.2.1.4 del capítulo IV:***

**Bushing "A" (230 kV):**

- El registro de **0.51%** (obtenido en campo y corregido a 20°C) de factor de potencia del aislamiento C1 del bushing, se encuentra en el orden de aceptabilidad del 0.5% recomendado por la *Doble Engineering Company*.
- El registro de **0.54%** (obtenido en campo y corregido a 20°C) de factor de potencia del aislamiento C2 del bushing, se encuentra en el orden de aceptabilidad del 0.5% recomendado por la *Doble Engineering Company*.

**Bushing "a" (69 kV):**

- El registro de **0.55%** (obtenido en campo y corregido a 20°C) de factor de potencia del aislamiento C1 del bushing, se encuentra en el orden de aceptabilidad del 0.5% recomendado por la *Doble Engineering Company*.
- El registro de **0.56%** (obtenido en campo y corregido a 20°C) de factor de potencia del aislamiento C2 del bushing, se encuentra en el orden de aceptabilidad del 0.5% recomendado por la *Doble Engineering Company*.

**2) *Análisis a partir de la comparación de los registros de ensayos en campo con los realizados en fábrica:***

Para poder realizar este análisis comparativo, es necesario que los registros obtenidos en campo de este ensayo, sean corregidos a una sola temperatura referencial similar a la de los ensayos en fábrica, que para este caso era de 20°C.

De esta forma, basándonos en la información del protocolo de ensayos en fábrica de estos bushing's, presentado en la *tabla anexa 5.A2* del presente capítulo, se establece el siguiente cuadro comparativo de análisis:

ENSAYO	Especimen bajo ensayo	Factor de Potencia a 20°C (%)	
		Ensayo en Fábrica	Ensayo en Campo
Bushing "A"	C1	0.42	0.51
	C2	0.46	0.54
Bushing "a"	C1	0.49	0.55
	C2	0.46	0.56

**Tabla 5.6** – Cuadro comparativo entre registros de ensayos de Factor de Potencia obtenidos en fábrica y en campo

De este cuadro se puede concluir que, se presenta un aumento de no más del 19% de los registros de campo con respecto a los de fábrica. No existe una regla establecida sobre algún porcentaje máximo o mínimo de diferencia para juzgar las condiciones del aislamiento. No obstante, se debería considerar que ninguno de los registros de campo se aleja de la realidad y la diferencia no tan significativa podría deberse a la contaminación exterior de la superficie del bushing y/o la estimación exacta de la temperatura del aislamiento en el ensayo.

### 5.2.5 Análisis y diagnóstico del estado del aceite aislante del transformador

Previamente al análisis del aceite aislante en campo, es necesario conocer sus características de fabricación con el fin de establecer parámetros de cuestionamiento de los resultados de ensayos realizados desde su recepción en campo. Para el caso del transformador en referencia, sólo el tipo de aceite y su fabricante son indicados en la placa de identificación, no obstante, en la *tabla anexa 5.A3*, se presenta el respectivo protocolo de ensayos en fábrica.

### **5.2.5.1 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la determinación de la Rigidez Dieléctrica del aceite**

Para el análisis del estado del aceite mediante este ensayo, se empleó un instrumento semiautomático para medida de la rigidez dieléctrica de líquidos aislantes, modelo OTS60SX de la Megger Company (AVO), cuyas características técnicas se detallan en la *figura anexa 5.5*.

El ensayo de Rigidez Dieléctrica es de importancia en el periodo de montaje del transformador, ya que se lo aplica para el seguimiento de las condiciones del aceite desde su recepción hasta la puesta en servicio. Por lo general, se dan tres etapas básicas de muestreo y análisis del aceite mediante este método de ensayo, las cuales se aplicaron en este caso y se detallan a continuación:

#### **Etapas 1 (En la recepción del aceite en campo)**

Según los datos de placa, se requieren de 25000 litros de aceite para la inmersión del transformador en referencia. Esta cantidad fue recibida en sitio almacenada en 120 tambores metálicos de 208 litros (55 galones) cada uno.

Al desconocer las condiciones en las que dichos reservorios fueron transportados desde fábrica, surgió la necesidad de efectuar ensayos rápidos que permitan cuestionar el estado del aceite en su recepción, descartando así cualquier presencia

de contaminación. Por lo tanto, como método rápido y de fácil cuestionamiento del estado del aceite, se aplicó el ensayo de rigidez dieléctrica según método **ASTM D.1816** (con 1mm de espaciamento entre electrodos) al 10% de la cantidad recepcionada, es decir a 12 muestras de aceite, cada una de diferentes tambores escogidos al azar, donde los resultados obtenidos corresponden a los registrados en el *formulario anexo 5.A4 (ensayos del #1 al #12 – hoja 1 de 2)*.

En resumen, los valores promedios obtenidos para los doce ensayos realizados fueron los siguientes:

<i>Ensayo</i>	<i>#1</i>	<i>#2</i>	<i>#3</i>	<i>#4</i>	<i>#5</i>	<i>#6</i>	<i>#7</i>	<i>#8</i>	<i>#9</i>	<i>#10</i>	<i>#11</i>	<i>#12</i>
<i>Rigidez Dieléctrica (kV)</i>	23.4	28.5	20.1	25.0	31.7	20.5	20.5	20.1	28.0	31.0	21.4	32.3

*Tabla 5.7 – Registros de ensayos de Rigidez Dieléctrica del aceite.*

Comparando cada uno de estos valores con el valor límite mínimo referencial de 20kV dado por la IEEE Std.C57.106-2002 en la *tabla anexa 4.G1*, se puede concluir que: las muestras #3, #6, #7, #8 y #11 revelan un valor de rigidez dieléctrica en zona de riesgo.

*Por tanto, esto nos permite diagnosticar que existe algún problema de contaminación en el aceite de unos cuantos tambores, ya sea por elementos extraños, suciedad y/o agua en suspensión, que pudo haberse originado durante su transporte desde fábrica.*

## **Etapa 2 (Durante el proceso de reacondicionamiento del aceite)**

Previamente al llenado de un transformador en campo, los fabricantes recomiendan que el aceite destinado para su inmersión sea sometido a un proceso de tratamiento de reacondicionamiento (a explicarse en el siguiente capítulo), esto, independiente de las condiciones que revelen los ensayos de recepción.

El número de periodos de reacondicionamiento al que se somete la cantidad total de aceite, depende de la mejoría que este vaya presentando durante el proceso, y dicha mejoría se la determina mediante ensayos de rigidez dieléctrica. De igual manera se podría decir, que la cantidad de ensayos de rigidez dieléctrica realizados, depende de la rapidez con que vaya mejorando el aceite a través de este proceso.

Para el caso en referencia, fue necesario realizar únicamente dos periodos de reacondicionamiento de los 25000 litros requeridos para la inmersión del transformador, y en consecuencia se efectuaron tres ensayos de rigidez dieléctrica según método normalizado **ASTM D.1816** (con 1mm de espaciamento entre electrodos), siendo los resultados obtenidos los que se encuentran registrados en el ya mencionado *formulario anexo 5.A4 (ensayos #1, #2, #3 – hoja 2 de 2)*.

En resumen comparando los valores promedios de rigidez dieléctrica obtenidos antes (en la recepción), durante y después del proceso de reacondicionamiento del aceite, podemos observar claramente en la siguiente tabla como el aceite fue mejorando sus características eléctricas.

<i>Rigidez dieléctrica del aceite aislante (KV)</i>		
<i>Antes del periodo de reacondicionamiento</i>	<i>Después del primer periodo de reacondicionamiento</i>	<i>Después del segundo periodo de reacondicionamiento (final)</i>
26.3	42.2	53.6

**Tabla 5.8** – Cuadro comparativo de los resultados obtenidos de ensayos de rigidez dieléctrica del aceite durante su periodo de reacondicionamiento

Por lo tanto, comparando el último valor promedio (53.60kV) obtenido al finalizar el periodo de reacondicionamiento, con el valor límite mínimo referencial de 20kV dado por la IEEE Std.C57.106-2002 en la *tabla anexa 4.G1*, se puede concluir que el aceite ha mejorado sus características dieléctricas con la aplicación de dicho proceso de tratamiento, y puede ser aceptado para la inmersión del transformador.

### **Etapa 3 (Después de 48 horas de reposo en el transformador)**

Después de 48 horas de reposo, el aceite aislante dentro del transformador ha llegado a un estado de equilibrio, luego de haber experimentado un proceso normal de transferencia de humedad que se da desde los materiales aislantes celulósicos con los cuales entra en contacto. Por tanto, al no haber existido un buen secado

previo del transformador, la cantidad de agua absorbida por el aceite será significativa.

En esta etapa, la aplicación del ensayo de rigidez dieléctrica según método normalizado **ASTM D-1816** (con 1mm de espaciado entre electrodos), juega un papel importante, ya que permitiría un cuestionamiento rápido en campo sobre tal situación, mucho antes que el análisis de contenido de agua en laboratorio

Es así, que para el caso en referencia, este ensayo fue realizado tomándose la muestra de aceite desde una de sus válvulas ubicadas en la parte inferior de la cuba, donde los resultados obtenidos, son los que se encuentran registrados en el *formulario anexo 5.A4 (ensayo #4)*.

Comparando el valor promedio de rigidez dieléctrica obtenido en este ensayo, con el valor límite mínimo referencial de 32kV dado por la IEEE Std.C57.106-2002 en la *tabla anexa 4.H2*, se puede concluir que: el aceite aislante luego de experimentar un proceso de transferencia de humedad con el aislamiento celulósico interno del transformador, presenta un valor de rigidez dieléctrica **ACEPTABLE**.

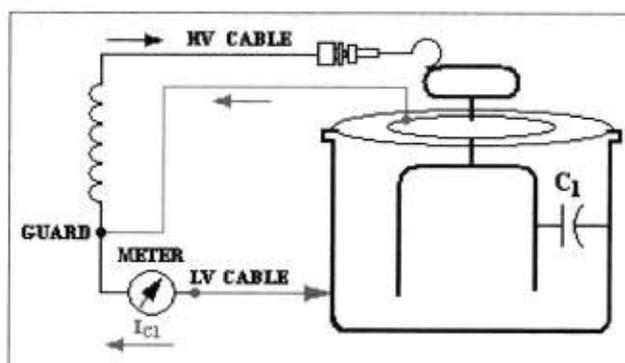
*Por tanto, esto nos permite diagnosticar que, el aceite aislante inmerso en el transformador se encuentra libre de elementos extraños, suciedad y/o agua en suspensión.*

### 5.2.5.2 Análisis y diagnóstico del ensayo para la determinación del Factor de Potencia del aceite

Este ensayo al igual que el de rigidez dieléctrica, es de gran importancia en el cuestionamiento del aceite aislante en campo, posterior a las 48 horas de reposo en el transformador. Su aplicación se dio a una muestra exclusiva de aceite tomada de la parte inferior de la cuba a través de una de sus válvulas, y para el análisis de su estado, se utilizó el mismo instrumento modelo M4100 de la Doble Engineering Company, aplicado para la determinación del factor de potencia del aislamiento total del transformador en referencia.

#### 5.2.5.2.1 Ensayo aplicado

Se aplicó el único método de ensayo existente (modo UST -measure red ground blue), cuyo esquema real de conexiones se mostró en la *figura anexa 4.14.B*. Siendo este analizado previamente a su implementación en campo, conforme el siguiente esquema:



*Figura 5.2 – Método de ensayo para determinar el factor de potencia del aceite aislante*

El resultado de factor de potencia obtenido, fue registrado en el *formulario anexo 5.A5*.

#### **5.2.5.2.2 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

Para aplicar los diferentes criterios de evaluación de los resultados, es necesario que el registro de factor de potencia (0.0469% a 30°C) obtenido en campo, sea corregido a una temperatura referencial de 20°C.

Por lo tanto, considerando el tipo de líquido aislante en referencia (aceite mineral), nos ubicamos en la *tabla anexa 4.D2* (de recomendación de la Doble Engineering Company) y determinamos el respectivo factor de corrección (0.63) según la temperatura de ensayo (30°C). Es así, que en el mismo *formulario anexo 5.A5*, se especifica adicionalmente el correspondiente valor de factor de potencia corregido a 20°C (**0.0295%**).

De esta forma, a partir del único resultado obtenido y corregido (0.0295%), se realiza el siguiente análisis aplicando los criterios recomendados en el literal 4.5.3.2.2 del capítulo IV:

- Según norma IEEE Std.C57.106-2002

*El registro de 0.0295% se encuentra por debajo del límite máximo referencial de 0.05% (para Factor de Potencia a 25°C) establecido en la tabla anexa 4.H1 de la IEEE Std.C57.106-2002, para el cuestionamiento del aceite aislante posterior a la inmersión de un transformador en campo,*

- Según criterio de la DOBLE Engineering Company

*El registro de factor de potencia de 0.0295%, se encuentra por debajo del límite máximo de 0.05%, recomendado por la Doble Engineering Company, para un aceite nuevo y en buenas condiciones. .*

*Por tanto, al verificar el cumplimiento de ambos criterios recomendados para la evaluación de los resultados, podemos diagnosticar que, el aceite aislante inmerso en el transformador, se encuentra libre de deterioración y/o contaminación, dada especialmente por presencia de humedad, carbón u otras sustancias conductoras.*

### **5.2.5.3 Análisis y diagnóstico a partir de los ensayos físico-químicos**

El análisis del aceite aislante mediante ensayos físico-químicos fue realizado posterior a su inmersión en el transformador, luego de 48 horas en reposo.

Su aplicación se dio a una muestra exclusiva de aceite (frasco de 0.5 litros) tomada de la parte inferior de la cuba a través de una de sus válvulas. El respectivo análisis de dicha muestra, se lo realizó en los laboratorios de SERTINLAB S.A., localizados en la Ciudad de Quito, cuyo informe de resultados emitido No. 2062-07, se presenta en la *tabla anexa 5.A4*. Este informe técnico detalla: el tipo de ensayo aplicado según norma ASTM y los parámetros referenciales de cuestionamiento para evaluación de los resultados obtenidos.

Para reforzar el análisis emitido por el laboratorio, en la *tabla anexa 5.A5* se reconsideran los resultados obtenidos, comparándolos adicionalmente con los parámetros de cuestionamiento recomendados por la **IEEE Standards C57.106-2002 - table 3 (tabla anexa 4.J1)**, para el caso en referencia.

Luego de evaluar los resultados de cada uno de los ensayos tanto físicos como químicos del aceite, se puede diagnosticar que:

*“El aceite mineral aislante tipo Nytro-10GBAP de NYNAS, inmerso en el transformador en referencia, presenta propiedades tanto físicas como químicas de condiciones ACCEPTABLES para su primera puesta en servicio”*

#### 5.2.5.4 Análisis y diagnóstico a partir de los ensayos de cromatografía de gases disueltos

El análisis del aceite aislante mediante ensayo cromatográfico de gases disueltos, fue realizado posterior a su inmersión en el transformador, luego de 48 horas en reposo.

Su aplicación se dio a una muestra exclusiva de aceite (jeringa de 30ml) tomada de la parte inferior de la cuba a través de una de sus válvulas. El análisis de dicha muestra, se lo realizó en los laboratorios de la MORGAN SCHAFFER, localizados en Québec-Canadá, cuyo informe de resultados emitido No. K970-1, se presenta en la *tabla anexa 5.A6*. Este informe técnico detalla: la cantidad (en ppm) de cada uno de los nueve gases disueltos en la muestra enviada, el total de contenido de gases en porcentaje y el respectivo diagnóstico de los resultados obtenidos.

No obstante, como complemento del informe presentado por la Morgan Schaffer, a continuación se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos:

COMPONENT	PPM	LEVEL		NOTES
		DS	BR	
H2 (Hydrogen)	<10 nd	-	-	"PPM" Parts per million by volume of dissolved gas at 273K and 760 torr.
O2/A (Oxygen + Argon)	4950	-	-	"nd" Not detectable.
N2 (Nitrogen)	19800	-	-	"DS" Dornenburg and Strittmatter.
CO (Carbon Monoxide)	6	-	-	"BR" U.S. Bureau of Reclamation.
CH4 (Methane)	< 5 nd	-	-	"*" Component is above the warning level.
CO2 (Carbon Dioxide)	74	-	-	"*" Component is below the warning level.
C2H4 (Ethylene)	< 2 nd	-	-	
C2H6 (Ethane)	< 2 nd	-	-	
C2H2 (Acetylene)	< 2 nd	-	-	
<b>TOTAL GAS CONTENT</b>	<b>2.48%</b>			

**Figura 5.3** – Abstracto de resultados, tomado del informe K970-1 de la Morgan Schaffer

De los nueve gases hallados, los seis tipos de gases combustibles ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ) se presentan en cantidades mínimas no detectables y los tres tipos de gases no combustibles ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) se presentan en cantidades aceptables, donde, el elevado contenido de gases de Nitrógeno y Oxígeno (y por ende de Dióxido de Carbono) se atribuye al tiempo que estuvo el aceite en contacto con el aire atmosférico desde su fabricación hasta la inmersión del transformador. Esta última particularidad puede ser verificada con el protocolo de ensayo en fábrica de los gases disueltos en el aceite, presentado en la *tabla anexa 5.A7*.

Debido a la no presencia de gases combustibles, no se hizo aplicable ninguna de las técnicas de diagnóstico de resultados. Esto se lo puede apreciar en la parte inferior del informe, donde se hace referencia al siguiente abstracto:

<b>RATIO DIAGNOSIS</b>	
A ratio is calculated only if at least one component is above a warning level.	
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ : NOT CALCULATED	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$ : NOT CALCULATED
$\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_6$ : NOT CALCULATED	$\text{CH}_4/\text{H}_2$ : NOT CALCULATED
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ : NOT CALCULATED	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_2$ : NOT CALCULATED
$\text{CO}_2/\text{CO}$ : NOT CALCULATED	

**Figura 5.4** – Abstracto de diagnóstico, tomado del informe K970-1 de la Morgan Schaffer

Luego de evaluar los resultados del ensayo cromatográfico de gases disueltos en el aceite, se puede diagnosticar que:

*“El aceite mineral aislante tipo Nytro-10GBAP de NYNAS, inmerso en el transformador en referencia, presenta un contenido ACEPTABLE de gases que no atentan contra su primera puesta en servicio, descartando cualquier peligro de origen de una falla”.*

*Fotografías captadas durante la ejecución de estos ensayos en campo, se muestran en las figuras anexas 5.6.A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K.*

### **5.3 CASO II – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Instrumentación**

#### **5.3.1 CASO II.A - Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Tensión (de Potencial)**

##### **5.3.1.1 Descripción**

Este caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de tres transformadores de tensión recientemente instalados, como parte de su recepción y previa puesta en servicio en la barra principal de 69kV de la Subestación “Riobamba”, localizada en la Provincia del Chimborazo y que forma parte de la Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, van dirigidos exclusivamente al análisis total del sistema de aislamiento en conjunto del transformador

### **5.3.1.2 Características del equipo**

El transformador de tensión en referencia, corresponde a uno del tipo pedestal con arrollamiento primario monofásico y dos arrollamientos secundarios (uno para medición y otro para protección). Siendo, sus demás características tanto técnicas como físicas, las que se detallan en las *figuras anexas 5.7.A, B, C, D* de este capítulo.

### **5.3.1.3 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total del transformador en referencia a través de este ensayo, se utilizó el instrumento megohmmetro modelo S1-5001 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.2*.

#### **5.3.1.3.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.D1* del capítulo anterior y considerando la configuración física de los transformadores de tensión en referencia, se plantea en el *apéndice 5.B1* del presente capítulo, el análisis completo de cinco posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.B1* para el registro de los resultados obtenidos en campo

*En el análisis de este caso se aplicaron únicamente cuatro de los cinco ensayos planteados en el apéndice 5.B1.*

#### **5.3.1.3.2 Método de medición aplicado**

De los métodos recomendados en el ítem 4.3.2.1.4 para la medición de la resistencia de aislamiento en general, se escogió el método de **“tiempo-resistencia”**, que de acuerdo con las características del instrumento de ensayo, este se lo realizó aplicando una tensión constante de 5000 voltios DC al espécimen bajo ensayo con referencia al arrollamiento primario *H* y una tensión constante de 500 voltios DC al espécimen bajo ensayo con referencia a los arrollamientos secundarios *X* y *Y*.

#### **5.3.1.3.3 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

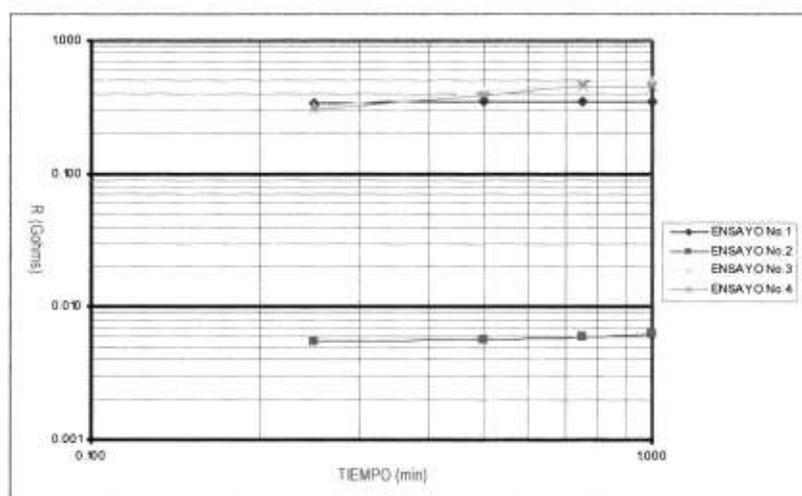
A partir de las lecturas de resistencia de aislamiento, medidas y registradas en el *formulario anexo 5.B1*, para cada uno de los ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis:

##### ***1) Análisis de la interpretación gráfica de las curvas de absorción dieléctrica:***

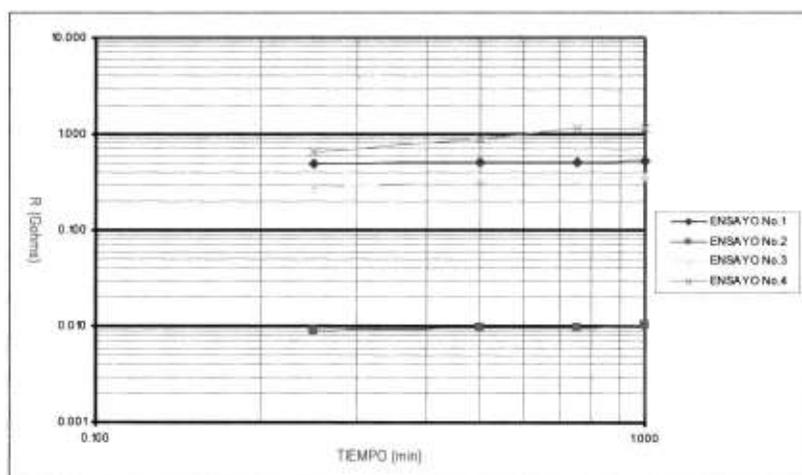
En vista de que el sistema de aislamiento (aceite-papel-madera) del equipo en referencia, es similar al utilizado en un transformador de

potencia, aquí también se hace aplicable el método expuesto en el CRITERIO II del literal 4.4.2.2.3 para la corrección de los registros de campo a una temperatura referencial de 75°C, permitiendo la evaluación en conjunto de las curvas de absorción dieléctrica obtenidas de cada ensayo aplicado. Dichos valores ya corregidos, son asentados en el mismo *formulario anexo 5.B1*.

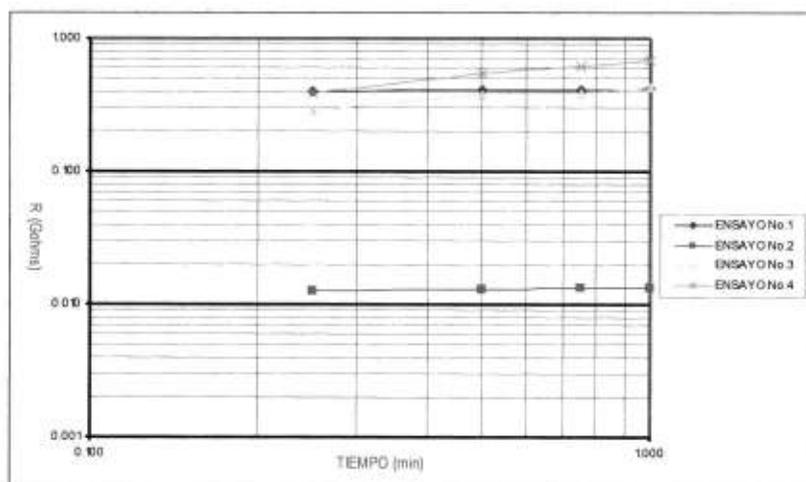
El análisis de las curvas de absorción dieléctrica, debe ser comparativo entre unidades similares de cada fase del sistema. Por tanto, a continuación se presentan dichas curvas, obtenidas para cada uno de los tres transformadores de tensión (ØA, ØB y ØC) bajo ensayo:



**Figura 5.5** – Curvas de absorción de los cuatro ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de tensión ØA - CASO II.A



**Figura 5.6** – Curvas de absorción de los cuatro ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de tensión OB - CASO II.A



**Figura 5.7** – Curvas de absorción de los cuatro ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de tensión OC - CASO II.A

De estos gráficos se puede concluir que:

- Para cada uno de los tres transformadores de tensión, los cuatro ensayos aplicados revelan una ascendencia de sus valores de resistencia de aislamiento con el aumento del tiempo de aplicación de

la tensión constante de ensayo durante un minuto. Característica que según el análisis del literal 5.2.3.1.3 (ítem 1) para el caso similar de un transformador de potencia, revela un aislamiento en BUENAS condiciones.

- Las curvas de absorción dieléctrica correspondientes a los ensayos #1, #3 y #4, se encuentran dentro de un rango comparable de 0.1 a 1 Gigaohm (a 75°C) para los tres transformadores de tensión bajo ensayo. Por lo tanto, se descarta algún problema referente a estas secciones de aislamiento en alguna de las unidades bajo ensayo.
- Es evidente en los tres transformadores de tensión, la baja resistencia de aislamiento que existe entre el arrollamiento primario y los secundarios (ensayo #2), esto debido al poco material aislante involucrado en esta sección por su distancia mínima de separación. Por lo tanto, se considera que esta es una característica normal de estos equipos y se descarta algún problema referente a esta sección de aislamiento en alguna de las unidades bajo ensayo.

## ***2) Análisis de los Índices de Absorción***

De la relación de las lecturas de resistencia de aislamiento registradas a los 60 y 30 segundos, se obtienen los siguientes Índices de Absorción

(IA) de los cuatro ensayos aplicados en cada uno de los transformadores de tensión en análisis, cuya interpretación del estado del aislamiento según la *tabla anexa 4.B1*, se da de la siguiente manera:

<b>Ensayo</b>	<b>Índice de Absorción (IA)</b>	<b>Condiciones del aislamiento</b>
#1	1.017	POBRE
#2	1.090	POBRE
#3	1.212	CUESTIONABLE
#4	1.174	CUESTIONABLE

**Tabla 5.9** – Condiciones del aislamiento Transformador de Tensión ØA según el Índice de Absorción

<b>Ensayo</b>	<b>Índice de Absorción (IA)</b>	<b>Condiciones del aislamiento</b>
#1	1.011	POBRE
#2	1.057	POBRE
#3	1.074	POBRE
#4	1.271	SATISFACTORIO

**Tabla 5.10** – Condiciones del aislamiento Transformador de Tensión ØB según el Índice de Absorción

<b>Ensayo</b>	<b>Índice de Absorción (IA)</b>	<b>Condiciones del aislamiento</b>
#1	1.022	POBRE
#2	1.038	POBRE
#3	1.133	CUESTIONABLE
#4	1.262	SATISFACTORIO

**Tabla 5.11** – Condiciones del aislamiento Transformador de Tensión ØC según el Índice de Absorción

Analizando en conjunto los tres cuadros anteriormente mostrados, se puede concluir que:

Los calificativos de POBRE y CUESTIONABLE, que se les está dando a ciertas secciones de aislamiento analizadas de cada uno de los transformadores de tensión, puede que no se deba a la presencia de algún problema interno de contaminación. Cabe recordar que estos equipos, al mantener el mismo sistema de aislamiento aceite-papel/madera utilizado en los transformadores de potencia, posee características altamente capacitivas que influyen en la carga del aislamiento durante el tiempo de aplicación de la tensión DC constante del ensayo, pudiendo ser necesario un tiempo mayor al periodo de un minuto aquí aplicado para que la corriente total del ensayo no se vea fuertemente influenciada por su componente capacitiva o de carga (ver gráfico 4.21).

Tal razón puede ser mayormente evidente en las secciones de aislamiento analizadas a partir de los ensayos #1 y #2 para los tres transformadores de tensión ( $\emptyset A$ ,  $\emptyset B$  y  $\emptyset C$ ), donde se conoce que dichas secciones hacen referencia al aislamiento integro del arrollamiento primario que involucra gran volumen de material aislante, y por consecuencia proporcionalmente una mayor capacitancia en el ensayo.

*No obstante, para corroborar esta hipótesis, es necesario aplicar otros métodos que permitan el análisis de estas secciones de aislamiento, como sería el caso del ensayo para la determinación de su factor de potencia y/o factor de disipación.*

*Los resultados de Índices de Polarización podrían haber contrarrestado a los de los Índices de Absorción aquí hallados, con la aplicación de un periodo mayor de ensayo (10 minutos). Cabe recalcar que dicho análisis adicional no fue posible debido a la premura del cliente y a las condiciones climáticas, por lo cual se hace válido el respaldo de estos resultados con el análisis adicional mediante el ensayo dieléctrico de determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento.*

#### **5.3.1.4 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total de los transformadores de tensión en referencia, a través de este ensayo, se utilizó el instrumento modelo DELTA-2000 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.8*.

##### **5.3.1.4.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.C1* del capítulo anterior y considerando la configuración física de los transformadores de tensión en referencia, se plantea en el *apéndice 5.B2* del presente capítulo, el análisis completo de nueve posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados.

Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.B2* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

*En el análisis de este caso, se aplicaron únicamente los tres primeros ensayos planteados en el apéndice 5.B2. Para cada uno, el instrumento permitió hallar, tanto las pérdidas por calentamiento (en Watts), la capacitancia (en picofaradios) y el factor de potencia (en %) de la respectiva sección de aislamiento en análisis.*

#### **5.3.1.4.2 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

Para aplicar los diferentes criterios de evaluación de los resultados, es necesario que los registros de factor de disipación obtenidos en campo, sean corregidos a una temperatura referencial de 20°C.

Por lo tanto, considerando que el equipo en referencia se trata de un Transformador de Tensión (PT) inmerso en aceite aislante y de voltaje nominal menor a 220kV, nos ubicamos en la *tabla anexa 4.D1* (de recomendación de la Doble Engineering Company) y determinamos los respectivos factores de corrección para cada uno de los registros, según la temperatura de ensayo. Es así, que en el *formulario anexo 5.B2*, se especifica adicionalmente el correspondiente valor de factor de potencia corregido a 20°C

De esta forma, el análisis aquí detallado se lo realiza a partir de los resultados obtenidos y corregidos para cada uno de los tres ensayos aplicados en cada transformador, tomando en cuenta los  *criterios recomendados en el literal 4.6.2.1.4 del capítulo IV*.

Dado que no se disponían de los protocolos de ensayos en fábrica, se realizó únicamente el análisis comparativo de los registros obtenidos entre unidades similares, tanto de valores de factor de potencia (en %), como de pérdidas (en watts) y capacitancia de sus secciones de aislamiento analizadas por igual. Es así que a continuación se representan los siguientes cuadros comparativos:

<i>Sección de aislamiento bajo análisis</i>	<i>Factor de potencia corregido a 20°C (en %)</i>		
	<i>TP-ØA</i>	<i>TP-ØB</i>	<i>TP-ØC</i>
$C_{HL}+C_{HG}$	0.4880	0.4416	0.4514
$C_{HG}$	0.4880	0.4347	0.4514
$C_{HL}$	1.3920	0.9729	0.8658

**Tabla 5.12** – Cuadro comparativo de resultados de Factor de Potencia del aislamiento

<i>Sección de aislamiento bajo análisis</i>	<i>Capacitancia (en pF)</i>		
	<i>TP-ØA</i>	<i>TP-ØB</i>	<i>TP-ØC</i>
$C_{HL}+C_{HG}$	1050.4	1063.2	1059.7
$C_{HG}$	1028.9	1046.3	1037.6
$C_{HL}$	21.56	16.98	21.98

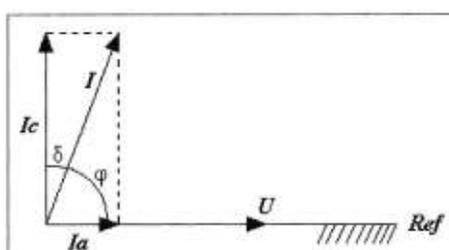
**Tabla 5.13** – Cuadro comparativo de resultados de Pérdidas en el aislamiento

<i>Sección de aislamiento bajo análisis</i>	<i>Pérdidas (en Watts)</i>		
	<i>TP-ØA</i>	<i>TP-ØB</i>	<i>TP-ØC</i>
$C_{HL}+C_{HG}$	0.0150	0.0160	0.0152
$C_{HG}$	0.0147	0.0155	0.0148
$C_{HL}$	0.0009	0.0006	0.0006

**Tabla 5.14** – Cuadro comparativo de resultados de Capacitancia del aislamiento.

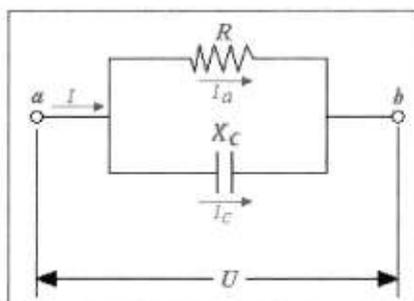
Del primer cuadro comparativo (Tabla 5.12), se puede observar que para las tres unidades, su mayor sección de aislamiento presente entre el arrollamiento primario y tierra ( $C_{HG}$ ), los valores de factor de potencia obtenidos no muestran una diferencia significativa que ponga en duda su buen estado. No así, la sección de aislamiento presente entre el arrollamiento primario y los arrollamientos secundarios ( $C_{HL}$ ) del transformador de la fase A, presenta un incremento considerable respecto a las otras unidades, a pesar de que su magnitud (1.3920%) se encuentra por debajo del 3% (máximo recomendado según la experiencia).

Para determinar las posibles causas de este incremento, es necesario analizar las componentes en cuadratura de la corriente de ensayo (la reactiva capacitiva " $I_c$ " y la activa " $I_a$ "), ya que estas se consideran como los principales parámetros que intervienen en la determinación del factor de pérdidas dieléctricas ( $\tan(\delta)$ ).



**Figura 5.8** – Diagrama fasorial de la corriente de ensayo

Interpretando el diagrama fasorial anterior en base a un circuito eléctrico en paralelo que representa el espécimen bajo ensayo, tenemos la siguiente figura:



**Figura 5.9** – Circuito eléctrico del espécimen bajo ensayo

Donde:

**I:** La corriente total que circula a través del aislamiento, calculada por el instrumento de ensayo,

**$U_{ab}$ :** Voltaje AC aplicado por el instrumento de ensayo,

**R:** Resistencia a las pérdidas en el aislamiento por efecto Joule

**$X_c$ :** Reactancia capacitiva del aislamiento ( $1/\omega C$ )

Es así que a partir del análisis del circuito mostrado, se hace factible determinar las componentes  **$I_a$**  e  **$I_c$**  de la corriente total del ensayo **I**, de la siguiente manera:

#### **Determinación de la componente $I_c$ :**

Aplicando la ecuación de caída de voltaje en el respectivo ramal capacitivo, se conoce que:

$$V = I_c \cdot X_c \quad (5.1)$$

$$V = I_c \cdot \frac{1}{\omega C} \quad (5.2)$$

$$I_c = V \cdot \omega C \quad (5.3)$$

Donde:

$\omega = 2\pi f$  ( $f = 60$  Hz frecuencia del voltaje aplicado con el instrumento)

$V$ : es el voltaje aplicado con el instrumento a la respectiva sección de aislamiento bajo ensayo (2490 Voltios)

$C$ : es la capacitancia de la sección de aislamiento en análisis, determinada con el instrumento de ensayo (21.56 pF)

De esta forma, aplicando la ecuación 5.3, tenemos que:

$$I_c = 2490 \cdot 2\pi \cdot 60 \cdot 21.56 \times 10^{-12}$$

$$I_c = 0.0202386 \text{ mA}$$

### **Determinación de la componente $I_g$ :**

Al conocer la magnitud de la componente  $I_c$  y el factor de disipación o de pérdida dieléctrica  $\text{tg}(\delta)$  hallado con el instrumento de ensayo (1.74%), aplicamos la expresión 4.2 para determinar la magnitud de la componente  $I_g$ :

$$\text{tg}(\delta) = \frac{I_g}{I_c} \cdot 100\%$$

$$I_a = \frac{(\operatorname{tg}(\delta)) \cdot I_c}{100} \quad (5.4)$$

$$I_a = \frac{(1.74) \cdot 0.0202386}{100}$$

$$I_a = 0.0003522 \text{ mA}$$

Aplicando este mismo procedimiento, hallamos las componentes de las corrientes de ensayo referentes a las otras unidades, obteniendo en resumen el siguiente cuadro:

<i>Componentes de la corriente de ensayo I</i>	<i>TP-ØA</i>	<i>TP-ØB</i>	<i>TP-ØC</i>
<i>I<sub>a</sub> (mA)</i>	0.0003522	0.0002247	0.0002414
<i>I<sub>c</sub> (mA)</i>	0.0202386	0.0159393	0.0206329

**Tabla 5.15** – Cuadro comparativo de las componentes de la corriente de ensayo

*De este cuadro comparativo se puede concluir finalmente que el alto valor de factor de disipación obtenido en la unidad de la fase A, se debe principalmente a una mayor fuga de potencia activa en su aislamiento por pérdidas mediante efecto Joule, desenmascarada por una componente activa (de valor 0.0003522) mayor que las otras unidades (B y C), considerando que se tiene una misma sección de aislamiento cuya capacitancia es aproximadamente igual para todos los transformadores en referencia.*

*A pesar de esto, la magnitud de dicha componente no se considera excesiva, por mantenerse en el mismo orden de los mA y con una diferencia de pocos decimales, recalcando además que en base a mi experiencia, problemas graves de aislamiento revelarían magnitudes de corrientes activas nada comparables.*

*Esto por lo tanto, nos permite diagnosticar que: “Todas las secciones de aislamiento involucradas en este ensayo, se encuentran libres de contaminación (dada por presencia de humedad, carbonización y otros) y/o deterioración alguna acrecentada por la humedad presente”.*

*Fotografías captadas durante la ejecución de estos ensayos en campo, se muestran en las figuras anexas 5.9.A, B, C, D, E, F*

### **5.3.2 CASO II.B - Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Corriente**

#### **5.3.2.1 Descripción**

Este caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de tres transformadores de corriente, como parte de su recepción, previa instalación y puesta en servicio en la posición “Banco de Capacitores” a 69kV de la Subestación “Santa Elena”, localizada en la Provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, van dirigidos exclusivamente al análisis total del sistema de aislamiento en conjunto del transformador.

### **5.3.2.2 Características del equipo**

El transformador de corriente en referencia, corresponde a uno del tipo pedestal, con arrollamiento primario en forma de “U” y tres arrollamientos secundarios (uno para medición y dos para protección) ubicados en la parte inferior y con su respectivo núcleo toroidal. Siendo, sus demás características tanto técnicas como físicas, las que se detallan en las *figuras anexas 5.10.A, B* de este capítulo.

### **5.3.2.3 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total de los transformadores en referencia a través de este ensayo, se utilizó el instrumento megohmmetro modelo S1-5001 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.2*.

#### **5.3.2.3.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.D2* del capítulo anterior y considerando la configuración física de los transformadores

de corriente en referencia, se plantea en el *apéndice 5.C1* del presente capítulo, el análisis completo de siete posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.C1* para el registro de los resultados obtenidos en campo

*En el análisis de este caso se aplicaron únicamente dos de los siete ensayos planteados en el apéndice 5.C1.*

#### **5.3.2.3.2 Método de medición aplicado**

De los métodos recomendados en el ítem 4.3.2.1.4 para la medición de la resistencia de aislamiento en general, se escogió el método de **“tiempo-resistencia”**, que de acuerdo con las características del instrumento de ensayo, este se lo realizó aplicando una tensión constante de 5000 voltios DC al espécimen bajo ensayo con referencia al arrollamiento primario ***P*** y una tensión constante de 500 voltios DC al espécimen bajo ensayo con referencia a los arrollamientos secundarios ***1S***, ***2S*** y ***3S***.

#### **5.3.2.3.3 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

A partir de las lecturas de resistencia de aislamiento, medidas y registradas en el *formulario anexo 5.C1*, para cada uno de los ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis.

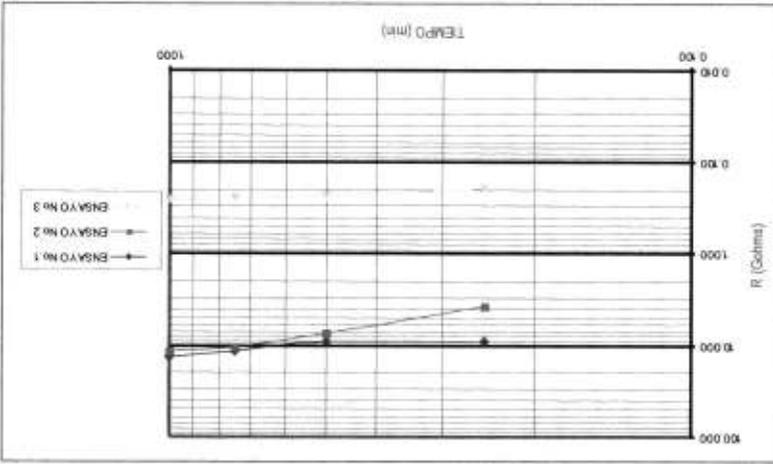
**1) *Análisis de la interpretación gráfica de las curvas de absorción dieléctrica:***

Al igual que en el caso anterior, por poseer este equipo un sistema de aislamiento (aceite-papel-madera) similar al de un transformador de potencia, también se hace aplicable el método expuesto en el CRITERIO II del literal 4.4.2.2.3 para la corrección de los registros de campo a una temperatura referencial de 75°C, permitiendo la evaluación en conjunto de las curvas de absorción dieléctrica obtenidas de cada ensayo aplicado. Dichos valores ya corregidos, son asentados en el mismo *formulario anexo 5.C1.*

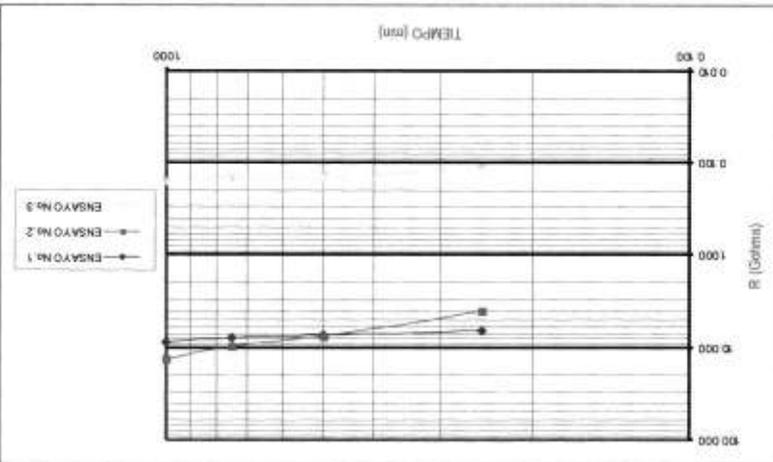
*Al tratarse en este caso el análisis de tres equipos de características similares, la comparación de sus curvas de absorción dieléctrica obtenidas de cada ensayo aplicado, ayudaría en la detección de algún problema de consideración presente en alguno de ellos.*

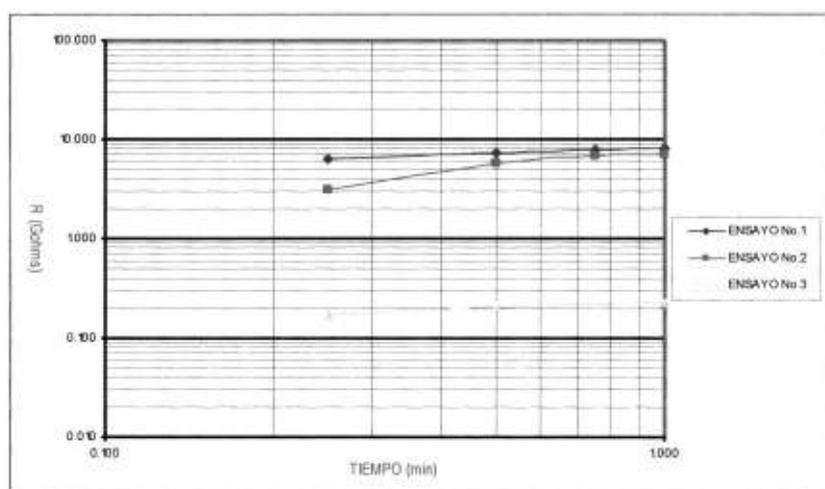
*Por lo tanto, el análisis comparativo de las correspondientes curvas obtenidas para cada transformador de corriente bajo ensayo, se presenta a continuación:*

**Figura 5.11** – Curvas de absorción de los tres ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de corriente ØB - CASO II.B



**Figura 5.10** – Curvas de absorción de los tres ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de corriente ØA - CASO II.B





**Figura 5.12** – Curvas de absorción de los tres ensayos aplicados para medida de resistencia de aislamiento del transformador de corriente OC - CASO II.B

De estos gráficos se puede concluir que:

- Para cada uno de los tres transformadores de corriente, los tres ensayos aplicados revelan una ascendencia de sus valores de resistencia de aislamiento con el aumento del tiempo de aplicación de la tensión constante de ensayo durante un minuto. Característica que según el análisis del literal 5.2.3.1.3 (ítem 1) para el caso similar de un transformador de potencia, revela un aislamiento en BUENAS condiciones.
- Las curvas de absorción dieléctrica correspondientes a los ensayos #1 y #2, se encuentran dentro de un rango comparable de 1 a 15 Gigaohm (a 75°C) para los tres transformadores de corriente bajo ensayo. Por lo

tanto, se descarta algún problema referente a estas secciones de aislamiento.

- Por otro lado, es evidente en los tres transformadores de corriente, la baja resistencia de aislamiento que existe entre los arrollamientos secundarios y tierra (ensayo #3), lo cual analizando su configuración constructiva interna mostrada en las *figuras anexas 5.10.A, B*, podría decirse que se atribuye a la disposición reducida de material aislante en comparación con el arrollamiento primario. Por lo tanto, al considerar también que este es un evento que se está dando por igual para las tres unidades bajo en ensayo, se concluye que es una característica normal de estos equipos y se descarta algún problema referente a esta sección de aislamiento.

## **2) *Análisis de los Índices de Absorción***

De la relación de las lecturas de resistencia de aislamiento registradas a los 60 y 30 segundos, se obtienen los siguientes Índices de Absorción (IA) de ensayos aplicados en cada uno de los transformadores de corriente en análisis, cuya interpretación del estado del aislamiento según la *tabla anexa 4.B1*, se da de la siguiente manera:

<i>Ensayo</i>	<i>Índice de Absorción (IA)</i>	<i>Condiciones del aislamiento</i>
#1	1.179	CUESTIONABLE
#2	1.766	EXCELENTE
#3	1.143	CUESTIONABLE

**Tabla 5.16** – Condiciones del aislamiento Transformador de Corriente OA según el Índice de Absorción

<i>Ensayo</i>	<i>Índice de Absorción (IA)</i>	<i>Condiciones del aislamiento</i>
#1	1.473	BUENO
#2	1.581	BUENO
#3	1.117	CUESTIONABLE

**Tabla 5.17** – Condiciones del aislamiento Transformador de Corriente OB según el Índice de Absorción

<i>Ensayo</i>	<i>Índice de Absorción (IA)</i>	<i>Condiciones del aislamiento</i>
#1	1.075	POBRE
#2	1.235	CUESTIONABLE
#3	1.135	CUESTIONABLE

**Tabla 5.18** – Condiciones del aislamiento Transformador de Corriente OC según el Índice de Absorción

Analizando en conjunto los tres cuadros anteriormente mostrados, se puede concluir que:

Los calificativos de POBRE y CUESTIONABLE, que se les está dando a ciertas secciones de aislamiento analizadas de cada uno de los transformadores de corriente, puede que no se deba a la presencia de algún problema interno de contaminación. Cabe recordar que estos equipos, al mantener el mismo sistema de aislamiento aceite-papel/madera utilizado

tanto en los transformadores de potencia como en los de tensión, posee características altamente capacitivas que influyen en la carga del aislamiento durante el tiempo de aplicación de la tensión DC constante del ensayo, pudiendo ser necesario un tiempo mayor al periodo de un minuto aquí aplicado para que la corriente total del ensayo no se vea fuertemente influenciada por su componente capacitiva o de carga (ver gráfico 4.21).

Tal razón puede ser mayormente evidente en las secciones de aislamiento analizadas a partir de los ensayos #1 y #2 para los tres transformadores de corriente ( $\emptyset A$ ,  $\emptyset B$  y  $\emptyset C$ ), donde se conoce que dichas secciones hacen referencia al aislamiento integro del arrollamiento primario que involucra gran volumen de material aislante, y por consecuencia proporcionalmente una mayor capacitancia en el ensayo.

*No obstante, para corroborar esta hipótesis, es necesario aplicar otros métodos que permitan el análisis de estas secciones de aislamiento, como sería el caso del ensayo para la determinación de su factor de potencia y/o factor de disipación.*

#### **5.3.2.4 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total de los transformadores de corriente en referencia, a través de este ensayo, se utilizó el instrumento modelo M4100 de la Doble Engineering Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.3*.

##### **5.3.2.4.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.C2* del capítulo anterior y considerando la configuración física de los transformadores de corriente en referencia, se plantea en el *apéndice 5.C2* del presente capítulo, el análisis completo de seis posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.C2* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

*En el análisis de este caso, se aplicó únicamente el primero de los seis ensayos planteados en el apéndice 5.C2. Para cada uno, el instrumento permitió hallar, tanto las pérdidas por calentamiento (en Watts), la capacitancia (en picofaradios) y el factor de potencia (en %) de la respectiva sección de aislamiento en análisis.*

#### **5.3.2.4.2 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

Para aplicar los diferentes criterios de evaluación de los resultados, es necesario que los registros de factor de potencia obtenidos en campo, sean corregidos a una temperatura referencial de 20°C.

Por lo tanto, considerando que el equipo en referencia se trata de un Transformador de Corriente (CT) inmerso en aceite aislante y de voltaje nominal menor a 220kV, nos ubicamos en la *tabla anexa 4.D1* (de recomendación de la Doble Engineering Company) y determinamos los respectivos factores de corrección para cada uno de los registros, según la temperatura de ensayo. Es así, que en el *formulario anexo 5.C2*, se especifica adicionalmente el correspondiente valor de factor de potencia corregido a 20°C.

De esta forma, a partir de los resultados obtenidos y corregidos, para el único ensayo aplicado, se realiza el siguiente análisis:

##### ***1) Análisis a partir de la comparación de los registros de ensayos obtenidos, entre unidades similares***

Para el presente análisis es necesario considerar los tres parámetros determinados con este ensayo que son: el factor de potencia (en %), las pérdidas por calentamiento (en watts) y la capacitancia de las secciones de

aislamiento involucradas con el respectivo ensayo aplicado. Es así que a continuación se representan los siguientes cuadros comparativos:

<i>Sección de aislamiento bajo análisis</i>	<i>Factor de potencia corregido a 20°C (en %)</i>		
	<i>TC-ØA</i>	<i>TC-ØB</i>	<i>TC-ØC</i>
<i>C<sub>P</sub>+C<sub>PS</sub></i>	0.3172	0.2379	0.230

**Tabla 5.19** – Cuadro comparativo de resultados de Factor de Potencia del aislamiento

<i>Sección de aislamiento bajo análisis</i>	<i>Pérdidas (en Watts)</i>		
	<i>TC-ØA</i>	<i>TC-ØB</i>	<i>TC-ØC</i>
<i>C<sub>P</sub>+C<sub>PS</sub></i>	0.264	0.204	0.198

**Tabla 5.20** – Cuadro comparativo de resultados de Pérdidas en el aislamiento

<i>Sección de aislamiento bajo análisis</i>	<i>Capacitancia (en pF)</i>		
	<i>TC-ØA</i>	<i>TC-ØB</i>	<i>TC-ØC</i>
<i>C<sub>P</sub>+C<sub>PS</sub></i>	1406.8	1434.6	1435.3

**Tabla 5.21** – Cuadro comparativo de resultados de Capacitancia del aislamiento

Del primer cuadro comparativo (Tabla 5.19), se puede observar que el transformador de corriente de la fase “A” presenta un incremento considerable de su valor de factor de potencia respecto a las otras unidades, el mismo que requiere ser investigado a pesar de que su magnitud (0.3172%) se encuentra muy por debajo del 3% máximo recomendado según la experiencia.

Al igual que en el caso anterior, para determinar las posibles causas de este incremento, es necesario analizar las componentes en cuadratura de la corriente de ensayo (la reactiva capacitiva " $I_c$ " y la activa " $I_a$ "), de esta forma se toma en cuenta el mismo análisis aplicado. Es así, que a continuación se presenta en resumen las magnitudes de tales componentes para cada unidad analizada:

<i>Componentes de la corriente de ensayo I</i>	<i>TC-ØA</i>	<i>TC-ØB</i>	<i>TC-ØC</i>
<i>I<sub>a</sub> (mA)</i>	<i>0.016823</i>	<i>0.012866</i>	<i>0.012445</i>
<i>I<sub>c</sub> (mA)</i>	<i>5.303523</i>	<i>5.408327</i>	<i>5.410966</i>

**Tabla 5.22** – Cuadro comparativo de las componentes de la corriente de ensayo

*De este cuadro comparativo se puede concluir finalmente que el alto valor de factor de pérdidas obtenido en la unidad de la fase A, se debe principalmente a una mayor fuga de potencia activa en su aislamiento por pérdidas mediante efecto Joule, desenmascarada por una componente activa (de valor 0.016823) mayor que las otras unidades (B y C), considerando que se tiene una misma sección de aislamiento cuya capacitancia es aproximadamente igual para todos los transformadores en referencia.*



**C.I.B.**

*A pesar de esto, la magnitud de dicha componente no se considera de excesiva, por mantenerse en el mismo orden de los mA y con una diferencia de pocos decimales, recalcando además que en base a mi experiencia, problemas graves de aislamiento revelarían magnitudes de corrientes activas nada comparables.*

*Esto por lo tanto, nos permite diagnosticar que: “Todas las secciones de aislamiento involucradas en este ensayo, se encuentran libres de contaminación (dada por presencia de humedad, carbonización y otros) y/o deterioración alguna acrecentada por la humedad presente”.*

**2) Análisis a partir de la comparación de los registros de ensayos en campo con los realizados en fábrica:**

Tomando en cuenta los registros de protocolos de ensayo en fábrica presentados en las *tablas anexas 5.B1 y 5.B2*, se establecen los siguientes cuadros comparativos:

<i>Equipo</i>	<i>Factor de Potencia a 20°C (%)</i>	
	<i>Ensayo en Fábrica</i>	<i>Ensayo en Campo</i>
<i>TC-ØA</i>	<i>0.24</i>	<i>0.3172</i>
<i>TC-ØB</i>	<i>0.24</i>	<i>0.2379</i>
<i>TC-ØC</i>	<i>0.24</i>	<i>0.2300</i>

**Tabla 5.23** – Cuadro comparativo entre registros de Factor de Potencia del aislamiento, obtenidos en fábrica y en campo

<i>Equipo</i>	<i>Capacitancia (en pF)</i>	
	<i>Ensayo en Fábrica</i>	<i>Ensayo en Campo</i>
<i>TC-ØA</i>	<i>1389</i>	<i>1406.8</i>
<i>TC-ØB</i>	<i>1417</i>	<i>1434.6</i>
<i>TC-ØC</i>	<i>1417</i>	<i>1435.3</i>

**Tabla 5.24** – Cuadro comparativo entre registros de capacitancia del aislamiento, obtenidos en fábrica y en campo

Del primer cuadro comparativo (tabla 5.23) se puede observar que para las unidades correspondientes a las fases “B” y “C”, los valores de campo se aproximan a los de fábrica; no así, en la fase “A” existe un leve incremento de dicho valor con respecto al de fábrica, que de acuerdo a lo ya analizado en el literal 1) de este ítem, NO representa algún problema de consideración. De todas formas, al desconocer el origen de tal diferencia presente, se recomendaría monitorear su estado con pruebas periódicas que descarten algún indicio de contaminación que tienda a aumentar con el tiempo de operación del equipo.

Del segundo cuadro comparativo (tabla 5.24) se puede observar que para las tres unidades existe un leve incremento simétrico de capacitancia en el orden de los 17pF, que posiblemente se deba a la diferencia de precisión de los instrumentos de ensayo utilizados. No obstante, hay que considerar que este evento NO debería perjudicar en alguna manera a los valores de factor de potencia, dado que la variación de las componentes activas de la corriente de ensayo se da proporcional a la variación de sus componentes

*capacitivas, tal como se puede interpretar la expresión (5.4) ya citada anteriormente.*

*Fotografías captadas durante la ejecución de estos ensayos en campo, se muestran en las figuras anexas 5.11.A, B, C, D.*

### **5.3.3 CASO II.C - Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Tensión Capacitivo**

#### **5.3.3.1 Descripción**

Este caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Transformador de Tensión Capacitivo, como parte de su recepción, previa instalación y puesta en servicio emergente en reemplazo de la unidad de la fase “B” existente de la posición ATQ a 138kV de la Subestación “Posorja”, localizada en la Provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, van dirigidos exclusivamente al análisis del aislamiento de los módulos capacitivos del transformador y del arrollamiento del transformador intermedio.

### **5.3.3.2 Características del equipo**

El transformador de tensión capacitivo en referencia, corresponde a uno del tipo pedestal compuesto por dos unidades de módulos capacitivos en serie y acoplados a un transformador intermedio de doble arrollamiento secundario (uno para medición y otro para protección). Siendo, sus demás características tanto técnicas como físicas, las que se detallan en la *figura anexa 5.12.A, B* de este capítulo.

### **5.3.3.3 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total del transformador en referencia a través de este ensayo, se utilizó el instrumento megohmetro modelo S1-5001 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.2*.

#### **5.3.3.3.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.D3* del capítulo anterior y considerando la configuración física del transformador de tensión en referencia, se plantea en el *apéndice 5.D1* del presente capítulo, el análisis completo de seis posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es

en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.D1* para el registro de los resultados obtenidos en campo

*En el análisis de este caso se aplicaron únicamente tres de los seis ensayos planteados en el apéndice 5.D1.*

#### **5.3.3.3.2 Método de medición aplicado**

De los métodos recomendados en el ítem 4.3.2.1.4 para la medición de la resistencia de aislamiento en general, se escogió el método de “**tiempo-resistencia**”, que de acuerdo con las características del instrumento de ensayo, este se lo realizó aplicando una tensión constante de 5000 voltios DC al espécimen bajo ensayo con referencia al arrollamiento primario **H** y una tensión constante de 500 voltios DC al espécimen bajo ensayo con referencia a los arrollamientos secundarios **X** y **Y**.

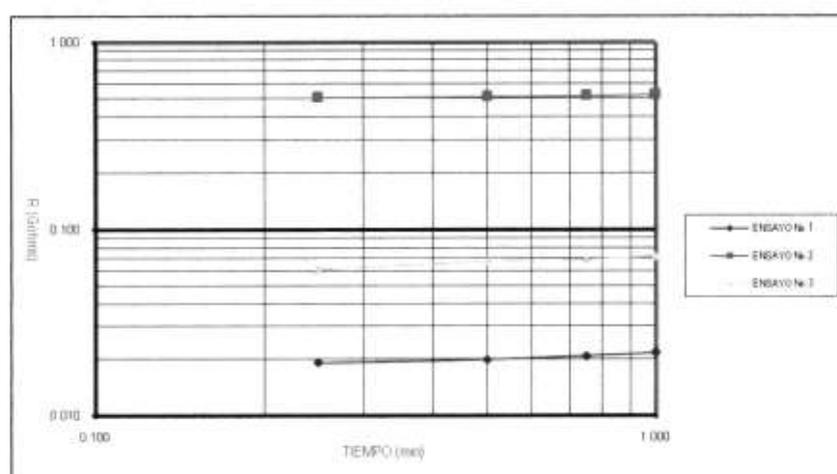
#### **5.3.3.3.3 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

A partir de las lecturas de resistencia de aislamiento, medidas y registradas en el *formulario anexo 5.D1*, para cada uno de los ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis:

**1) Análisis de la interpretación gráfica de las curvas de absorción dieléctrica:**

En vista de que el sistema de aislamiento (aceite-papel-madera) del equipo en referencia, es similar al utilizado en un transformador de potencia, aquí también se hace aplicable el método expuesto en el CRITERIO II del literal 4.4.2.2.3 para la corrección de los registros de campo a una temperatura referencial de 75°C, permitiendo la evaluación en conjunto de las curvas de absorción dieléctrica obtenidas de cada método de ensayo aplicado. Dichos valores ya corregidos, son asentados en el mismo *formulario anexo 5.D1*.

Al tratarse el caso en referencia del ensayo de un solo equipo, este análisis se limita solo a evaluar la tendencia de las curvas de absorción obtenidas para esta unidad. Por tanto, se tiene lo siguiente:



**Figura 5.13** – Curvas de absorción de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento en el transformador de tensión capacitivo – CASO II.C

Aquí se puede concluir, que para los tres ensayos aplicados, las curvas de absorción correspondientes, revelan una ascendencia de sus valores de resistencia de aislamiento con el aumento del tiempo de aplicación de la tensión constante de ensayo durante un minuto. Característica que según el análisis del literal 5.2.3.1.3 (ítem 1) para el caso similar de un transformador de potencia, revela un aislamiento en BUENAS condiciones.

*Hay que considerar que adicionalmente se pueden analizar los índices de absorción, pero por motivos ya explicados en los anteriores casos (referentes al corto tiempo del ensayo aplicado en este tipo de equipo de elevadas características capacitivas), se prefiere considerar el análisis aquí realizado a las curvas de absorción sustentado con las magnitudes de las lecturas de resistencia de aislamiento en el orden de los Gigaohms (mayores a 1000MΩ considerado como mínimo valor referencial de aceptabilidad), como criterios suficientes para diagnosticar que las secciones de aislamiento del transformador intermedio aquí analizadas se encuentran libres de contaminación.*

#### **5.3.3.4 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total del transformador de tensión capacitivo del caso en referencia, a través de este ensayo, se utilizó el instrumento

modelo DELTA-2000 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.8*.

#### **5.3.3.4.1 Ensayos aplicados**

Como ya se mencionó en el anterior capítulo, en este tipo de transformador de instrumentación, el ensayo está dirigido exclusivamente al análisis de las secciones o módulos capacitivos en el disponible. Es así, que para este caso se aplicaron los dos únicos ensayos recomendados en el *apéndice 4.C3*, y previamente a su implementación en campo, cada uno de estos fue analizado conforme lo descrito en el *apéndice 5.D2*. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.D2* para el registro de los resultados obtenidos en campo

Para cada ensayo aplicado, el instrumento de ensayo permitió hallar: las pérdidas por calentamiento (en Watts o miliWatts), la capacitancia (en picofaradios) y el factor de potencia (en %) de la respectiva sección de aislamiento en análisis.

#### **5.3.3.4.2 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico**

Para aplicar los diferentes criterios de evaluación de los resultados, es necesario que los registros de factor de potencia obtenidos en campo, sean corregidos a una temperatura referencial de 20°C.

Por lo tanto, considerando que el equipo en referencia se trata de un Transformador de Potencial (PT) inmerso en aceite aislante y de voltaje nominal menor a 220kV, nos ubicamos en la *tabla anexa 4.D1* (de recomendación de la Doble Engineering Company) y determinamos los respectivos factores de corrección para cada uno de los registros, según la temperatura de ensayo. Es así, que en el *formulario anexo 5.D2*, se especifica adicionalmente el correspondiente valor de factor de potencia corregido a 20°C.

De esta forma, a partir de los resultados obtenidos y corregidos, para cada uno de los ensayos aplicados, se realiza el siguiente análisis:

***1) Análisis a partir de los criterios recomendados en el literal 4.6.2.1.4 del capítulo IV:***

***Según criterio de la DOBLE Engineering Company :***

*Para cada sección capacitiva, los correspondientes registros de valores de factor de potencia obtenidos en campo y corregidos a una temperatura referencial de 20°C (mostrados en el formulario anexo 5.D2), cumplen con el criterio recomendado por la DOBLE, de ser menores a 0.5%.*

**2) *Análisis a partir de la comparación de los registros de ensayos en campo con los valores de placa***

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, una de las particularidades que se da con este tipo de transformador de instrumentación, es que siempre los fabricantes ven la necesidad de incluir en sus datos característicos de placa, los valores referenciales de fábrica tanto de capacitancia como de factor de potencia de cada sección capacitiva. Tales valores de referencia, sirven de mucha ayuda para establecer un análisis comparativo del aislamiento involucrado.

Para este caso, solo se especificó únicamente dentro de los datos de placa, los valores de capacitancia de las secciones capacitivas C1 y C2, por lo tanto, a continuación se establece el análisis comparativo de tales parámetros:

<i>Sección analizada</i>	<i>Capacitancia (en pF)</i>	
	<i>Ensayo en Fábrica</i>	<i>Ensayo en Campo</i>
<i>C1</i>	<i>19122</i>	<i>19239</i>
<i>C2</i>	<i>117576</i>	<i>118010</i>

**Tabla 5.25** – *Cuadro comparativo entre registros de capacitancia del aislamiento, obtenidos en fábrica y en campo*

De este cuadro comparativo se puede concluir que la capacitancia medida en campo se aproxima a la registrada en fábrica, cumpliéndose

consecuentemente también dicha proximidad entre las respectivas componentes capacitivas de la corriente total de ensayo por la expresión 5.3 ( $I_c = VwC$ ) anteriormente citada. Por tanto, si existiera un incremento del factor de potencia determinado en campo con respecto al de fábrica, este debería atribuirse exclusivamente a las pérdidas activas en su aislamiento.

En resumen de los diferentes criterios aquí aplicados en la evaluación de los resultados del ensayo para la determinación del Factor de Potencia del aislamiento de este transformador de instrumentación, se llega a una sola conclusión de que el aislamiento íntegro de dicho equipo se encuentra en BUENAS condiciones.

*Esto por lo tanto, nos permite diagnosticar que: "Las dos secciones de aislamiento analizadas en este ensayo, se encuentran libres de contaminación (dada por presencia de humedad, carbonización y otros) y/o deterioración alguna acrecentada por la humedad presente".*

*Fotografías captadas durante la ejecución de estos ensayos en campo, se muestran en las figuras anexas 5.13.A, B, C.*

## **5.4 CASO III – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Seccionador de Potencia**

### **5.4.1 Descripción**

Este caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un seccionador de potencia recientemente instalado, como parte de su recepción y previa puesta en servicio en la Bahía “Machala 1” a 230kV de la Subestación “Milagro”, localizada en la provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, van dirigidos exclusivamente al análisis del estado de cada una de las columnas aisladoras de los tres polos del seccionador.

### **5.4.2 Características del Seccionador**

El seccionador de potencia en referencia signado como 89-241, corresponde a uno de tres polos, los mismos que se interconectan mecánicamente para operar de forma simultánea mediante mando motorizado o manual. Cada unidad de polo realiza el seccionamiento en un solo punto de corte a través de las cuchillas soportadas por columnas giratorias de porcelana de núcleo sólido. Sus demás características tanto técnicas como físicas, se detallan en las *figura anexa 5.14*.

### **5.4.3 Análisis y Diagnóstico del estado del aislamiento total del seccionador**

#### **5.4.3.1 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento**

Para el análisis del estado de las columnas aislantes del seccionador en referencia a través de este ensayo, se utilizó el instrumento megohmmetro modelo S1-5001 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.2*.

##### **5.4.3.1.1 Métodos de ensayo aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.E1* del capítulo anterior, referente a la configuración física de este seccionador, se plantea en el *apéndice 5.E1* del presente capítulo, el análisis completo de tres posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados por cada polo. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.E1* para el registro de los resultados obtenidos en campo

*En el análisis de este caso se aplicó únicamente el primero de los tres métodos de ensayos planteados en el apéndice 5.E1.*

#### 5.4.3.1.2 Método de medición aplicado

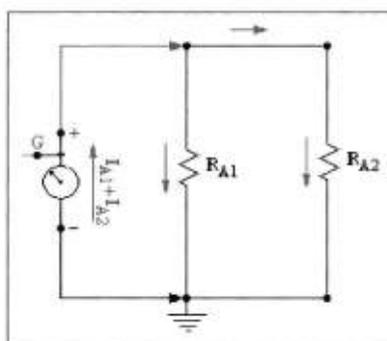
De los métodos recomendados en el ítem 4.3.2.1.4 para la medición de la resistencia de aislamiento en general, se escogió el método de “**corto tiempo o lectura puntual**”, que de acuerdo con las características del instrumento de ensayo, este se lo realizó aplicando una tensión constante de 5000 voltios DC al espécimen bajo ensayo por el tiempo de un minuto.

*Debido a que el espécimen bajo ensayo para este caso, corresponde a columnas de porcelana sólida donde por sus características no se hace presente el fenómeno de absorción, NO se aplicó el método de tiempo-resistencia como en los otros casos analizados.*

#### 5.4.3.1.3 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico

Tomando en cuenta que el valor mínimo referencial de 50000MΩ recomendado en el literal 4.7.2.1.3, es aplicable solo para el caso de una columna aislante de cualquier seccionador, se hace necesario relacionar dicho valor con el análisis en referencia de la siguiente forma:

- 1) De acuerdo con el ensayo #1 analizado en el *apéndice 5.E1*, el circuito equivalente del caso en referencia corresponde al siguiente:



**Figura 5.14** – Circuito equivalente del ensayo para la medida de la resistencia del aislamiento de un polo del seccionador – CASO III

Donde,  $R_{A1}$  y  $R_{A2}$ : Representan la resistencia de aislamiento de cada columna aislante.

- 2) Por lo tanto, planteando las respectivas ecuaciones para determinar la resistencia equivalente del circuito anterior, se tiene lo siguiente:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{A1}} + \frac{1}{R_{A2}} \quad (5.5)$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{R_{A1} + R_{A2}}{R_{A1} \cdot R_{A2}}$$

- 3) Al considerarse de las mismas características las columnas de aisladores del seccionador en referencia, se establece que las resistencias en análisis son equivalentes, es decir  $R=R_{A1}=R_{A2}$ . Por lo tanto, se tiene que:

$$\frac{1}{R_t} = \frac{2R}{R^2}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{2}{R}$$

$$R_t = \frac{R}{2}$$

- 4) De esta forma, siendo  $R$  el valor mínimo referencial de  $50000M\Omega$ , la resistencia equivalente  $R_t$  para el caso en referencia sería la siguiente:

$$R_t = \frac{50000}{2} (M\Omega)$$

$$\boxed{R_t = 25000(M\Omega)}$$

Por lo tanto, comparando cada uno de los registros del *formulario anexo 5*. El con el mínimo referencial de  $25000M\Omega$ , se puede concluir que estos se encuentran por encima de dicho valor, lo cual consecuentemente implica que el aislamiento integro de cada polo se encuentra en BUENAS condiciones.

*Esto nos permite diagnosticar que las columnas aislantes de porcelana del seccionador en referencia, se encuentran libres de contaminación, especialmente en su superficie que por lo general se asientan agentes contaminantes inorgánicos que con el tiempo y la humedad reaccionan formando caminos preferenciales para las corrientes de fuga superficial.*

## **5.5 CASO IV – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Interruptor de Potencia**

### **5.5.1 Descripción**

Este quinto caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un interruptor de potencia inmerso en aceite mineral, como parte de una inspección rutinaria para mantenimiento y previa nueva puesta en servicio en la Bahía “Milagro 2” a 69kV de la Subestación “Milagro”, localizada en la provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los ensayos dieléctricos aquí aplicados, van dirigidos exclusivamente al análisis total del sistema de aislamiento en conjunto del equipo.

### **5.5.2 Características del Interruptor**

El interruptor de potencia en referencia signado como 52-032, corresponde a uno de tres unidades de polo individual conectadas mecánicamente para operar de forma simultánea como un interruptor trifásico. Cada unidad de polo comprende de un tanque de acero de sección elíptica donde se aloja el sistema de palanca de desconexión y dos bushing's del tipo capacitivos en cuya parte inferior se encuentran los contactos fijos con su respectiva cámara de extinción, todo esto inmerso en aceite mineral aislante.

Sus demás características tanto técnicas como físicas, se detallan en las *figuras anexas 5.15*.

### **5.5.3 Análisis y Diagnóstico del estado del aislamiento total del interruptor**

#### **5.5.3.1 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la medida de la Resistencia de Aislamiento**

Para el análisis del estado del aislamiento total del interruptor en referencia a través de este ensayo, se utilizó el instrumento megohmmetro modelo S1-5001 de la Megger Company, cuyas principales características de fabricación se detallan en la *figura anexa 5.2*.

##### **5.5.3.1.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.G1* del capítulo anterior, referente a este tipo de interruptor, se plantea en el *apéndice 5.F1* del presente capítulo, el análisis completo de cuatro posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.F1* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

*En el análisis de este caso se aplicó únicamente el último de los cuatro ensayos planteados en el apéndice 5.F1.*

### 5.5.3.1.2 Método de medición aplicado

De los métodos recomendados en el ítem 4.3.2.1.4 para la medición de la resistencia de aislamiento en general, se escogió el método de “**tiempo-resistencia**”, que de acuerdo con las características del instrumento de ensayo, este se lo realizó aplicando una tensión constante de 5000 voltios DC al espécimen bajo ensayo, durante el periodo de un minuto.

### 5.5.3.1.3 Evaluación de los resultados obtenidos y Diagnóstico

A partir de las lecturas de resistencia de aislamiento, medidas y registradas en el *formulario anexo 5.F1*, para un mismo ensayo aplicado en cada uno de los tres polos, se realiza el siguiente análisis:

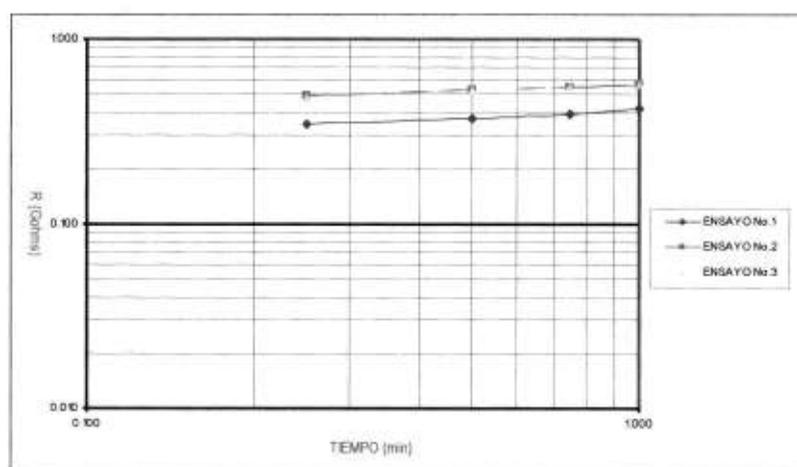
#### *1) Análisis de la interpretación gráfica de las curvas de absorción dieléctrica:*

En vista de que el sistema de aislamiento (aceite-madera) del equipo en referencia, es similar al utilizado tanto en un transformador de potencia como en uno de instrumentación, aquí también se hace aplicable el método expuesto en el CRITERIO II del literal 4.4.2.2.3 para la corrección de los registros de campo a una temperatura referencial de 75°C, permitiendo la evaluación en conjunto de las curvas de absorción dieléctrica obtenidas para cada uno de los tres polos del interruptor. Dichos valores ya

corregidos, son asentados en el mismo *formulario anexo 5.F1* (hojas 1, 2, 3 de 9).

*Al tratarse en este caso el análisis de un interruptor con tres polos de características similares, la comparación de las curvas de absorción dieléctrica obtenidas para cada uno de ellos, ayudaría en la detección de algún problema de consideración al existir una diferencia significativa.*

Por lo tanto, representando en conjunto las curvas de los ensayos aplicados a los respectivos polos del interruptor en referencia, se obtiene lo siguiente:



**Figura 5.15** – *Curvas de absorción de cada ensayo aplicado para medida de la resistencia de aislamiento de los polos del interruptor 52-032- CASO IV*

De este gráfico se puede concluir, que para los tres polos del mismo interruptor se revela un buen comportamiento de los valores de resistencia de aislamiento (es decir, ascendentes con el tiempo de aplicación de la

tensión DC constante de ensayo), no así la curva del polo "A" (ensayo No.1) presenta valores menores en comparación con los otros polos, concluyéndose que en este existen indicios de contaminación de su aislamiento.

## **2) *Análisis de los criterios expuestos en el literal 4.8.2.2.3***

La finalidad de este criterio es investigar si el aceite aislante de inmersión de cada polo del interruptor en referencia presenta contaminación excesiva, para lo cual se requiere verificar si las magnitudes de los registros obtenidos en campo, se encuentran por debajo del mínimo valor recomendado de  $10000M\Omega$  (a  $20^{\circ}C$ ).

Esto nos obliga a establecer un análisis comparativo, requiriéndose que tanto el valor referencial como los registros de campo sean referidos a una misma temperatura. Por tanto, se da la opción de bien corregir todos los registros de campo a la temperatura base de  $20^{\circ}C$ , ó lo más conveniente, corregir el valor referencial del criterio dado a la temperatura base de  $75^{\circ}C$  siendo esta a la cual ya se encuentran corregidos los registros de campo.

Decidiendo corregir el valor mínimo referencial de  $10000M\Omega$  (a  $20^{\circ}C$ ) a una temperatura base de  $75^{\circ}C$  se realiza el siguiente análisis:

- 1) Determinando el factor de corrección, aplicando las expresiones (4.35) y (4.36) del CRITERIO II del literal 4.4.2.2.3, se tiene que:

$$fc = 2^a \quad a = \frac{75^{\circ}\text{C} - \theta}{10}$$

Donde, para este caso  $\theta = 20^{\circ}\text{C}$

$$a = \frac{75^{\circ}\text{C} - 20}{10} = 5,5$$

Siendo:

$$fc = 2^{(5,5)} = 45.2548$$

- 2) Corrigiendo el valor de  $10000\text{M}\Omega$  de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $75^{\circ}\text{C}$ , aplicando la expresión (4.34), se tiene que:

$$R_{i\theta} = R_{i75^{\circ}\text{C}} \cdot fc$$

Donde,  $R_{i\theta} = R_{i20^{\circ}\text{C}} = 10000\text{M}\Omega$  y  $fc = 45.2548$

$$R_{i20^{\circ}\text{C}} = R_{i75^{\circ}\text{C}} \cdot fc \quad \rightarrow \quad R_{i75^{\circ}\text{C}} = \frac{R_{i20^{\circ}\text{C}}}{fc}$$

$$R_{i75^{\circ}\text{C}} = \frac{10000\text{M}\Omega}{45.2548}$$

$$\mathbf{R_{i75^{\circ}\text{C}} = 220.97\text{M}\Omega (0.220\text{G}\Omega)}$$

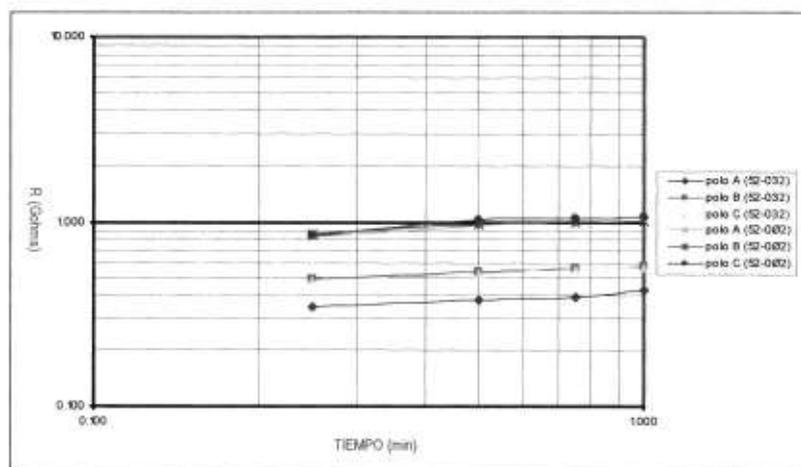
*Por lo tanto, el valor mínimo referencial recomendado de  $10000M\Omega$  a  $20^{\circ}C$ , es equivalente a  $220.97M\Omega$  a  $75^{\circ}C$ .*

Comparando este valor (de  $0.220 G\Omega$ ), con los registros de campo del *formulario anexo 5.F1* (corregidos a  $75^{\circ}C$ ), podemos concluir que todos se encuentran por encima del mínimo referencial dado, descartando algún indicio de contaminación excesiva del aceite inmerso en cada uno de los polos del interruptor en referencia.

No obstante, cabe recalcar que el valor mínimo recomendado por este criterio supone condiciones muy extremas, por tanto, al conocer que el interruptor en referencia no ha sido sometido a ensayos periódicos anuales luego de su instalación, se crea la necesidad de establecer un análisis más detallado comparando sus registros con resultados de ensayos en otra unidad similar instalada en el mismo sistema, pero que según sus historiales de operación se conozca que no haya sido expuesto a muchas operaciones.

De esta forma, considerando que el interruptor 52-002 de la posición de transferencia de dicho esquema de barras, por lo general se ve expuesto a muy pocas operaciones con consecuente reducida deterioración de su aislamiento, este podría permitir establecer un criterio de comparación útil de cuan bajos están siendo los registros de resistencia de aislamiento del equipo en referencia.

Por lo tanto, realizando los respectivos ensayos a esta unidad y tomando en cuenta sus los registros asentados en el *formulario anexo 5.F1 (hojas 4, 5, 6 de 9)*, se plantea el siguiente gráfico comparativo del análisis de las curvas de absorción de ambas unidades de similares características:



**Figura 5.16** – Curvas de absorción de cada ensayo aplicado para medida de la resistencia de aislamiento de los polos de interruptores 52-032 y 52-002- CASO IV

Es evidente en este último gráfico, que las curvas de absorción dieléctrica obtenidas para los tres polos del interruptor 52-002, se encuentran muy por encima de las obtenidas para los tres polos del interruptor 52-032, con una diferencia de casi el doble de sus respectivos valores de resistencia de aislamiento.

*Esto nos conlleva diagnosticar en primera instancia, que existe un alto grado de contaminación del aislamiento involucrado en el interruptor 52-032. Dicha contaminación sin duda alguna se atribuye a la presencia de agua y a la carbonización del aceite aislante producto de las varias extinciones de arco*

*que se han dado durante su tiempo en servicio, en especial por ser este un interruptor de una posición de línea propenso a varias interrupciones por fallas.*

La significativa diferencia en el estado del aislamiento de ambos interruptores, se la pudo apreciar al inspeccionar internamente el tanque de cada uno de sus polos, cuyas imágenes captadas durante estos trabajos, se presentan en las figuras anexas 5.16.A,B,C,D,E,F y 5.17.A,B,C,D,E,F.

*En conclusión, el mínimo referencial recomendado en el criterio del literal 4.8.2.2.3 debe considerarse como un valor mínimo extremo, siendo recomendable realizar un seguimiento periódico del estado del aislamiento de este tipo de interruptor evitando llegar a una condición de alto grado de contaminación que permita el colapso de su normal funcionamiento.*

#### **5.5.3.1.4 Acciones tomadas**

En respuesta al diagnóstico del estado del aislamiento del interruptor en referencia, como primera instancia se aplicaron los siguientes trabajos correctivos:

- 1) Lavado con aceite aislante limpio y libre de humedad, de los componentes internos de cada uno de los polos del interruptor. Realizándose a la vez, una inspección visual minuciosa del estado de tales componentes.

- 2) Llenado de cada tanque de los respectivos polos del interruptor, con aceite aislante nuevo, sometido a proceso previo de reacondicionamiento.

Posterior al llenado de cada tanque de los tres polos del interruptor, se dejó en reposo (por 24 horas) el aceite aislante con el fin de lograr un equilibrio de la humedad con los aislamientos celulósicos también presentes en su interior (efecto a explicarse con mayor detalle en el capítulo VI), tal es el caso de la varilla de operación. Es así que luego de cumplido este periodo, se sometió el interruptor nuevamente a ensayos de medida de su resistencia de aislamiento para confirmar la mejoría de su estado con los trabajos correctivos aplicados, siendo los resultados obtenidos los que se muestran en el *formulario anexo F.1* (hojas 7, 8, 9 de 9)

*Fotografías captadas durante la ejecución de estos trabajos correctivos en campo, se muestran en las figuras anexas 5.18.A, B, C, D, E, F.*

### **5.5.3.2 Análisis y diagnóstico a partir del ensayo para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento**

A pesar de recomendarse su aplicación, este ensayo no fue considerado en el análisis del estado del aislamiento del equipo en referencia. No obstante, con la finalidad de aportar con información valiosa al respecto, se presenta a

continuación el análisis de cada uno de los ensayos a ser aplicados y la interpretación de resultados supuestos para varios casos que podrían presentarse.

#### **5.5.3.2.1 Ensayos aplicados**

Tomando en cuenta los ensayos recomendados en el *apéndice 4.F1* del capítulo anterior, referente a este tipo de interruptor, se plantea en el *apéndice 5.F2* del presente capítulo, el análisis completo de tres posibles tipos de ensayos que pueden ser aplicados. Es en base a este análisis, que se define el *formulario anexo 5.F2* para el registro de los resultados obtenidos en campo.

#### **5.5.3.2.2 Evaluación de resultados de casos supuestos y diagnóstico**

Para este caso, la evaluación de los resultados obtenidos, parte del análisis en conjunto del cuestionamiento del Índice de Pérdidas en el Tanque TLI (basado en la *tabla anexa 4.S1*) y el comportamiento de los valores de factor de potencia y pérdidas en cada una de las secciones de aislamiento analizadas en los respectivos ensayos, tanto con el interruptor “abierto” como “cerrado”.

De esta forma, en base a la experiencia en el mantenimiento de este tipo de equipo primario y a la recopilación de mucha información de interés publicada por los varios fabricantes tanto de interruptores como de instrumentos de

ensayo, se expone a continuación el análisis y diagnóstico de cinco casos supuestos, considerados como los más comunes en presentarse:

### **CASO 1 (Formulario anexo 5.F2 – hoja 1 de 5)**

Este caso trata sobre los registros del *formulario anexo 5.F2 - hoja 1 de 5*, en base a los cuales se realiza el siguiente análisis:

#### *1) Cuestionamiento del Índice de Pérdidas en el Tanque TLI*

Según el cuestionamiento de la *tabla anexa 4.S1*, este índice se encuentra dentro del rango de  $-0.10W$  a  $+0.05W$ , lo cual revela un aislamiento en condiciones normales.

#### *2) Comportamiento de los valores de Factor de Potencia (en %) y Pérdidas (en Watts)*

La similitud entre valores de factor de potencia y pérdidas obtenidos de ensayos separados de cada bushing de un mismo polo con el interruptor en posición “abierto”, revela el estado normal del aislamiento correspondiente.

Por otra parte, el ligero decrecimiento del factor de potencia en el ensayo con el interruptor “cerrado”, se debe al incremento de capacitancia que se origina al considerar el doble (en paralelo) de la porción de aislamiento en

análisis. De igual forma, el ligero aumento de pérdidas en el ensayo con el interruptor “cerrado” se debe al incremento de volumen de aislamiento en análisis.

*Por tanto, a partir de este análisis desarrollado se puede diagnosticar que el interruptor no presenta indicios de contaminación y/o deterioración de su aislamiento integro.*

### **CASO 2 (Formulario anexo 5.F2 – hoja 2 de 5)**

Este caso trata sobre los registros del *formulario anexo 5.F2 - hoja 2 de 5*, en base a los cuales se realiza el siguiente análisis:

#### *1) Cuestionamiento del Índice de Pérdidas en el Tanque TLI*

Según el cuestionamiento de la *tabla anexa 4.S1*, este índice se encuentra dentro del rango  $-0.10W$  a  $-0.20W$ , donde se recomienda realizar ensayos en una base más frecuente y se dan indicios de posibles problemas en el aislamiento correspondiente al ensamblaje guía de la varilla de operación, ensamblaje de contactos fijos (cámara de interrupción) y la porción superior de la varilla de operación.

2) *Comportamiento de los valores de Factor de Potencia (en %) y Pérdidas (en Watts)*

En el ensayo del interruptor en posición “abierto” tomando como referencia el bushing #2, se presenta un incremento considerable de los valores tanto de factor de potencia como de pérdidas en el aislamiento. El origen de este evento puede deberse a dos situaciones: problema interno en el bushing o problema de humedad u otro tipo de contaminación en la cámara de interrupción que conforma esta sección en análisis. Para poder determinar la posible causa, es necesario aplicar ensayos separados a cada elemento aislante independiente, por ejemplo:

- El bushing al ser del tipo capacitivo, permite analizar su aislamiento interno mediante la toma de derivación (toma capacitiva). Esto, sin necesidad de ser desmontado del interruptor.

*El diagnóstico sobre este caso se podrá emitir luego de analizar los criterios de cuestionamiento recomendados en el literal 4.10.2.1.4.*

- La cámara de interrupción puede ser analizada por separado con la aplicación de este ensayo mediante el modo UST, cuyo método de aplicación se muestra en detalle en la *figura anexa 5.19.A.*

*Si se obtienen valores de factor de potencia mucho mayores a 20% con un voltaje de ensayo de 10kV, se puede diagnosticar que dicho elemento presenta problemas de contaminación debido especialmente a la presencia de exceso de humedad.*

Por otra parte, al obtenerse en el ensayo con el interruptor “cerrado”, un valor de factor de potencia un poco menor que el obtenido en el ensayo con el interruptor “abierto” tomando como referencia el bushing #1, se puede concluir rápidamente que el problema presente en el bushing #2 no se debe a contaminación alguna de su aislamiento interno y/o externo, y se presumiría que este prácticamente radica en la cámara de interrupción.

*Cabe recalcar, que si el valor de factor de potencia obtenido en el ensayo con el interruptor “cerrado”, hubiera sido alto muy cercano al obtenido en el ensayo con el interruptor “abierto” referenciado al bushing #2, era condición suficiente para presumir que el problema se deba a su contaminación interna y/o externa. Además, esto implicaría obtener un TLI de pequeño valor negativo (en el rango de entre -0.10 y +0.05)*

### **CASO 3 (Formulario anexo 5.F2 – hoja 3 de 5)**

Este caso trata sobre los registros del *formulario anexo 5.F2 - hoja 3 de 5*, en base a los cuales se realiza el siguiente análisis:

#### *1) Cuestionamiento del Índice de Pérdidas en el Tanque TLI*

Según el cuestionamiento de la *tabla anexa 4.S1*, este índice se encuentra dentro del rango  $-0.10W$  a  $-0.20W$ , donde se recomienda realizar ensayos en una base más frecuente y se dan indicios de posibles problemas en el aislamiento correspondiente al ensamblaje guía de la varilla de operación, ensamblaje de contactos fijos (cámara de interrupción) y la porción superior de la varilla de operación.

#### *2) Comportamiento de los valores de Factor de Potencia (en %) y Pérdidas (en Watts)*

En primera instancia, al obtenerse bajos valores tanto de factor de potencia como pérdidas en el ensayo del interruptor en posición “cerrado”, se puede descartar algún problema en el aislamiento de ambos bushing’s (#1 y #2). No así, los ensayos del interruptor en posición “abierto” referenciado a cada bushing, presentan valores similares y altos tanto de factor de potencia como de pérdidas, muy por encima de los resultados obtenidos en el ensayo con el interruptor “cerrado”, siendo el posible origen de este evento las

siguientes situaciones: deterioración del ensamblaje guía de la varilla de operación, deterioración de la parte más alta de la propia varilla de operación o problema de humedad u otro tipo de contaminación en ambas cámaras de interrupción tanto del bushing #1 como del bushing #2. Este último considerado como un caso muy coincidente.

Para determinar la posible causa, es recomendable aplicar ensayos separados a cada elemento aislante independiente, por ejemplo:

- Tanto el ensamblaje guía como la varilla de operación, ambas de material celulósico (madera), pueden ser analizadas mediante el cuestionamiento de sus pérdidas dieléctricas (o resistencia AC) determinadas con la aplicación de este ensayo mediante el modo UST, cuyo método se conoce como de “tres electrodos” y su aplicación se muestra en detalle en la *figura anexa 5.19.B*.

*Si se obtienen valores de pérdidas iguales o mayores a 0.20watts con un voltaje de ensayo de 10kV, se puede diagnosticar que dicho elemento presenta problemas de contaminación debido especialmente a la presencia de humedad.*

- La cámara de interrupción puede ser analizada por separado con la aplicación del mismo método que ya se puso en detalle en el caso anterior.

*Si se obtienen valores de factor de potencia mucho mayores a 20% con un voltaje de ensayo de 10kV, se puede diagnosticar que dicho elemento presenta problemas de contaminación debido especialmente a la presencia de exceso de humedad.*

#### **CASO 4 (Formulario anexo 5.F2 – hoja 4 de 5)**

Este caso trata sobre los registros del *formulario anexo 5.F2 - hoja 4 de 5*, en base a los cuales se realiza el siguiente análisis:

##### *1) Cuestionamiento del Índice de Pérdidas en el Tanque TLI*

Según el cuestionamiento de la *tabla anexa 4.S1*, este índice se encuentra dentro del rango mayor a +0.10W, donde se recomienda investigar inmediatamente las causas, dándose indicios de posibles problemas en el aislamiento correspondiente a la varilla de operación, el aceite y/o el revestimiento interno del tanque.

2) *Comportamiento de los valores de Factor de Potencia (en %) y Pérdidas (en Watts)*

En primera instancia, al obtenerse similarmente bajos valores tanto de factor de potencia como de pérdidas en ambos ensayos del interruptor en posición “abierto”, se puede descartar algún problema en el aislamiento de ambos bushing’s (#1 y #2). No así, los ensayos del interruptor en posición “cerrado”, presentan valores altos tanto de factor de potencia como de pérdidas, muy por encima de los resultados obtenidos en los ensayo con el interruptor “abierto”, siendo el posible origen de este evento las siguientes situaciones: deterioración de la varilla de operación, contaminación del revestimiento interno del tanque y anormalmente alta resistencia de contacto.

Para determinar la posible causa, en cuanto a la varilla de operación, se podría aplicar el método ensayo de “tres electrodos” como ya se explico en el anterior caso; lo mismo no sucede con el revestimiento interno del tanque, el cual no se presta para la implementación de un ensayo en campo que permitiera corroborar su estado de aislamiento. Por otra parte, si existiera alta resistencia de contacto, esta podría verificarse mediante un ensayo de tipo eléctrico utilizando un instrumento especial (ducter) para mediciones de baja resistencia (en el orden de los  $\mu\text{ohm}$ ).

*Para el caso de los ensayos en la varilla de operación, si se obtienen valores de pérdidas mayores a 0,20watts con un voltaje de ensayo de 10kV, se puede diagnosticar que dicho elemento presenta problemas de contaminación debido especialmente a la presencia de exceso de humedad. Mientras que para el caso de la medida de la resistencia de contactos, si esta se presentara muy por encima de los valores de fábrica, se puede diagnosticar la presencia de excesivas pérdidas por efecto joule entre contactos.*

#### **CASO 5 (Formulario anexo 5.F2 – hoja 5 de 5)**

Este caso trata sobre los registros del *formulario anexo 5.F2 - hoja 5 de 5*, en base a los cuales se realiza el siguiente análisis:

##### *1) Cuestionamiento del Índice de Pérdidas en el Tanque TLI*

Según el cuestionamiento de la *tabla anexa 4.S1*, este índice se encuentra dentro del rango +0.05W a +0.10W, donde se recomienda realizar ensayos en una base más frecuente y se dan indicios de posibles problemas en el aislamiento correspondiente a la varilla de operación, el aceite y/o el revestimiento interno del tanque.

2) *Comportamiento de los valores de Factor de Potencia (en %) y Pérdidas (en Watts)*

Al obtenerse altos valores de factor de potencia y de pérdidas en las secciones de aislamiento involucradas en ambos ensayos tanto con el interruptor “abierto” como “cerrado”, es posible que se estén presentando una de las siguientes situaciones: que exista coincidentemente la contaminación del aislamiento (interno y/o externo) de ambos bushing's o que el aceite propiamente se encuentre con alto grado de contaminación y/o deterioración.

Para poder determinar la posible causa, es necesario aplicar ensayos separados a cada elemento aislante independiente, por ejemplo:

- El bushing, como ya se trato anteriormente, al ser del tipo capacitivo, permite analizar su aislamiento interno mediante la toma de derivación (toma capacitiva). Esto, sin necesidad de ser desmontado del interruptor.

*El diagnóstico sobre este caso se podrá emitir luego de analizar los criterios de cuestionamiento recomendados en el literal 4.10.2.1.4.*

- El aceite aislante, puede ser muestreado desde su válvula inferior de drenaje, para someterse al método de ensayo descrito en el literal 4.5.3.2.1

*El diagnóstico sobre este caso se podrá emitir luego de analizar los criterios de cuestionamiento recomendados en el literal 4.5.3.2.2*

Si se determina que la condición causante de los valores anormales de este ensayo, se debe a la contaminación del aceite por los motivos ya expuestos en el capítulo III, se recomienda el lavado minucioso de los elementos internos del tanque con aceite limpio, y el reemplazo o reacondicionamiento del aceite retirado. Posteriormente al nuevo llenado del tanque, se recomienda volver a realizar los ensayos respectivos que permitan determinar el estado del equipo para su nueva puesta en servicio.

## **5.6 CASO V – Análisis y Diagnóstico en campo del estado del aislamiento de un Equipo Encapsulado**

### **5.6.1 Descripción**

Este quinto caso trata sobre el análisis y diagnóstico en campo, del estado del aislamiento de un equipo encapsulado en gas SF<sub>6</sub> recientemente instalado, como

parte de su recepción y previa puesta en servicio en la Subestación “Salitral”, localizada en la provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

El ensayo dieléctrico aquí aplicado, va dirigido al análisis total del sistema de aislamiento en conjunto del equipo.

### **5.6.2 Características del Equipo Encapsulado**

El equipo encapsulado en referencia, corresponde a una subestación blindada en gas SF<sub>6</sub> tipo 8DN9, marca SIEMENS-Alemania, diseñada para operar a una tensión nominal de 72.5kV. Comprende de un esquema de doble barra colectora y se encuentra compuesta de diez bahías individuales, de las cuales una cumple la función de acoplador de barras y las nueve restantes son posiciones de línea, cada una con posibilidad de ser transferida en operación.

Sus demás características tanto técnicas como físicas, se detallan en las figuras *anexas 5.20 y 5.21.A, B, C, D*, de este capítulo.

### **5.6.3 Método de ensayo aplicado**

Siguiendo las recomendaciones del fabricante, al tratarse este equipo encapsulado de uno recientemente instalado, donde se hace necesario verificar el

estado de su aislamiento previamente a la primera puesta en servicio, se aplicó el método ensayo de alta tensión con circuito de resonancia AC en serie de frecuencia variable.

Tomando como referencia el *apéndice 4.11* del capítulo anterior para la implantación de este método de ensayo, el técnico de SIEMENS estableció cuatro esquemas de análisis del equipo encapsulado en referencia, acorde con sus dimensiones y disposición física. Estos esquemas se muestran en las *figuras anexas 5.22.A, B, C y D*, siendo que cada uno considera una sección específica del equipo encapsulado para su análisis.

Los resultados obtenidos de los cuatro esquemas de ensayos aplicados, se registraron en los formularios de recepción de SIEMENS correspondientes a las *tablas anexas 5.C1, 5.C2, 5.C3 y 5.C4*.

#### **5.6.4 Ensamblaje del circuito de ensayo en campo**

El ensamblaje del circuito de ensayo en campo se lo realizó en base al esquema de la figura 4.58 del capítulo anterior, con la única diferencia que la fuente de alimentación para el caso en referencia, fue tomada directamente de los servicios auxiliares de la subestación (208 Vac) y no de un generador. En las *figuras anexas 5.23, 5.24 y 5.25.A, B, C*, pueden apreciarse tanto el circuito de ensayo implantado

en campo, como las correspondientes características de cada uno de sus componentes principales que lo conforman.

Debido a las dimensiones del equipo reactor de potencia, este requirió ser ensamblado en campo. Dicho ensamblaje comprendió: la instalación de sus contactos principales internos (uno tipo esférico y otro tipo barra), la instalación del único bushing cuyo terminal principal hace de punto de aplicación de alto voltaje, y el respectivo proceso de evacuación y llenado con gas SF<sub>6</sub> (a presión nominal 5bar) como medio aislante para todo el equipo reactor. En las *figuras anexas 5.26.A, B, C, D, E, F*, se muestra en detalle todo el proceso de ensamblaje de este equipo.

Posterior al ensamblaje del reactor, se procedió a acoplar los demás equipos, estableciendo el circuito de ensayo citado anteriormente en la *figura anexa 5.23*.

Cabe recalcar que el equipo reactor puede ser acoplado tanto directamente a las barras colectoras del equipo encapsulado por medio de una de sus bridas laterales (según muestra la *figura anexa 5.27*), como externamente mediante aplicación de un bushing como se dio en este caso, siendo el único requerimiento el instalarlo lo más próximo a los puntos de aplicación en el equipo encapsulado como los son los bushing's de salida de una de sus bahías en referencia.

### 5.6.5 Análisis y diagnóstico del estado del aislamiento total del equipo encapsulado

El análisis del estado del aislamiento en este caso, se basa únicamente en la verificación del cumplimiento del criterio recomendado en el literal 4.9.3.3.2 del capítulo IV, para los cuatro esquemas de ensayos descritos en las *figuras anexas 5.22.A, B, C, D* y cuyos resultados se detallan en las *tablas anexas 5.C1, 5.C2, 5.C3 y 5.C4*.

Tomando en cuenta la metodología del ensayo recomendada en el literal 4.9.3.3.1 del capítulo anterior, se determinaron los voltajes de alta tensión a ser aplicados en el ensayo, siendo estos los siguientes:

1. Primer voltaje aplicado por 15 minutos  $\rightarrow 1,2U_r/\sqrt{3}$

$$1,2U_r/\sqrt{3} = 1,2 \cdot (72.5\text{kV})/\sqrt{3} = 50.23\text{kV}$$

*(Aplicado con el equipo de ensayo: 50kV)*

2. Segundo voltaje aplicado por 3 minutos  $\rightarrow U_r$

$$U_r = 72.5\text{kV}$$

*(Aplicado con el equipo de ensayo: 72kV)*

3. Tercer voltaje aplicado por 1 minuto (voltaje de ensayo)  $\rightarrow U_{ds}$

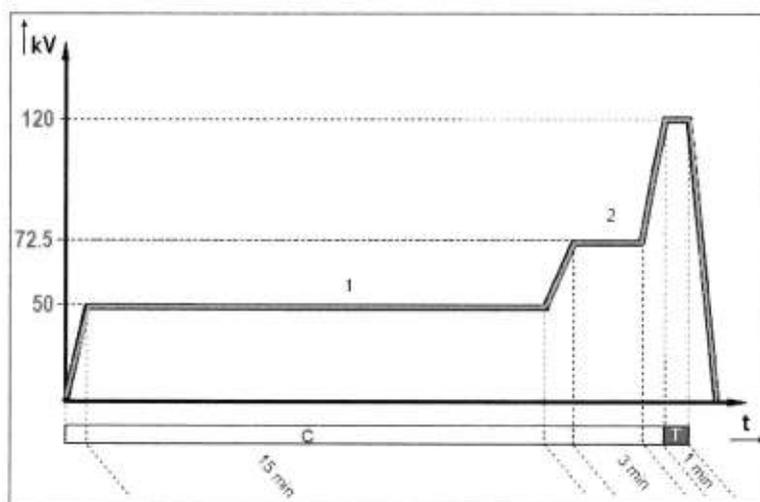
$U_{ds} = 80\%$ (voltaje breve duración según tabla 102 norma IEC 62271-203)

$U_{ds} = 80\%$ (140kV)

**$U_{ds} = 112\text{kV}$**

*(Aplicado con el equipo de ensayo: 120kV)*

A partir de estos voltajes, se determinó la curva *voltaje de ensayo vs tiempo* a ser utilizada como referencia para el cuestionamiento de los parámetros a evaluar con este ensayo:



**Figura 5.17** – Curva “ voltaje de ensayo vs tiempo” aplicada en CASO V

Es así, que durante la ejecución de los cuatro esquemas de ensayo descritos en las *figuras anexas 5.22.A, B, C y D* para cada uno de los polos del equipo encapsulado, se pudo constatar, que las correspondientes secciones de aislamiento bajo ensayo,

NO presentaron falla alguna ante la aplicación del alto voltaje de 120 kV durante el periodo de un minuto.

*Por lo tanto, esto nos permite diagnosticar que el ensamblaje del equipo encapsulado ha sido realizado adecuadamente y no existe presencia de contaminación alguna dentro de sus compartimentos, dado especialmente por humedad y/o partículas extrañas que originen caminos preferenciales de descargas.*

#### **5.6.6 Análisis de otros parámetros del ensayo**

Adicionalmente a los parámetros de frecuencia de resonancia y alto voltaje de ensayo aplicado, el equipo variador de frecuencia RSE 70 presentaba también el valor de la corriente capacitiva de fuga a través de la sección de aislamiento bajo ensayo. A pesar de que este último parámetro, no guarda relación con el objetivo principal del ensayo, ayuda a establecer criterios de comparación entre las secciones ensayadas y mucho mejor entre polos de una misma sección en análisis.

La capacitancia de la sección del aislamiento bajo ensayo, es otro parámetro adicional que puede ser determinado a partir de los resultados de la frecuencia de resonancia y demás datos de placa de los equipos del circuito. Es así, que tomando como ejemplo los resultados obtenidos de la aplicación del esquema de ensayo #1 con referencia a la figura anexa 5.22.A y la tabla anexa 5.C1, se expone a continuación los respectivos cálculos para su determinación:

1. Cuando el circuito entra en resonancia, es decir, cuando la reactancia capacitiva del aislamiento y la reactancia inductiva del reactor de potencia se equilibran a una cierta frecuencia, se establece la siguiente expresión:

$$XL=XC \quad (5.6)$$

$$wL=1/wC$$

donde:

**L:** inductancia de placa del reactor de potencia (720H)

**W:**  $2\pi f$

**f:** frecuencia de resonancia del circuito bajo ensayo.

**C:** capacitancia de la sección de aislamiento bajo ensayo

2. Como el valor de frecuencia de resonancia depende directamente de la capacitancia de la sección de aislamiento bajo ensayo, esta varía según su magnitud. Es así, que para el análisis de las secciones de aislamiento de cada polo del esquema de ensayo #1, se dieron los siguientes resultados:

Sección de prueba	Celdas: Felder: =F05 + =F01 + =F02			Incluyendo barra mit Sammelschiene:	Barra 1		
Tensión de prueba Prüfspannung (kV)	Frecuencia de prueba Prüffrequenz			Tiempo de prueba Prüfzeit (min)	Corriente capacitiva Ladestrom		
	Polo A Eql. A (Hz)	Polo B Pol. B (Hz)	Polo C Eql. C (Hz)		Polo A Pol. A A	Polo B Pol. B A	Polo C Pol. C A
50	79.1	80.2	82.1	15	0.1	0.1	0.1
72	79.1	80.2	82.1	3	0.2	0.1	0.1
120	79.1	80.2	82.1	1	0.3	0.3	0.3

**Tabla 5.26 – Cuadro de resultados del esquema de ensayo #1**

3. Aplicando los resultados de frecuencia de resonancia del esquema de ensayo #1, en la fórmula 5.6 de equilibrio de reactancias del circuito, despejando la capacitancia  $C$ , se tiene que:

$$\omega L = 1/\omega C$$

$$C = 1/\omega^2 L$$

Para el polo "A":

$$C = 1/(2 \cdot \pi \cdot 79.1 \text{Hz})^2 \cdot 720 \text{H}$$

$$C = 5.6228 \text{nf}$$

Para el polo "B":

$$C = 1/(2 \cdot \pi \cdot 80.2 \text{Hz})^2 \cdot 720 \text{H}$$

$$C = 5.4696 \text{nf}$$

Para el polo "C":

$$C = 1/(2 \cdot \pi \cdot 82.1 \text{Hz})^2 \cdot 720 \text{H}$$

$$C = 5.2194 \text{nf}$$

Comparando los resultados obtenidos tanto de frecuencia de resonancia como de capacitancia del aislamiento, con las secciones del equipo encapsulado según el análisis del esquema de ensayo #1, se puede concluir que:



- *A mayor sección de equipo encapsulado en análisis, con mayor volumen de aislamiento involucrado, se requiere menor frecuencia de resonancia en el circuito de ensayo.*
- *A mayor sección de equipo encapsulado en análisis, con mayor volumen de aislamiento involucrado, se obtiene mayor capacitancia en el circuito de ensayo.*

*Fotografías captadas durante la ejecución de estos ensayos en campo, se muestran en las figuras anexas 5.28.A, B, C y 5.29.A, B, C, D.*

## **CAPÍTULO VI**

### **6. MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA PRESERVACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN**

#### **6.1 MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA PRESERVACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

##### **6.1.1 TRATAMIENTO DEL ACEITE AISLANTE**

###### **6.1.1.1 Consideraciones Generales**

Las alteraciones de las propiedades físico-químicas que el aceite sufre durante su uso, pueden ser restauradas a través de métodos adecuados de tratamiento, logrando que finalmente este líquido aislante vuelva a condiciones iguales e inclusive mejores que las iniciales. Estos métodos de tratamiento son los siguientes:

- a) Métodos de reacondicionamiento del aceite aislante
- b) Métodos de recuperación o regeneración del aceite aislante.

*La selección del método de tratamiento del aceite aislante, depende de las condiciones y del estado en las cuales este se encuentre, es decir, si estuviere contaminado o deteriorado.*

### **6.1.1.2 Métodos de reacondicionamiento del aceite aislante**

Este proceso de tratamiento se lo aplica al aceite contaminado, con el propósito de remover por medios mecánicos la humedad, gases y las partículas sólidas en suspensión, manteniendo o incrementando su rigidez dieléctrica.

Existen tres métodos para efectuar el reacondicionamiento de líquidos aislantes y estos son: la filtración, la centrifugación y la deshidratación al vacío o termovacío.

#### **6.1.1.2.1 Método de filtración**

A través de la filtración se puede remover del aceite el agua no disuelta y las partículas sólidas en suspensión. Este método se basa en el uso de la máquina de filtro-prensa, donde sus partes principales son el filtro y la bomba. El filtro es formado por una serie de placas y cuadros (bastidores o marcos) de hierro fundido, entre los cuales se prensan las hojas de papel de filtro.

La capacidad de filtración de la máquina de filtro-prensa, varía conforme las dimensiones de las placas. Existen filtros con capacidad entre 20 a 100 litros/min.

El diagrama esquemático de la máquina de filtro-prensa y las partes que conforman uno de sus filtros, se detallan en las *figuras anexas 6.1.A, B, C, D*.

La acción de la máquina de filtro-prensa sobre las impurezas contenidas en el aceite, se resume en la siguiente tabla:

<i>CONTAMINANTES</i>	<i>EFICIENCIA DE LA MÁQUINA</i>
<i>Agua emulsionada</i>	<i>Parcial</i>
<i>Agua disuelta</i>	<i>Parcial</i>
<i>Aire y gases</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Sólidos no coloidales</i>	<i>Excelente</i>
<i>Coloidales-Partículas y lodos</i>	<i>Parcial</i>
<i>Acidez</i>	<i>Ninguna</i>

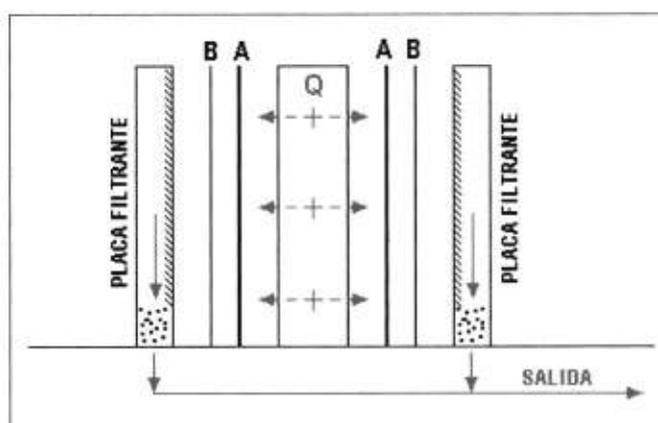
**Tabla 6.1** – Acción de la máquina filtro-prensa sobre las impurezas en el aceite

### **1. Principio de operación de la máquina de filtro-prensa**

En forma general, el aceite es succionado hacia la máquina y bombeado para el canal de admisión, para luego penetrar en el espacio interno de los cuadros de filtrado, siendo entonces forzado a pasar por el papel filtro, fluyendo por sus ranuras hasta alcanzar el canal de salida ya purificado.

El aceite al entrar en el filtro-prensa, se divide igualmente por todos los cuadros filtrantes con la presión que recibe, atraviesa el papel filtro y va directo a la placa filtrante, donde es retirado por pequeños orificios localizados en la parte inferior de la placa y transferido para el canal de salida.

La siguiente figura muestra un modelo esquemático del paso del aceite por el filtro, donde **Q** es el cuadro filtrante, **A** es el papel con porosidad de  $3\mu\text{m}$  y **B** es el papel con porosidad de  $1\mu\text{m}$ .



*Figura 6.1 – Modelo esquemático del paso del aceite en el filtro*

En el inicio del filtrado, es conveniente utilizar apenas dos hojas de papel filtro entre las secciones del filtro prensa, haciendo circular el aceite primero por la hoja de mayor espesura y después por la de menor espesura (Ver la figura anterior); posteriormente se deberá utilizar de dos a cuatro hojas de papel filtro. Este procedimiento se basa en el hecho de que en el primer recorrido del aceite por el equipo, este podrá estar muy sucio, aumentando un esfuerzo excesivo de la máquina. De esta forma, siempre es conveniente verificar el color y el estado de los papeles filtro a ser utilizados, para establecer las diferencias entre el antes y el después

*La capacidad del filtro prensa depende de la temperatura del aceite, siendo que éste, a una temperatura más caliente circula con mayor facilidad que el frío. La temperatura adecuada para la operación de filtrado está entre 20°C y 40°C. Bajo esta faja, la viscosidad del aceite aumenta rápidamente, reduciendo la capacidad del filtro, mientras que por encima de 40°C el aceite circula con más facilidad, permitiendo que la humedad y algunos contaminantes se disuelvan y no puedan retirarse con el filtrado.*

## **2. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) La conexión entre el transformador y la máquina de filtro-prensa debe realizarse según el diagrama mostrado en la *figura anexa 6.2*. Donde, la entrada de la máquina es conectada a la válvula inferior de la cuba del transformador y la salida a la válvula superior.
- 2) No se deben usar mangueras de caucho común. Normalmente se utilizan mangueras de neopreno resistente al aceite (con mallado metálico).
- 3) Es necesario que durante el proceso de reacondicionamiento se controle el contenido agua presente en el papel filtro, ya que un

contenido saturante en esta, requerirá de su reemplazo. Para tal situación, existen los siguientes criterios:

- a. Cuando la presión del manómetro de la máquina filtro-prensa indique presiones de filtrado con valores superiores a los recomendados por el fabricante (normalmente mayor a 3.6 Kg/cm<sup>2</sup>), es un indicativo de que el papel se encuentra saturado y debe ser sustituido.
- b. Si dos muestras de un mismo aceite, antes y después del filtrado, indicaran valores bajos e iguales de rigidez dieléctrica, es un indicativo de que el papel se encuentra saturado y debe ser sustituido. Por tanto, es recomendable realizar frecuentes ensayos de rigidez dieléctrica del aceite desde el inicio y durante el proceso de filtración,

Como referencia, se indica a continuación el tiempo que el papel filtro puede ser usado eficientemente, basado en la rigidez dieléctrica que el aceite aislante presente antes de ser sometido al proceso de filtración:

<i><b>RIGIDEZ DIELECTRICA INICIAL (KV)</b></i>	<i><b>TIEMPO ESTIMADO (horas)</b></i>
<i>10</i>	<i>½</i>
<i>15</i>	<i>2</i>
<i>20</i>	<i>6</i>

**Tabla 6.2** – Relación entre los valores de rigidez dieléctrica inicial del aceite y el tiempo estimado de durabilidad del papel filtro a ser utilizado.

*El papel de filtro absorbe agua hasta que sea alcanzado el equilibrio con el contenido de agua del aceite, esto a la temperatura que se esta realizando el proceso de filtración.*

- 4) El papel filtro que ha sido retirado de la máquina y que se encuentra saturado de agua, debe ser sometido inmediatamente a un proceso de secado en estufas especiales diseñadas para cada tamaño de papel filtro padronizado.

Estas estufas, se encuentran equipadas con astas para soporte de las hojas de papel y un termostato que debe ser regulado para la temperatura de 100°C. En ellas, existen diversos compartimentos de secado independientes, con sistema de chimenea, que prevé una distribución uniforme de calor, permitiendo igualmente la sustitución de aire húmedo por aire seco. Adicionalmente, tienen un ducto de aceite para que los papeles usados no presenten peligro de inflamación en las resistencias de calentamiento.

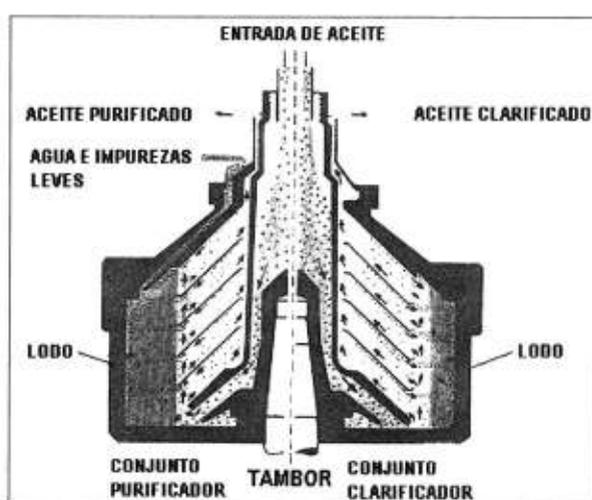
Las hojas de papel filtro deben estar espaciadas 2mm dentro de la estufa y calentadas por un tiempo de 6 a 12 horas, para asegurar un mejor secado. Inmediatamente, son colocadas en el filtro prensa para su uso, debido a que por sus características higroscópicas, reabsorbe cerca de 2/3 de la humedad total en tan sólo 10 minutos.

*En las figuras anexas 6.3.A, B, C se da una idea de este instrumento en forma detallada.*

### 6.1.1.2 Método de Centrifugación

La centrifugación es un medio muy conveniente de separar mecánicamente del aceite el agua y contaminantes libres en suspensión, tales como, sedimentos y carbón. El agua disuelta en el aceite no es removida por este método.

Se basa en el uso de separadoras centrífugas que poseen un tambor giratorio de alta velocidad, el cual puede ser del tipo clarificador o purificador. En el primero, el aceite es descargado quedando en la separadora el agua y las impurezas sólidas; en el segundo, se tiene la remoción de partículas sólidas y dos tipos de líquido.



*Figura 6.2 – Tambor de una máquina centrífuga*

*La máquina centrífuga puede retirar mayor concentración de contaminantes que la máquina filtro-prensa convencional, más no puede remover algunos de los contaminantes de manera tan eficiente.*

En consecuencia, esta máquina es generalmente utilizada para el procesamiento de grandes cantidades de aceite contaminado. Frecuentemente el líquido aislante, después de la centrifugación, es pasado a través del filtro prensa para una purificación final.

La acción de la máquina centrífuga sobre las impurezas contenidas en el aceite, se resume en la siguiente tabla:

<i>CONTAMINANTES</i>	<i>EFICIENCIA DE LA MÁQUINA</i>
<i>Agua emulsionada</i>	<i>Excelente</i>
<i>Agua disuelta</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Aire y gases</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Sólidos no coloidales</i>	<i>Parcial</i>
<i>Coloidales-Partículas y lodos</i>	<i>Parcial</i>
<i>Acidez</i>	<i>Ninguna</i>

**Tabla 6.3** – *Acción de la máquina centrífuga sobre las impurezas*

En general los límites de temperatura para el procesamiento se sitúan entre 40°C y 80°C, siendo la temperatura óptima recomendada de 60°C. No obstante, para que el agua pueda ser plenamente removida del aceite por centrifugación, su temperatura debe estar entre 49°C y 52°C; debido a que temperaturas más elevadas podrían aumentar la cantidad de agua disuelta.

### 6.1.1.2.3 Método de deshidratación al vacío o termovacío

Este método consiste en la circulación del aceite aislante por medio de una máquina purificadora que posea dispositivos de filtración, de calentamiento y una cámara de desgasificación donde se aplica alto vacío.

La desgasificación y la deshidratación térmica acelerada con aplicación de alto vacío en aceite de transformadores de potencia, es uno de los métodos más eficientes y económicos para la remoción de agua disuelta y gases.

La acción de la máquina de deshidratación al vacío sobre las impurezas contenidas en el aceite, se resume en la siguiente tabla:

<b>CONTAMINANTES</b>	<b>EFICIENCIA DE LA MÁQUINA</b>
<i>Agua emulsionada</i>	<i>Parcial</i>
<i>Agua disuelta</i>	<i>Excelente</i>
<i>Aire y gases</i>	<i>Excelente</i>
<i>Sólidos no coloidales</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Coloidales-Partículas y lodos</i>	<i>Ninguna</i>
<i>Acidez</i>	<i>Ninguna</i>

**Tabla 6.4** – Acción de la máquina de termovacío sobre las impurezas

Un diagrama esquemático de la máquina de termovacío y sus principales partes constitutivas, se detallan en las *figura anexa 6.4*

## 1. Principio de operación de la máquina de termovació

El aceite desde el transformador es succionado dentro de la máquina de termovació a través de la bomba de entrada, para posteriormente ser calentado al pasar por un grupo de calefactores tipo resistencias. Saliendo del grupo de calefacción, el aceite pasa a través de un primer filtro de gran espesor (generalmente de 3 a 5 micrones) permitiéndose la remoción de partículas sólidas.

Seguidamente, el aceite entra a una cámara, donde por destilación a vacío, el agua disuelta, aire, gases y otros contaminantes volátiles presentes en el aceite, son removidos. Esta cámara de vacío posee varios cartuchos especiales de acelerador químicamente inerte (fibra de vidrio) que cumplen las siguientes funciones:

- Su diseño de estructura de profundidad permite que el agua libre sea rápidamente separada del aceite por fusión, incluso antes de alcanzar el estado de vaporización.
- Millones de fibras de vidrio de diámetro entre 3 a 10 micrones, proveen una larga área de superficie total, permitiendo la exposición de una película delgada de aceite al vacío, para una mejor remoción del agua y los gases.

- Los puntos afilados de las fibras de vidrio promueven la rápida remoción de gases y vapores desde el aceite.
- Los elementos actúan como un filtro fino, removiendo todos los contaminantes sólidos.

*Existe otro método para exponer el aceite al vacío, el cual, mediante el uso de boquillas rociadoras, permite la aspersión del aceite en forma de chorros dentro de la cámara de vacío. No obstante, este método genera problemas debido a la alta tensión superficial que presentan las gotas de aceite, y requiere además de muchos pasos para obtener el mismo grado de desgasificación que el método de destilación ya explicado.*

Al salir el aceite de la cámara de vacío, este pasa a través de un último filtro de menor espesor (0.5 a 1 micrones) para la remoción de partículas sólidas más pequeñas. Finalmente, el aceite ya reacondicionado es descargado mediante la válvula de salida de la máquina.

*La máquina de termovacío a utilizarse para el reacondicionamiento del aceite aislante de un transformador de potencia, debe poseer una capacidad de desplazamiento mayor a 2000 litros por hora.*

## **2. Resultados esperados con la aplicación de este método**

Los resultados esperados luego del reacondicionamiento del aceite mediante la aplicación de este método, se resumen a continuación:

- 1) Reducción del contenido de agua en el aceite aislante, a menos de 10ppm.
- 2) Reducción de contenido de aire de 12% en volumen para menos de 0.25%. Otros gases en solución con el aceite (incluyendo los combustibles), también son removidos.
- 3) Remoción del 99.7% de todas las partículas de 0.3 microns o mayores.

## **3. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método en transformadores desenergizados**

- 1) La conexión entre la máquina de termovacío y el transformador de potencia, debe realizarse conforme el diagrama mostrado en la *figura anexa 6.5*. Donde, la válvula inferior del transformador se conecta con la entrada de la máquina y la salida de esta con la válvula superior del transformador.

*Se de deben utilizar mangueras plásticas con mallado metálico interno o mangueras de caucho, resistentes al aceite, a las altas presiones y temperaturas.*

- 2) Se deben realizar los siguientes chequeos previos a la máquina de termovacío antes de su arranque:
  - a. Verificar el correcto nivel de aceite de la bomba de vacío.
  - b. Realizar una inspección visual de las conexiones de las tuberías y de los instrumentos, en busca de cualquier posible daño.
  - c. Conectar la alimentación de la máquina a una fuente de poder que cumpla las características descritas en la placa del equipo. Asegurar el uso adecuado de la protección de cortocircuito.
  - d. Verificar la correcta secuencia de las fases y aterrizar apropiadamente la máquina.
  
- 3) Consultar el diagrama de bloques del equipo de tratamiento a utilizarse, con el fin de seleccionar correctamente las válvulas a ser ABIERTAS y CERRADAS, de tal forma que:
  1. Se permita una recirculación interna del aceite en la máquina, previo al proceso de reacondicionamiento.

*El objetivo de esto, es permitir que la máquina se caliente completamente, lo cual ayuda a reducir la formación de espuma y permite a la bomba de vacío alcanzar su temperatura normal de operación (aprox. 70°C) antes del inicio del proceso. Se reduce el riesgo de condensación y se extiende la vida del aceite de la bomba de vacío.*

2. Una vez que las condiciones óptimas de la máquina hayan sido desarrolladas, se permita iniciar el proceso de reacondicionamiento con la recirculación de aceite en el conjunto máquina-equipos. Es decir, permitiendo el ingreso de aceite proveniente del transformador y a la vez, la descarga del aceite ya tratado hacia el mismo.
  
- 4) Es recomendable que el tratamiento del aceite sea efectuado con un nivel de vacío en la cámara de desgasificación, inferior a 0,66 kPa (5mmHg) cuando la temperatura del aceite fuera en lo máximo 60°C. Mientras que, para temperaturas encima de 60°C, hasta un máximo de 80°C, el valor del nivel de vacío debe estar por encima de 0,66kPa. Esto con el fin de evitar su fraccionamiento.

**NOTA:** *La temperatura de 80°C del aceite no debe ser sobrepasada.*

- 5) El proceso debe ser normalmente controlado por mediciones de pérdidas dieléctricas, rigidez dieléctrica y contenido de agua, en el aceite aislante. Esto permite comprobar el mejoramiento de sus características hasta obtener un valor aceptable que sea un indicativo de que el proceso debe ser finalizado.

*Tratándose en el caso de aceites nuevos (aceites que todavía no entran en contacto con el equipo), el proceso de tratamiento deberá proseguir hasta que se alcancen los siguientes valores:*

<b>ENSAYO</b>	<b>VALORES</b>	<b>MÉTODO</b>
<i>Rigidez dieléctrica (kV)</i>	<i>70</i>	<i>ASTM-1816D (0,08")</i>
<i>Factor de potencia a 20°C (%)</i>	<i>0,01</i>	<i>ASTM-D-924</i>
<i>Contenido de agua <math>V \leq 138</math> kV (ppm)</i>	<i>20</i>	<i>K. Fischer</i>
<i>Contenido de agua <math>V \geq 230</math> kV (ppm)</i>	<i>10</i>	<i>K. Fischer</i>
<i>Contenido de gas <math>V \leq 138</math> kV (%)</i>	<i>2</i>	
<i>Contenido de gas <math>V \geq 230</math> kV (%)</i>	<i>0,3</i>	

**Tabla 6.5** – *Valores recomendados para el aceite nuevo posterior a su reacondicionamiento*

*Para el caso de aceites aislantes usados, en operación, los parámetros generalmente utilizados como indicativo de la necesidad de reacondicionamiento son:*

ENSAYO	VALORES		MÉTODO
	<230 kV	≥ 230 kV	
Rigidez dieléctrica (kV)	25	35	ASTM-1816D (0,08")
Factor de potencia a 20°C (%)	0,5 – 1,5		ASTM-D-924
Contenido de agua (ppm)	25	20	K. Fischer
Gases disueltos, total (%)	10	10	
Combustibles (ppm)	2000	2000	

**Tabla 6.6** – Valores referenciales que indican la necesidad de someter el aceite aislante en operación a un proceso de reacondicionamiento

Mientras que el aceite en estas condiciones, será sometido a dicho proceso de reacondicionamiento hasta presentar las siguientes características:

ENSAYO	VALORES		MÉTODO
	<230 kV	≥ 230 kV	
Rigidez dieléctrica (kV)	50	60	ASTM-1816D (0,08")
Factor de potencia a 20°C (%)	0,3 – 1,0		ASTM-D-924
Contenido de agua (ppm)	20	15	K. Fischer
Gases disueltos, total (%)		0,5	
Combustibles (ppm)	2000	2000	

**Tabla 6.7** – Valores recomendados para el aceite usado posterior a su reacondicionamiento

#### 4. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método en transformadores energizados

- 1) La conexión entre la máquina de termovació y el transformador de potencia, debe realizarse conforme el diagrama mostrado en la *figura anexa 6.6*. Es importante observar que a diferencia del esquema para

transformadores desenergizados, aquí se establecen dos by-pass, uno interno (propio de la máquina) y otro externo entre las válvulas superior e inferior del transformador.

*El by-pass externo es efectuado con manguera plástica transparente, de tal forma que permita observar la existencia de burbujas de aire en el circuito, las cuales tienen que ser drenadas al inicio del proceso.*

- 2) El equipo de tratamiento debe ser colocado lo más próximo posible del transformador, a fin de permitir que el conjunto máquina-equipo pueda ser mantenido bajo observación constante para una acción rápida en caso de anomalías.
- 3) Se deben realizar los respectivos chequeos previos de la máquina de termovació, similares a los expuestos en el literal 2) del anterior ítem.
- 4) Al igual que en el proceso de transformadores desenergizados, se recomienda consultar el diagrama de bloques de la máquina de termovació a ser utilizada (ver literal 3 de dicho proceso).
- 5) Las condiciones de temperatura y presión en la cámara de desgasificación son similares a las recomendadas en el literal 4) del anterior ítem.

*Considerando que el transformador esta energizado, la temperatura del aceite ya se encuentra próxima de la de tratamiento, necesitando solo eventuales entradas del sistema de calentamiento.*

*Durante el proceso de tratamiento debe ser cuidada la elevación de temperatura del aceite en relación a la carga y el ambiente, a fin de que el transformador trabaje dentro de los límites establecidos de temperatura.*

- 6) El caudal de desplazamiento de la máquina de tratamiento debe ser en torno de 600 gl/hora (2300 litros/hora), a fin de evitar turbulaciones del aceite dentro del transformador, con consecuente formación de burbujas de aire y calentamiento.
- 7) Durante el proceso no hay necesidad de desactivación del rele buchholz del tanque, sin embargo es recomendable que el mismo sea drenado y que de él sean retirados eventuales depósitos de gas existentes.

*En caso de existencia de alarma de este relé, el equipo de tratamiento debe ser desconectado para observaciones.*

- 8) El proceso de tratamiento debe ser controlado por el análisis de muestras periódicas de aceite, retiradas en la entrada de la máquina (antes de pasar por el filtro y la cámara de desgasificación).

### **6.1.1.3 Métodos de recuperación o regeneración del aceite aislante**

Este proceso de tratamiento se lo aplica al aceite deteriorado, con el propósito de eliminar por medios químicos (actividad catalítica), de adsorción y filtración, los productos de la oxidación, contaminantes ácidos y en estado coloidal.

Existen varios métodos para efectuar la recuperación del aceite aislante y estos son: por percolación, por contacto con arcilla activada y por tratamiento químico con ácido sulfúrico y trifosfato de sodio.

#### **6.1.1.3.1 Método de percolación con arcilla activada**

Este método consiste en hacer pasar el aceite a través de un medio adsorbente que permita retirar sus impurezas.

Un material adsorbente muy utilizado para esta finalidad es la “tierra fuller” (atapulguita), una arcilla a base de silicatos de aluminio hidratado, la cual se encuentra naturalmente en forma bruta y que para ser utilizada, es secada,

triturada, quemada, lavada con agua y tratada con vapor o ácido. Posee una adecuada capacidad purificadora y de descolorización, que le permite ser empleada de forma comercial en la refinación y purificación de los aceites aislantes.

También se usa la alumina activada como adsorbente. La alumina es un óxido de aluminio más estable que la tierra fuller y puede ser fácilmente reactivada.

*La arcilla utilizada debe ser de una granulometría fina, de más de 100 mesh (normalmente, tierra fuller de 220 mesh).*

La percolación del aceite puede efectuarse de dos formas: por gravedad o a presión. Durante el desarrollo de ambos métodos, se debe controlar el nivel de recuperación del aceite realizando durante intervalos de tiempo, ensayos de determinación del número de neutralización (acidez) y tensión interfacial. Esto ayudará a comprobar el estado de saturación de la arcilla, siendo un indicativo de la necesidad de su reemplazo y una referencia para la finalización del proceso.

*Cabe destacar que en la aplicación de estos métodos, se tendrá una pérdida de aceite en torno del 5% o 0,5 litros de aceite por kilogramo de arcilla.*

### **Método de percolación por gravedad**

En este método, se utiliza una columna de 4,5 metros de altura aproximadamente, donde el aceite por su propio peso fuerza su paso a través de una capa de adsorbente, por tanto la percolación se va procesando automáticamente. El volumen de aceite sometido a la percolación por hora, es de aproximadamente 38 litros por  $0,1\text{m}^2$  de área de adsorbente.

No obstante, con la aplicación de este método existen las siguientes desventajas:

- En la tercera pasada de aceite, éste no es lo suficientemente tratado, ya que la arcilla se encuentra saturada.
- Existe la formación de caminos preferenciales que son abiertos en la arcilla, de tal modo que el aceite que pasa por estos, no entra en buen contacto con la arcilla no saturada.
- La cantidad de arcilla no es calculada por la cantidad de aceite, más si por la capacidad del recipiente.

En la *figura anexa 6.7* se ilustra el esquema de una instalación típica de percolación de aceite por gravedad.

### **Método de percolación por presión**

En este método, el aceite es percolado a una presión de 500kPa, mediante una bomba. La máquina de percolación a presión es compacta, ya que cuenta con un solo tanque o varios cartuchos en serie conteniendo la arcilla. Normalmente opera conectada al equipo de termovació.

*El acoplamiento entre la máquina de percolación y de termovació, permite crear un circuito cerrado de recirculación del aceite en el transformador, por tal motivo, este método es el más apropiado para operaciones en campo.*

En comparación con el método de percolación por gravedad, con éste método se acelera el proceso y se eliminan los caminos preferenciales en la arcilla. No obstante, el tratamiento sigue siendo medio, ya que la relación aceite/arcilla no es la ideal.

En la *figura anexa 6.8* se ilustra el esquema de una instalación típica de percolación del aceite por presión.

## **1. Principio de operación de la máquina de percolación acoplada a la máquina de termovació**

El aceite desde el transformador es succionado dentro de la máquina de termovació a través de la bomba de entrada, para posteriormente ser calentado al pasar por un grupo de calefactores tipo resistencias.

Saliendo del grupo de calefacción, el aceite se dirige hacia los percoladores con tierra fuller; pues, estando este caliente, se torna solvente de los productos de su propia oxidación y esto ayuda en la activación de la arcilla.

Los percoladores normalmente son compuestos de dos columnas con arcilla, donde solo una de ellas es utilizada al inicio del proceso para posterior a su saturación utilizar la segunda. Es decir, en el primer percolador a medida que la arcilla retiene los productos de la oxidación, va perdiendo su poder de adsorción hasta saturarse (no conseguir retener más contaminantes además de los ya adsorbidos); de allí, es que el flujo de aceite es dirigido para el segundo percolador hasta que este llegue de igual forma a la saturación.

Saliendo de los percoladores, el aceite pasa por un filtro de 1 micron, antes de entrar en la cámara de desgasificación, para retener partículas de la arcilla acarreadas por el flujo.

En la cámara de vacío se recomienda aplicar un vacío de 1 torr, para la retirada completa de gases y humedad. Tanto la temperatura como la presión de vacío deben ser controladas de modo que se impida el craqueamiento de los hidrocarburos del aceite, tal como se recomendó en el proceso de reacondicionamiento.

Luego de salir de la cámara de desgasificación, finalmente el aceite pasa por un filtro de 0,5 micron, para impedir la entrada en el transformador de cualquier contaminante sólido o coloidal.

Finalmente, previo a la descarga del aceite de vuelta al transformador, recibe una cierta adición de inhibidores artificiales. Esto, debido a que durante su contacto con la tierra fuller, los inhibidores naturales contra la oxidación, todavía presentes en el aceite, son también adsorbidos. Por tal circunstancia, es necesario recuperar la estabilidad a la oxidación del aceite y suplir la carencia de los inhibidores naturales, agregando un aditivo sintético antioxidante conocido como DBPC (2,6 DITERCIARIO-BUTIL-PARA-CRESOL), o el DBP (2,6 DIBUTIL FENOL), en una proporción no mayor a 0,3% (en relación al peso) según la Norma ASTM D-3487.



**C.I.B.**

Los cristales de DBPC se diluyen en una determinada cantidad de aceite, que luego es adicionada al flujo que sale de la cámara de desgasificación en la propia máquina de termovació.

El aceite es pasado hasta que se alcancen tres circulaciones (se considera una circulación cuando el volumen de aceite tratado fuera igual a la capacidad del tanque del transformador). A partir de este instante, se efectúa el control del proceso a cada circulación por medio de la tensión interfacial.

La tensión interfacial, se considera un ensayo confiable que retrata con precisión las condiciones globales del aceite en regeneración (un valor elevado de tensión interfacial indica un índice de neutralización bajo y un factor de potencia aceptable).

El control del tratamiento no debe efectuarse a través del índice de neutralización, debido a que los adsorbentes como la tierra fuller, tienen preferencia por los ácidos. Siendo que, este índice mejora rápidamente por ser los ácidos los primeros en ser retirados; sin embargo, otros productos continúan presentes y van siendo eliminados a medida que la regeneración sigue avanzando.

Como el aceite entra por la parte superior del transformador, los arrollamientos van siendo limpiados de arriba hacia abajo. La borra (lodo) disuelta, a la vez, entra en el flujo de aceite a ser regenerado y queda retirada en las columnas de tierra fuller. Con esto, el aceite vuelve al transformador libre de borra, y por tanto, con mayor poder de solvencia.

*Una muestra del aspecto físico que presenta la tierra fuller, antes y después de su saturación, se detalla en la figura anexa 6.9.*

## **2. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) El circuito debe ser montado conforme la *figura anexa 6.10*, esquema similar al de reacondicionamiento del aceite, la única diferencia se da en la configuración interna de la máquina, al existir en este caso, una derivación de la salida de los calefactores hacia los percoladores y de estos un retorno hacia la entrada de la cámara de desgasificación. Además del equipo para agregar inhibidores.
- 2) El grado de calentamiento necesario, es definido por el ensayo de punto de anilina (temperatura en la cual el aceite disuelve una sustancia aromática). En este punto el aceite posee mayor poder de

solventia; por tanto, calentado algunos grados encima durante el proceso, alcanzará el interior del transformador en la temperatura ideal. Generalmente, el aceite ingresa a la cama de arcilla a una temperatura entre 60°C y 70°C.

*Cabe recordar que para los aceites nafténicos, el punto de anilina se encuentra entre 63 y 84°C, y para los aceites parafínicos, está entre 85 y 91°C.*

- 3) Tanto la temperatura como el vacío aplicado en la cámara de desgasificación deben ser controlados para impedir el craqueamiento de los hidrocarburos del aceite.
- 4) Se recomienda tomar muestras del aceite antes y después de terminar el proceso de regeneración, para la realización de ensayos físico-químicos completos y de estabilidad a la oxidación.

#### **6.1.1.3.2 Método de contacto con arcilla activada**

En este método, se calcula la cantidad de arcilla necesaria para retirar la acidez del aceite, a través del análisis de una muestra en laboratorio.

Este proceso consiste en mezclar el aceite precalentado a una temperatura de entre 60°C y 70°C, con la cantidad de arcilla ya determinada, para posteriormente agitar la mezcla durante un cierto tiempo. Luego, el aceite es retirado por decantación y sometido a un proceso de filtración, pasando primero por un filtro grueso (de tela) y luego por un fino (prensa).

*Al igual que los métodos de percolación, la arcilla utilizada debe ser de una granulometría fina, de más de 100 mesh (normalmente, tierra fuller de 220 mesh) y al finalizar el proceso se tendrá una pérdida de aceite en torno al 5%.*

#### **6.1.1.3.3 Método de ácido sulfúrico**

Este método es considerado de tratamiento químico, utilizando como medio alcalino el ácido sulfúrico y adicionalmente tierra fuller que permite eliminar el contenido de ácido todavía existente. Su proceso se detalla a continuación:

- 1) El aceite es colocado en un tanque de hierro, se adicionan de 2% a 3% de su peso de ácido sulfúrico comercial de 1,84 de densidad. La mezcla es agitada por aire comprimido durante media hora y dejada en reposo hasta el día siguiente.

- 2) El aceite es bombeado para un segundo tanque en el cual se somete a un tratamiento con silicato de sodio en la proporción de 3% a 4%. Esta mezcla es nuevamente agitada con aire comprimido y dejada en reposo hasta el día siguiente.
- 3) El aceite es bombeado para un tercer tanque, en el cual recibe tierra fuller (200mesh) en la cantidad de 3% a 4% en peso. Esta mezcla es sometida a la agitación con aire comprimido por una hora y dejada en reposo hasta el día siguiente.
- 4) Finalmente, el aceite es sometido a un proceso de reacondicionamiento con filtro-prensa y almacenado.

En la *figura anexa 6.11.A* se detalla el esquema de instalación de este proceso para recuperación del aceite aislante.

#### **6.1.1.3.4 Método de trifosfato de sodio**

Este método es considerado de tratamiento químico, utilizando como medio alcalino el trifosfato de sodio y adicionalmente tierra fuller que permite eliminar el contenido de ácido todavía existente. Su proceso se detalla a continuación:

- 1) El aceite deteriorado es bombeado hacia un primer tanque, donde se mezcla con trifosfato de sodio a 80°C durante una hora. Se deja en reposo hasta que la separación de los dos líquidos sea total.
- 2) Se decanta la solución de trifosfato de sodio y se lava el aceite con chorros de agua.
- 3) El aceite es enviado a una separadora centrífuga, para posteriormente ser bombeado hacia un segundo tanque, luego de pasar por un calentador
- 4) En este último tanque el aceite se mezcla con contenido de tierra fuller activada (200 mesh). La mezcla es agitada durante 15 minutos y dejada en reposo hasta el día siguiente
- 5) Nuevamente el aceite es lavado con agua caliente y enviado a una separadora centrífuga, de la cual al salir es sometido a un proceso de reacondicionamiento.

En la *figura anexa 6.11.B* se detalla el esquema de instalación de este proceso para recuperación del aceite aislante.

### 6.1.1.3.5 Determinación de la cantidad de tierra fuller requerida para la recuperación del aceite

La cantidad de tierra fuller requerida para los métodos de recuperación, depende del estado inicial de acidez del aceite (número de neutralización) a tratar y del punto final que se desea alcanzar. Para lo cual, se utiliza el siguiente gráfico:

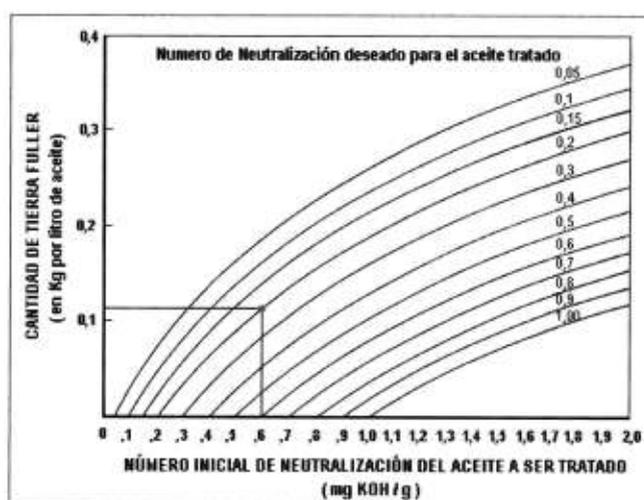


Figura 6.3 – Absorción de la tierra fuller, según la Engelhard Minerals and Chemical Corp

Ejemplo de cálculo por interpolación:

Número inicial de neutralización del aceite a ser tratado: 0,6 mgKOH/g

Número de neutralización que se desea alcanzar: 0,2 mgKOH/g

Masa de tierra fuller a ser utilizada por litro de aceite (aproximadamente):

0,11 Kg.

## 6.1.2 SECADO INTERNO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

### 6.1.2.1 Generalidades

Todos los métodos de secado interno de transformadores apuntan hacia un objetivo común: *remover el agua libre y atrapada en la celulosa*. El parámetro cuantitativo más indicativo del contenido de agua de un sistema de aislamiento, es la presión parcial de vapor de agua, la cual, por la ley universal de los gases, es directamente proporcional a la masa de dicho vapor de agua.

*Por lo tanto, se puede definir como un buen método de secado de un transformador, a cualquiera que reduzca en el menor tiempo posible a valores aceptables el nivel de presión de vapor de agua y por consiguiente el contenido de agua en el aislamiento.*

El secado de transformadores puede efectuarse con el empleo de los siguientes métodos: método criogénico, método de circulación de aire caliente, método de circulación de aceite caliente, método de aplicación de alto vacío, método de aspersión con aceite caliente (hot-spray) y método de calentamiento con corriente eléctrica en los arrollamientos.

## 6.1.2.2 Métodos de secado interno del transformador

### 6.1.2.2.1 Método de secado criogénico

Este método consiste en someter el tanque del transformador a la aplicación de un alto vacío y congelar el agua extraída del aislamiento en un condensador de hielo seco o bomba criogénica instalado entre el tanque y la bomba de vacío.

La bomba criogénica es un dispositivo altamente refrigerante que se coloca en la línea de vacío y estimula la condensación del vapor de agua que se está extrayendo del transformador. Normalmente, posee un área de enfriamiento de aproximadamente  $12000\text{cm}^2$  y capacidad para 70Kg de hilo seco. *Las figuras anexas 6.12.A, B, muestran el diseño de esta bomba.*

El principio de operación se debe al gradiente de presión del vapor de agua que se establece entre la superficie del aislamiento del transformador y la cámara fría del condensador. La presión de vapor de agua a  $-80^{\circ}\text{C}$  (temperatura de la cámara fría del condensador) es de  $0,4\ \mu\text{Hg}$  y la presión parcial de equilibrio del vapor de agua a  $18^{\circ}\text{C}$  es aproximadamente  $40\ \mu\text{Hg}$ , para un contenido de humedad de 0,5% en el aislamiento. Esta relación de 100:1 en el gradiente de la presión de vapor, permite que se consiga una gran eficacia en la migración de humedad desde el aislamiento hacia la cámara fría del condensador, sin

aplicación de calor. Valores bajos de la temperatura del aislamiento disminuyen la eficacia del proceso.

### **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) El transformador, la bomba criogénica y el conjunto de vacío, deben ser conectados en serie; tal como se muestra en el esquema de instalación de la *figura anexa 6.13.A*.

**NOTA:** La bomba criogénica siempre debe quedar ubicada encima del transformador.

- 2) La interconexión entre el transformador y la bomba criogénica se efectúa con ductos de 8" de diámetro, y la interconexión entre el condensador y el conjunto de vacío con ductos de 4" de diámetro.
- 3) La aplicación de este método se la efectúa estando el tanque del transformador sin aceite y con gas nitrógeno seco.
- 4) Para temperaturas ambiente por debajo de 10°C se requiere un calentamiento adicional para mejorar la eficiencia, pues a bajas

temperaturas el vacío necesario para alcanzar el rompimiento de equilibrio de las presiones de vapor de agua, es bajo.

- 5) La medición del agua condensada en la cámara de la bomba criogénica, es un parámetro que sirve para el control de la cantidad de agua extraída durante el proceso. Ciertos fabricantes recomiendan que el proceso de secado debe continuar hasta alcanzar el límite de 35g. de agua extraída en un periodo de 6 horas.
- 6) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el aislamiento celulósico antes y después del proceso de secado, esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

#### **6.1.2.2.2 Método de circulación de aire caliente**

Este método consiste en inyectar inferiormente aire forzado limpio y seco a una temperatura máxima de 90°C dentro del transformador, permitiendo que el aire escape por la parte superior.

Normalmente se lo aplica en transformadores de mediana potencia, sobre todo en los casos en que no se pueda someter a altos vacíos el tanque del transformador.

El aire caliente es obtenido con el auxilio de una máquina sopladora y un calentador. La cantidad de aire se determina con el criterio de garantizar que las temperaturas de entrada y salida de aire sean aproximadamente las mismas.

### **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) El transformador, el calentador de aire y el ventilador, deben ser conectados en serie; tal como se detalla en el esquema de instalación mostrado en la *figura anexa 6.13.B*.
- 2) El tanque del transformador debe ser cubierto con mantas aislantes térmicas para minimizar las pérdidas de energía y prevenir la condensación interna de agua dentro del tanque.
- 3) La aplicación de este método se la efectúa luego de retirar todo el aceite aislante.
- 4) Para la entrada de aire caliente en la parte inferior del tanque del transformador, normalmente se utilizan ductos de 6”.
- 5) En el interior del tanque, a la altura de la entrada del aire caliente, se deben colocar mamparas de asbesto como deflectores para dirigir el

flujo de aire, evitando que este se concentre en determinadas zonas del transformador y no se logre un secado uniforme.

- 6) La capacidad mínima de la máquina sopladora debe de aproximadamente 28 litros por 10kVA del transformador y por minuto.

**Por ejemplo;** *Cuál es la capacidad mínima del soplador para un transformador de 25MVA??*

$$R//. \quad \frac{25000(kVA)}{10(kVA)} \cdot 0,028(m^3 / \text{min}) = 70(m^3 / \text{min})$$

- 7) El área total de las aberturas de entrada del aire caliente debe ser de  $130\text{cm}^2$  para cada  $28\text{m}^3$  de aire por minuto, en lo mínimo.

**Por ejemplo;** *Con referencia al ejemplo anterior, Cuál deberá ser el área total mínima de las aberturas de entrada de aire caliente??*

$$R//. \quad \frac{70(m^3 / \text{min})}{28(m^3 / \text{min})} \cdot 130(\text{cm}^2) = 325\text{cm}^2$$

- 8) De igual forma, el área de las aberturas de inspección de la tapa del transformador, debe ser de tamaño suficiente para la salida del aire, para lo cual, la suma de las áreas de las aberturas de salida no puede ser menor que el total de las áreas de entrada.

- 9) Entre el calentador de aire y el tanque del transformador, se instalará un filtro de aire, para prevenir incendios en su interior, debido al paso de partículas inflamables.
  
- 10) Es preciso instalar termómetros a la entrada y a la salida de aire con el fin de controlar que se obtenga una mínima diferencia de temperaturas del aire que entra y sale del transformador.
  
- 11) La potencia del calentador de aire debe ser en torno de los 43W por 28 litros de aire soplado por minuto. El calentador puede ser del tipo eléctrico (compuesto de resistencias eléctricas) o del tipo intercambiador de calor (utilizando gases calientes de combustión o vapor de agua que no entren en contacto con el flujo de aire). Es necesario controlar la temperatura del aire en la salida del calentador usando un termómetro y termostato.
  
- 12) Todas las precauciones deben ser tomadas para evitar algún incendio durante el secado. Hay que evitar focos calientes cerca del transformador, dado que el aceite que impregna a los materiales celulósicos, tiene un punto de inflamación de 145°C.

- 13) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el aislamiento celulósico antes y después del proceso de secado, esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

#### **6.1.2.2.3 Método de circulación de aceite caliente**

Este método consiste en hacer circular continuamente aceite caliente por el transformador, procesándolo a través de una máquina purificadora de termovació.

El calentador de la máquina de termovació debe tener una capacidad de aproximadamente  $0,16\text{W}/\text{cm}^2$  de superficie externa del tanque del transformador (paredes y tapa). Además, este debe ser proyectado para no permitir que la temperatura del aceite en la superficie que entra en contacto con la fuente de calor, sea mayor que  $80^\circ\text{C}$ , para evitar su deterioración.

*A diferencia de los otros métodos este es más lento. La velocidad de secado depende de la rata de transferencia de humedad del papel al aceite seco que está ingresando al transformador, que normalmente es muy baja.*

## **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) El esquema de instalación de este método debe realizarse según el diagrama mostrado en la *figura anexa 6.14.A*.

Donde, la conexión entre la máquina de termovació y el transformador, debe realizarse de la misma manera que para el proceso de reacondicionamiento.

Es decir, el aceite debe ser retirado del fondo del tanque del transformador, pasando por la máquina de termovació y retornado por la parte superior del tanque.

- 2) El tanque del transformador debe ser cubierto con mantas aislantes térmicas para evitar la pérdida de eficiencia en el proceso.
- 3) La temperatura recomendada para calentamiento del aceite es de 60°C para niveles de vacío en la cámara de desgasificación de la máquina de tratamiento de aceite, inferiores a 666Pa (5 torr); y para casos en que los niveles de vacío fueran superiores a 666Pa (5 torr), la temperatura puede ser elevada hasta el límite máximo de 80°C, evitándose el fraccionamiento y la oxidación del aceite aislante.

- 4) El proceso debe ser realizado con el transformador a pleno volumen de aceite y a presión atmosférica.
- 5) El proceso debe ser controlado por las mediciones de pérdidas dieléctricas, resistencia de aislamiento y contenido de agua en el aceite.
- 6) Si el método se lo realizó a una temperatura del aceite mayor a 60°C, es recomendable agregar una cierta cantidad de inhibidor al final del proceso, puesto que el vacío a tal temperatura, evapora los compuestos aromáticos (inhibidores naturales) y el inhibidor artificial si lo tuviera.
- 7) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el aislamiento celulósico antes y después del proceso de secado, esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

#### **6.1.2.2.4 Método de aspersión con aceite caliente (hot-spray)**

Este método consiste en utilizar toberas de aspersión adecuadamente instaladas dentro de la parte superior del transformador, de tal manera que permitan el baño de las bobinas con aceite caliente, aplicando al mismo tiempo el proceso de vacío.

El aceite que circula dentro del transformador en este proceso, debe cumplir básicamente tres finalidades:

- a) Ser agente de transferencia de calor hacia el interior del transformador.
- b) Retirar por arrastre la humedad, la cuál va a ser eliminada en la cámara de vacío.
- c) Efectuar un buen lavado al transformador para limpiar impurezas y lodos.

#### **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) El esquema de instalación de este método debe realizarse según el diagrama mostrado en la *figura anexa 6.14.B*.
- 2) Aislar térmicamente el transformador con mantas de lana de vidrio y recubrirlo con lona impermeable, para protección de las mantas contra la intemperie.
- 3) Para obtener un buen rendimiento térmico y aspersion adecuada de aceite, es conveniente el vaciado de aceite a una velocidad de desplazamiento del orden de 1000 litros/hora para transformadores trifásicos y de 2000 litros/hora para transformadores monofásicos.

- 4) El proceso es realizado con un volumen reducido de aceite, normalmente el 20% del volumen de aceite del transformador. El nivel de aceite no debe sobrepasar el aislamiento de la parte inferior de los arrollamientos.
- 5) La temperatura del aceite debe ser de 80°C, ajustada en los calefactores de la máquina de tratamiento. Esto, con el fin de lograr un buen calentamiento de la parte activa.

*Debido a las condiciones de temperatura y vacío a las cuales el aceite se encuentra sometido durante este proceso, es recomendable no utilizar este mismo aceite para el llenado final del transformador.*

- 6) Para la aspersión de aceite dentro del transformador, normalmente se utilizan dos toberas por bobina en el caso de transformadores trifásicos y cuatro toberas por bobina en el caso de transformadores monofásicos.

*Los tubos donde se conectan las toberas deben ser metálicos y deben tener un diámetro uniforme de 1". Las toberas de aspersión deben ser dispuestas de tal forma que permitan bañar toda la superficie de cada arrollamiento.*

- 7) Es necesario disponer de una buena bomba de succión para vencer el vacío dentro del transformador. Caso contrario, se debe adaptar adicionalmente una bomba auxiliar en serie con la máquina de tratamiento.
- 8) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el aislamiento celulósico antes y después del proceso de secado, esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

#### **6.1.2.2.5 Método de circulación de corriente eléctrica en los arrollamientos**

Este método consiste principalmente en calentar los arrollamientos y por ende el aceite del transformador, colocando en cortocircuito el arrollamiento de baja tensión y aplicando un voltaje apropiado en el arrollamiento de alta tensión de tal forma que se haga circular en el una corriente de cerca de 20% de la nominal. Para mejorar la eficiencia de este método, paralelamente se recircula el aceite a través de la máquina de tratamiento por termovacío.

Una vez alcanzados los niveles de temperaturas deseados (máximo 95°C en los arrollamientos y 85°C en el aceite), se desconecta la alimentación del cortocircuito, se evacua todo el aceite y se aplica alto vacío al tanque del transformador.

*Esta operación debe repetirse cuantas veces sea necesario hasta alcanzar el nivel de humedad deseado en la celulosa en condiciones de equilibrio. Por tanto, este método también es considerado como lento.*

### **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) El tanque del transformador debe ser cubierto con mantas aislantes térmicas para evitar la pérdida de eficiencia en el proceso.
- 2) El proceso debe ser realizado con el transformador a pleno volumen de aceite y a presión atmosférica.
- 3) El conmutador debe ser colocado en la posición correspondiente a la derivación que permita circular la corriente por todo el arrollamiento.
- 4) El vacío aplicado posteriormente al tanque del transformador, debe ser mantenido continuamente hasta que la temperatura de los arrollamientos caiga a 40°C. Inmediatamente, se deberá llenar con aceite el transformador sin romper el vacío hasta que alcance su nivel máximo.

**NOTA:** Se deberá evitar cualquier ingreso de aceite en la bomba de vacío.

- 5) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el aislamiento celulósico antes y después del proceso de secado, esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

#### **6.1.2.2.6 Método de aplicación de alto vacío**

Este método consiste en aplicar un alto vacío al tanque del transformador, a la temperatura ambiente y durante el tiempo que sea necesario hasta lograr la extracción de la humedad a los límites establecidos.

#### **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) La conexión entre la bomba de vacío y el transformador; debe efectuarse según el diagrama mostrado en la *figura anexa 6.15*.

*Se deben utilizar tubos de acero o mangueras de caucho de alta resistencia, de diámetro nunca menor a 50mm (2") y de longitudes cortas.*

- 2) Para la aplicación de este proceso debe usarse una apropiada bomba de vacío que cumpla las siguientes condiciones:
- a. Que alcance un nivel de último vacío de 3Pa (0,02 mmHg) o menos.
  - b. Que tenga una capacidad de desplazamiento de gases adecuada al tamaño del transformador, debido a que una pequeña cantidad de agua se expande dentro del gran volumen del tanque del transformador. Por tanto, para transformadores de media y baja tensión se recomienda una bomba de vacío con capacidad de desplazamiento de  $3\text{m}^3/\text{min}$  ( $180\text{m}^3/\text{hora}$ ). Mientras que, en transformadores de alta y extra alta tensión se recomienda una bomba de vacío con capacidad de desplazamiento de  $4\text{m}^3/\text{min}$  ( $240\text{m}^3/\text{hora}$ ).

*Para lograr estos valores requeridos, es necesario el uso de una bomba de vacío de paletas rotativas, de un solo paso, sellada con aceite y en algunos casos, complementada con un soplador o booster conectado en serie. Este último le permite alcanzar una presión de último vacío mucho menor, que puede ser de hasta 0,001 mmHg.*

- 3) Previo a la aplicación de este proceso debe verificarse si el tanque del transformador soporta altos vacíos por debajo de 1mmHg. Incluyendo otros compartimentos como el conservador y el conmutador de derivaciones bajo carga.

*Los componentes del transformador que no sean resistentes a la alta presión de vacío, deben ser aislados. Por ejemplo, en ciertos diseños suelen ser los radiadores y el conservador.*

- 4) Realizar previamente, un diagrama acorde con el diseño del transformador, determinando el sentido de las presiones internas a ser aplicadas durante el proceso. Esto, con el fin de identificar las diferencias de presiones a originarse entre los compartimentos del equipo, las mismas que deberán ser evitadas abriendo las válvulas de interconexión requeridas o realizando convencionalmente los by-pass necesarios entre ellos.
- 5) La medición de la presión de vacío debe efectuarse en la parte superior del tanque del transformador, lo más lejos posible del punto de conexión de la bomba de vacío. Para tal propósito, se debe utilizar un medidor presión absoluta de precisión (vacuómetro), del tipo aneróide o de par termoeléctrico. El medidor de mercurio sólo puede ser

utilizado cuando este posea un dispositivo que impida la eventual entrada de mercurio en el tanque.

- 6) El sistema no debe tener puntos de vaciamiento (especialmente en las uniones), pues la penetración de aire húmedo perjudica la operación y no permite que sea alcanzado el vacío deseado.
- 7) Llevar un control de las lecturas del vacuómetro en intervalos de tiempo. Cuidar que el nivel de vacío aplicado durante el proceso no sobrepase el valor límite dado por el fabricante del transformador.
- 8) Finalizar el proceso de vacío (apagar la bomba) luego de 24 horas de haber alcanzado una presión interna de 1 torr. Normalmente cuando se alcancen niveles de vacío menor a 0.3 torr.
- 9) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el aislamiento celulósico antes y después del proceso de secado, esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

### **6.1.2.3 Determinación del estado de humedad en el aislamiento sólido de los transformadores**

#### **6.1.2.3.1 Métodos de medición cualitativa del agua en la celulosa**

##### **1. Por medidas eléctricas**

Se efectúa mediante los ensayos eléctricos de FACTOR DE POTENCIA y RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.

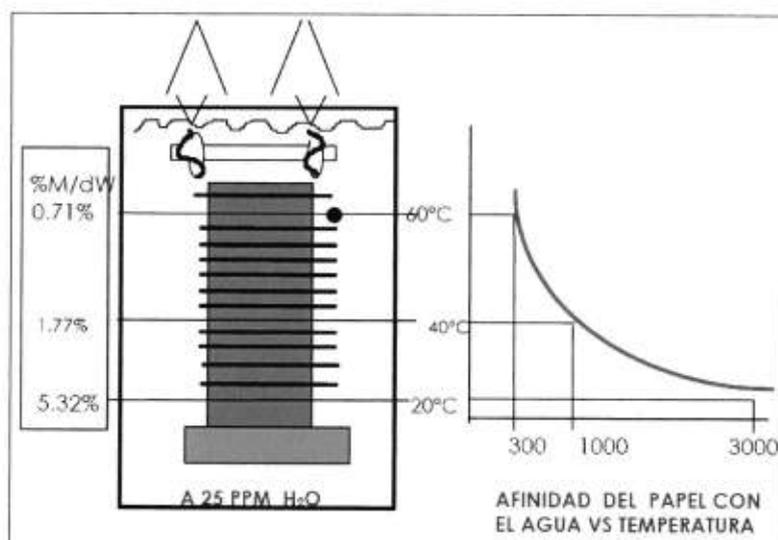
Los transformadores nuevos generalmente salen de fábrica con un factor de potencia de 0.5%. Los transformadores en uso pueden tener un F.P mayor, pero cuando la lectura supera el 2% se debe entrar a investigar más la condición de humedad del transformador si se trata de un aceite con ÍNDICE DE CALIDAD por encima de 1500, pues sabemos que las sustancias polares además del agua, afectan el factor de potencia y la resistencia de aislamiento.

*La resistencia de aislamiento es una buena ayuda para tener una idea del contenido de agua, especialmente si utilizamos el concepto de VOLTAJE DE PASO, basado en el efecto Evershed, ya explicado en el literal 4.3.2.1.4 (4) del capítulo anterior.*

*El ensayo de factor de potencia resulta ser suficientemente sensible para relacionarla con el contenido de agua de un aislamiento. No obstante, la figura 3.5 nos da una idea general sobre la variación de esta magnitud con respecto a la humedad en los aislamientos celulósicos, considerando el caso de un aceite no degradado.*

## 2. Mediante la aplicación de los multiplicadores de MYERS

Una de las últimas investigaciones de la S.D MYERS ha establecido con base en el PRINCIPIO DE EQUILIBRIO, una relación de mucha utilidad que nos permite conocer el porcentaje de agua por peso seco en la celulosa (%M/dW) conociendo el contenido de agua en ppm del aceite, teniendo en cuenta la temperatura del fondo del transformador que es la más baja y en la cual se da la máxima afinidad del papel con agua.



**Figura 6.4** – Afinidad del papel con el agua vs temperatura (S.D Myers)

En esta figura se aprecia que el perfil hidrofílico del papel no es uniforme verticalmente en las bobinas del transformador.

El contenido de agua en el papel se comporta de manera inversa al perfil térmico de la parte activa. Es claro con este gráfico, que la temperatura más baja está precisamente en la parte inferior y es donde se encuentra el mayor porcentaje de agua en el papel.

Como resultado de la investigación de este fenómeno, la compañía S.D MYERS nos entrega la curva mostrada en la figura anexa 6.16, de la cual se obtienen los MULTIPLICADORES DE MYERS, en función de la temperatura del devanado. De esta forma, para cada temperatura, el multiplicador obtenido se lo aplica directamente al valor en ppm de agua en el aceite (determinado mediante análisis físico-químico), determinando así, el perfil de porcentaje de agua en el papel.

Recordando la curva de saturación del aceite con el agua en función de la temperatura mostrada en la figura 3.12, se concluye de manera elemental que *el aceite tiende a entregar agua al papel cuando baja la temperatura, y el papel a su vez tiende a absorberla*, razón que explica de una manera clara, como más del 90% del agua se encuentra en la celulosa y menos del 10% en el aceite.

Es por tanto evidente que el estado de agua en el transformador varía con la temperatura (T) de operación de la unidad, debido a la termodinámica que se desarrolla permanentemente dentro del equipo. Es decir:

- Si T **sube**, el sistema transfiere agua: del papel **hacia el** aceite.
- Si T **baja**, el sistema transfiere agua: del aceite **hacia el** papel.
- La condición de equilibrio se establece cuando la presión de vapor de agua es igual en el papel y el aceite. Por tanto, no hay transferencia de agua.

*Este fenómeno por tanto nos aclara el por qué son inocuos los tratamientos de aceite cuando el objetivo que se pretende es secar la parte activa del transformador. Por otro lado, es claro que el agua en el papel se mide en porcentaje ( $10^2$ ), mientras que el agua en el aceite se mide en ppm ( $10^6$ ), órdenes de magnitudes bastantes diferentes.*

#### **6.1.2.3.2 Medición cuantitativa del agua en el aislamiento celulósico**

Esta medición se basa en un solo método y consiste en la estimación de la cantidad de agua (en peso) contenida en la celulosa del transformador, a partir de la determinación de la *temperatura de punto de rocío (escarcha)* del ambiente que la rodea en su interior (generalmente gas extra-seco), luego de llegar a un estado de equilibrio.

*El punto de rocío no es más que la temperatura a la cual el vapor de agua se condensa cuando se enfría a presión constante. Es decir, la temperatura a la cual dicho gas está saturado por el agua que contiene.*

El investigador Jhon D. Piper, del Departamento de Investigación de la empresa Detroit Edison Company (Detroit-Michigan), realizó una investigación sobre este asunto, cuyos resultados fueron publicados por la IEEE en Octubre de 1946, con el título *"Moisture Equilibrium Between Gas Space and Fibrous Materials in Enclosed Electric Equipment"* (Equilibrio de Humedad entre un espacio gaseoso y materiales fibrosos en equipos encapsulados). En esta publicación No. 46-160, se presenta el gráfico de la *figura anexa 6.17*, conocido como *"El Gráfico de Piper"*, mediante el cual se puede determinar el contenido de humedad del aislamiento celulósico (porcentaje en peso del papel), al relacionar su temperatura con la *presión de saturación del vapor de agua* del gas con el que este encuentre en contacto, esto después de haber sido alcanzado el estado de equilibrio.

*Cabe recalcar que, la condición de equilibrio se alcanza, cuando la presión parcial de agua en la superficie del aislamiento celulósico es igual a la presión parcial de vapor de agua del medio gaseoso que lo rodea. Esta última, determinada a partir de su relación con la temperatura de punto de rocío de acuerdo con la tabla anexa 6.A1.*

## 1. Consideraciones en la aplicación del gráfico de Piper

Para la determinación cuantitativa del agua en el aislamiento celulósico del transformador, mediante la aplicación del gráfico de Piper, se recomienda considerar lo siguiente:

- 1) El transformador debe ser vaciado y presurizado con gas extra-seco para permitir establecer un sistema gas-papel que permita crear el equilibrio de las presiones de vapor de agua, luego de la transferencia unidireccional de humedad del papel hacia dicho gas.

Es recomendable mediante el uso de un higrómetro apropiado, verificar que se logre la condición de equilibrio, y ello se puede obtener cuando la lectura de punto de rocío en dicho higrómetro se estabilice por varias horas. Por tanto, bajo esta condición podemos estar seguros que no existirá diferencial de presiones parciales de vapor de agua.

*No obstante, se estima que esta condición de equilibrio se logra luego de un periodo de mínimo 24 horas de presurización.*

- 2) Con el valor de la última lectura de temperatura de punto de rocío ( $^{\circ}\text{C}$ ) del gas, ya en condiciones de equilibrio, se determina en la *tabla anexa*

6.A1, el correspondiente valor de la presión de vapor saturado de agua del gas.

- 3) Con los valores de presión parcial del vapor de agua (obtenido en la tabla) y la temperatura del aislamiento (medida en campo), se obtiene el porcentaje de agua en peso del papel, mediante interpolación en el gráfico de Piper (figura anexa 6.17). Por lo tanto, para determinar la cantidad en peso (en gramos) del agua en el aislamiento celulósico, es necesario conocer el peso total del papel involucrado en las bobinas.

Esta situación sería algo complicada, ya que dicha información no se presenta en los datos de placa, y solo se la podría conocer al menos que se realice la consulta al fabricante. No obstante, existen formulas empíricas que permiten estimar el peso del papel involucrado en un transformador X, a partir de ciertos valores de referencia mostrados en su placa de información técnica. Por tanto, a continuación se cita dos de ellas:

- a. Formula que permite determinar el peso aproximado del papel (kraft) en base a su capacidad nominal (KVA):

$$W(Kg) = 0,136 \cdot kVA \quad (6.1)$$

donde:

**W:** Peso del papel en kilogramos

**kVA:** Capacidad nominal del transformador según placa

- b. Formula que permite determinar el peso aproximado del papel en base a la cantidad de galones de aceite requeridos:

$$W(lbs) = \frac{VOL \cdot 10\% \cdot 231 \cdot 62,5 \cdot 1,4}{1728} = 1,17VOL \quad (6.2)$$

donde:

**W:** Peso del papel en libras

**VOL:** Galones de aceite según placa

**10%:** Porcentaje de aceite que retiene el transformador

**231:** Pulgadas cúbicas en un galón de aceite

**1728:** Pulgadas cúbicas en un pie cúbico

**62,5:** Peso específico del agua en lb/pie<sup>3</sup>

**1,4:** Gravedad específica del papel

## **6.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA PRESERVACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS ENCAPSULADOS**

### **6.2.1 TRATAMIENTO DEL GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF<sub>6</sub>)**

#### **6.2.1.1 Consideraciones Generales**

Como ya se explicó en el capítulo III, las moléculas de gas SF<sub>6</sub> se pueden descomponer en compuestos de flúor y azufre a causa de descargas eléctricas o altas temperaturas. Normalmente estas materias se recombinan en SF<sub>6</sub>. Pero, si el agua y otras materias coexisten al mismo tiempo, la recombinación NO es completa y quedan las materias residuales gaseosas, llamados productos de descomposición. Si la recombinación ocurre en presencia de metales, se pueden formar fluoruros metálicos en forma de polvos.

Los productos de descomposición gaseosos que se encuentran más frecuentemente en el gas SF<sub>6</sub> usado son: HF (Fluoruro de Hidrógeno), SO<sub>2</sub> (Dióxido de Azufre), SOF<sub>2</sub> (Fluoruro de Tionilo), SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (Difluoruro de Sulfurilo) y SF<sub>4</sub> (Tetrafluoruro de azufre).

Además, partículas sólidas de descomposición pueden presentarse en el gas SF<sub>6</sub> descompuesto, tales como: WO<sub>3</sub> (Trióxido de Wolframio) y CuF<sub>2</sub> (Difluoruro de Cobre).

La eliminación de tales productos de la descomposición del gas SF<sub>6</sub>, requiere de la aplicación de un método de tratamiento. De esta forma, el único método de tratamiento existente aplicado en campo, consiste en la purificación y secado del gas SF<sub>6</sub>, ambos realizados mediante proceso de filtración.

#### **6.2.1.2 Método de Filtración del gas SF<sub>6</sub>**

Este método consiste en el empleo de filtros tanto para secado como para retención de partículas de descomposición, los cuales se disponen dentro del circuito de extracción, almacenaje y recarga de gas SF<sub>6</sub> de una maquina móvil de tratamiento en campo.

##### **6.2.1.2.1 Características del filtro de secado del gas SF<sub>6</sub>**

Este filtro sirve para adsorber humedad y productos de descomposición del gas SF<sub>6</sub> (gaseosos). Esta compuesto de un cartucho filtrante reemplazable, que consta de un tubo con contenido de deshidratante de Oxido de Aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a la entrada y tamiz molecular a la salida. El primero presente en una cantidad aproximada de 2Kg (granos de 2 a 5mm) y el segundo de 1Kg.

*Esta mezcla filtrante ha sido comprobada por la mayoría de los fabricantes de equipos encapsulados, como la más adecuada para adsorber humedad y también productos de descomposición.*

Con este cartucho filtrante se puede obtener en el gas, una temperatura de punto de rocío inferior a  $-50^{\circ}\text{C}$ . Para un secado óptimo la cantidad de flujo es decisiva, siendo que la capacidad de adsorción dependa tanto del grado de contaminación del gas, como el tiempo de contacto con el filtro y su grado de saturación. Cabe resaltar que el rendimiento de una unidad de filtrado se aumenta utilizando varios filtros en paralelo, pero no en serie, porque el material del filtro necesita un tiempo de contacto mínimo para poder ejecutar una adsorción.

El deshidratante puede adsorber aproximadamente 120 gramos de agua, sin que la humedad residual del gas exceda 10ppm (igual a  $-44^{\circ}\text{C}$  temperatura del punto de rocío a presión absoluta de 1bar). La capacidad de adsorción del cartucho filtrante para productos de descomposición es diferente para cada materia. Por ejemplo, para el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y fluoruro de tionilo ( $\text{SOF}_2$ ) la capacidad de adsorción es de 15 a 20% en peso, es decir 90 a 120 gramos por cartucho.

En la *figura anexa 6.18* se presenta en detalle un cartucho filtrante de las características indicadas.

*NO se recomienda la regeneración o recuperación del óxido de aluminio y el tamiz molecular saturados, ya que al ser sometidos a procesos comunes de calentamiento y secado con alto vacío pueden liberar vapores insalubres y*

*dañinos para el medio ambiente. Hay que considerar adicionalmente, que dichos procesos son muy costosos y resultaría más económico su reemplazo.*

#### **6.2.1.2.2 Características del filtro de partículas del gas SF<sub>6</sub>**

El filtro de partículas sirve para extraer por filtración las partículas sólidas y productos de descomposición sólidos del gas SF<sub>6</sub>.

Este está compuesto de un cartucho filtrante, el cual consta de un cilindro plegado con una sección en forma de estrella. El resultado de esta disposición es una gran superficie filtrante (0,12 m<sup>2</sup>) que posibilita un largo tiempo de utilización.

*Se obtiene un factor de retención de 100% para partículas mayores a 1,0µm.*

#### **6.2.1.3 Principio de operación de la máquina de tratamiento de gas SF<sub>6</sub>**

El gas SF<sub>6</sub> contenido en el compartimento de un equipo encapsulado, es succionado dentro de la máquina de tratamiento a través de un compresor (por lo general de tipo émbolo seco), para luego ser forzado su paso a través de la unidad de filtrado compuesta por los filtros de secado y de retención de partículas, ya mencionados anteriormente.



Posteriormente, el gas pasa a ser almacenado a presión en un depósito propio de la máquina. Siendo también factible mediante una derivación en el circuito, su almacenaje en botellas externas exclusivas para gas SF<sub>6</sub>.

Luego de haberse extraído completamente el gas del compartimento, este último es sometido a un proceso de evacuación (aplicación de vacío) a través de una bomba de vacío dispuesta en el mismo circuito de la máquina, esto con el objetivo de realizar su secado interno (proceso que se tratará en detalle más adelante).

Finalmente, el gas ya purificado es retornado al respectivo compartimento del equipo encapsulado, utilizando la propia presión del gas en el tanque de almacenamiento. En este proceso de rellenado, se considera nuevamente el paso del gas a través de la unidad de filtrado, lo cual asegura su eficaz purificación para su nueva puesta en servicio.

El diagrama esquemático de una máquina de tratamiento y sus principales partes constitutivas, se detallan en las *figura anexa 6.19*.

#### **6.2.1.4 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) Para la conexión entre el compartimento a intervenir y la máquina de tratamiento, se recomienda utilizar una manguera de caucho resistente a altas presiones, por lo general de diámetro 1" a 1½".

- 2) Se deben realizar los siguientes chequeos previos a la máquina de tratamiento de gas, antes de su arranque:
  - a. Verificar el correcto nivel de aceite de la bomba de vacío y si este no contuviera humedad (presentándose en forma nublosa).
  - b. Realizar una inspección visual de las conexiones de las tuberías y de los instrumentos, en busca de cualquier posible daño.
  - c. Conectar la alimentación de la máquina a una fuente de poder que cumpla las características descritas en la placa del equipo. Asegurar el uso adecuado de la protección de cortocircuito.
  - d. Verificar la correcta secuencia de las fases y aterrizar apropiadamente la máquina.
  
- 3) Previamente a la intervención del gas SF<sub>6</sub> de un compartimento, es recomendable conocer su estado, realizando ensayos de medición de porcentaje de gas y humedad (temperatura de punto de rocío). Esto, con la finalidad de tener una idea de cuan contaminado pudiera estar el gas y su posible influencia sobre la saturación inmediata de los cartuchos filtrantes de la máquina de tratamiento.

4) Consultar el diagrama de bloques del equipo de tratamiento a utilizarse, con el fin de seleccionar correctamente las válvulas a ser ABIERTAS y CERRADAS, de tal forma que:

1. Se realice la evacuación únicamente de la manguera a utilizarse en la interconexión con el equipo encapsulado.

*El objetivo de esto, es eliminar la humedad posiblemente presente en el interior de la manguera, ya que se desconoce el estado en que esta se encontraba previamente a su uso.*

2. Una vez evacuada la manguera de interconexión, esta se conecte al respectivo compartimiento y se dé inicio al proceso de extracción de gas para su descontaminación mediante filtración, siendo este finalmente almacenado en un tanque auxiliar.
3. Ya extraído todo el gas del compartimento, este sea evacuado (aplicación de vacío) con la finalidad de ser secado internamente.
4. Finalmente el gas ya purificado sea retornado a su compartimento de origen.

- 5) En el momento de determinar la presión final de llenado del compartimento de un equipo encapsulado, se recomienda tomar en cuenta la curva de corrección de presión de gas SF<sub>6</sub> por temperatura en función de su densidad (mostrada en la *figura anexa 6.20*). Esto, debido a que es muy poco probable coincidir la aplicación de dicho proceso en campo a la temperatura ambiente de 20°C a la cual el fabricante especifica en placa la presión final de llenado de gas.

***Ejemplo:***

***El fabricante de un equipo encapsulado, recomienda establecer una presión final de llenado de 6 Bar a 20°C, para uno de sus compartimentos que está siendo intervenido. Si el proceso de llenado de gas se está realizando a una temperatura ambiente de 30°C, cual debería ser la presión final a establecer en dicho compartimento?***

1. Interpolando en el gráfico de la figura anexa 6.19 con los datos de placa de presión (6 bar) y temperatura (20°C), hallamos el punto de intersección de ambos parámetros que a su vez determinan la curva de densidad del gas SF<sub>6</sub> correspondiente. (trazado celeste del gráfico de la *figura anexa 6.21*)

2. Ya determinada la respectiva curva de densidad ( $46\text{Kg/m}^3$ ), interpolamos con referencia a esta, la temperatura ambiente de campo a la cual se está realizando el proceso de llenado ( $30^\circ\text{C}$ ), cuya proyección hacia el eje “y” nos permite conocer finalmente el nuevo valor correspondiente de presión. (Trazado verde del gráfico de la *figura anexa 6.21*)

***La presión finalmente determinada de 6.3bar (a  $30^\circ\text{C}$ ), es la que debe ser considerada como de referencia para establecerse en el compartimento del equipo encapsulado como la presión de fin de llenado y de nueva puesta en servicio.***

*Para el control de la presión del compartimento durante el llenado, es recomendable instalar un manómetro padrón tipo pluma a la manguera de interconexión, de una escala amplia cuya lectura máxima de presión este cercanamente por encima del valor nominal del compartimento.*

- 6) El flujo de llenado de gas  $\text{SF}_6$  de un compartimento, debe ser regulado manualmente, siendo al inicio lento y posteriormente incrementado acorde con el aumento de presión en el compartimento. No se recomienda establecer un flujo de llenado muy rápido.

## **6.2.2 SECADO INTERNO DEL EQUIPO ENCAPSULADO**

### **6.2.2.1 Consideraciones Generales**

No existe más de un proceso para el secado interno del compartimento de un equipo encapsulado, como trata en el caso de los transformadores de potencia. El único método aquí establecido, sólo se basa en la aplicación de alto vacío.

### **6.2.2.2 Método de aplicación de alto vacío**

Este método consiste en conectar en serie directamente al compartimento del equipo encapsulado, una bomba que permita aplicar alto vacío (de  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  Torr), a la temperatura ambiente y durante el tiempo que sea necesario hasta lograr la extracción de la humedad a los límites establecidos.

#### **6.2.2.2.1 Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) Para la interconexión entre el compartimento y la bomba de vacío, se deben utilizar mangueras de caucho resistente a altas presiones, de diámetro nunca menor a 1½" y de longitudes cortas.

*Previamente a la aplicación del proceso, se debe aplicar vacío a la manguera para confirmar su estado (hermeticidad).*

- 2) Como regla general, antes de iniciar el proceso de secado, se debe consultar en los manuales del fabricante del equipo encapsulado, la mínima presión de vacío que resiste cada uno de sus compartimentos.
- 3) Para la aplicación de este proceso debe usarse una apropiada bomba de vacío que cumpla las siguientes condiciones:
  - a. Que alcance un nivel de último vacío menor a 1mbar.
  - b. Que tenga una capacidad de desplazamiento de aproximadamente la mitad de lo recomendado para el secado de un transformador de potencia, acorde con las dimensiones reducidas de un compartimento.

*Para lograr estos valores requeridos, basta el uso de una bomba de vacío de paletas rotativas de un solo paso, sellada con aceite y en algunos casos, complementada con un soplador o booster conectado en serie, que le permita alcanzar una presión de vacío mucho menor.*

- 4) Se recomienda monitorear el nivel de vacío aplicado a un compartimento mediante el uso de un vacuómetro patrón (medidor de presión de vacío), conectado a la manguera de interconexión, lo más cercano posible al acople del equipo encapsulado (lejos de la bomba de vacío).

*Luego de alcanzado el nivel de vacío esperado, parar la bomba y confirmar en el vacuómetro que durante 15 minutos no se produzca un aumento de presión en más de 5mbar, caso contrario existe un punto de pérdida de vacío que debe ser corregido. La válvula principal de interconexión entre la bomba y el compartimento, debe permanecer cerrada durante la medición.*

- 5) Llevar un control de las lecturas del vacuómetro en intervalos de tiempo. Cuidar que el nivel de vacío aplicado durante el proceso no sobrepase el valor límite dado por el fabricante del equipo encapsulado.
- 6) Finalizar el proceso de vacío (apagar la bomba) luego de 1 hora de haber alcanzado una presión interna de 1Torr Normalmente cuando se alcancen niveles de vacío cercanos a 0.1mbar.
- 7) Se deben realizar mediciones cuantitativa y/o cualitativa del contenido de humedad en el interior del compartimento, antes y después del proceso de secado. Esto con el objetivo de verificar la eficiencia del proceso.

### **6.2.2.3 Determinación cuantitativa del contenido de humedad en el gas**

Para la determinación cuantitativa del contenido de humedad en el gas SF<sub>6</sub> inmerso en uno de los compartimentos del equipo encapsulado, es necesario

emplear un instrumento de medición que permita determinar el punto de rocío (la temperatura a la que comienza la condensación del vapor de agua) de dicho gas.

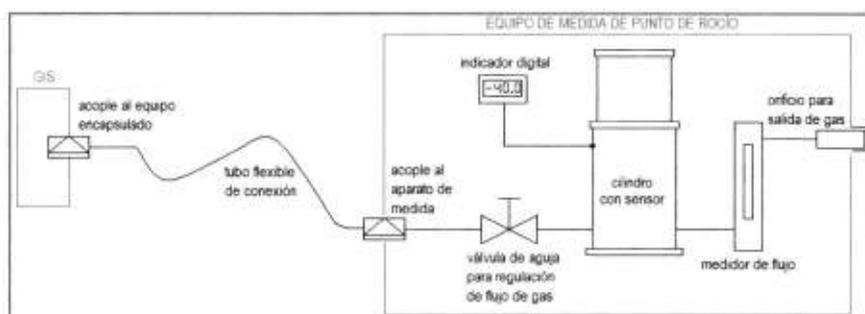
A partir del punto de rocío obtenido con el instrumento de medición, se obtiene el contenido de humedad en el gas (en ppm) mediante interpolación en el gráfico característico del gas SF<sub>6</sub> que se muestra en la *figura anexa 6.22*. Este gráfico relaciona la temperatura de punto de rocío (en el eje x) con el contenido de vapor de agua en ppm (eje y) tanto en masa como en volumen.

Las temperaturas de punto de rocío correspondientes al contenido de humedad admisible dentro de un compartimento del equipo encapsulado son:

	<b>Punto de rocío</b>
Valor límite crítico de humedad	- 5 °C (+ 23 °F)
Humedad máx. admisible en la puesta en servicio / durante el funcionamiento	- 10 °C (+ 14 °F)

### **6.2.2.3.1 Principio de funcionamiento del instrumento para determinar el punto de rocío del gas SF<sub>6</sub>**

El principio de funcionamiento de este instrumento, se basa en el siguiente diagrama funcional:



**Figura 6.5** – Diagrama funcional del instrumento de medida de punto de rocío

El gas extraído del compartimento del equipo encapsulado bajo ensayo, es ingresado a través de un tubo flexible en el instrumento de medición, alojándose en su interior en un cilindro cerrado dentro del cual encuentra un sensor en cuyos poros microscópicos penetra el vapor de agua del gas. Este sensor transfiere sus datos en forma de señales eléctricas hacia un indicador digital, en el cual se indica directamente la temperatura de punto de rocío en °C.

### **1. Principales recomendaciones a seguir para la aplicación de este método**

- 1) La conexión del instrumento es directa al acople del compartimento del equipo encapsulado y se debe utilizar una manguera de teflón reforzada con una malla metálica, de diámetro aproximado  $\frac{1}{2}$ ".

*Generalmente el fabricante recomienda el uso de la propia manguera suministrada con el instrumento y no el uso de otra similar.*

2) Previamente a la interconexión del instrumento de medición con el compartimento del equipo encapsulado, se debe considerar lo siguiente:

- a. Verificar las características de la fuente de voltaje requerida por el instrumento.
- b. La manguera de interconexión y sus respectivos acoples, deben presentarse secos y limpios, antes de la interconexión.

*Si la humedad esta visible en los acoplamientos, esta debe ser retirada con un trapo seco y posteriormente secada por 15 minutos o más mediante un secador de mano, alcanzando una temperatura de 60°C. Por otro lado, si la humedad ha ingresado en la manguera, esta deberá ser desconectada en ambos extremos y sometida a presión de gas seco (por ejemplo, Nitrógeno) por un tiempo aproximado de 5 minutos*

- c. Asegurarse que el compartimento bajo ensayo del equipo encapsulado, se encuentre a la presión de servicio. Dicha presión no debe exceder a 10 bar, salvo el caso que el fabricante indique lo contrario.

- 3) Ya realizada la interconexión entre el compartimento y el instrumento de medición, se debe realizar la transferencia de gas a través de la manguera con un flujo de baja velocidad, regulado generalmente mediante una válvula dispuesta en el propio instrumento. Normalmente la velocidad del flujo suele estar en un rango de 0.1lt/min. a 1 lt/min. de gas SF<sub>6</sub>, dependiendo del fabricante.
  
- 4) La operación del instrumento de medición debe ser efectuada de acuerdo a las recomendaciones de su fabricante expuestas en el respectivo manual de operación.

*El tiempo de medición necesario depende del punto de rocío medido. Mientras más seco se encuentre el gas bajo ensayo, más tiempo se tomará el instrumento en su determinación.*

- 5) Registrar los valores obtenidos de punto de rocío del gas en cada uno de los compartimentos del equipo encapsulado.

### **6.3 CASOS SOBRE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRESERVACIÓN DEL AISLAMIENTO EN EQUIPOS DE ALTA TENSIÓN INSTALADOS EN VARIAS DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS QUE CONFORMAN EL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN (SNT)**

#### **6.3.1 Consideración básica**

Se considera que todos los equipos de alta tensión que forman parte de una subestación de transmisión son de importancia, no así, debido a su complejidad y dimensiones, los transformadores de potencia y los equipos encapsulados en gas SF<sub>6</sub>, se destacan por exigir mayores cuidados de su sistema de aislamiento, tanto en el periodo de montaje (durante el cual se exponen sus partes internas al ambiente) como a lo largo de sus años de operación.

Por tal razón, en este último capítulo se ha tratado en detalle los diferentes métodos aplicados para preservar o cuidar el aislamiento de dichos equipos, siendo aquí finalmente puestos en práctica a través de dos casos reales suscitados en el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), actualmente mantenido y operado por la Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica TRANSELECTRIC S.A.

## **6.3.2 CASO I – Aplicación de los métodos de preservación del aislamiento en un Transformador de Potencia**

### **6.3.2.1 Descripción**

Este primer caso trata sobre la aplicación de los métodos de preservación del sistema del aislamiento de un transformador de potencia recientemente instalado campo, como parte del proceso de ensamblaje inicial previo a su puesta en servicio en la posición de “reserva” del banco de transformadores signado como ATQ, existente en la Subestación “Machala”, localizada en la provincia del Oro y que forma parte de la Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los métodos de preservación aquí aplicados, están dirigidos al secado interno del transformador y al reacondicionamiento de su aceite aislante de inmersión.

### **6.3.2.2 Características del transformador**

El transformador de potencia en referencia, corresponde a uno del tipo monofásico con disposición de tres arrollamientos, de los cuales dos (AT y BT) se disponen como autotransformador y uno separadamente como arrollamiento terciario. Sus demás características tanto técnicas como físicas, se detallan en la *figura anexa 6.23* de este capítulo.

### **6.3.2.3 Descripción de los métodos de preservación aplicados**

#### **6.3.2.3.1 Cuidados del sistema de aislamiento aplicados durante el ensamblaje del equipo**

Al presenciar el ensamblaje en campo del transformador en referencia, pude constatar cuan vulnerable es el aislamiento interno de este equipo (el celulósico) a los efectos de contaminación, dado al inevitable contacto con el aire ambiente al que se ve expuesto en el tiempo que se mantiene abierta la cuba para instalación de ciertos accesorios como es el caso de los bushing's.

No obstante, se pudo comprobar que dicha vulnerabilidad del aislamiento interno a los efectos de contaminación, puede ser amortiguada con la aplicación de ciertas actividades no muy complejas que de por sí ayudarían en lo posterior a los métodos de preservación normalmente recomendados. Estas actividades fueron las siguientes

- 1) Se tomó en cuenta las condiciones ambientales en que se realizó la apertura de la cuba. Por tanto, esta se realizó teniendo un ambiente muy soleado, con una temperatura de 35°C y humedad relativa de 49%.

- 2) Durante los trabajos de instalación de los bushing's, se procuró inyectar nitrógeno seco al interior de la cuba, con el fin de reducir en forma significativa el ingreso de aire húmedo.

NOTA: Existen fabricantes que recomiendan instalar los bushing's con la cuba del transformador en un 80% llena de aceite aislante para evitar el contacto directo de la humedad del aire ambiente con el aislamiento celulósico.

*Fotografías captadas en sitio, relacionadas con lo aquí expuesto, se detallan en las figuras anexas 6.24.A, B, C, D, E.*

#### **6.3.2.3.2 Secado interno del equipo**

Posterior al ensamblaje total del transformador, considerando la posible incidencia que pudo haber tenido la humedad del aire ambiente en su aislamiento celulósico interno (a pesar de los cuidados aplicados), se requiere aplicar un proceso de eficiente secado.

En nuestro medio, es común utilizar para este propósito el método de aplicación de alto vacío. Es así, que para el caso en referencia se dispuso de una bomba de vacío mecánica (de paletas rotativas), reforzada con un booster, cuyas características tanto físicas como técnicas, se detallan en la *figuras anexa 6.25.*

Se tomaron en cuenta las recomendaciones dadas en el ítem (1) del literal 6.1.2.2.6, siendo cumplidas de la siguiente manera:

- 1) Para la conexión de la bomba de vacío al transformador, se utilizó una manguera de caucho de diámetro 2".
- 2) Conforme al diseño del transformador en referencia, se planteó el diagrama de análisis del sentido de las presiones internas a ser aplicadas con la bomba de vacío. En base a este diagrama, se determinó la posición adecuada de ciertas válvulas y la implantación de conexiones externas (bypass) necesarias, con el fin de evitar diferencias de presiones entre compartimentos del propio equipo. Dicho diagrama se pone en detalle en la *figura anexa 6.26*.
- 3) La medición de la presión de vacío se la realizó cercano a la cuba, para lo cual se utilizó un vacuómetro de pluma, con rango de medición de 0 a 760 Torr de presión absoluta.
- 4) Se llevo un control de las lecturas de vacío aplicadas, cuyos valores de campo fueron registrados en el *formulario anexo 6.A1*.

*Aquí se puede constatar que luego de 24 horas de haber alcanzado 1 Torr de presión de vacío, se logro obtener una presión final de 0.3 Torr*

*(0.41mbar) en la cual se dio por terminada la aplicación de vacío, la misma cuya estabilidad se monitoreo durante un periodo de 8 horas con el fin de reafirmar la inexistencia de puntos de vaciamiento o fugas.*

Cabe recalcar que antes de la aplicación del proceso de secado interno del transformador con alto vacío, este fue sometido a un proceso de hermeticidad con inyección de nitrógeno seco hasta una presión de 5PSI, verificándose su estabilidad por un periodo de 24horas. Esto se realiza con el fin de descartar cualquier fuga presente en los puntos intervenidos durante el montaje, asegurando la aplicación normal de vacío. Adicionalmente, se aprovecha este gas nitrógeno seco en reposo dentro del transformador, para realizar la medida de contenido de humedad en el aislamiento celulósico estableciendo una referencia previa que permita evaluar la eficiencia del método de secado a ser aplicado.

*En este caso, al carecer de los instrumentos adecuados, no se realizó la medición del contenido de humedad en el aislamiento celulósico ni antes y después del proceso de secado, con el fin de establecer una comparación que permita verificar los logros alcanzados. Por lo general, este es uno de los problemas que se presenta en nuestro medio, tanto las compañías que brindan este tipo de servicio como las que lo requieren, no muestran el interés necesario por aplicar de manera adecuada estos métodos.*

*Fotografías captadas en sitio, relacionadas con lo aquí expuesto, se detallan en las figuras anexas 6.27.A, B, C, D.*

### **6.3.2.3.3 Tratamiento de reacondicionamiento del aceite aislante**

Para el reacondicionamiento del aceite aislante del transformador en referencia, se aplicó el método de deshidratación al vacío (o termovacío), siendo las características de la máquina aquí utilizada, las que se detallan en las *figuras anexas 6.28 y 6.29.A, B, C, D, E, F, G, H, I*. Cabe recalcar que en nuestro medio es común la aplicación de este método.

Este proceso fue realizado en dos etapas, la primera con el aceite fuera del transformador, y la segunda con el aceite ya inmerso en el transformador.

*Para el caso de la primera etapa*, los 17413 litros de aceite requeridos por el transformador para su inmersión, fueron almacenados en un solo tanque metálico. Este tanque disponía de válvulas tanto inferior como posterior con el fin de permitir la recirculación del aceite a través de la máquina de termovacío, implantándose el mismo esquema de conexión aplicado con el transformador.

Tomando en cuenta las características nominales de la máquina de termovacío, se estableció un flujo de circulación de aceite de 2500 litros/hora, por un periodo de 21 horas ininterrumpidas, con el fin de lograr aproximadamente tres

pasadas completas de la totalidad de dicho líquido aislante. Este proceso se monitoreó cada hora, tomándose lecturas periódicas del medidor de flujo disponible en la máquina; adicionalmente, después de cada pasada se receptaron muestras de aceite para ser analizadas mediante ensayo de rigidez dieléctrica con el fin de verificar su mejora (referencia ejemplo del capítulo V sobre ensayos aplicados).

*Por lo general, este proceso se lo aplica paralelamente al de secado del transformador, cuya finalidad es prepararlo para su posterior inmersión, ya con sus características mejoradas, libre de contenido de humedad y partículas extrañas.*

*Para el caso de la segunda etapa, los 17413 litros de aceite requeridos por el transformador ya se encuentran en su interior, y el proceso de termovaciación se establece implantando el esquema de conexión similar al mostrado en la *figura anexa 6.5*, donde el aceite es recirculado entre el equipo y la máquina de termovaciación.*

Para este caso, se consideró que el flujo no debe exceder un máximo de 2000 litros/hora, con el fin de evitar turbulencias a su entrada, que puedan originar golpeteos en los elementos internos del transformador, tales como las bobinas (especialmente su aislamiento). Considerando que la totalidad de este aceite ya

fue reacondicionado previamente fuera del transformador, no es necesario realizar más de una pasada estando inmerso.

*Fotografías captadas en sitio, relacionadas con la aplicación de este método en campo, se detallan en la figura anexa 6.30.*

### **6.3.3 CASO II – Aplicación de los métodos de preservación del aislamiento en un Equipo Encapsulado**

#### **6.3.3.1 Descripción**

Este segundo caso trata sobre la aplicación en campo de los métodos de preservación del sistema del aislamiento de un equipo encapsulado en gas SF<sub>6</sub> recientemente instalado, como parte del proceso de ensamblaje inicial previo a su puesta en servicio en la Subestación “Salitral”, localizada en la provincia del Guayas y que forma parte de la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Los métodos de preservación aquí aplicados, están dirigidos al secado interno de los compartimentos que conforman el equipo encapsulado y al tratamiento del gas SF<sub>6</sub> a utilizar en su inmersión.

### **6.3.3.2 Características del equipo encapsulado**

El equipo encapsulado de referencia en este caso, es el mismo que se trató en el caso V del capítulo anterior, por tanto, se recomienda citar nuevamente sus correspondientes características ya detalladas en el literal 5.6.

### **6.3.3.3 Descripción de los métodos de preservación aplicados**

#### **6.3.3.3.1 Cuidados en el ensamblaje del equipo**

Durante el ensamblaje del equipo encapsulado, se pudo constatar que es inevitable dejar de exponer la parte interna de sus compartimentos al ambiente, dada la necesidad de intervenir en el acoplamiento de sus barras. A diferencia del transformador, este no posee algún material aislante en su interior que tenga elevada afinidad con la humedad como lo es el caso del papel u otro material de origen celulósico. De esta forma, se considera que el riesgo de contaminación interna es menor pero no despreocupante, ya que el ingreso considerable de humedad y/o partículas extrañas, podrán ser indicio de futuras descargas parciales, especialmente cuando se dé su asentamiento en los aisladores de resina soportes de barras, donde por lo general se crean caminos preferenciales.

Cabe recalcar, que la inevitable exposición de la parte interna de los compartimentos al ambiente, se debe a los trabajos de inspección, limpieza, e instalación de contactos para acoplamiento de las barras colectoras.

Al igual que en el transformador de potencia, se pudo constatar que aquí también se pueden aplicar ciertas actividades no muy complejas que ayudarían en lo posterior a los métodos de preservación normalmente recomendados. Estas actividades fueron las siguientes:

- 1) La remoción interna en el compartimento, de partículas extrañas producto del montaje, a través de un proceso de aspiración minucioso tanto de la superficie metálica como la de los aisladores resínicos soportes de barras colectoras.
- 2) La limpieza de la superficie de los aisladores resínicos de cada compartimento, con alcohol embebido en una tela especial.
- 3) La colocación de bolsas o filtros nuevos de tamiz molecular previamente al cierre del compartimento.

*Fotografías captadas en sitio, relacionadas con lo aquí expuesto, se detallan en las figuras anexas 6.31.A, B, C, D, E.*

#### **6.3.3.2 Secado interno del equipo**

Luego de concluir los trabajos de acoplamiento de todos los módulos que conforman el equipo encapsulado, se requirió obligatoriamente someter a cada

uno de estos al proceso de evacuación con el fin de realizar un eficiente secado que elimine el contenido de humedad ingresada durante el periodo de ensamblaje.

Es así, que para este caso se disponía de una eficiente bomba de vacío, la misma que formaba parte del circuito operacional de una máquina de tratamiento de gas SF<sub>6</sub>, de características detalladas en las *figuras anexas 6.32 y 6.33.A, B, C*.

Se pudo comprobar que el tiempo de duración de este proceso (tiempo que dura obtener un vacío menor a 1mbar), depende de las dimensiones de cada módulo, siendo de un periodo aproximado de quince minutos para módulos pequeños como de los seccionadores, TC's y TP's, y de casi una hora para los módulos que abarcan todas las barras colectoras principales del esquema del equipo encapsulado. Por lo tanto, con el fin de dar una idea sobre los parámetros a tomar en cuenta en la aplicación de este proceso, se expone en el *formulario anexo 6.B1*, las lecturas tomadas en campo durante su aplicación en uno de los compartimentos del equipo en referencia.

El circuito de aplicación de este proceso, planteado con la máquina de tratamiento en referencia (utilizando la bomba de vacío), corresponde al mostrado en la *figura anexa 6.34*.

### 6.3.3.3 Llenado de gas SF<sub>6</sub> purificado

Es necesario, que la última presión de vacío obtenida en el compartimento con la aplicación del proceso de secado, sea superada obligatoriamente con el ingreso del mismo gas SF<sub>6</sub> disponible para su llenado final. Es así, que dicho gas a ser ingresado, debe estar purificado, libre de humedad y de cualquier contenido de partículas extrañas.

Para este caso, el gas SF<sub>6</sub> utilizado para el llenado de los compartimentos del equipo en referencia, se encontraba disponible en una botella grande de 600Kg, certificado por el fabricante con características 99.99% seco y puro. El trasvase de este gas hacia los compartimentos del equipo encapsulado, fue realizado a través de la misma máquina de tratamiento, cuyo circuito operacional implantado, se detalla en la *figura anexa 6.35*.

Para asegurar que el gas SF<sub>6</sub> sea ingresado libre de partículas y humedad, se consideró en el circuito operacional de la máquina, su paso a través de la respectiva unidad de filtrado disponible.

El proceso de llenado de gas al igual que el de secado del equipo encapsulado, depende de las dimensiones de sus compartimentos, y adicionalmente de la regulación del flujo de trasvase y la presión final de llenado según especificaciones del fabricante (ver ítem 5 de literal 6.2.1.4). Para el equipo

encapsulado en referencia, los compartimentos requerían de una presión nominal de 6.1bar. El tiempo de llenado para compartimentos pequeños fue de 10 a 15 minutos y para compartimentos grandes (barras principales) de 30 a 45 minutos.

*Fotografías captadas en sitio, relacionadas con la aplicación tanto del proceso de secado como el proceso de llenado de gas SF<sub>6</sub> en este equipo encapsulado, se muestran en las figuras anexas 6.36.A, B, C.*

#### **6.3.3.4 Ensayos de verificación del estado del gas SF<sub>6</sub> previamente a la puesta en servicio del equipo encapsulado**

El gas SF<sub>6</sub> al igual que el nitrógeno en el interior de la cuba de un transformador (en el proceso de verificación de secado), se expone a la transferencia de humedad con los elementos internos presentes hasta llegar a un estado de equilibrio luego de un cierto tiempo en reposo. Es así, que si el gas ingresado no se encontraba lo suficientemente seco, o por el contrario, si el proceso de evacuación aplicado previamente no ha logrado el secado interno esperado, se originaría la presencia significativa de vapor de agua en el gas que puede ser determinada mediante el ensayo de medida de su punto de rocío.

Para el caso en referencia, este ensayo fue aplicado a cada compartimento del equipo encapsulado, conforme el diagrama mostrado anteriormente en la figura

6.5. Siendo las características del equipo de ensayo utilizado, las que se muestran en detalle en la *figura anexa 6.37*.

El principio de funcionamiento del equipo de ensayo utilizado, responde a lo expuesto en el literal 6.2.2.3.1., tomándose en cuenta los siguientes criterios recomendados por su fabricante:

- Si el instrumento de ensayo indica una lectura de punto de rocío mayor a  $-35^{\circ}\text{C}$  y dicha lectura no se ha movido en el último minuto, el valor debe considerarse como valedero.
- Si el instrumento de ensayo indica una lectura de punto de rocío menor a  $-35^{\circ}\text{C}$  por un tiempo mayor a 15 minutos, el valor debe considerarse como valedero.

Para la aplicación de este ensayo en campo, se tomaron en cuenta las recomendaciones dadas en el ítem (1) del literal 6.2.2.3.1. El técnico representante del fabricante SIEMENS, estableció como criterio de aceptación en campo para este ensayo, realizar la medición hasta que en el equipo se presente una lectura menor a  $-40^{\circ}\text{C}$  de punto de rocío para todos los compartimentos del equipo encapsulado.

Se pudo constatar que dicho criterio se cumplió para todos los compartimentos del equipo encapsulado en referencia, concluyéndose que el gas SF<sub>6</sub> utilizado para la inmersión de este equipo se encontraba con un contenido de humedad aceptable de menos de 17ppm (en masa) mucho menor que el máximo admisible de 350ppm (a -10°C de punto de rocío).

*Fotografías captadas en sitio, durante la aplicación de este ensayo en los compartimentos del equipo encapsulado del caso en referencia, se muestran en las figuras anexas 6.38.*

## CONCLUSIONES

- 1) Es necesario conocer previamente la estructura constructiva interna de un equipo de alta tensión, para poder identificar las respectivas secciones de aislamiento que requieren ser analizadas con los diferentes ensayos dieléctricos existentes.
- 2) El poseer un amplio conocimiento sobre las propiedades y características de los distintos materiales aislantes involucrados en la construcción de un equipo de alta tensión, facilita la interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos dieléctricos aplicados, permitiendo en lo posible detectar la localización de algún problema presente.
- 3) Se ha verificado que uno de los principales motivos de la tendencia en el uso cada vez más del gas SF<sub>6</sub> en interruptores de potencia, se debe a que este a pesar de descomponerse con la extinción del arco se vuelve a recomponer en casi un 100%, situación que por el contrario no ocurre con el aceite aislante que como resultado se degrada formando gases y demás partículas que contribuyen a la contaminación interna del equipo.
- 4) Se ha comprobado que para equipos de alta tensión de grandes dimensiones, en los cuales de manera directa o indirecta se expone su aislamiento interno al

ambiente, se requiere la aplicación de minuciosos cuidados y varias técnicas especiales de análisis que permitan verificar su estado previamente a la puesta en servicio.

- 5) Se ha determinado mediante investigaciones realizadas, que la humedad es uno de los factores que incide significativamente en la contaminación y/o degradación de los materiales aislantes sólidos y líquidos presentes en un equipo de alta tensión.
- 6) Se ha determinado mediante investigaciones realizadas, que el aceite mineral hasta cierto punto de deterioración, es el único material aislante que puede recuperar sus características dieléctricas, mediante la aplicación de métodos especiales de tratamiento
- 7) Sobre la aplicación de los métodos de ensayos dieléctricos para el control del aislamiento en los principales equipos de alta tensión de nuestro Sistema Eléctrico, se ha podido comprobar que no se ejecutan los análisis debidamente y tampoco se realizan estudios estadísticos de su comportamiento con los años en servicio.
- 8) Se ha comprobado que el establecimiento de métodos, procedimientos y criterios de evaluación de resultados, ayuda en la correcta aplicación de los ensayos

dieléctricos, determinando el control oportuno de los materiales aislantes y previniendo fallas posteriores de los equipos de alta tensión.

9) De los casos reales analizados en el capítulo V:

- **CASO I:** Luego de aplicar los diferentes criterios para el cuestionamiento de los resultados obtenidos de ensayos en campo de medida de la resistencia de aislamiento, determinación del factor de potencia y análisis del aceite aislante por separado, se llegó a la conclusión de que el aislamiento íntegro del transformador de potencia en referencia se encuentra en buenas condiciones y se descarta algún indicio de contaminación y/o deterioración del mismo.
  
- **CASO IIA / CASO IIB:** Luego de aplicar los diferentes criterios para el cuestionamiento de los resultados obtenidos de ensayos en campo de medida de la resistencia de aislamiento y determinación del factor de potencia, se llegó a la conclusión de que el aislamiento íntegro de cada uno de los tres transformadores de tensión y de corriente de referencia en cada caso, se encuentra en buenas condiciones, descartando algún indicio de contaminación y/o deterioración del mismo. No obstante, la unidad de la fase “A” en comparación con las demás (en ambos casos), presenta una mayor fuga de potencia activa en su aislamiento por pérdidas mediante efecto Joule.

- **CASO IIB:** Luego de aplicar los diferentes criterios para el cuestionamiento de los resultados obtenidos de ensayos en campo de medida de la resistencia de aislamiento del transformador intermediario y determinación de la Capacitancia de las bobinas capacitivas en serie, se llegó a la conclusión de que el aislamiento íntegro del transformador de tensión capacitivo en referencia, se encuentra en buenas condiciones, descartando algún indicio de contaminación y/o deterioración del mismo.
  
- **CASO III:** Al comprobar que los resultados de medidas de resistencia de aislamiento de cada columna aisladora soporte de las cuchillas del seccionador, son superiores al valor mínimo referencial de  $25000M\Omega$  dado en base a la experiencia, se llegó a la conclusión de que el aislamiento íntegro de cada polo se encuentra en buenas condiciones, descartando algún indicio de contaminación dado especialmente en la superficie de las columnas donde se asientan contaminantes orgánicos del ambiente.
  
- **CASO IV:** Al comparar los resultados de medida de la resistencia de aislamiento entre interruptores similares instalados en el mismo sistema, se llegó a la conclusión de que el aislamiento del equipo en referencia presentaba exceso de contaminación, dado especialmente por la carbonización de su aceite aislante.

- **CASO V:** Al verificar que no se presentó falla alguna ante la aplicación del alto voltaje (120 kV) de ensayo de resonancia en serie con frecuencia variable durante el periodo de un minuto, se llegó a la conclusión de que el aislamiento íntegro del equipo encapsulado en referencia se encuentra en buenas condiciones, descartando algún indicio de contaminación originado especialmente durante su ensamblaje.

10) Sobre la aplicación de los métodos de preservación del aislamiento en los principales equipos de alta tensión de nuestro Sistema Eléctrico, se ha podido comprobar que no se realiza el monitoreo del contenido de humedad antes, durante y después del proceso de secado de un transformador de potencia. Además, se ha verificado que hasta la actualidad, ningún transformador de potencia de los que se encuentran instalados, ha sometido su aceite aislante a algún proceso de tratamiento de regeneración.

## RECOMENDACIONES

- 1) Identificar los diferentes materiales aislantes que se involucran en la estructura constructiva de cada equipo de alta tensión, estudiar sus propiedades y características.
- 2) Identificar las diferentes secciones de un equipo de alta tensión donde se originan diferencias de potencial en servicio, con el fin de verificar mediante ensayos dieléctricos el estado del aislamiento involucrado en ella.
- 3) Familiarizarse con cada instrumento de ensayo a utilizarse en el análisis del estado del aislamiento de un equipo de alta tensión en campo, conocer el principio básico de su funcionamiento y los parámetros que este permite analizar
- 4) Estandarizar para cada equipo de alta tensión instalado en campo, los métodos de ensayos dieléctricos a ser aplicados, esto con el fin de establecer un análisis comparativo más real entre investigaciones periódicas realizadas.
- 5) Realizar un monitoreo más frecuente sobre el estado del aislamiento de un interruptor de potencia inmerso en aceite mineral aislante, dando prioridad a los que se encuentran instalados en los extremos de las líneas de transmisión, que

por lo general son los más propensos a continuas interrupciones por fallas y por ende a mayor origen de contaminación y/o degradación de su aislamiento.

- 6) Analizar con mayor frecuencia el aceite aislante contenido en las llaves conmutadoras de los transformadores de potencia, especialmente los que soporten operaciones continuas de su LTC para regulación de voltaje del sistema, dado que aquí se origina proporcionalmente mayor contaminación.
- 7) Tratar en lo posible de efectuar bajo similares condiciones, los ensayos dieléctricos periódicos recomendados en un equipo, con el fin de establecer un análisis estadístico comparativo de la evolución del estado de su aislamiento con los años en servicio
- 8) Efectuar durante la aplicación del respectivo proceso de secado de los transformadores de potencia instalados en nuestro Sistema Eléctrico, el correspondiente monitoreo de contenido de humedad en su aislamiento celulósico.
- 9) Realizar un análisis estadístico sobre el estado de deterioración del aceite aislante en los transformadores de potencia instalados en nuestro Sistema Eléctrico, esto con el fin de determinar si ya es necesaria la aplicación de algún método de tratamiento de regeneración.

10) Para el análisis y diagnóstico del aislamiento de los equipos de alta tensión en campo, se recomienda revisar las siguientes normas y/o publicaciones internacionales:

- **ABNT-NBR-108/1978**, criterios de cuestionamiento de los resultados de medida de resistencia de aislamiento de transformadores.
- **ASTM-D3487**, métodos de ensayo para el análisis físico-químico del aceite aislante.
- **ABNT-NBR.7274/1982**, criterios de cuestionamiento de contenido de gases disueltos en el aceite aislante de un transformador en relación a una falla incipiente.
- **ASTM D-923**, procedimientos para la toma de muestras de aceite aislante de los equipos de alta tensión.
- **IEEE STANDARS C57.106-2002**, criterios para la aceptación y mantenimiento del aceite mineral aislante de equipos.
- **IEC 56-4**, criterios de ensayos dieléctricos aplicados en interruptores de potencia.
- **IEC 62271-203**, criterios de ensayos dieléctricos aplicados en equipos encapsulados en Gas Hexafluoruro de Azufre SF<sub>6</sub>.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Sabino, Carlos A., *Cómo hacer una tesis y elaborar todo tipo de escritos*, Ed. Lumen / HVmanitas, Argentina, 1998
2. Roth, Arnold, *Técnica de la alta tensión*, Ed. Labor S.A, Barcelona, 1966
3. Ramírez Vásquez, José, *Materiales Electrotécnicos*, Ed. CEAC, Barcelona, 1977
4. Von Hippel, Arthur R., *Dielectric Materials and Applications*, Ed. The Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1954
5. Colombo, Roberto, *Disyuntores de alta tensão*, Ed. Siemens S.A São Paulo e Livraria Nobel S.A, São Paulo, 1986
6. Ramírez Vásquez, José, *Estaciones de transformación y distribución – Protección de sistemas eléctricos*, Ed. CEAC, España, 1972
7. Milasch, Milan, *Manutenção de transformadores em líquido isolante*, Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1983
8. Doble Engineering Company, *Doble test procedure manual*, Ed. Doble Engineering Company, Massachusetts, 2000
9. Mitsubishi Electric Corporation, *Test Techniques of GIS/GCB*, Ed. Mitsubishi Electric Corporation, Japón, 1980
10. Trench Electric, *Manual de Transformadores de Tensión Capacitivos*, Trench Electric, Junio, 1983

11. Mitsubishi Electric Corporation, *Manual de Instrucciones Disyuntores en aceite tipo 70-GTE-20A*, Ed. Mitsubishi Electric Corporation, Japón, 1980
12. Gallo, Martínez Ernesto, *Diagnóstico y Mantenimiento de Transformadores en campo*, Ed. Asociación Colombiana de Ingenieros, Bogotá, 2005
13. DILO, *Manual de instrucciones de empleo para Aparato de medida electrónico de humedad 3-031-R002*, Ed. DILO Armaturen und Anlagen GmbH, Alemania, 2005.
14. DILO, *Manual de instrucciones de empleo para Unidad de Tratamiento de gas SF6 B057R01*, Ed. DILO Armaturen und Anlagen GmbH, Alemania, 2005.

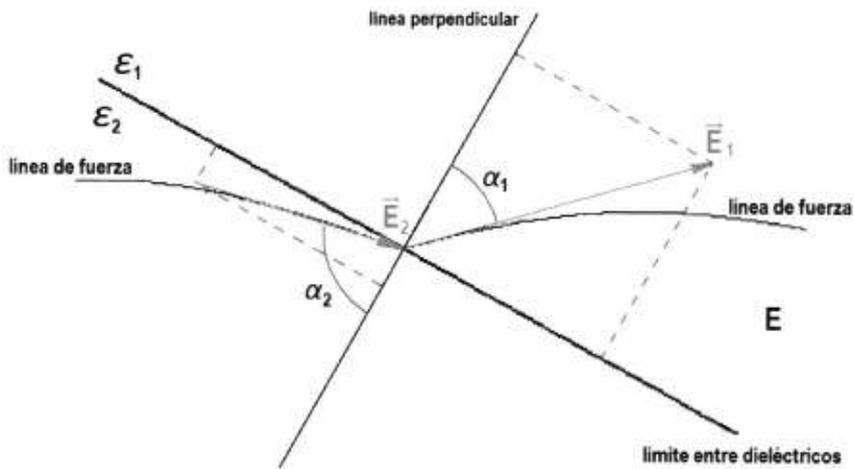
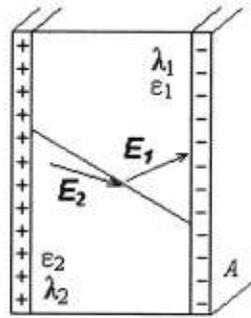
# APÉNDICES



**C.I.B.**

## APÉNDICE 1.A1

**Análisis vectorial del comportamiento de las líneas de fuerza en la superficie limitante de un arreglo refractorio entre dieléctricos**



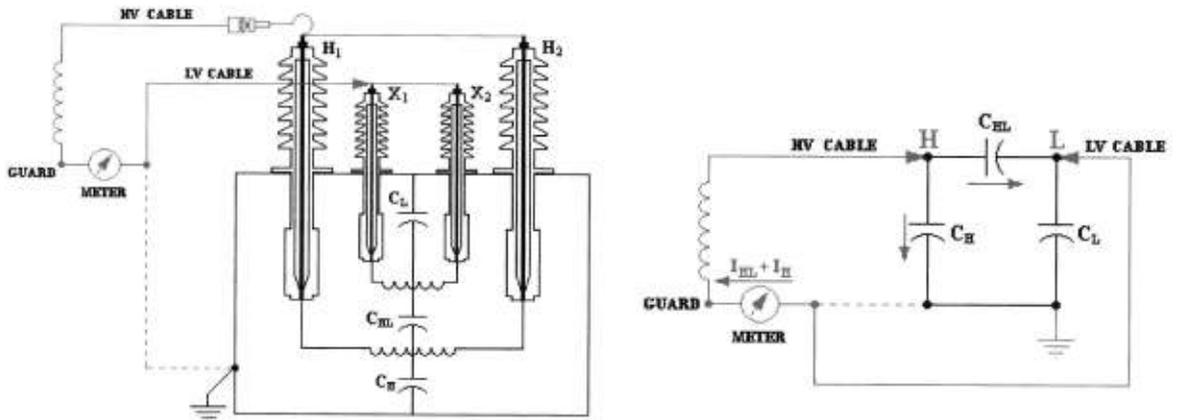
$$E_1 \text{sen} \alpha_1 = E_2 \text{sen} \alpha_2$$

$$D_1 \text{cos} \alpha_1 = D_2 \text{cos} \alpha_2$$

$$\frac{\text{tg} \alpha_1}{\text{tg} \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

## APÉNDICE 4.A1

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Transformador de Potencia de dos arrollamientos**



Ensayo No.	Modo de ensayo	Energizado	Ground	Guard	UST	Medición
1	GST-ground	Arrollamiento AT	Arrollamiento BT	--	--	$I_H + I_{HL}$
2	GST-guard	Arrollamiento AT	--	Arrollamiento BT	--	$I_H$
3	UST	Arrollamiento AT	--	--	Arrollamiento BT	$I_{HL}$
Ensayo (1) menos Ensayo (2)						$I_{HL}$
4	GST-ground	Arrollamiento BT	Arrollamiento AT	--	--	$I_L + I_{LH}$
5	GST-guard	Arrollamiento BT	--	Arrollamiento AT	--	$I_L$
6	UST	Arrollamiento BT	--	--	Arrollamiento AT	$I_{LH}$
Ensayo (4) menos Ensayo (5)						$I_{LH}$

donde:

**Arrollamiento de alta tensión (AT):** H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>

**Arrollamiento de baja tensión (BT):** X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>

**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

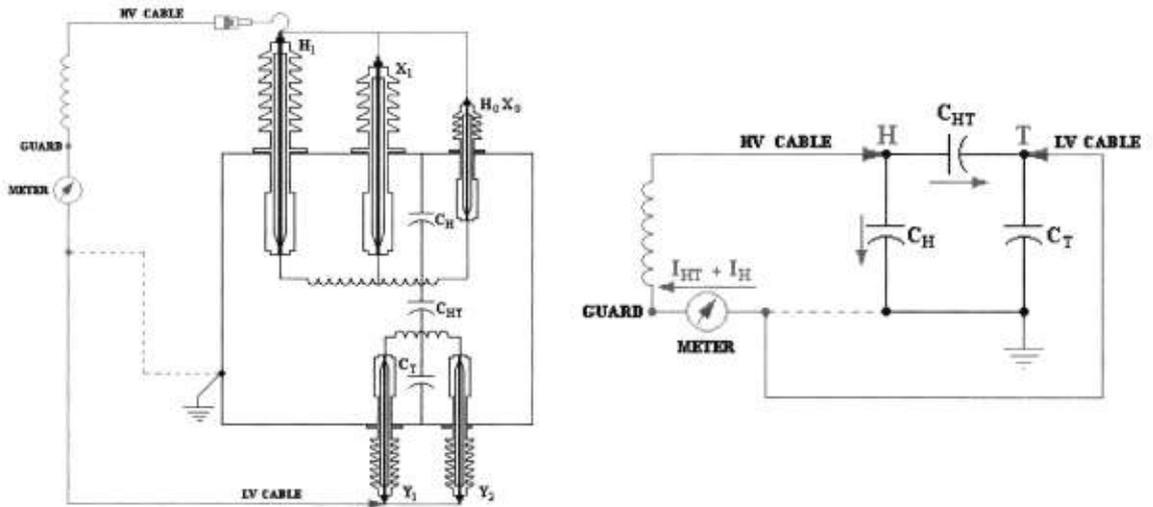
**HL:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y el arrollamiento secundario (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>)

**L:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**LH:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>) y el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>).

## APÉNDICE 4.A2

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Autotransformador de Potencia con arrollamiento terciario**



<i>Prueba No.</i>	<i>Modo de ensayo</i>	<i>Energizado</i>	<i>Ground</i>	<i>Guard</i>	<i>UST</i>	<i>Medición</i>
1	<i>GST-ground</i>	<i>Arrollamientos AT y BT</i>	<i>Arrollamiento Terciario</i>	--	--	$I_H + I_{HT}$
2	<i>GST-guard</i>	<i>Arrollamientos AT y BT</i>	--	<i>Arrollamiento Terciario</i>	--	$I_H$
3	<i>UST</i>	<i>Arrollamientos AT y BT</i>	--	--	<i>Arrollamiento Terciario</i>	$I_{HT}$
<i>Ensayo (1) menos Ensayo (2)</i>						$I_{HT}$
4	<i>GST-ground</i>	<i>Arrollamiento Terciario</i>	<i>Arrollamientos AT y BT</i>	--	--	$I_T + I_{TH}$
5	<i>GST-guard</i>	<i>Arrollamiento Terciario</i>	--	<i>Arrollamientos AT y BT</i>	--	$I_T$
6	<i>UST</i>	<i>Arrollamiento Terciario</i>	--	--	<i>Arrollamientos AT y BT</i>	$I_{TH}$
<i>Ensayo (4) menos Ensayo (5)</i>						$I_{TH}$

donde:

**Arrollamiento de alta tensión (AT):**  $H_1-H_0$

**Arrollamiento de baja tensión (BT):**  $X_1-X_0$

**Arrollamiento Terciario:**  $Y_1- Y_2$

**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1-H_0/ X_1-X_0$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

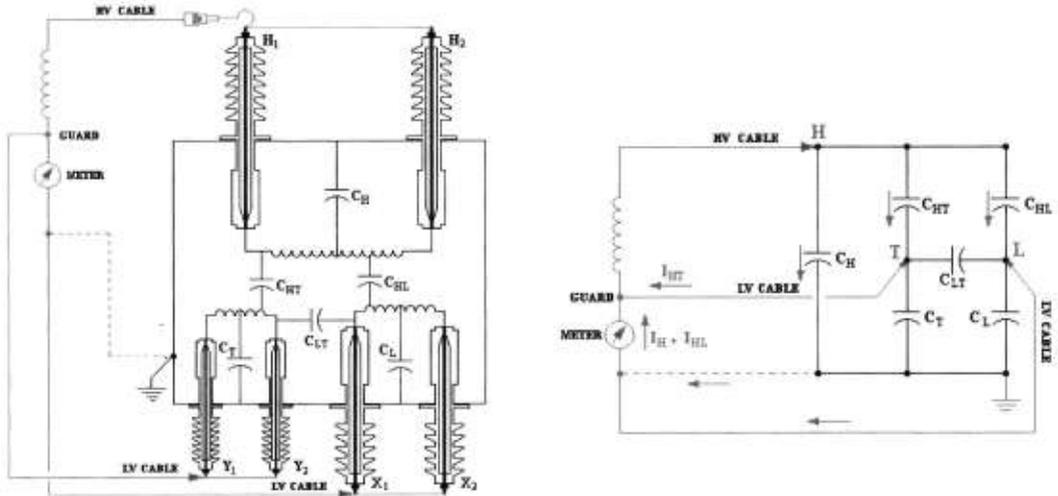
**HT:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1-H_0/ X_1-X_0$ ) y el arrollamiento terciario ( $Y_1- Y_2$ )

**T:** Aislamiento entre el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**TH:** Aislamiento entre el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ ) y el arrollamiento primario ( $H_1-H_0/ X_1-X_0$ )

## APÉNDICE 4.A3

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Transformador de Potencia de tres arrollamientos**



Ensayo No.	Modo de ensayo	Energizado	Ground	Guard	UST	Medición
1	GST-ground	Arrollamiento AT	Arrollamiento BT	Arrollamiento Terciario	--	$I_H + I_{HL}$
2	GST-guard	Arrollamiento AT	--	Arrollamientos BT y Terciario	--	$I_H$
3	UST	Arrollamiento AT	Arrollamiento Terciario	--	Arrollamiento BT	$I_{HL}$
Ensayo (1) menos Ensayo (2)						$I_{HL}$
4	GST-ground	Arrollamiento BT	Arrollamiento Terciario	Arrollamiento AT	--	$I_L + I_{LT}$
5	GST-guard	Arrollamiento BT	--	Arrollamientos AT y Terciario	--	$I_L$
6	UST	Arrollamiento BT	Arrollamiento AT	--	Arrollamiento Terciario	$I_{LT}$
Ensayo (4) menos Ensayo (5)						$I_{LT}$
7	GST-ground	Arrollamiento Terciario	Arrollamiento AT	Arrollamiento BT	--	$I_T + I_{TH}$
8	GST-guard	Arrollamiento Terciario	--	Arrollamientos AT y BT	--	$I_T$
9	UST	Arrollamiento Terciario	Arrollamiento BT	--	Arrollamiento AT	$I_{TH}$
Ensayo (7) menos Ensayo (8)						$I_{TH}$

**donde:**

**Arrollamiento de alta tensión (AT):**  $H_1-H_2$

**Arrollamiento de baja tensión (BT):**  $X_1-X_2$

**Arrollamiento terciario:**  $Y_1-Y_2$

**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1-H_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HL:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1-H_2$ ) y el arrollamiento secundario ( $X_1-X_2$ )

**L:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario ( $X_1-X_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

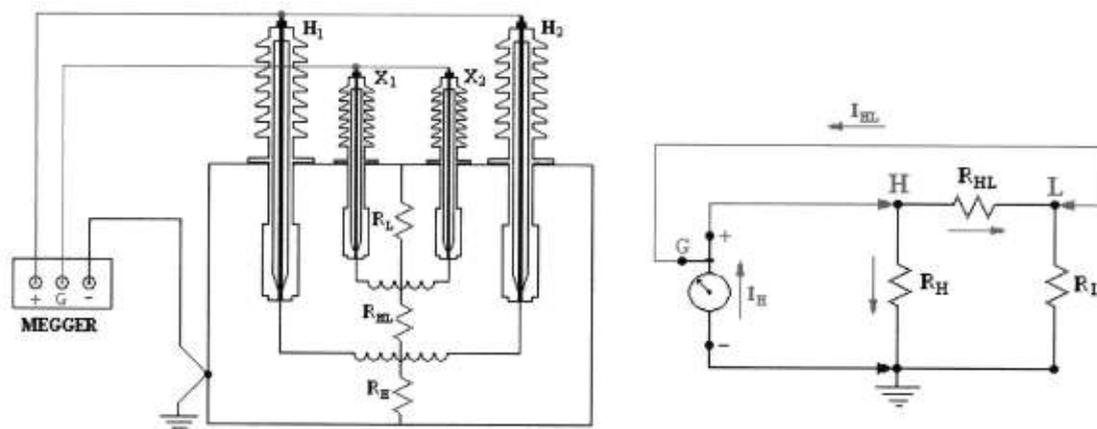
**LT:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario ( $X_1-X_2$ ) y el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ ).

**T:** Aislamiento entre el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**TH:** Aislamiento entre el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ ) y el arrollamiento primario ( $H_1-H_2$ ).

## APÉNDICE 4.B1

### Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Transformador de Potencia de dos arrollamientos



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Medición</i>
1	Arrollamiento AT	Arrollamiento BT	Tierra	$I_H$
2	Arrollamiento AT	Tierra	Arrollamiento BT	$I_H$
3	Arrollamiento BT	Arrollamiento AT	Tierra	$I_L$

donde:

**Arrollamiento de alta tensión (AT):**  $H_1$ - $H_2$

**Arrollamiento de baja tensión (BT):**  $X_1$ - $X_2$

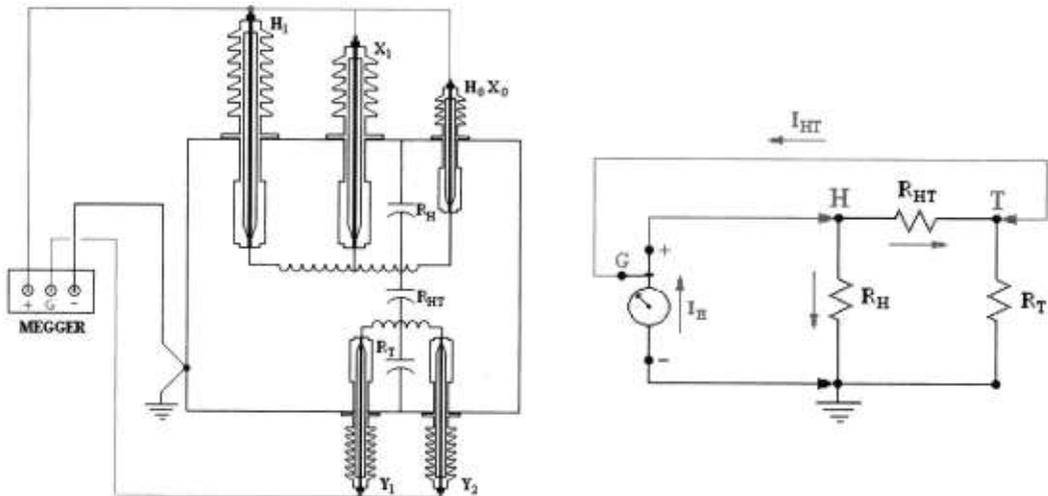
**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HL:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario ( $X_1$ - $X_2$ )

**L:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario ( $X_1$ - $X_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

## APÉNDICE 4.B2

### Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Autotransformador de Potencia con arrollamiento terciario



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Medición</i>
1	Arrollamientos AT y BT	Arrollamiento Terciario	Tierra	$I_{HT}$
2	Arrollamientos AT y BT	Tierra	Arrollamiento Terciario	$I_{HT}$
3	Arrollamiento Terciario	Arrollamientos AT y BT	Tierra	$I_T$

donde:

**Arrollamiento de alta tensión (AT):**  $H_1-H_0$

**Arrollamiento de baja tensión (BT):**  $X_1-X_0$

**Arrollamiento Terciario:**  $Y_1-Y_2$

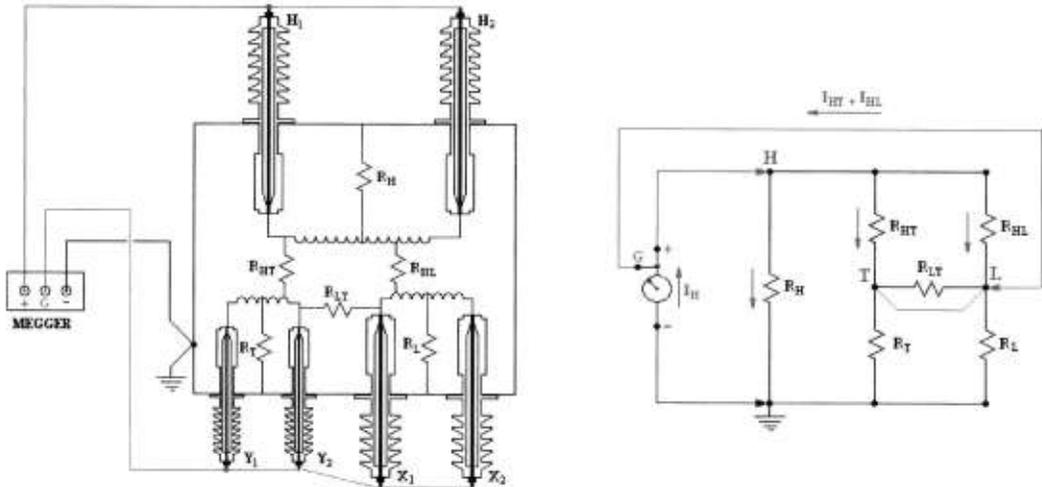
**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1-H_0 / X_1-X_0$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HT:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1-H_0 / X_1-X_0$ ) y el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ )

**T:** Aislamiento entre el arrollamiento terciario ( $Y_1-Y_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

## APÉNDICE 4.B3

### Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Transformador de Potencia de tres arrollamientos



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Medición</i>
1	Arrollamiento AT	Arrollamientos BT y Terc.	Tierra	$I_H$
2	Arrollamiento AT	Arrollamiento Terc. + Tierra	Arrollamiento BT	$I_{HL}$
3	Arrollamiento AT	Arrollamiento BT + Tierra	Arrollamiento Terciario	$I_{HT}$
4	Arrollamiento BT	Arrollamientos AT y Terc.	Tierra	$I_L$
5	Arrollamiento BT	Arrollamiento AT + Tierra	Arrollamiento Terc.	$I_{LT}$
6	Arrollamiento Terc.	Arrollamientos AT y BT	Tierra	$I_T$

donde:

**Arrollamiento de alta tensión (AT):** H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>

**Arrollamiento de baja tensión (BT):** X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>

**Arrollamiento terciario:** Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub>

**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HL:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y el arrollamiento secundario (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>)

**HT:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y el arrollamiento terciario (Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub>)

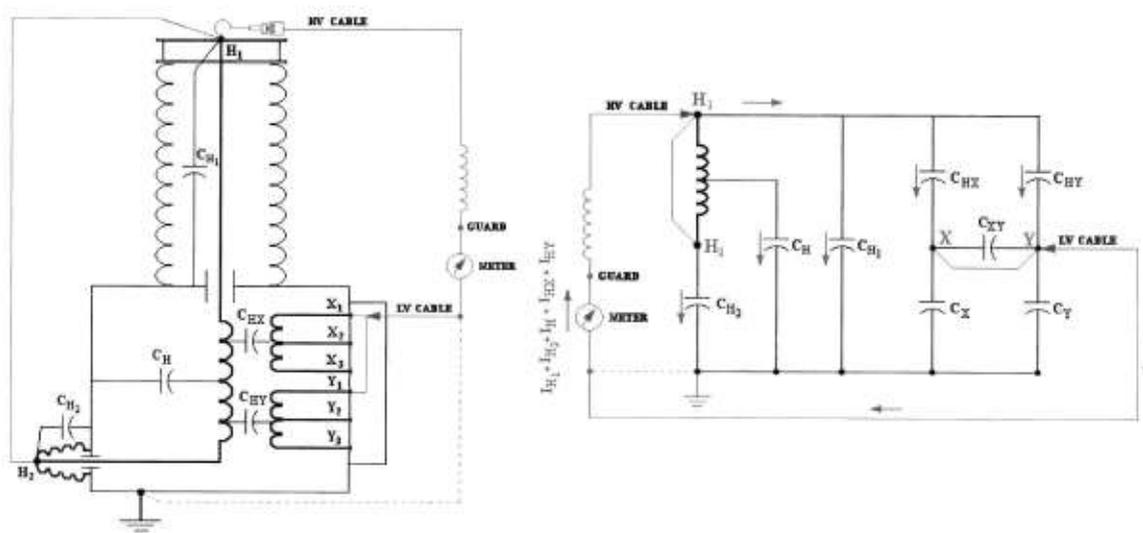
**L:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**LT:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>) y el arrollamiento terciario (Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub>)

**T:** Aislamiento entre el arrollamiento terciario (Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada).

## APÉNDICE 4.C1

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Transformador de Tensión (con terminal de aterrizamiento accesible y dos arrollamientos secundarios)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Modo de ensayo</i>	<i>Energizado</i>	<i>Ground</i>	<i>Guard</i>	<i>UST</i>	<i>Medición</i>
1	GST-ground	$H_1H_2$	$X_1Y_1$	---	---	Total ( $I_{H1} + I_{H2} + I_H + I_{HX} + I_{HY}$ )
2	GST-guard	$H_1$	$X_1Y_1$	$H_2$	---	$I_{H1} + I_H + I_{HX} + I_{HY}$
3	GST-guard	$H_2$	$X_1Y_1$	$H_1$	---	$I_{H2} + I_H + I_{HX} + I_{HY}$
4	UST	$H_1H_2$	$Y_1$	---	$X_1$	$I_{HX}$
5	UST	$H_1H_2$	$X_1$	---	$Y_1$	$I_{HY}$
6	GST-guard	$H_1$	---	$H_2X_1Y_1$	---	$I_{H1}$
7	GST-guard	$H_2$	---	$H_1X_1Y_1$	---	$I_{H2}$

**donde:**

**H<sub>1</sub>**: Aislamiento del bushing 1 (tipo no capacitivo).

**H<sub>2</sub>**: Aislamiento del bushing 2 (tipo no capacitivo).

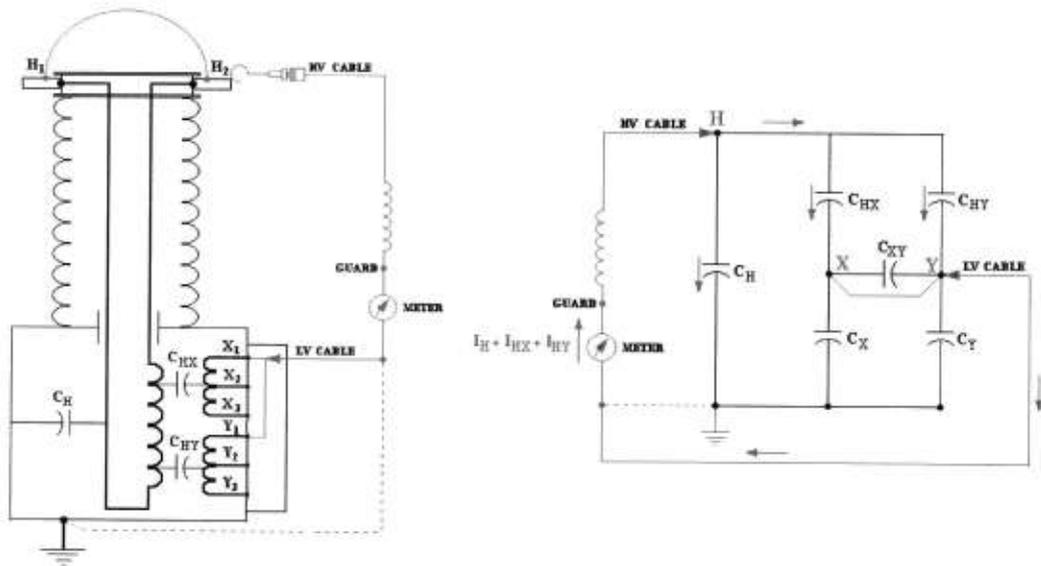
**H**: Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HX**: Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario X ( $X_1$ - $X_2$ - $X_3$ )

**HY**: Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario Y ( $Y_1$ - $Y_2$ - $Y_3$ )

## APÉNDICE 4.C2

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Transformador de Corriente (con dos arrollamientos secundarios)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Modo de ensayo</i>	<i>Energizado</i>	<i>Ground</i>	<i>Guard</i>	<i>UST</i>	<i>Medición</i>
1	GST-ground	$H_1H_2$	$X_1Y_1$	---	---	Total ( $I_H + I_{HX} + I_{HY}$ )
2	GST-guard	$H_1H_2$	---	$X_1Y_1$	---	$I_H$
3	UST	$H_1H_2$	---	---	$X_1Y_1$	$I_{HX} + I_{HY}$
4	UST	$H_1H_2$	$Y_1$	---	$X_1$	$I_{HX}$
5	UST	$H_1H_2$	$X_1$	---	$Y_1$	$I_{HY}$

**donde:**

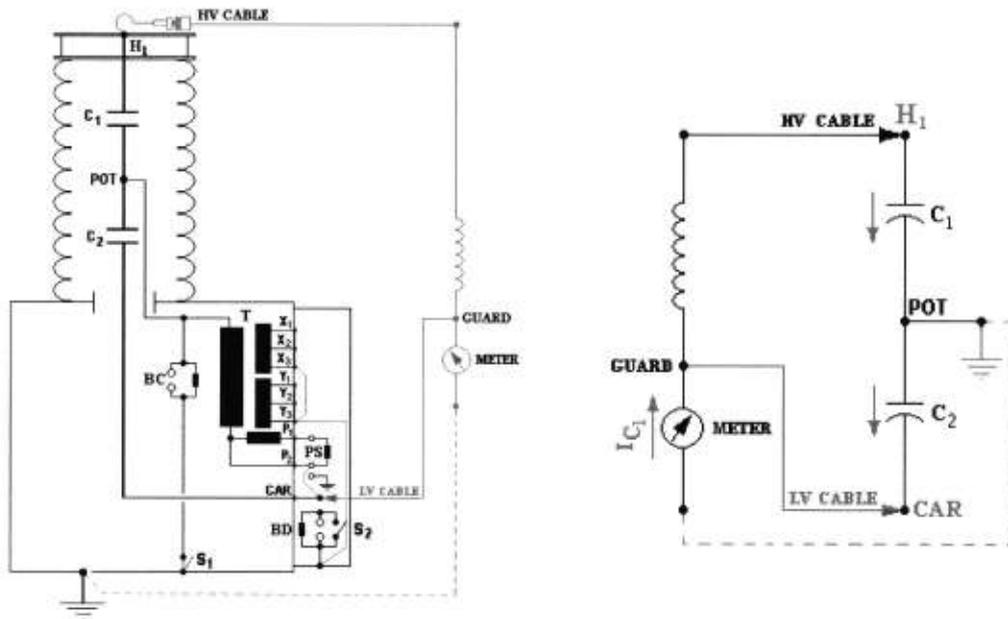
**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HX:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario X ( $X_1$ - $X_2$ - $X_3$ )

**HY:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario Y ( $Y_1$ - $Y_2$ - $Y_3$ )

### APÉNDICE 4.C3

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Transformador de Tensión Capacitivo (con terminal POT no accesible y dos arrollamientos secundarios)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Modo de ensayo</i>	<i>Energizado</i>	<i>Ground</i>	<i>Guard</i>	<i>UST</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Medición</i>
1	<i>GST-guard</i>	$H_1$	$POT (S_1)$	$CAR / P_2$	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Switch S1 cerrado</i></li> <li>• <i>Bobina de drenaje aislada de terminal CAR</i></li> </ul>	$I_{C1} (C_1)$
2	<i>GST-guard</i>	$CAR$	$POT (S_1)$	$H_1 P_2$	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Switch S1 cerrado</i></li> <li>• <i>Bobina de drenaje aislada de terminal CAR</i></li> </ul>	$I_{C2} (C_2)$

**donde:**

**BC:** Bobina de choque de la toma de tensión primaria POT

**BD:** Bobina de drenaje de la portadora CAR

**PS:** Elemento protector de sobretensión

**T:** Transformador intermedio

**S<sub>1</sub>:** Interruptor de tierra de la portadora CAR

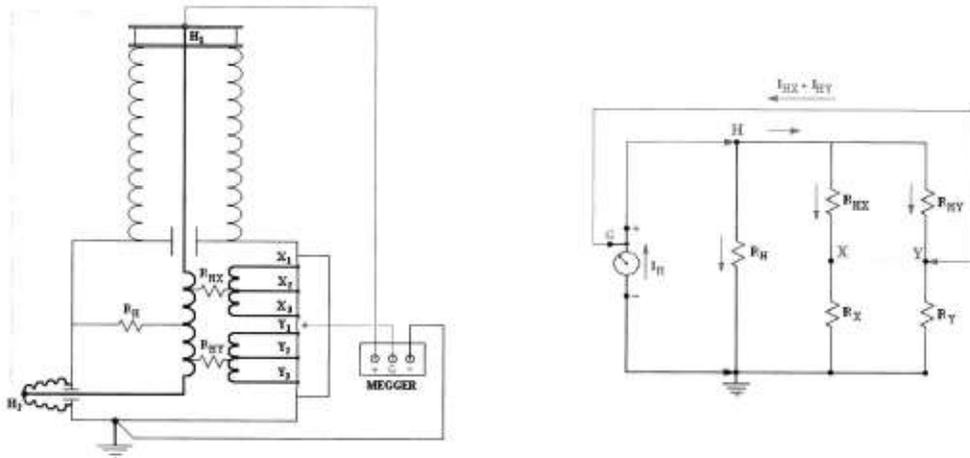
**S<sub>2</sub>:** Interruptor de tierra de la toma de tensión primaria POT

**C1:** Aislamiento de la bobina del capacitor C1

**C2:** Aislamiento de la bobina del capacitor C2

## APÉNDICE 4.D1

**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Transformador de Tensión (con terminal de aterrizamiento accesible y dos arrollamientos secundarios)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Medición</i>
1	Arrollamiento primario (H)	Arrollamientos secundarios (X-Y)	Tierra	$I_H$
2	Arrollamiento primario (H)	Tierra	Arrollamientos secundarios (X-Y)	$I_{HX} + I_{HY}$
3	Arrollamiento secundario (X)	Arrollamientos primario (H) y secundario (Y)	Tierra	$I_X$
4	Arrollamiento secundario (Y)	Arrollamientos primario (H) y secundario (X)	Tierra	$I_Y$
5	Arrollamiento secundario (X)	Arrollamiento primario (H) + Tierra	Arrollamiento secundario (Y)	$I_{XY}$

**donde:**

**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**X:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario X (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>-X<sub>3</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

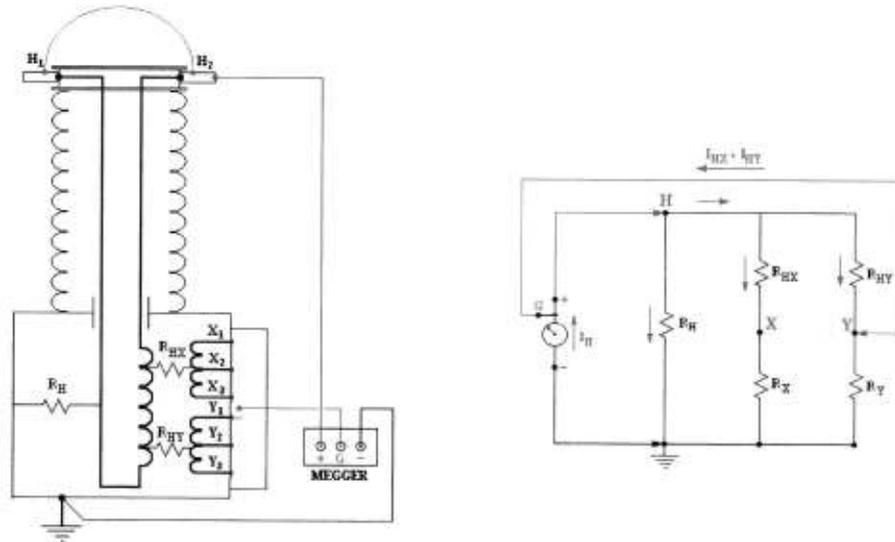
**Y:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario Y (Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub>-Y<sub>3</sub>) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HX:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y el arrollamiento secundario X (X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>-X<sub>3</sub>)

**HY:** Aislamiento entre el arrollamiento primario (H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) y el arrollamiento secundario Y (Y<sub>1</sub>-Y<sub>2</sub>-Y<sub>3</sub>)

## APÉNDICE 4.D2

**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Transformador de Corriente (con dos arrollamientos secundarios)**



<b>Ensayo No.</b>	<b>Terminal Línea (+)</b>	<b>Terminal Guarda (G)</b>	<b>Terminal Tierra (-)</b>	<b>Medición</b>
1	Arrollamiento primario (H)	Arrollamientos secundarios (X-Y)	Tierra	$I_H$
2	Arrollamiento primario (H)	Tierra	Arrollamientos secundarios (X-Y)	$I_{HX} + I_{HY}$
3	Arrollamiento secundario (X)	Arrollamientos primario (H) y secundario (Y)	Tierra	$I_X$
4	Arrollamiento secundario (Y)	Arrollamientos primario (H) y secundario (X)	Tierra	$I_Y$
5	Arrollamiento secundario (X)	Arrollamiento primario (H) + Tierra	Arrollamiento secundario (Y)	$I_{XY}$

**donde:**

**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**X:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario X ( $X_1$ - $X_2$ - $X_3$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

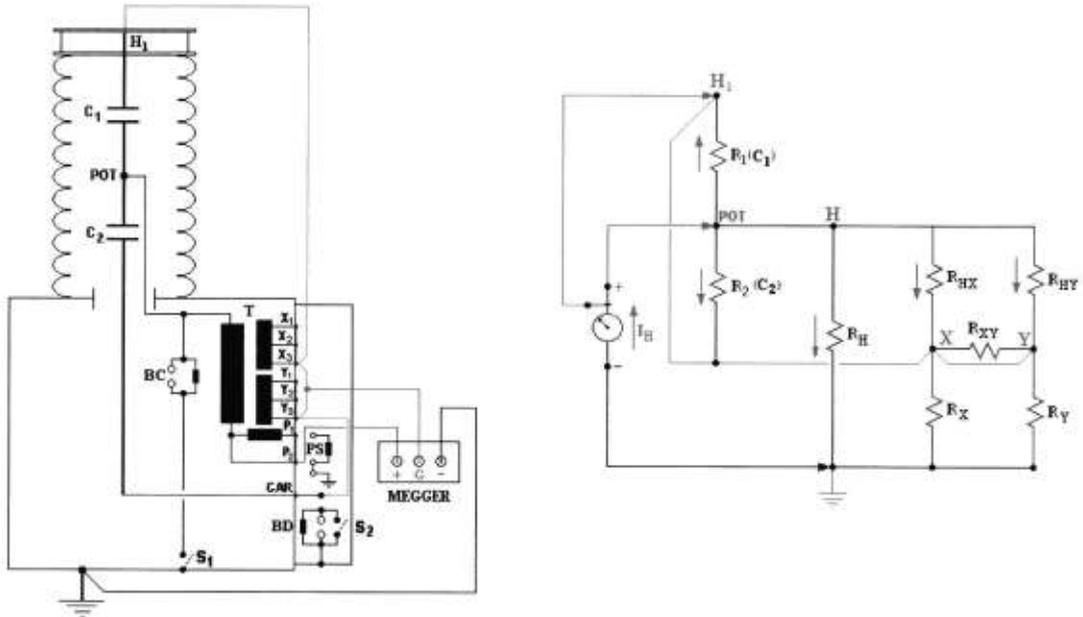
**Y:** Aislamiento entre el arrollamiento secundario Y ( $Y_1$ - $Y_2$ - $Y_3$ ) y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HX:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario X ( $X_1$ - $X_2$ - $X_3$ )

**HY:** Aislamiento entre el arrollamiento primario ( $H_1$ - $H_2$ ) y el arrollamiento secundario Y ( $Y_1$ - $Y_2$ - $Y_3$ )

### APÉNDICE 4.D3

**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Transformador de Tensión Capacitivo (con terminal POT no accesible y dos arrollamientos secundarios)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Medición</i>
1	$P_2$	$H_1 / CAR$ $X_1 X_2 X_3 / Y_1 Y_2 Y_3$	Tierra	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aislar PS de terminales <math>P_1</math> y <math>P_2</math></li> <li>Aislar BD de terminal CAR</li> <li>Switch <math>S_1</math> abierto</li> </ul>	$I_H$
2	$P_2$	$H_1 / CAR$ / Tierra	$X_1 X_2 X_3 / Y_1 Y_2 Y_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aislar PS de terminales <math>P_1</math> y <math>P_2</math></li> <li>Aislar BD de terminal CAR</li> <li>Switch <math>S_1</math> abierto</li> </ul>	$I_{HX} + I_{HY}$
3	$H_1$	$P_2 / CAR$	Tierra	<ul style="list-style-type: none"> <li>Switch <math>S_1</math> cerrado</li> <li>Bobina de drenaje aislada de terminal CAR</li> </ul>	$I_{C1}$
4	CAR	$P_1$	Tierra	<ul style="list-style-type: none"> <li>Switch <math>S_1</math> cerrado</li> <li>Bobina de drenaje aislada de terminal CAR</li> </ul>	$I_{C2}$

**donde:**

**BC:** Bobina de choque de la toma de tensión primaria POT

**BD:** Bobina de drenaje de la portadora CAR

**PS:** Elemento protector de sobretensión

**T:** Transformador intermedio

**S<sub>1</sub>:** Interruptor de tierra de la portadora CAR

**S<sub>2</sub>:** Interruptor de tierra de la toma de tensión primaria POT

**C1:** Aislamiento de la bobina del capacitor C1

**C2:** Aislamiento de la bobina del capacitor C2

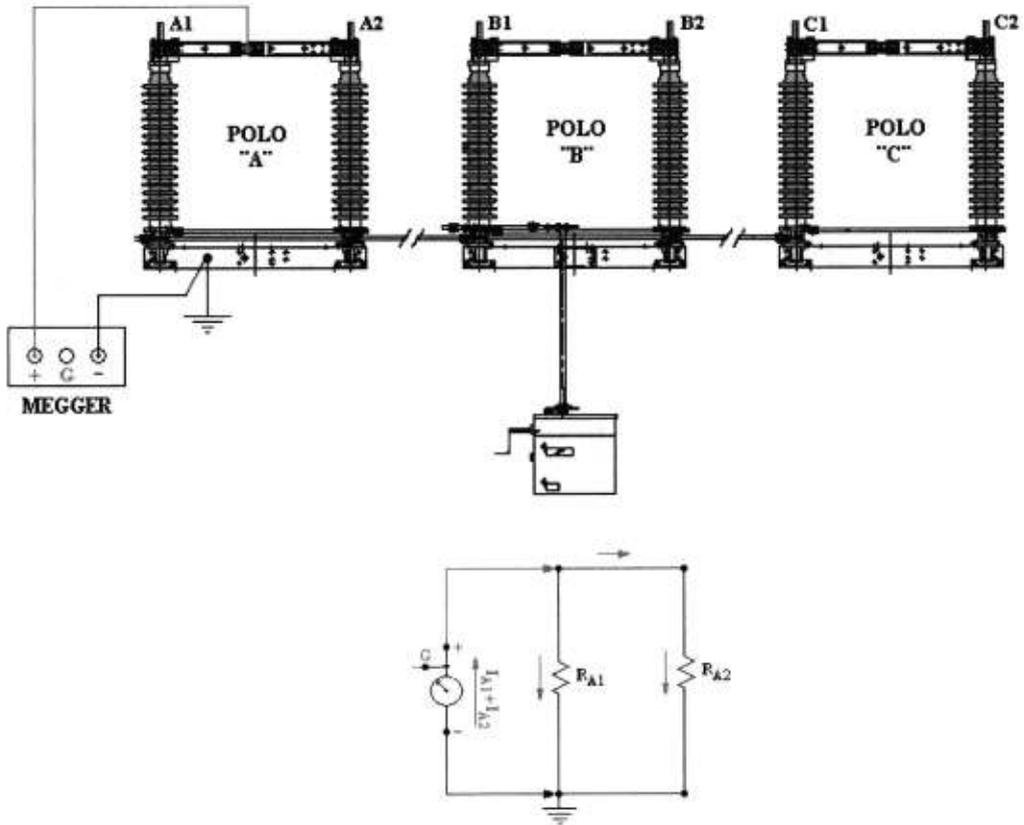
**H:** Aislamiento entre el arrollamiento primario del transformador intermedio T y tierra (masa del equipo sólidamente aterrizada)

**HX:** Aislamiento entre el arrollamiento primario y el arrollamiento secundario X ( $X_1$ - $X_2$ - $X_3$ ) del transformador intermedio.

**HY:** Aislamiento entre el arrollamiento primario y el arrollamiento secundario Y ( $Y_1$ - $Y_2$ - $Y_3$ ) del transformador intermedio.

## APÉNDICE 4.E1

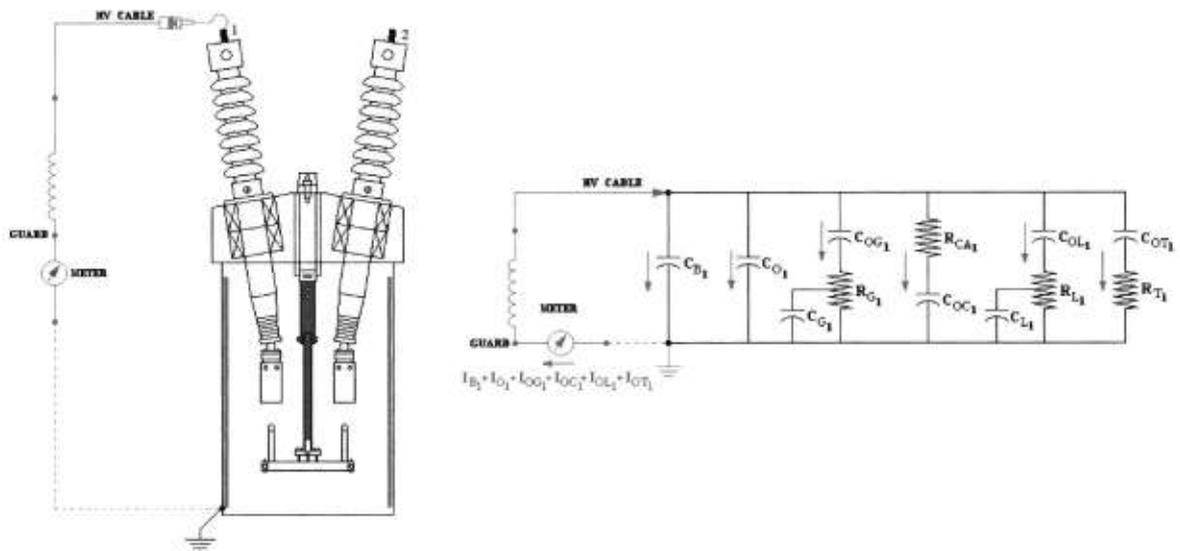
**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Seccionador de Potencia (de un solo punto de corte)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Posición del Seccionador</i>	<i>Medición</i>
1	A1- A2	----	Tierra	Cerrado	$I_{A1} + I_{A2}$
2	B1- B2	----	Tierra	Cerrado	$I_{B1} + I_{B2}$
3	C1- C2	----	Tierra	Cerrado	$I_{C1} + I_{C2}$
4	A1	----	Tierra	Abierto	$I_{A1}$
5	A2	----	Tierra	Abierto	$I_{A2}$
6	B1	----	Tierra	Abierto	$I_{B1}$
7	B2	----	Tierra	Abierto	$I_{B2}$
8	C1	----	Tierra	Abierto	$I_{C1}$
9	C2	----	Tierra	Abierto	$I_{C2}$

## APÉNDICE 4.F1

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Interruptor de Potencia inmerso en gran volumen de aceite (tipo GVO)**



Ensayo No.	Modo de ensayo	Energizado	Ground	Guard	UST	Posición del interruptor	Medición
1	GST-ground	Bushing 1	---	---	---	Abierto	$I_{B1} + I_{O1} + I_{OG1} + I_{OC1}$ $I_{OL1} + I_{OT1}$
2	GST-ground	Bushing 2	---	---	---	Abierto	$I_{B2} + I_{O2} + I_{OG2} + I_{CA1} + I_{OC2}$ $I_{OL2} + I_{OT2}$
3	GST-ground	Bushing 1 y Bushing 2	---	---	---	Cerrado	$\Gamma_B + \Gamma_O + \Gamma_{OG} + \Gamma_{OC}$ $\Gamma_L + \Gamma_{OT}$

donde:

**B<sub>1</sub>**: Aislamiento del bushing 1 (tipo capacitivo).

**O<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor

**OG<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y el ensamblaje guía de la varilla de operación.

**G<sub>1</sub>**: Aislamiento del ensamblaje guía de la varilla de operación.

**CA<sub>1</sub>**: Aislamiento de la cámara de interrupción.

**OC<sub>1</sub>**: Aceite entre la cámara de interrupción y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor.

**OL<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y la varilla de operación.

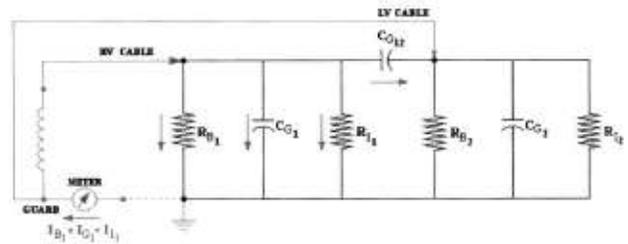
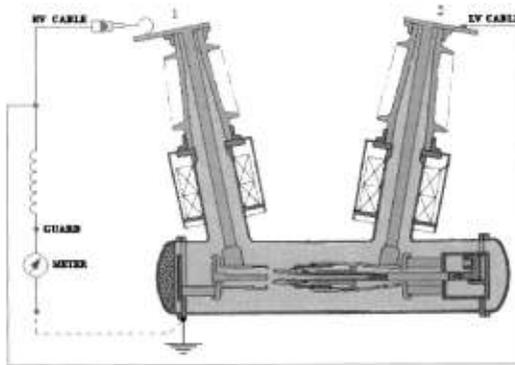
**L<sub>1</sub>**: Aislamiento de la varilla de operación

**OT<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y el recubrimiento interno aislante del tanque del interruptor.

**T<sub>1</sub>**: Aislamiento del recubrimiento interno aislante del tanque del interruptor.

## APÉNDICE 4.F2

**Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Interruptor de Potencia inmerso en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque muerto)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Modo de ensayo</i>	<i>Energizado</i>	<i>Ground</i>	<i>Guard</i>	<i>UST</i>	<i>Posición del interruptor</i>	<i>Medición</i>
1	GST-guard	Bushing 1	---	---	---	Abierto	$I_{B1} + I_{G1} + I_{I1}$
2	GST-guard	Bushing 2	---	---	---	Abierto	$I_{B2} + I_{G2} + I_{I2}$
3	UST	Bushing 1	---	---	Bushing 2	Abierto	$I_{G12}$
4*	GST-ground	Bushing 1 y Bushing 2	---	---	---	Cerrado	$I_{B1} + I_{G1} + I_{I1} + I_{B2} + I_{G2} + I_{I2}$

\*Este método es recomendado para interruptores que contienen doble cámara de interrupción

**donde:**

**B<sub>1</sub>:** Aislamiento del bushing 1 (tipo no capacitivo).

**G<sub>1</sub>:** Gas entre el conductor central del bushing 1 y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor

**I<sub>1</sub>:** Aislamiento del aislador soporte de cámara de interrupción.

**G<sub>12</sub>:** Gas entre contactos de la cámara de interrupción

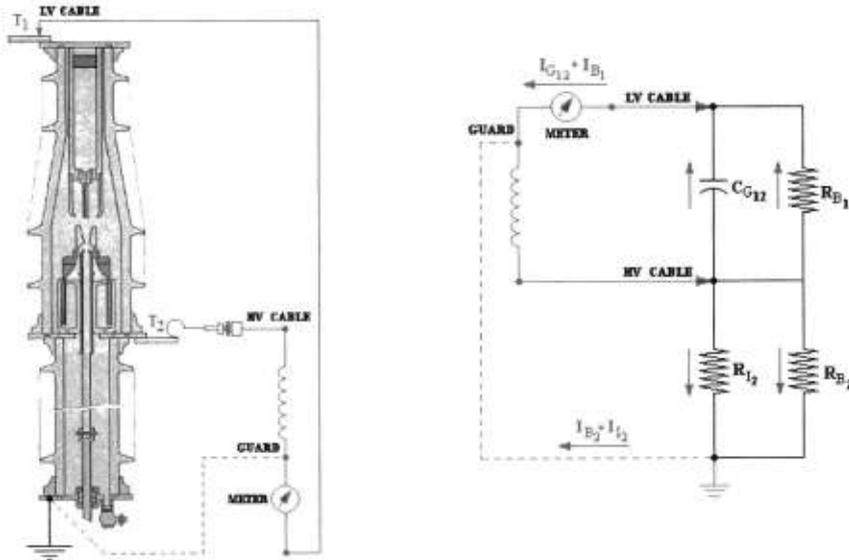
**B<sub>2</sub>:** Aislamiento del bushing 2 (tipo no capacitivo).

**G<sub>2</sub>:** Gas entre el conductor central del bushing 2 y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor

**I<sub>2</sub>:** Aislamiento del aislador soporte de cámara de interrupción.

### APÉNDICE 4.F3

Ensayos aplicados para la determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento de un Interruptor de Potencia inmerso en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque vivo)



Ensayo No.	Modo de ensayo	Energizado	Ground	Guard	UST	Posición del interruptor	Medición
1	UST	T <sub>2</sub>	---	---	T <sub>1</sub>	Abierto	$I_{G12} + I_{B1}$
2	GST-guard	T <sub>2</sub>	---	T <sub>1</sub>	---	Abierto	$I_{B2} + I_{I2}$

Donde:

**B<sub>1</sub>**: Aislamiento de la columna aislante superior (tipo no capacitivo).

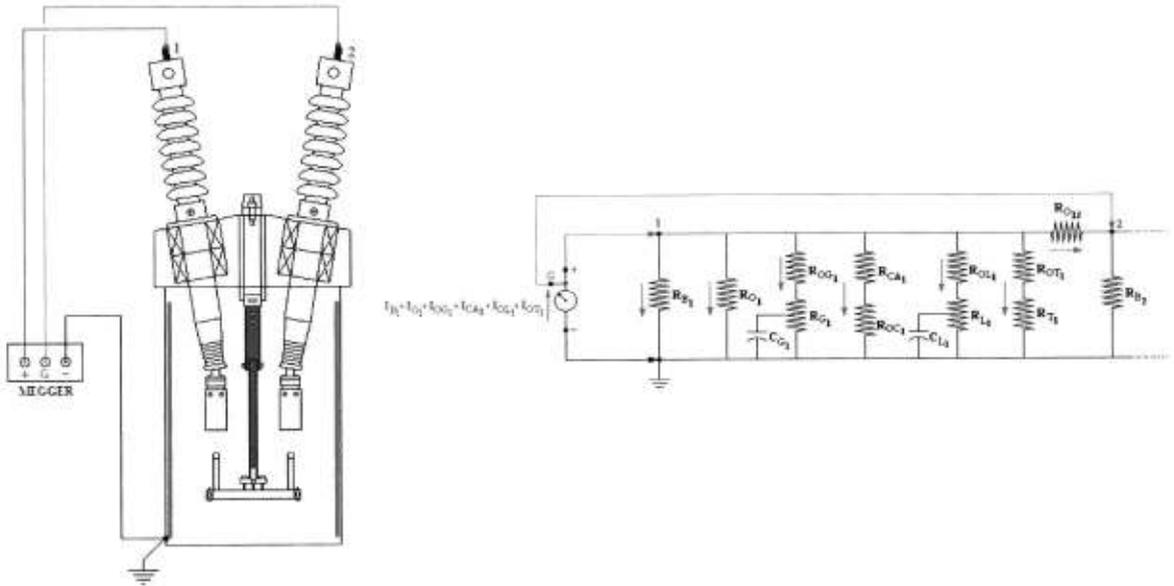
**G<sub>12</sub>**: Gas entre contactos de la cámara de interrupción

**B<sub>2</sub>**: Aislamiento de la columna aislante inferior (tipo no capacitivo).

**I<sub>2</sub>**: Aislamiento de la varilla de operación.

## APÉNDICE 4.G1

**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Interruptor de Potencia inmerso en gran volumen de aceite (tipo GVO)**



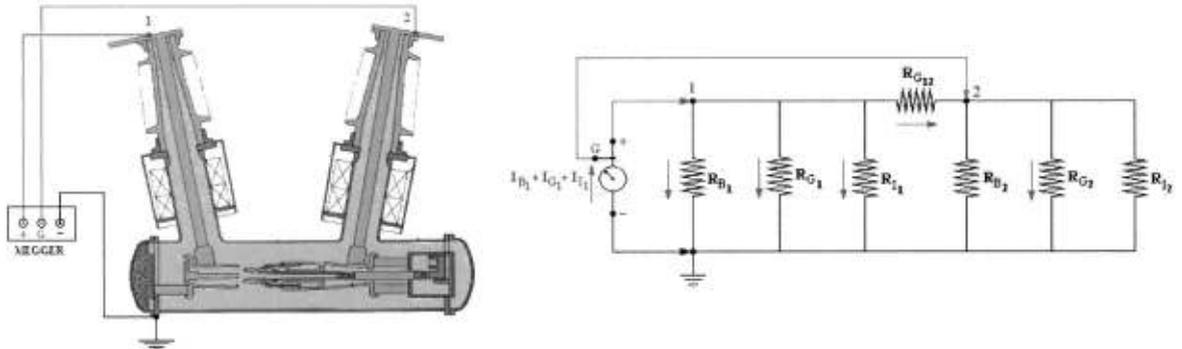
<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Posición del Interruptor</i>	<i>Medición</i>
1	Bushing 1	Bushing 2	Tierra	Abierto	$I_{B1} + I_{O1} + I_{OG1} + I_{CA1}$ $I_{OL1} + I_{OT1}$
2	Bushing 2	Bushing 1	Tierra	Abierto	$I_{B2} + I_{O2} + I_{OG2} + I_{CA2}$ $I_{OL2} + I_{OT2}$
3	Bushing 1	Tierra	Bushing 2	Abierto	$I_{O12}$
4	Bushing 1 Bushing 2	-----	Tierra	Cerrado	$I'_B + I'_O + I'_{OG} + I'_{CA}$ $I'_L + I'_{OT}$

**Donde:**

- B<sub>1</sub>**: Aislamiento del bushing 1 (tipo capacitivo).
- O<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor
- OG<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y el ensamblaje guía de la varilla de operación.
- G<sub>1</sub>**: Aislamiento del ensamblaje guía de la varilla de operación.
- CA<sub>1</sub>**: Aislamiento de la cámara de interrupción.
- OC<sub>1</sub>**: Aceite entre la cámara de interrupción y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor.
- OL<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y la varilla de operación.
- L<sub>1</sub>**: Aislamiento de la varilla de operación
- OT<sub>1</sub>**: Aceite entre el conductor central del bushing 1 y el recubrimiento interno aislante del tanque del interruptor.
- T<sub>1</sub>**: Aislamiento del recubrimiento interno aislante del tanque del interruptor.

## APÉNDICE 4.G2

**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Interruptor de Potencia inmerso en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque muerto)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Posición del Interruptor</i>	<i>Medición</i>
1	<i>Bushing 1</i>	<i>Bushing 2</i>	<i>Tierra</i>	<i>Abierto</i>	$I_{B1} + I_{G1} + I_{I1}$
2	<i>Bushing 2</i>	<i>Bushing 1</i>	<i>Tierra</i>	<i>Abierto</i>	$I_{B2} + I_{G2} + I_{I2}$
3	<i>Bushing 1</i>	<i>Tierra</i>	<i>Bushing 2</i>	<i>Abierto</i>	$R_{G12}$

**Donde:**

**B<sub>1</sub>:** Aislamiento del bushing 1 (tipo no capacitivo).

**G<sub>1</sub>:** Gas entre el conductor central del bushing 1 y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor

**I<sub>1</sub>:** Aislamiento del aislador soporte de cámara de interrupción.

**G<sub>12</sub>:** Gas entre contactos de la cámara de interrupción

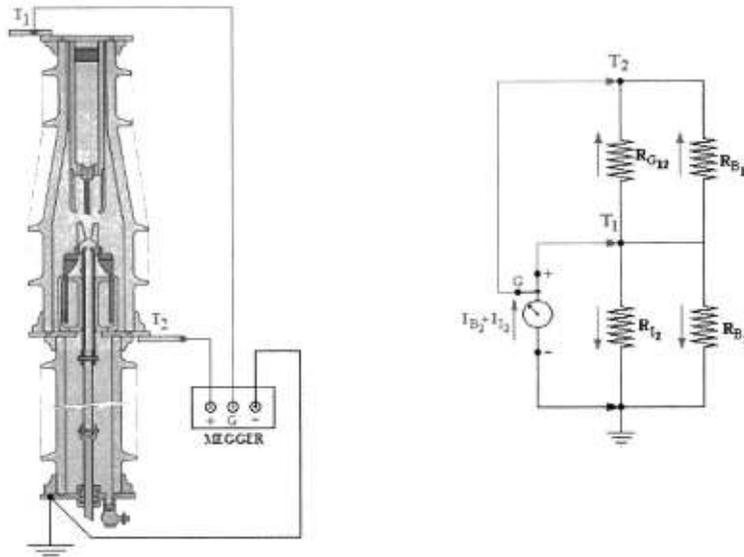
**B<sub>2</sub>:** Aislamiento del bushing 2 (tipo no capacitivo).

**G<sub>2</sub>:** Gas entre el conductor central del bushing 2 y el tanque sólidamente aterrizado del interruptor

**I<sub>2</sub>:** Aislamiento del aislador soporte de cámara de interrupción.

### APÉNDICE 4.G3

**Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Interruptor de Potencia inmerso en gas SF<sub>6</sub> (tipo tanque vivo)**



<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Posición del Interruptor</i>	<i>Medición</i>
1	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	Tierra	Abierto	I <sub>B2</sub> + I <sub>I2</sub>
2	T <sub>2</sub>	Tierra	T <sub>1</sub>	Abierto	I <sub>B1</sub> + I <sub>G12</sub>

**Donde:**

**B<sub>1</sub>**: Aislamiento de la columna aislante superior (tipo no capacitivo).

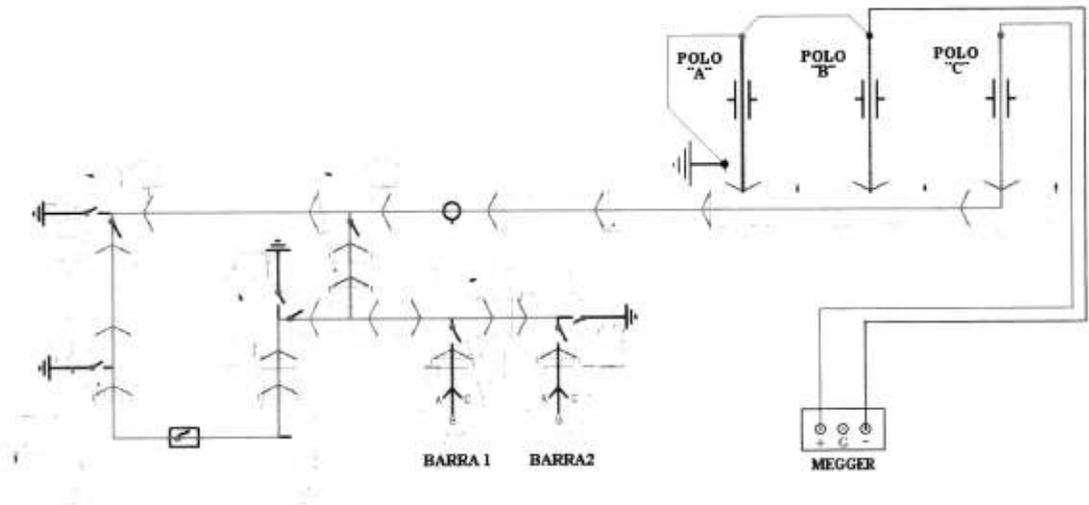
**G<sub>12</sub>**: Gas entre contactos de la cámara de interrupción

**B<sub>2</sub>**: Aislamiento de la columna aislante inferior (tipo no capacitivo).

**I<sub>2</sub>**: Aislamiento de la varilla de operación.

## APÉNDICE 4.H1

### Ensayos aplicados para la medición de la Resistencia de Aislamiento de un Equipo Encapsulado en gas SF<sub>6</sub>

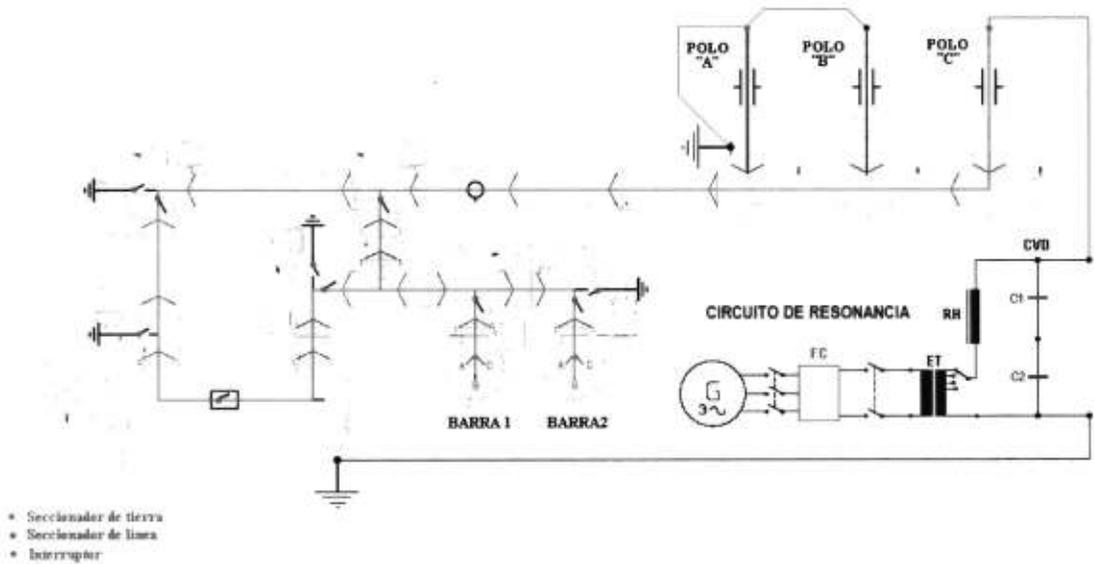


- Seccionador de tierra
- Seccionador de línea
- Interruptor

<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal Línea (+)</i>	<i>Terminal Guarda (G)</i>	<i>Terminal Tierra (-)</i>	<i>Posición de Interruptores y Seccionadores involucrados</i>	<i>Medición</i>
1	<i>Bushing fase A</i>	---	<i>Tierra / Bushing's fases B y C</i>	<i>Cerrado</i>	$R_A$
2	<i>Bushing fase B</i>	---	<i>Tierra / Bushing's fases A y C</i>	<i>Cerrado</i>	$R_B$
3	<i>Bushing fase C</i>	---	<i>Tierra / Bushing's fases A y B</i>	<i>Cerrado</i>	$R_C$
4	<i>Bushing's fases A, B y C</i>	-----	<i>Tierra</i>	<i>Cerrado</i>	$R_A + R_B + R_C$

## APÉNDICE 4.11

### Ensayos de alta tensión con resonancia AC de frecuencia variable de un Equipo Encapsulado en gas SF<sub>6</sub>

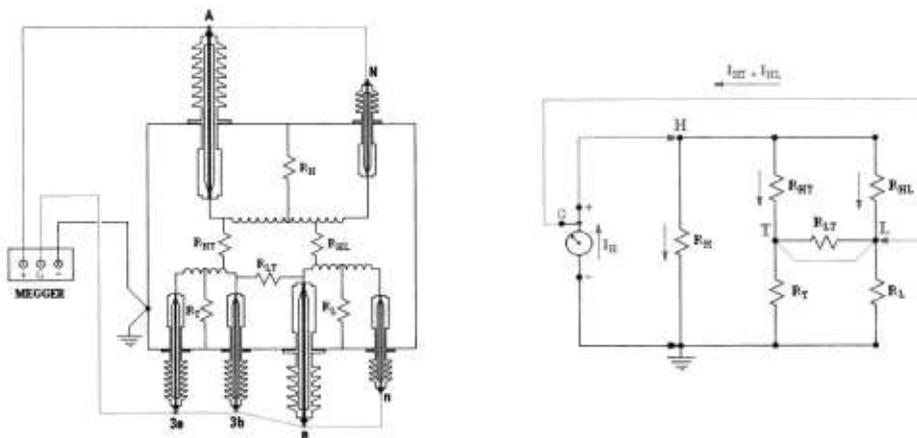


<i>Ensayo No.</i>	<i>Terminal AT Reactor</i>	<i>Tierra</i>	<i>Posición de Interruptores y Seccionadores involucrados</i>	<i>Medición</i>
1	<i>Bushing "fase A"</i>	<i>Bushing's "fases B y C"</i>	<i>Cerrado</i>	<i>C<sub>A</sub></i>
2	<i>Bushing "fase B"</i>	<i>Bushing's "fases A y C"</i>	<i>Cerrado</i>	<i>C<sub>B</sub></i>
3	<i>Bushing "fase C"</i>	<i>Bushing's "fases A y B"</i>	<i>Cerrado</i>	<i>C<sub>C</sub></i>

## APÉNDICE 5.A1

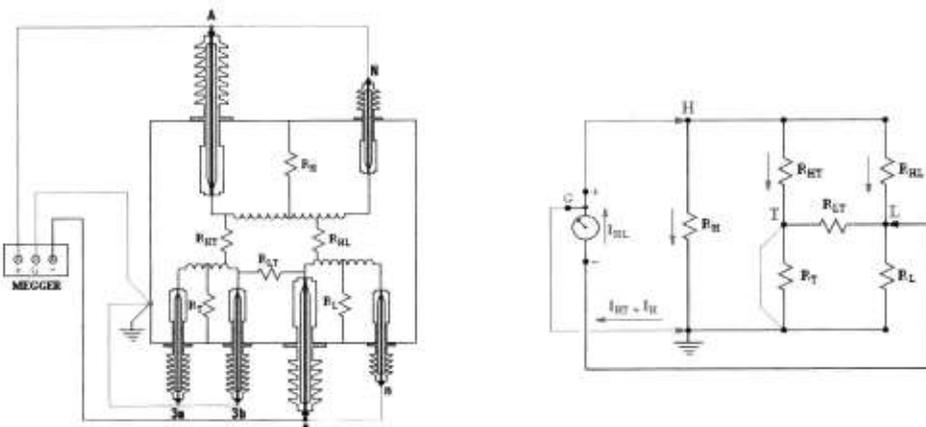
### **Análisis de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento de un transformador de potencia de tres arrollamientos**

#### **Ensayo No. 1**



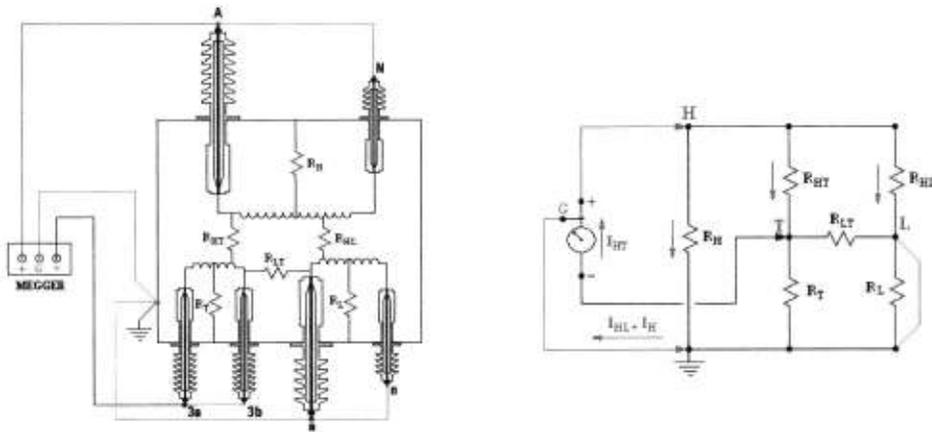
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_H$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alto voltaje y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_H$ .*

#### **Ensayo No. 2**



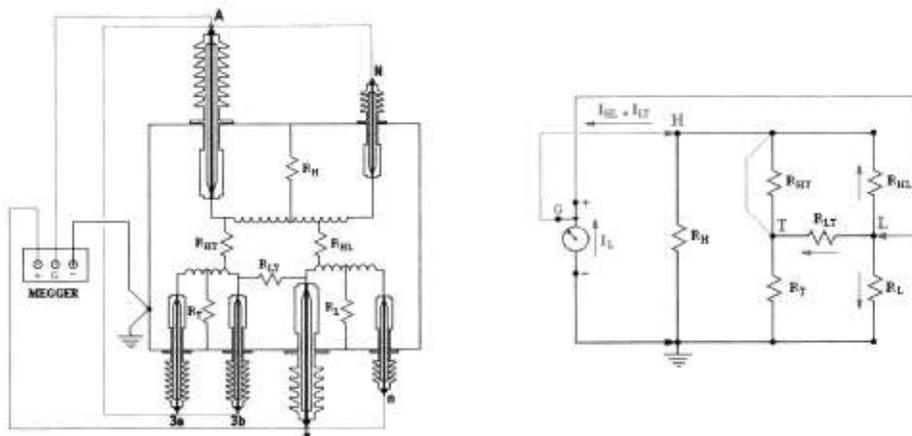
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HL}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de alto voltaje y bajo voltaje. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{HL}$ .

### Ensayo No. 3



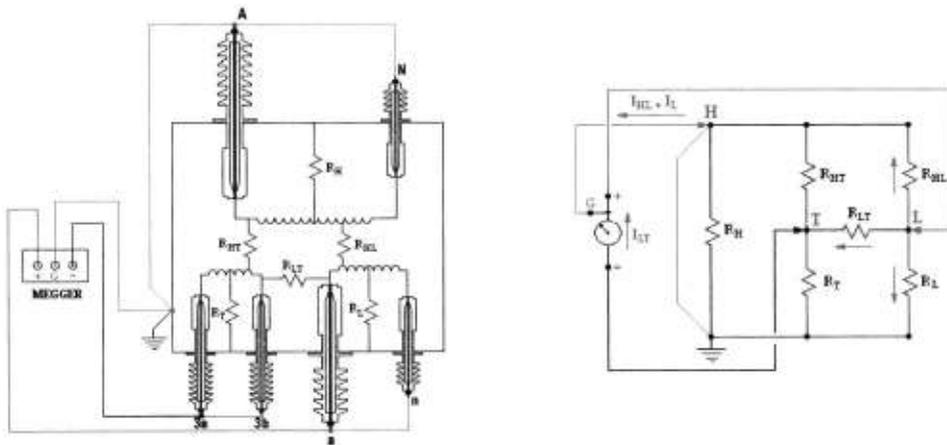
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HT}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de alto voltaje y terciario. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{HT}$ .

### Ensayo No. 4



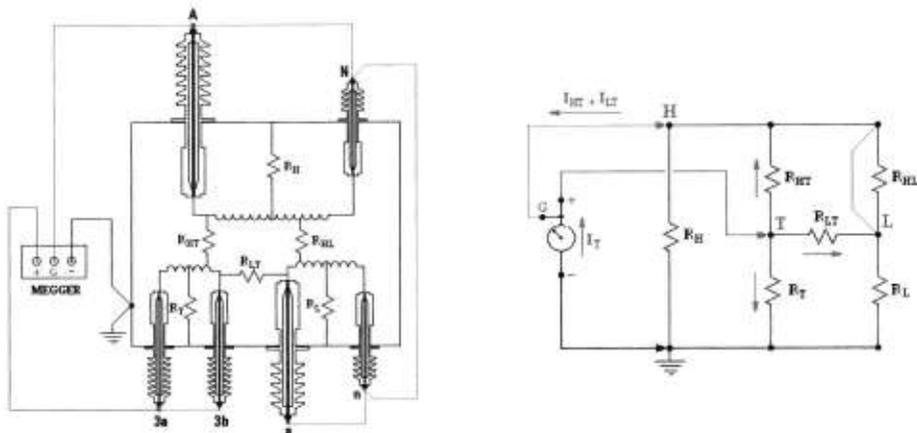
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_L$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de bajo voltaje y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_L$ .

### Ensayo No. 5



Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{LT}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de bajo voltaje y terciario. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{LT}$ .

### Ensayo No. 6

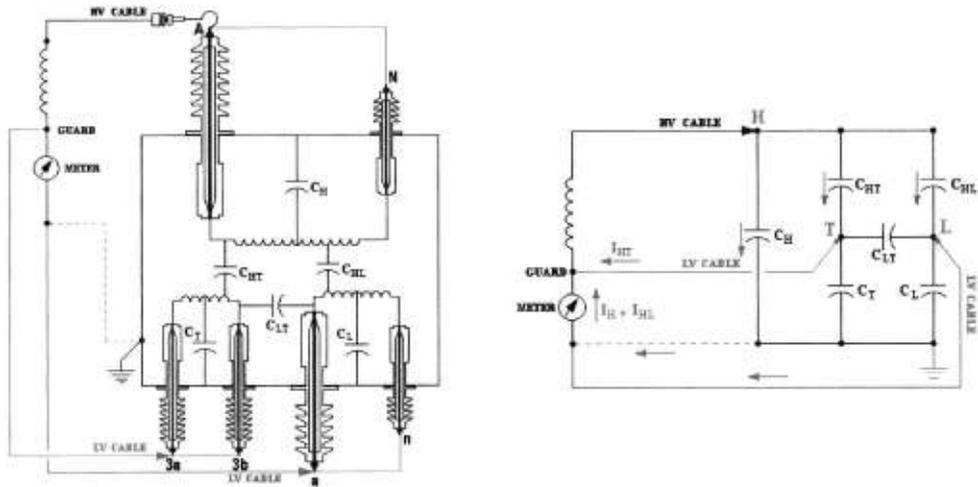


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_T$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento terciario y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_T$ .*

## APÉNDICE 5.A2

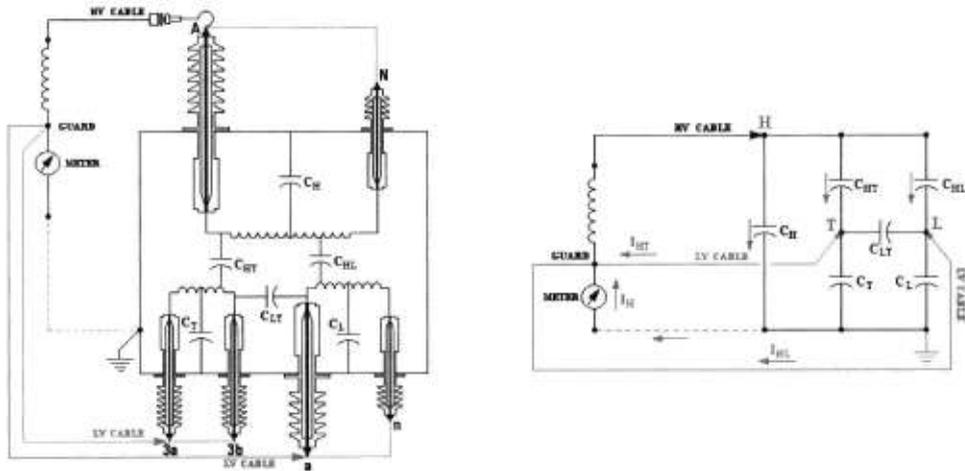
**Análisis de ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento de un transformador de potencia de tres arrollamientos**

### Ensayo No. 1 (Modo de ensayo GST-guard blue / Ground red)



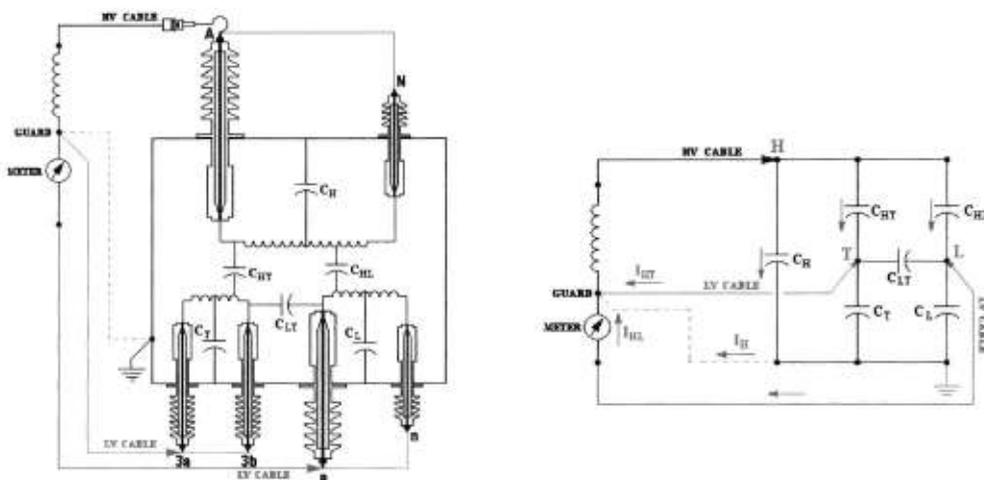
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HL} + I_{HL}$ , cuyas componentes circulan paralelamente a través del aislamiento involucrado tanto entre los arrollamientos de alta y baja tensión, como entre el arrollamiento de alta tensión y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HL} + C_H$ .*

**Ensayo No. 2 (Modo de ensayo GST-guard red and blue)**



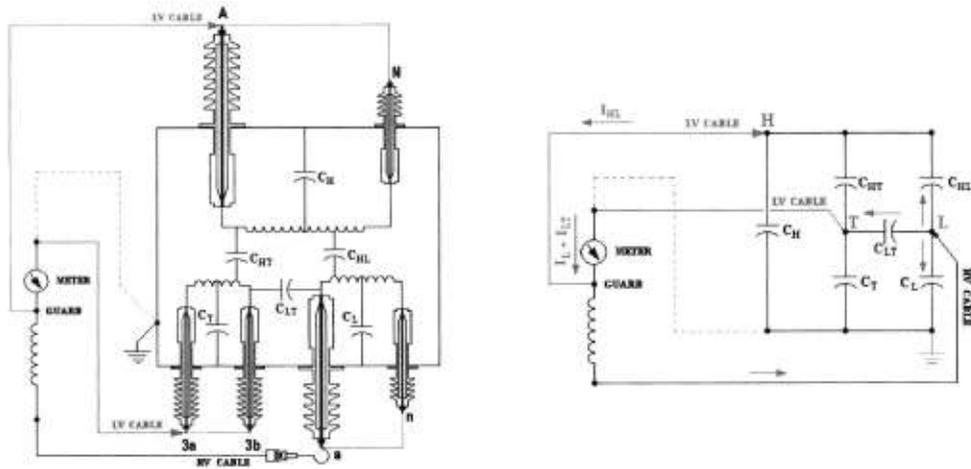
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_H$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alta tensión y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_H$ .*

**Ensayo No.3 (Modo de ensayo UST-measured red / ground blue)**



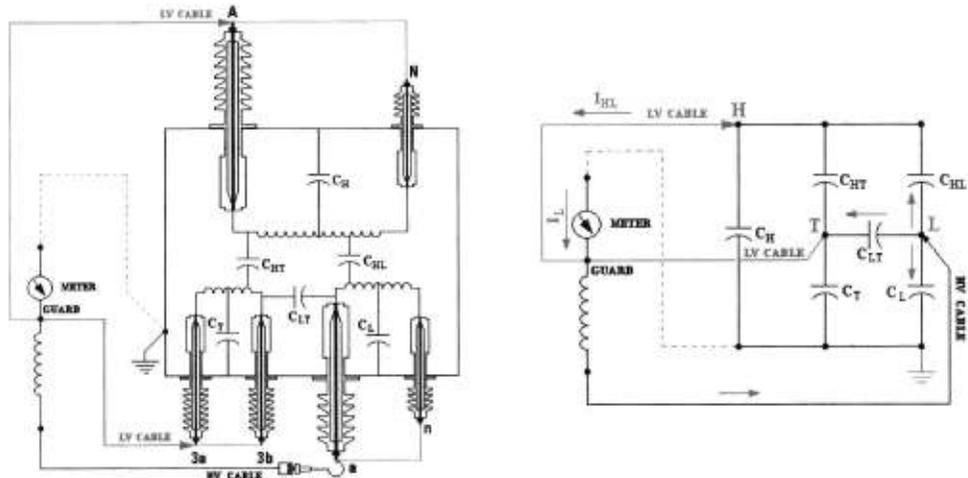
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HL}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de alta tensión y baja tensión. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HL}$ .

**Ensayo No. 4 (Modo de ensayo GST-guard blue / ground red)**



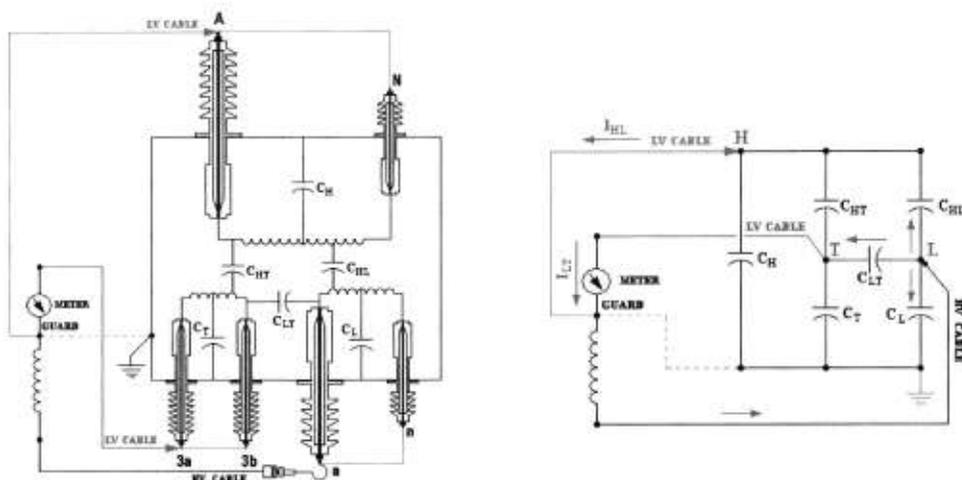
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_L + I_{LT}$ , cuyas componentes circulan a través del aislamiento involucrado tanto entre los arrollamientos de baja tensión y terciario, como entre el arrollamiento de baja tensión y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_L + C_{LT}$ .

**Ensayo No. 5 (Modo de ensayo GST-guard red and blue)**



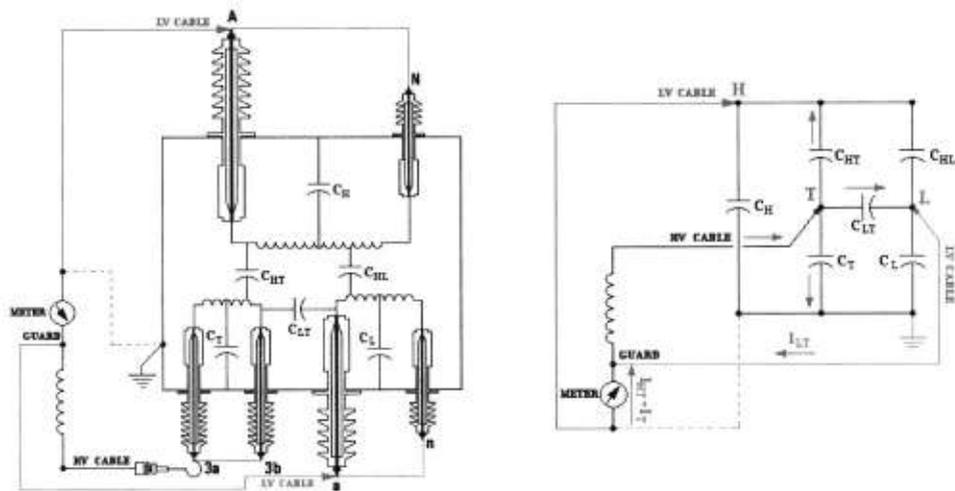
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_L$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de baja tensión y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_L$ .*

**Ensayo No. 6 (Modo de ensayo UST-measure red / ground blue)**



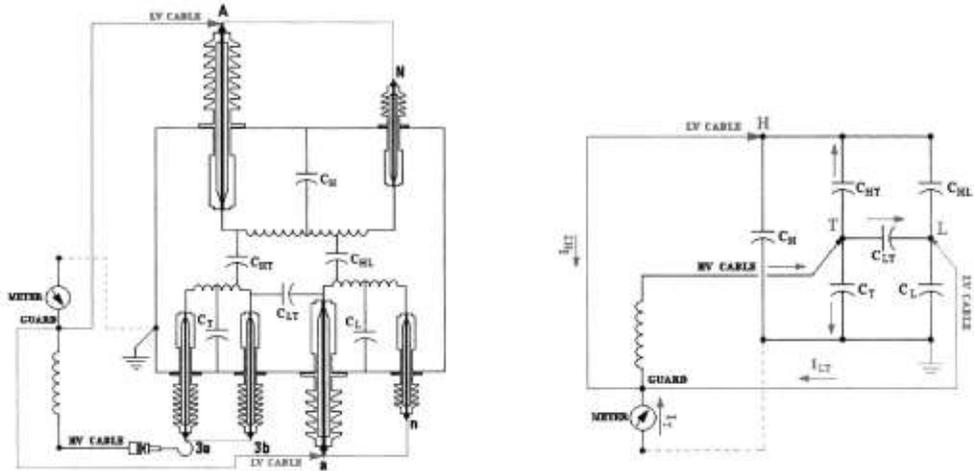
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{LT}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de baja tensión y terciario. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{LT}$ .

**Ensayo No. 7 (Modo de ensayo GST-guard blue / ground red)**



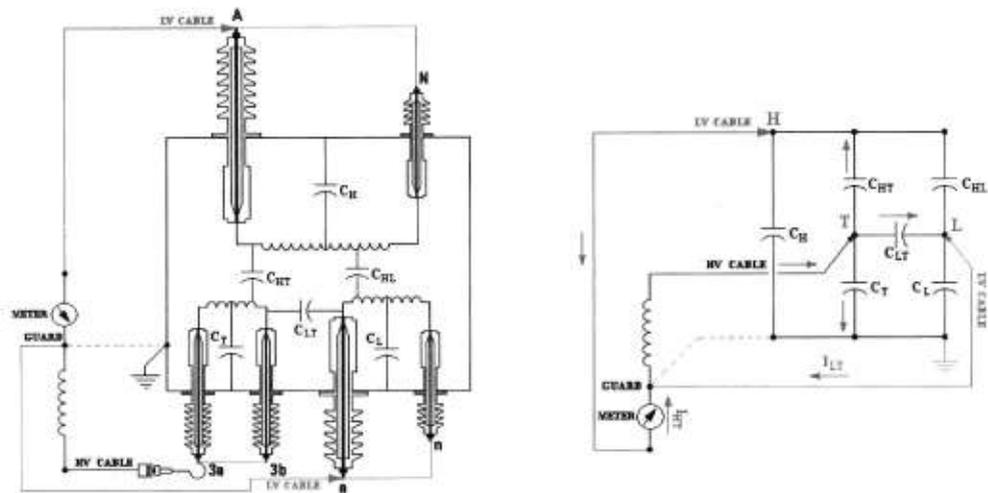
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_H+I_{HT}$ , cuyas componentes circulan a través del aislamiento involucrado tanto entre los arrollamientos de alta tensión y terciario, como entre el arrollamiento terciario y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_H+C_{HT}$ .

**Ensayo No. 8 (Modo de ensayo GST-guard red and blue)**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_T$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento terciario y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_T$ .*

**Ensayo No.9 (Modo de ensayo UST-measure red / ground blue)**



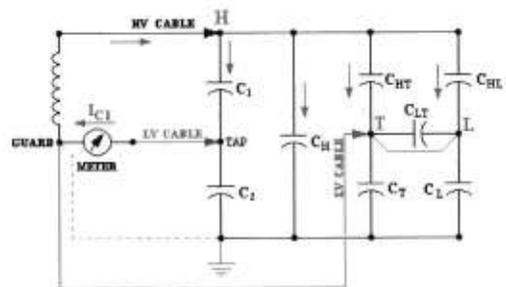
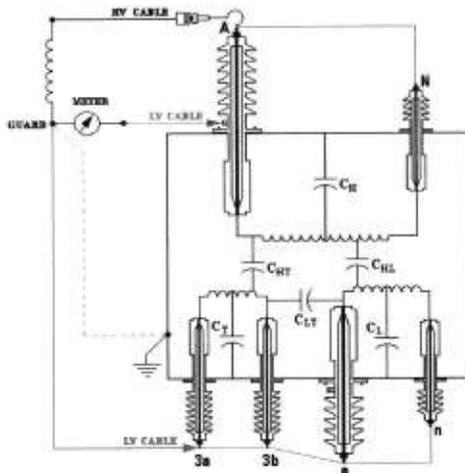
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HT}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de alta tensión y terciario. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HT}$ .*

## APÉNDICE 5.A3

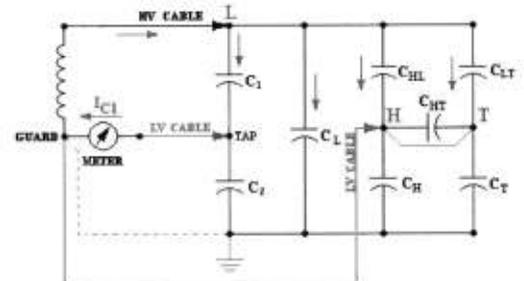
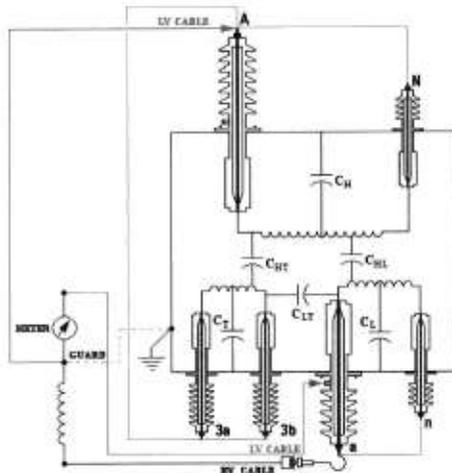
Análisis de ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia, capacitancia y pérdidas en el aislamiento de los bushing's del tipo capacitivos

### Ensayo No. 1 (Modo de ensayo UST-measure blue / ground red)

- Bushing "A"



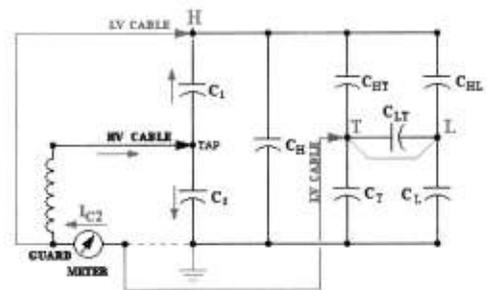
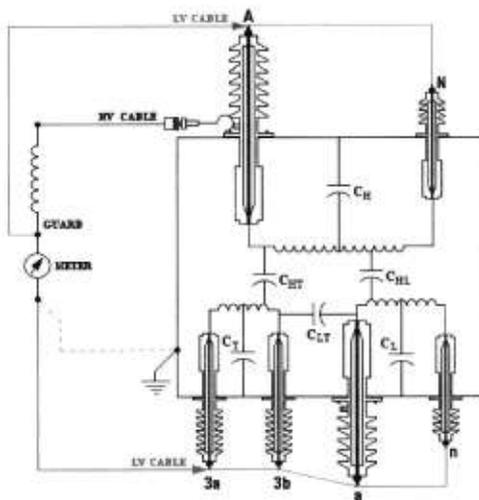
- Bushing "a"



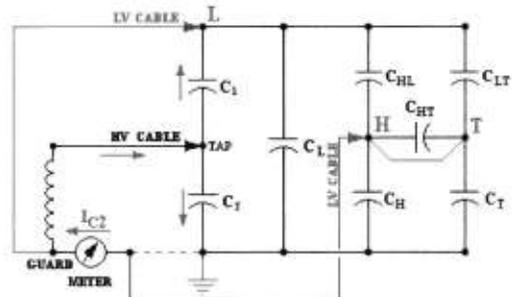
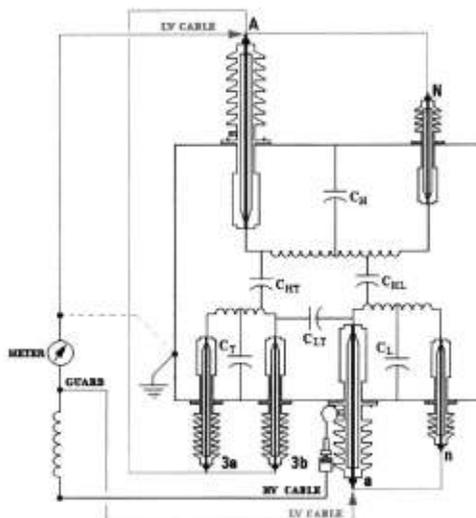
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{C1}$ , que circula a través del aislamiento principal (capacitivo) del bushing, involucrado entre su conductor central y el respectivo TAP de derivación. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_1$ .

## Ensayo No. 2 (GST-guard blue / ground red)

- Bushing "A"



- Bushing "a"

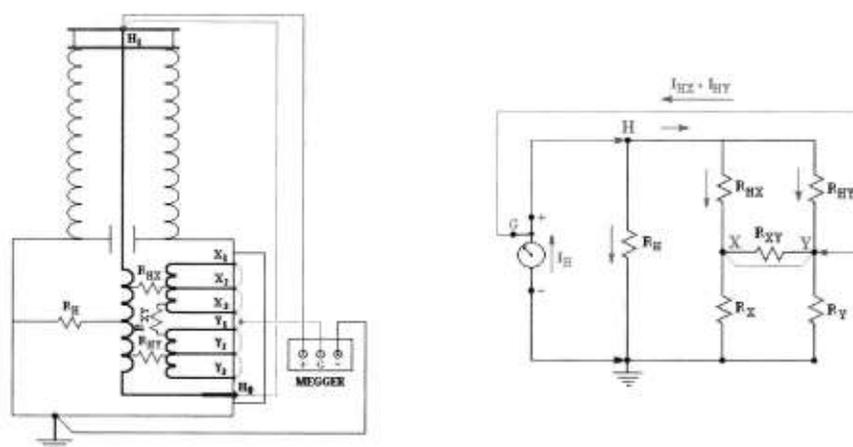


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{C_2}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el TAP de derivación del bushing y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_2$ .*

## APÉNDICE 5.B1

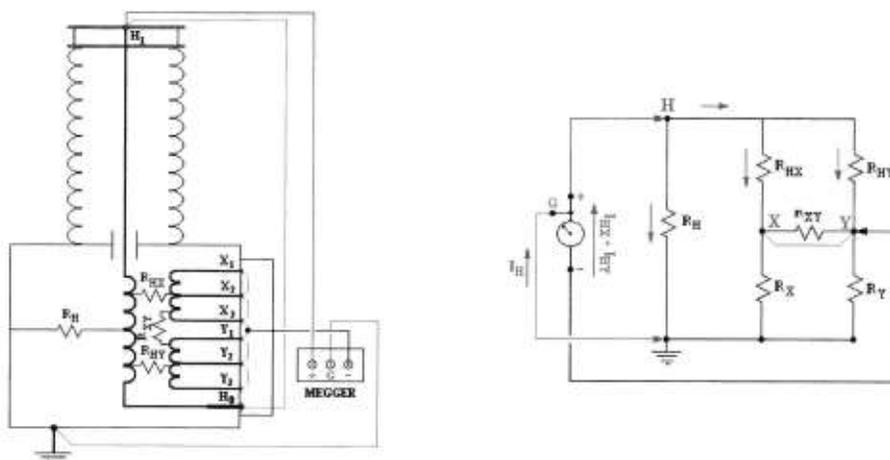
### **Análisis de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento de un transformador de tensión (de potencial)**

#### **Ensayo No. 1**



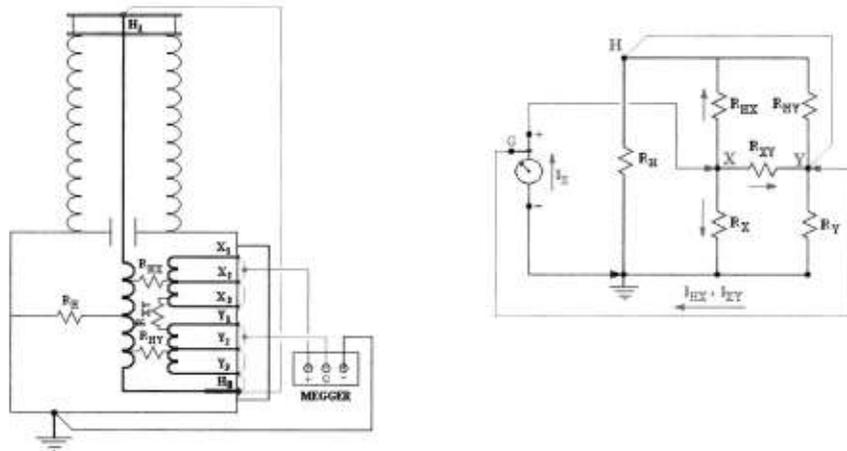
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_H$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alto voltaje y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_H$ .*

#### **Ensayo No. 2**



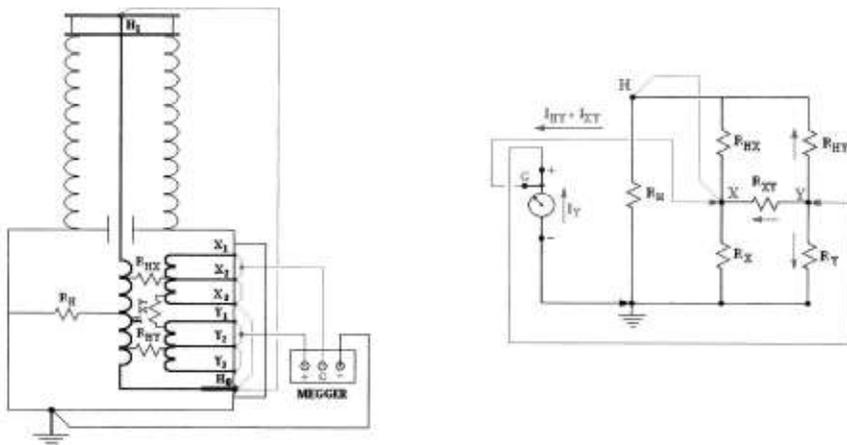
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HX} + I_{HY}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alto voltaje y los arrollamientos secundarios de bajo voltaje. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{HX} + R_{HY}$*

**Ensayo No. 3**



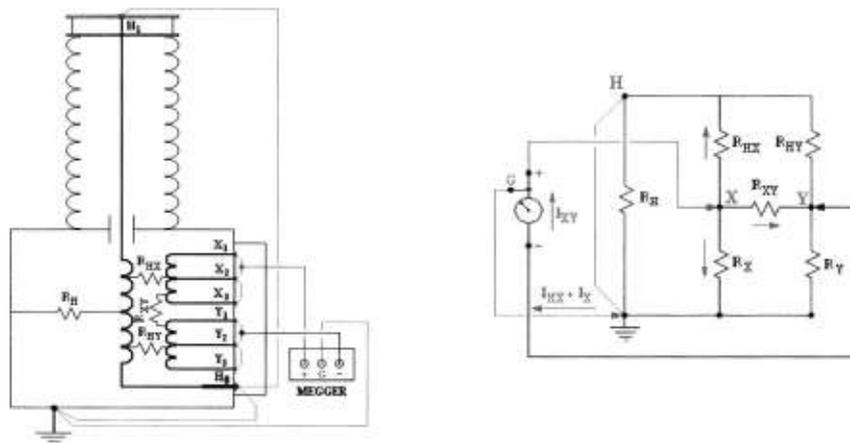
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_X$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento secundario X de bajo voltaje y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_X$*

**Ensayo No. 4**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_Y$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento secundario Y de bajo voltaje y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_Y$ .*

### **Ensayo No. 5**

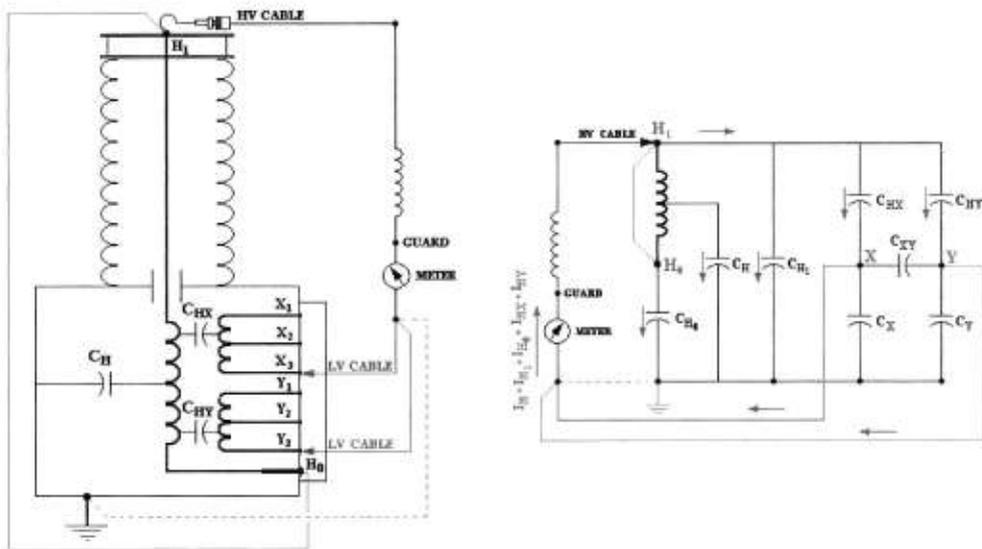


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{XY}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento secundario X y el arrollamiento secundario Y, ambos de bajo voltaje. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{XY}$ .*

## APÉNDICE 5.B2

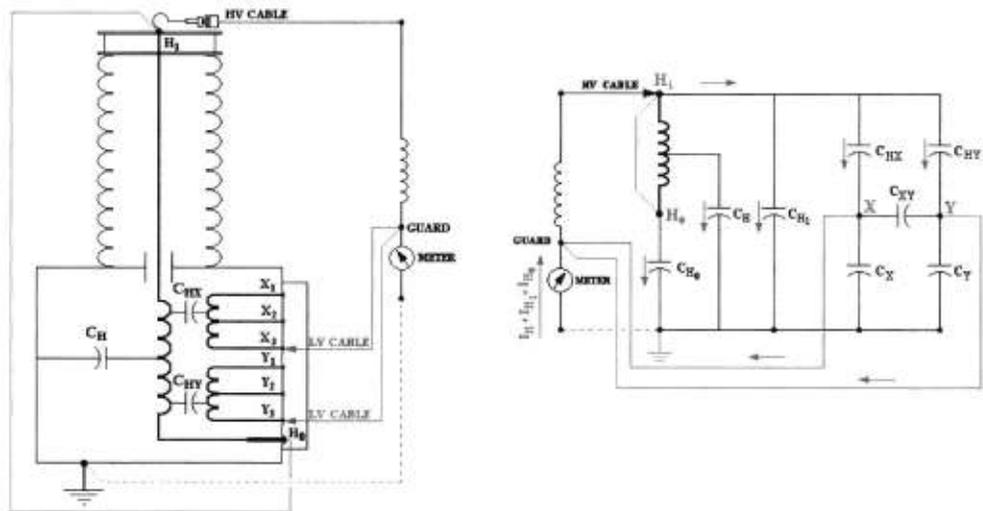
**Análisis de ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento de un transformador de tensión (de potencial)**

### Ensayo No. 1 (Modo de ensayo GST-ground red and blue)



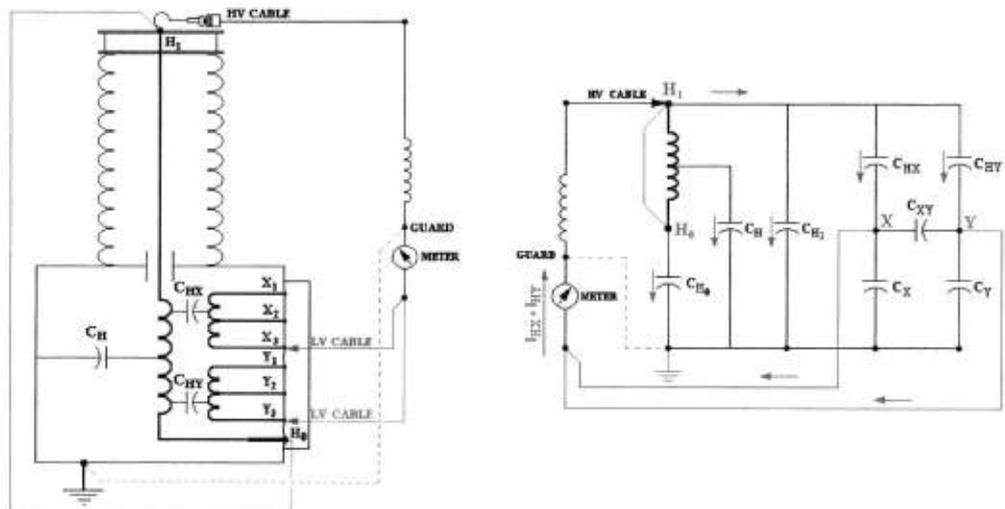
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{H1} + I_{H0} + I_H + I_{HX} + I_{HY}$ , cuyas componentes circulan tanto a través del aislamiento (interno y externo) involucrado entre el arrollamiento de alta tensión con respecto a tierra, como entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{H1} + C_{H0} + C_H + C_{HX} + C_{HY}$ . Este ensayo se considera como OVERALL, es decir, de análisis total del aislamiento.*

**Ensayo No. 1.1 (Modo de ensayo GST-guard red and blue)**



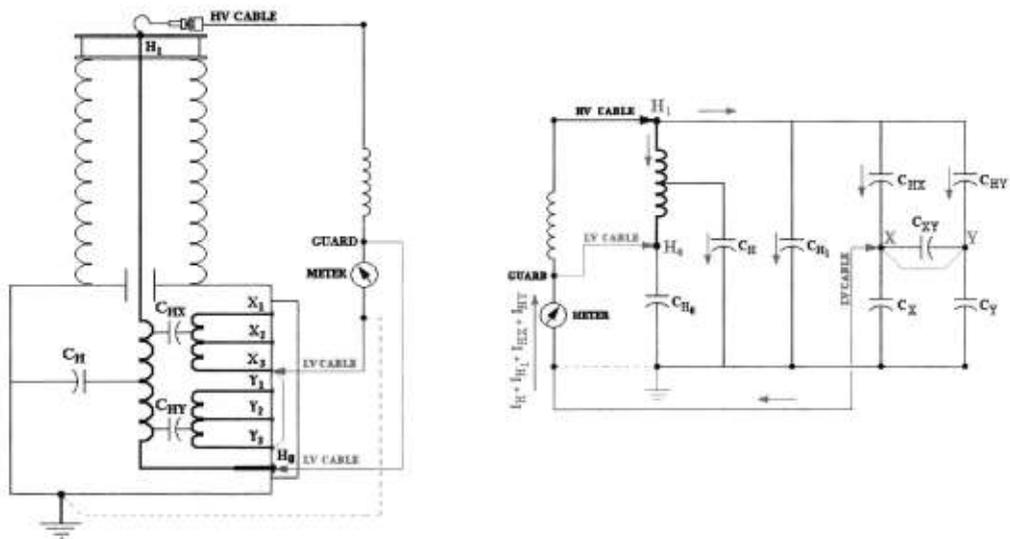
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{H1}+I_{H0}+I_{H2}$ , cuyas componentes circulan a través del aislamiento (interno y externo) involucrado entre el arrollamiento de alta tensión y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HX}+C_{H0}+C_{HY}$ .*

**Ensayo No. 1.2 (Modo de ensayo UST - measured red and blue)**



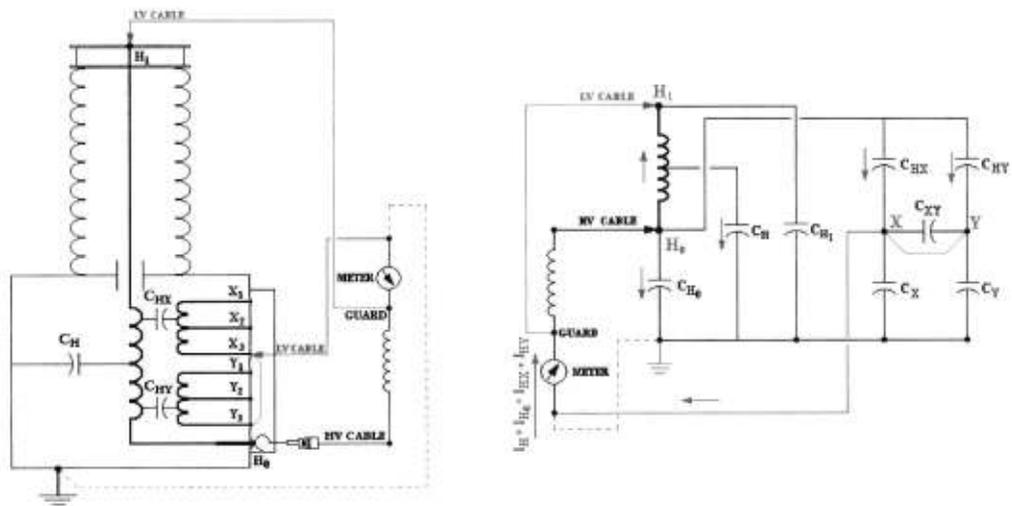
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HX}+I_{HY}$ , cuyas componentes circulan tanto a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HX}+C_{HY}$ .

**Ensayo No. 2 (Modo de ensayo GST-guard blue / ground red)**



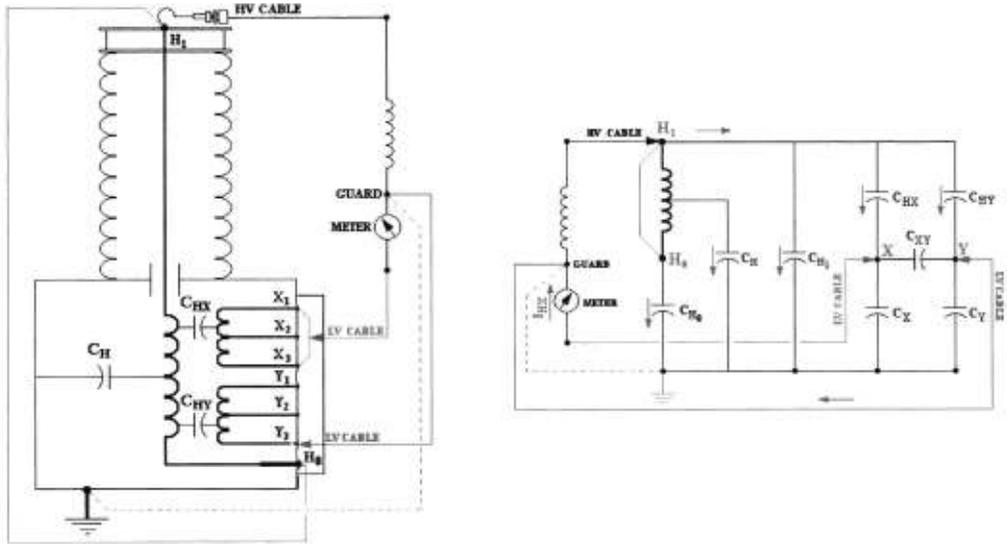
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{H1}+I_H+I_{HX}+I_{HY}$ , cuyas componentes circulan tanto a través del aislamiento (interno y externo) involucrado entre el arrollamiento de alta tensión (referenciado al terminal H<sub>1</sub>) con respecto a tierra, como entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{H1}+C_H+C_{HX}+C_{HY}$ . Este ensayo se considera como CROSSCHECK, es decir, de análisis progresivo del aislamiento a los largo de un arrollamiento, referenciado a uno de sus extremos en particular.

**Ensayo No. 3 (Modo de ensayo GST-guard blue / ground red)**



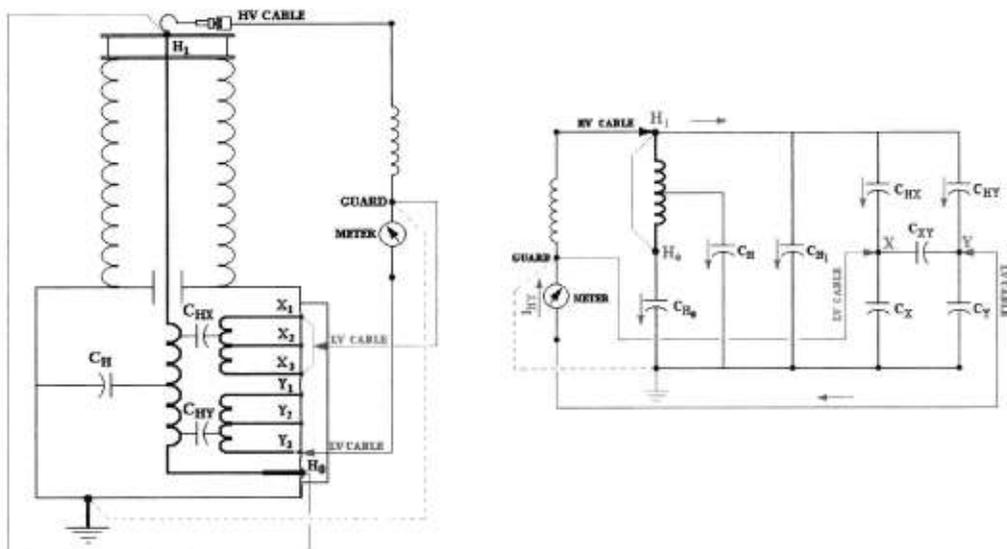
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{H0} + I_H + I_{HX} + I_{HY}$ , cuyas componentes circulan tanto a través del aislamiento (interno y externo) involucrado entre el arrollamiento de alta tensión (referenciado al terminal  $H_0$ ) con respecto a tierra, como entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{H0} + C_H + C_{HX} + C_{HY}$ . Este ensayo se considera como CROSSCHECK, es decir, de análisis progresivo del aislamiento a los largo de un arrollamiento, referenciado a uno de sus extremos en particular.*

**Ensayo No. 4 (Modo de ensayo UST-measured blue / ground red)**



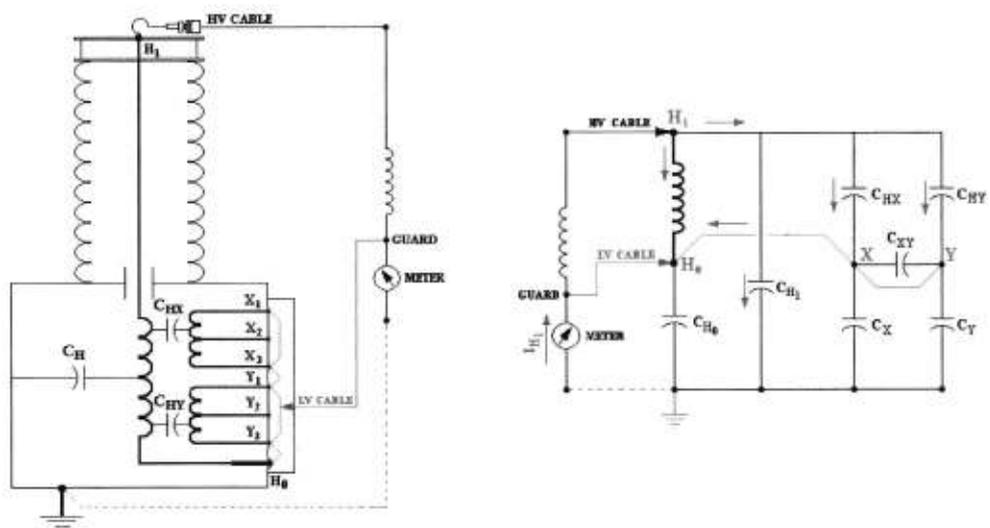
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HX}$  que atraviesa la sección de aislamiento involucrada entre el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento secundario X. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HX}$ .*

**Ensayo No. 5 (Modo de ensayo UST-measured red / ground blue)**



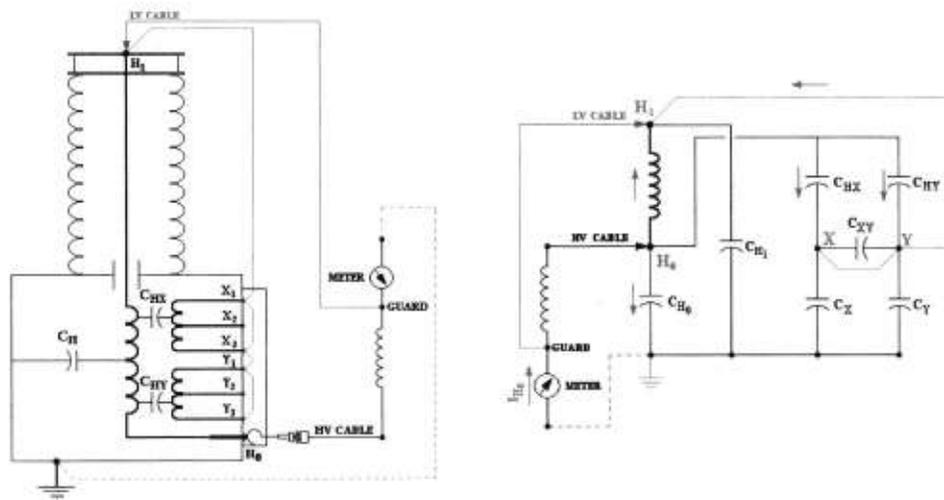
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HY}$ , que atraviesa la sección de aislamiento involucrada entre el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento secundario Y. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{HY}$ .

**Ensayo No. 6 (Modo de ensayo GST-guard blue / ground red)**



Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{H1}$ , que atraviesa la sección de aislamiento cercana al terminal H1, es decir el aislamiento que involucra principalmente a la columna del bushing. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{H1}$

### Ensayo No.7 (Modo de ensayo GST-guard blue / ground red)

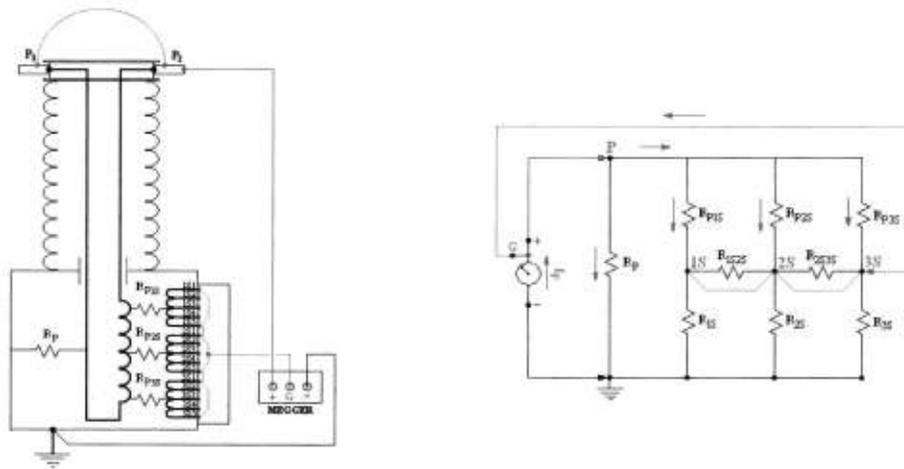


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{H0}$ , que atraviesa la sección de aislamiento cercana al terminal H0, es decir el aislamiento que involucra principalmente a la toma de aterrizamiento del arrollamiento primario. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{H0}$ .*

## APÉNDICE 5.C1

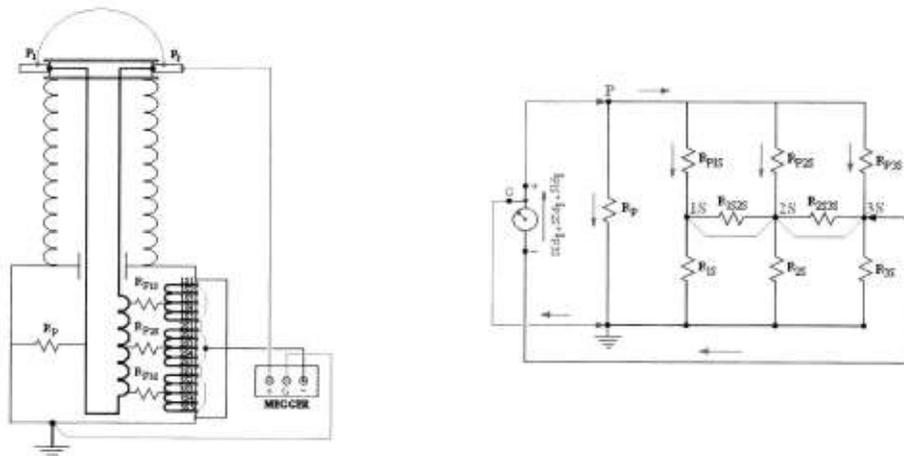
### **Análisis de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento de un transformador de corriente**

#### **Ensayo No. 1**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_P$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alta tensión (primario) y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_P$ .*

#### **Ensayo No. 2**

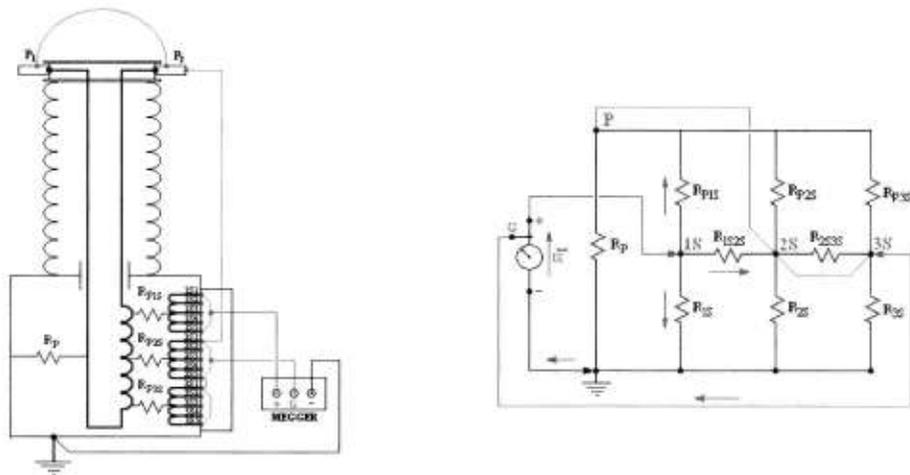




**C.I.B**

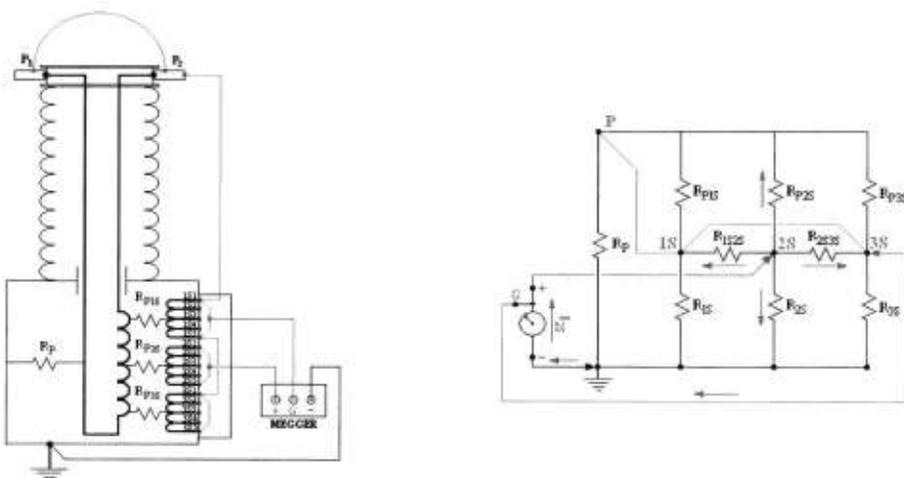
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{P1S}+I_{P2S}+I_{P3S}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{P1S} + R_{P2S} + R_{P3S}$

#### Ensayo No. 4



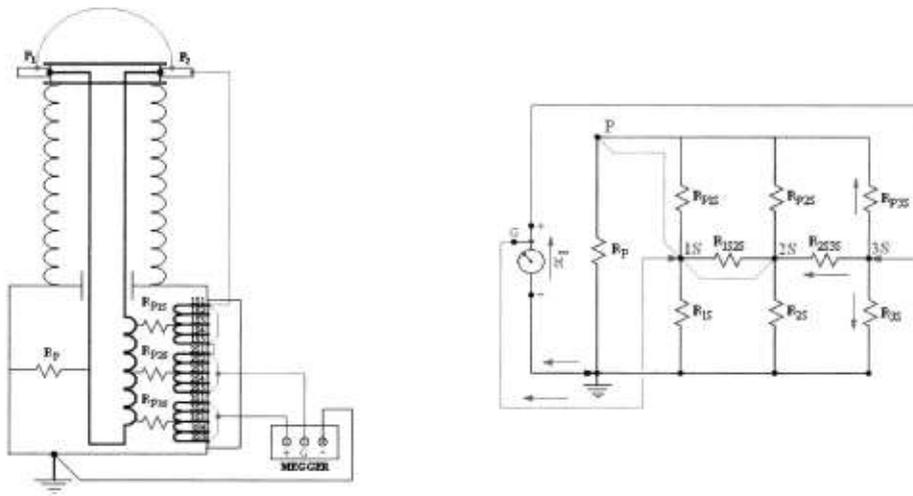
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{1S}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de baja tensión 1S y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{1S}$

#### Ensayo No. 5



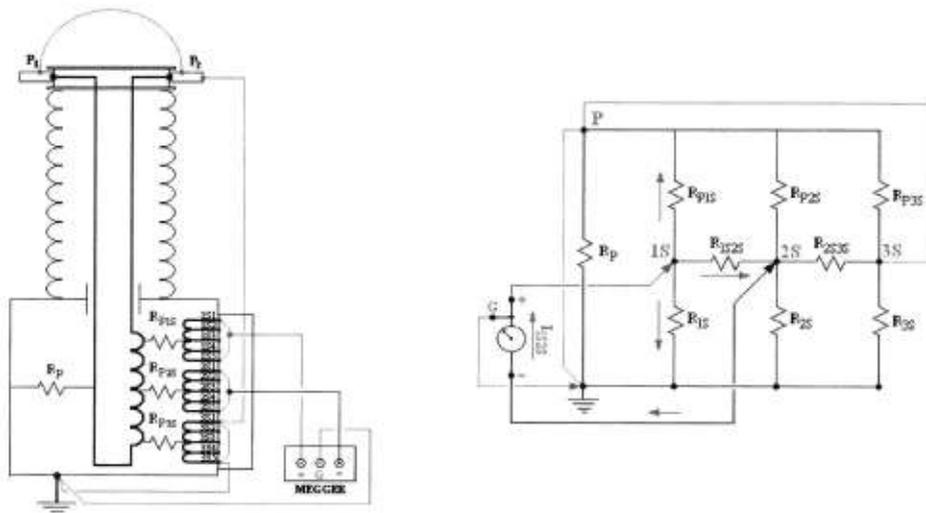
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{2S}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de baja tensión 2S y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{2S}$*

### **Ensayo No. 6**



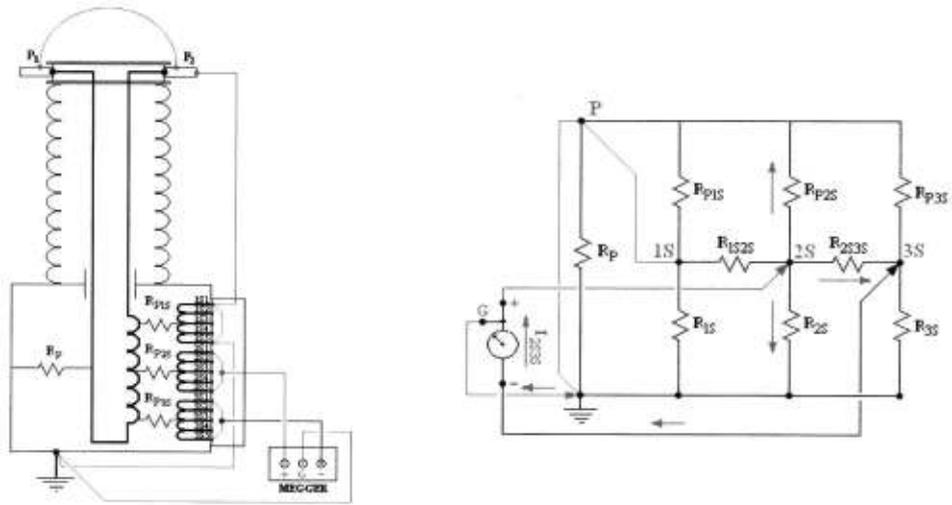
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{3S}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de baja tensión 3S y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{3S}$*

### **Ensayo No. 7**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{1S2S}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de baja tensión 1S y 2S. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{1S2S}$*

**Ensayo No. 8**

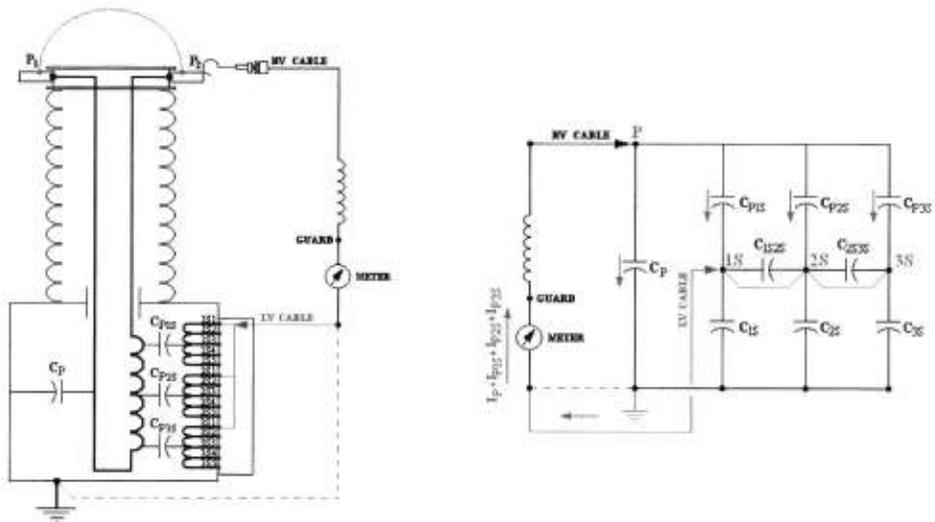


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{2S3S}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre los arrollamientos de baja tensión 2S y 3S. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{2S3S}$*

## APÉNDICE 5.C2

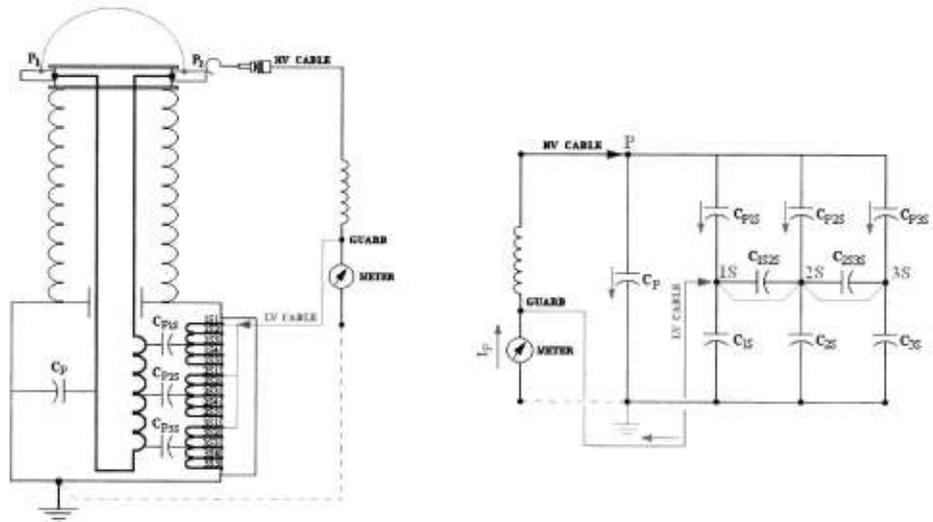
**Análisis de ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento de un transformador de corriente**

### Ensayo No. 1 (Modo de ensayo GST-ground red and blue)



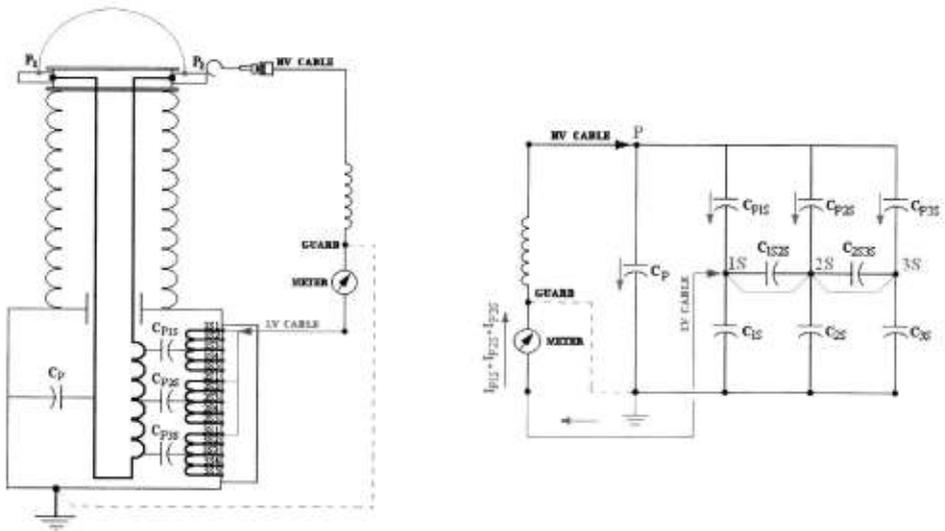
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_P + I_{P1S} + I_{P2S} + I_{P3S}$ , cuyas componentes circulan a través del aislamiento involucrado tanto entre el arrollamiento de alta tensión (primario) con respecto a tierra, como entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_P + C_{P1S} + C_{P2S} + C_{P3S}$ . Este ensayo se considera como OVERALL, es decir, de análisis total del aislamiento.*

**Ensayo No. 2 (Modo de ensayo GST-guard red and blue)**



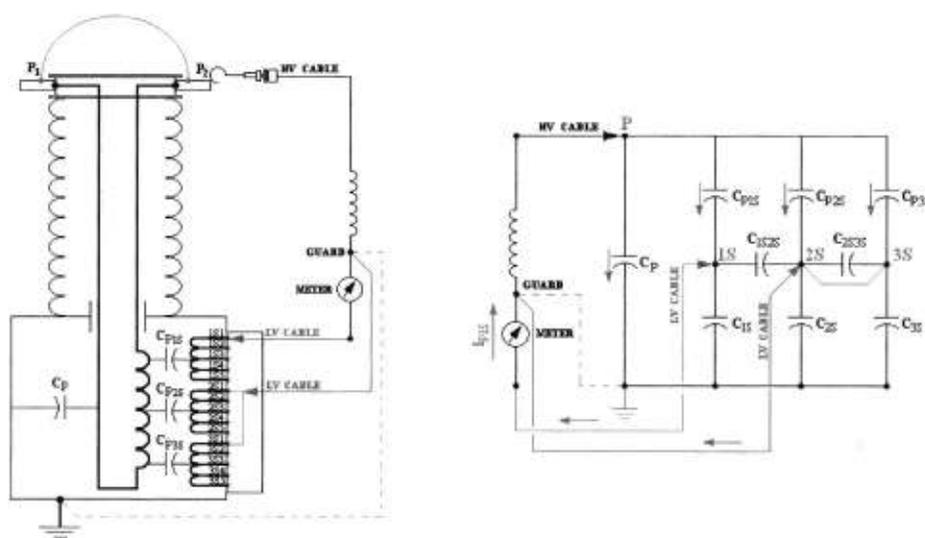
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_p$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alta tensión y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_p$ .*

**Ensayo No. 3 (Modo de ensayo UST - measured red and blue)**



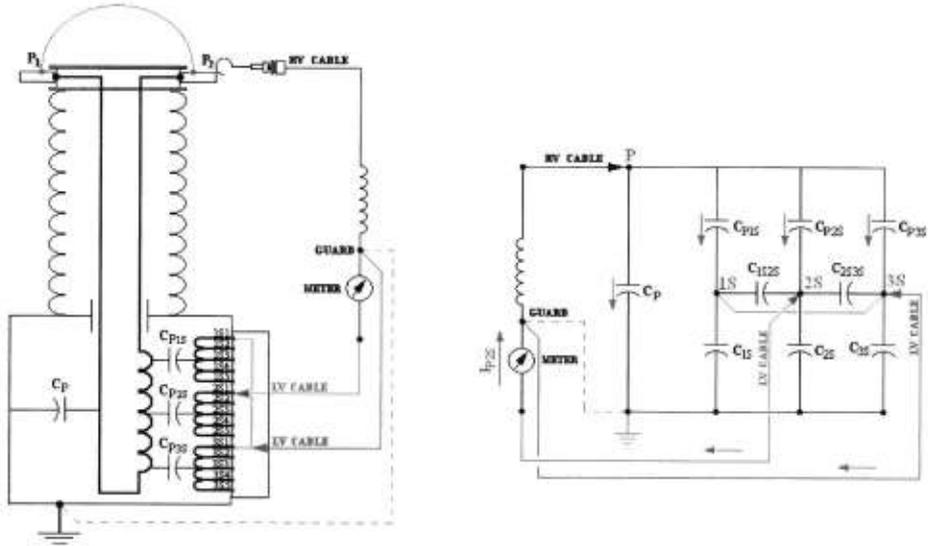
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{P1S}+I_{P2S}+I_{P3S}$ , cuyas componentes circulan a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento de alta tensión y los arrollamientos de baja tensión (secundarios). Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{P1S}+C_{P2S}+C_{P3S}$ .

**Ensayo No. 4 (Modo de ensayo UST-measured blue / ground red)**



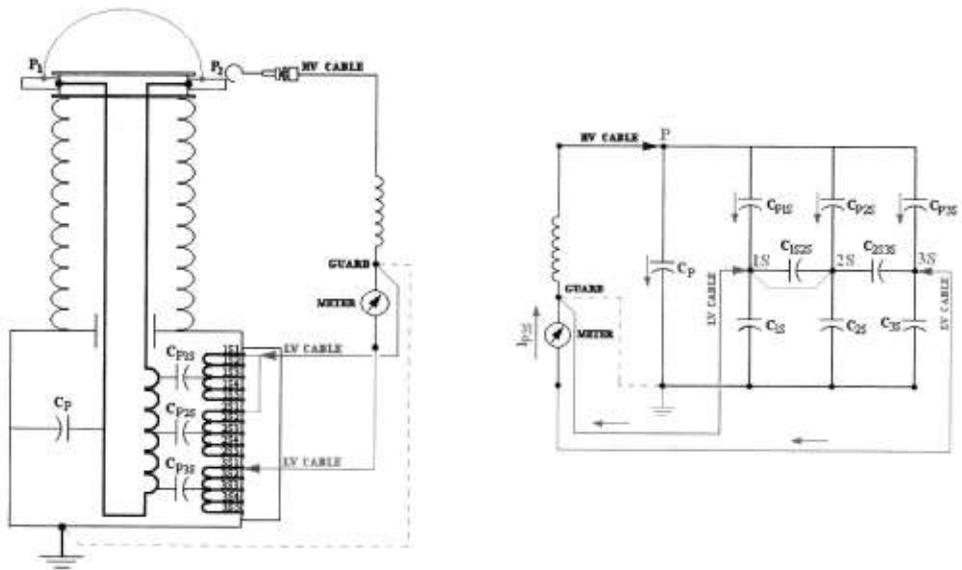
Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{P1S}$ , que circula a través la sección de aislamiento involucrada entre el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento de baja tensión 1S. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{P1S}$ .

**Ensayo No. 5 (Modo de ensayo UST-measured red / ground blue)**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{p25}$ , que circula a través la sección de aislamiento involucrada entre el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento de baja tensión 2S. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{p25}$ .*

**Ensayo No. 6 (Modo de ensayo UST-measured red / ground blue)**

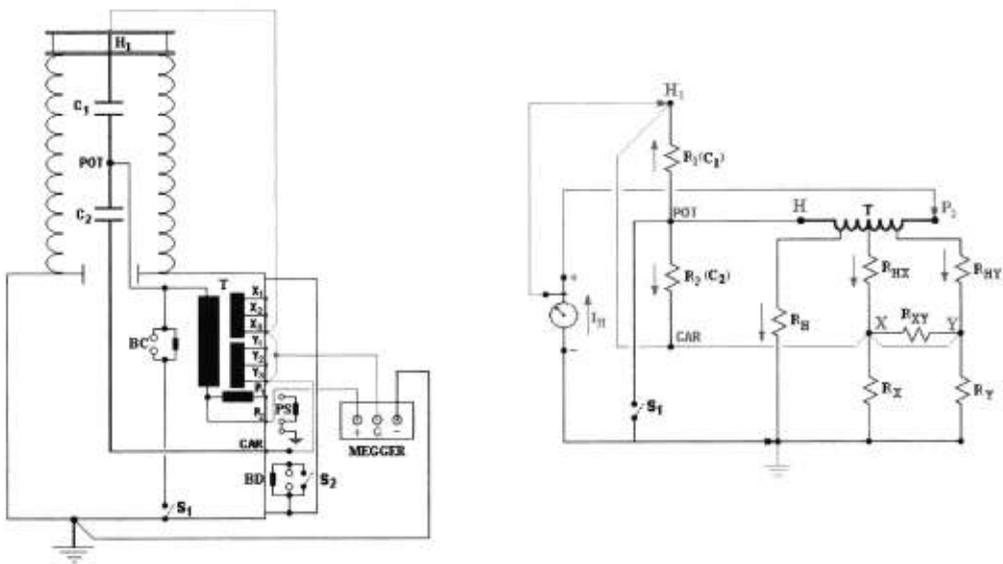


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{P3S}$  que circula a través la sección de aislamiento involucrada entre el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento de baja tensión 3S. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_{P3S}$ .*

## APÉNDICE 5.D1

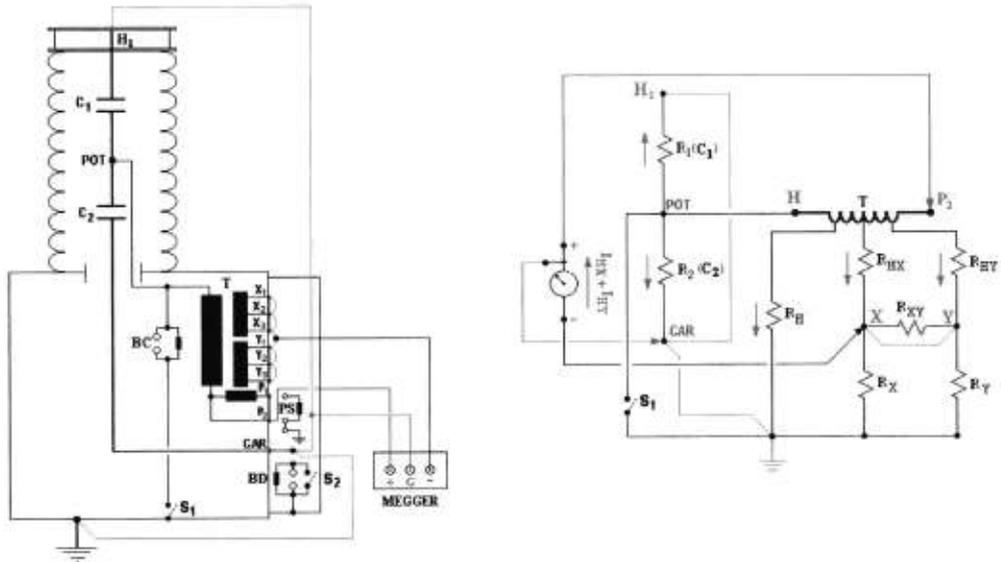
### **Análisis de los ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento de un Transformador de Tensión Capacitivo**

#### **Ensayo No. 1**



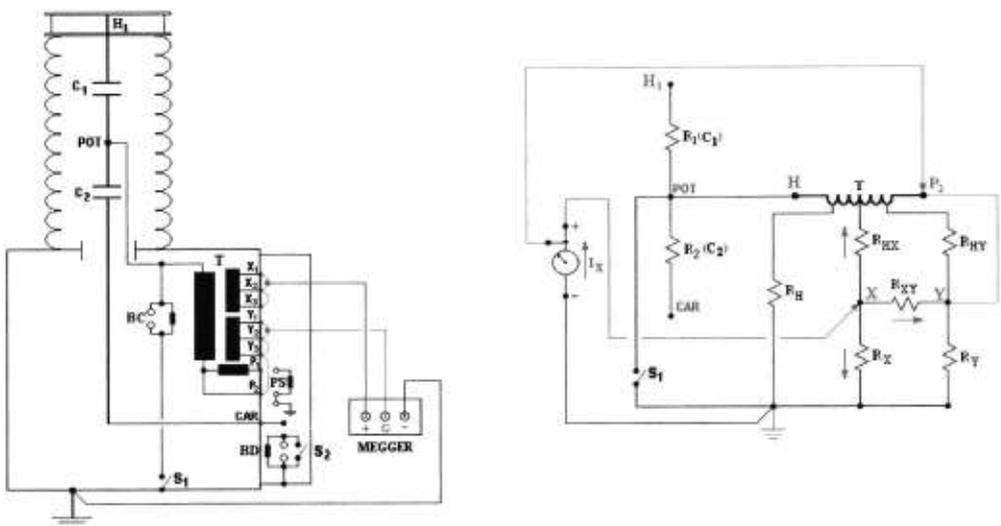
*Este ensayo permite analizar la corriente  $I_H$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento primario del transformador intermedio y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_H$ .*

## Ensayo No. 2



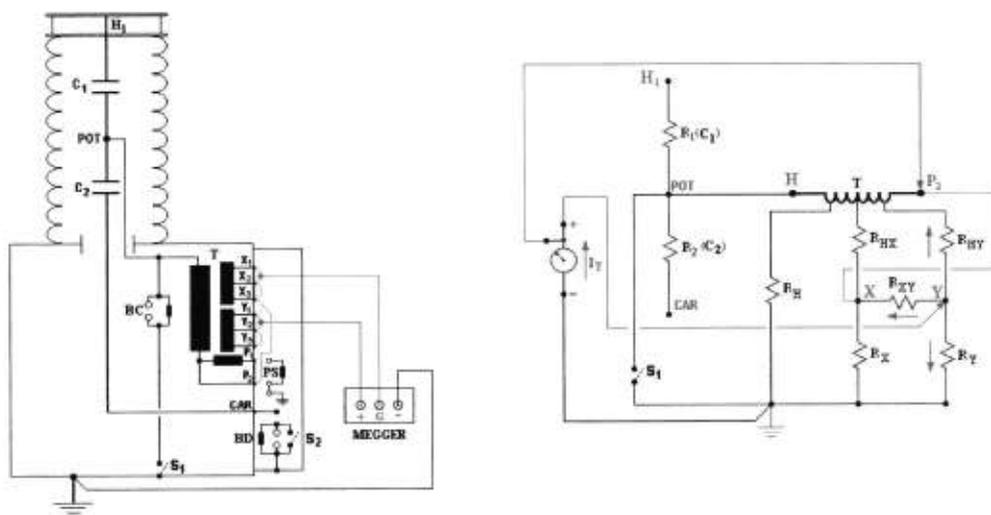
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{HX}+I_{HY}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento primario y los arrollamientos secundarios  $X$  y  $Y$  del transformador intermedio. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{HX}+R_{HY}$*

## Ensayo No. 3



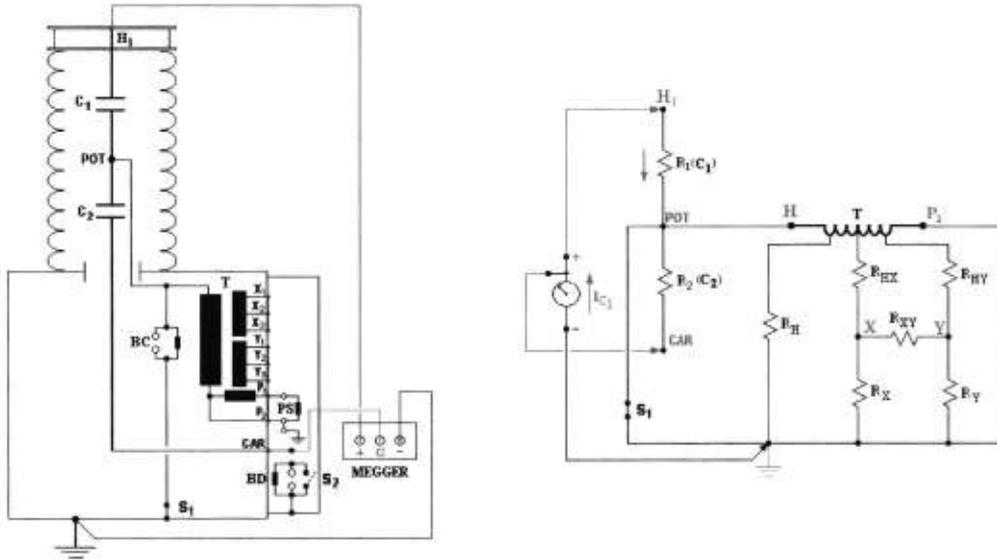
Este ensayo permite analizar la corriente  $I_X$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento secundario  $X$  del transformador intermedio y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_X$

#### Ensayo No. 4



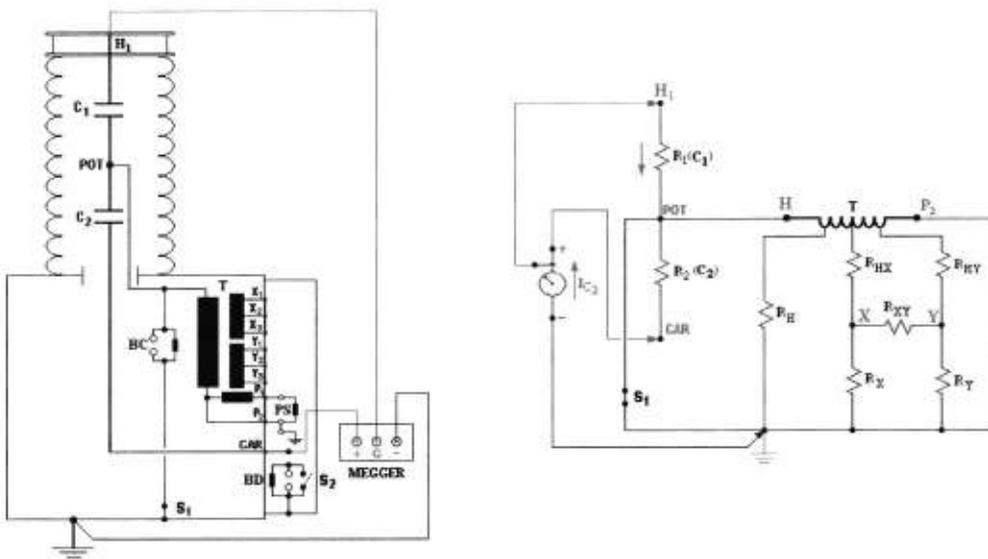
Este ensayo permite analizar la corriente  $I_Y$  que circula a través del aislamiento involucrado entre el arrollamiento secundario  $Y$  del transformador intermedio y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_Y$

## Ensayo No. 5



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{C1}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre placas del módulo capacitivo  $C_1$ . Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{C1}$ .*

## Ensayo No. 6

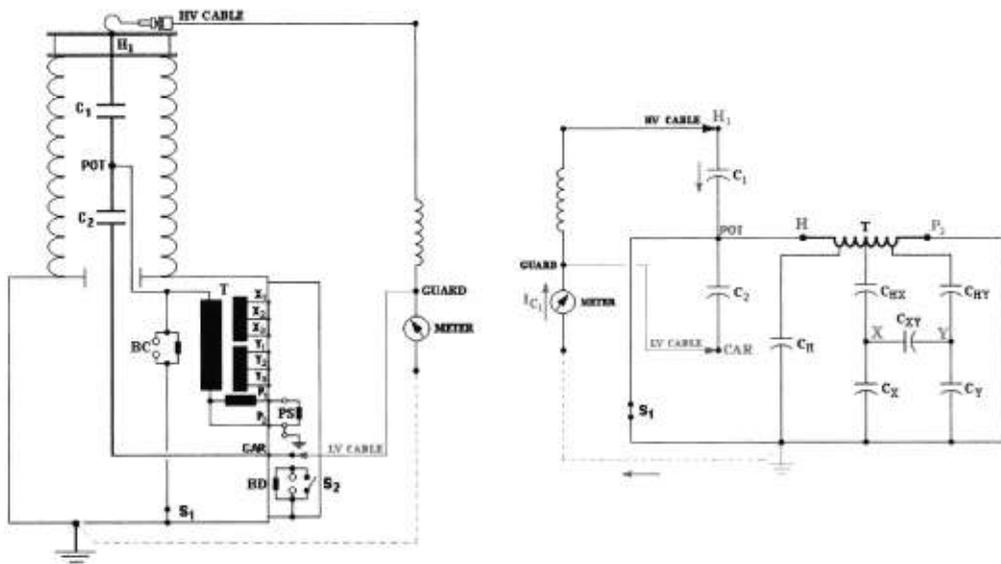


*Este ensayo permite analizar la corriente  $I_{C2}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre placas del módulo capacitivo  $C_2$ . Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{C2}$ .*

## APÉNDICE 5.D2

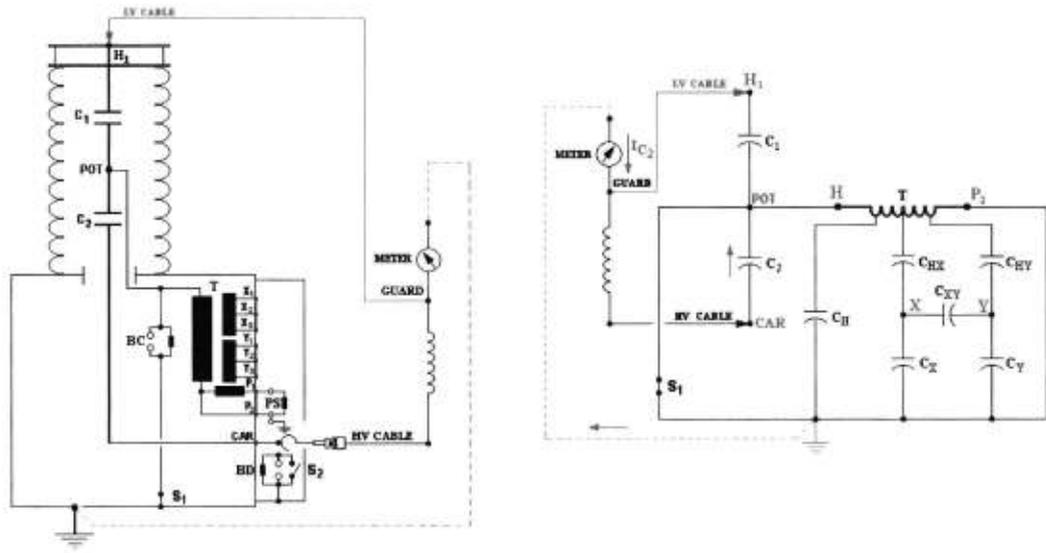
**Análisis de los ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento de un Transformador de Tensión Capacitivo**

### Ensayo No. 1 (Modo de ensayo GST-guard blue and red)



*Este ensayo permite analizar la corriente  $I_{C1}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre placas del módulo capacitivo  $C_1$ . Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_1$ .*

**Ensayo No. 2 (Modo de ensayo GST-guard blue and red)**

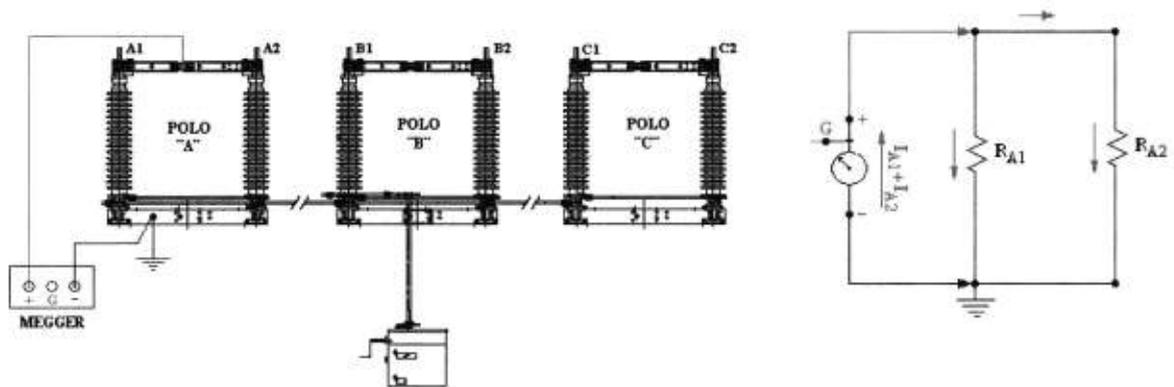


*Este ensayo permite analizar la corriente  $I_{C_2}$  que circula a través del aislamiento involucrado entre placas del módulo capacitivo  $C_2$ . Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C_2$ .*

## APÉNDICE 5.E1

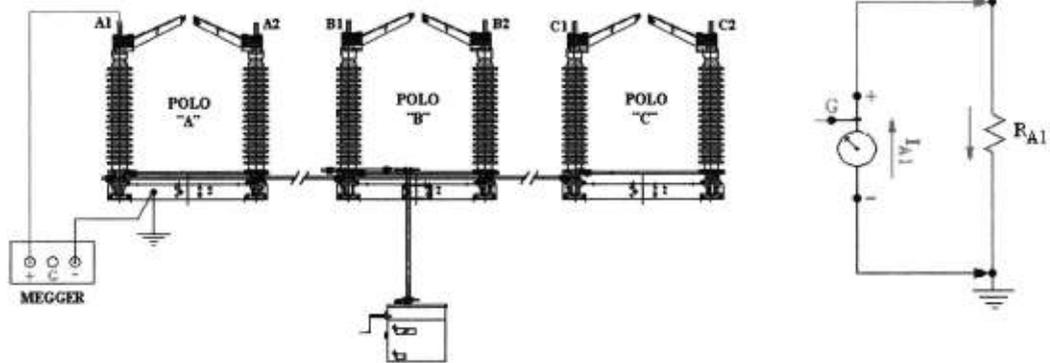
**Análisis de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento de un Seccionador de Potencia de un solo punto de corte (doble columna aislante por polo)**

### Ensayo No. 1



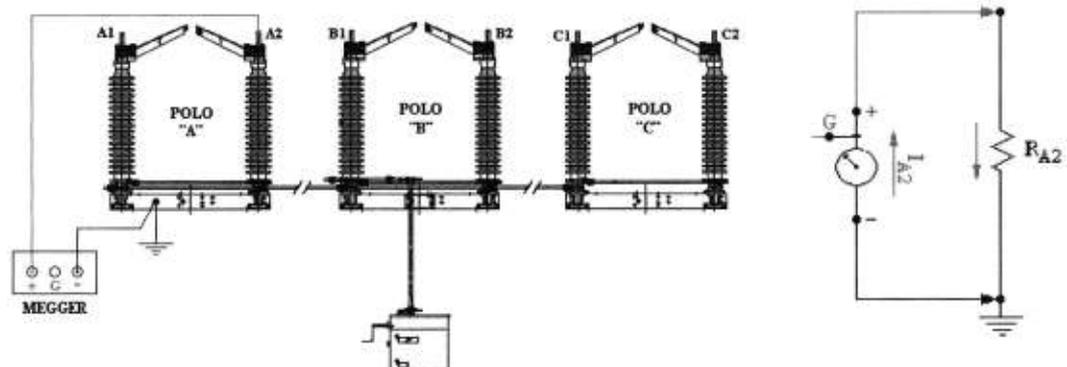
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{A1} + I_{A2}$ , que circula a través del aislamiento involucrado (aisladores de núcleo sólido) entre las cuchillas de cada polo y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{A1} + R_{A2}$ .*

## Ensayo No. 2



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{A1}$ , que circula a través del aislamiento involucrado (aislador de núcleo sólido) entre la cuchilla del terminal 1 de cada polo y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{A1}$ .*

## Ensayo No. 3

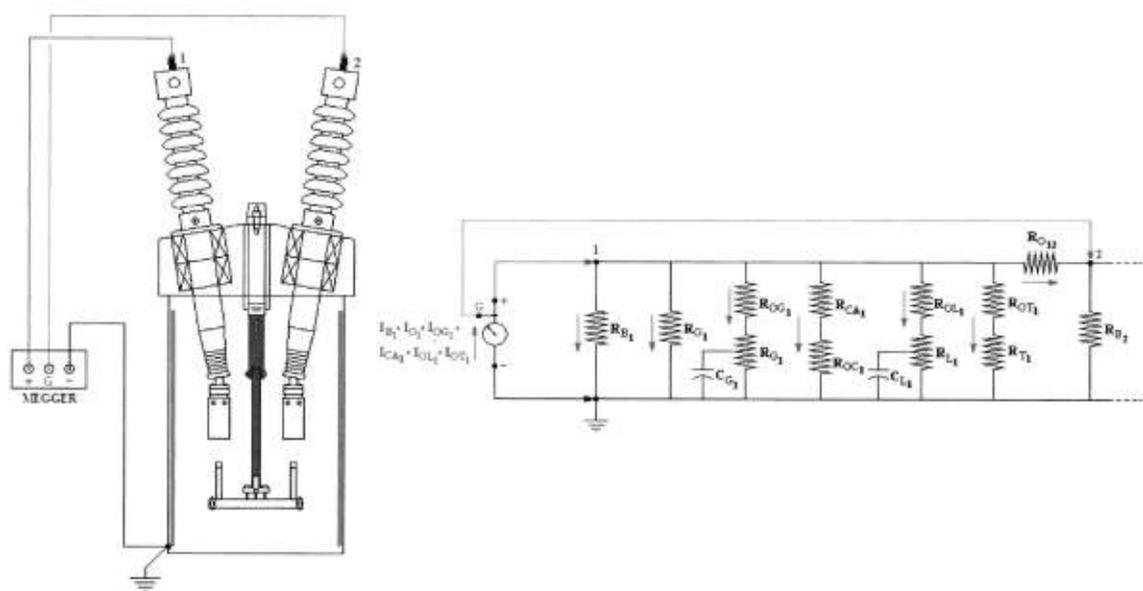


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{A2}$  que circula a través del aislamiento involucrado (aislador de núcleo sólido) entre la cuchilla del terminal 2 de cada polo y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{A2}$ .*

## APÉNDICE 5.F1

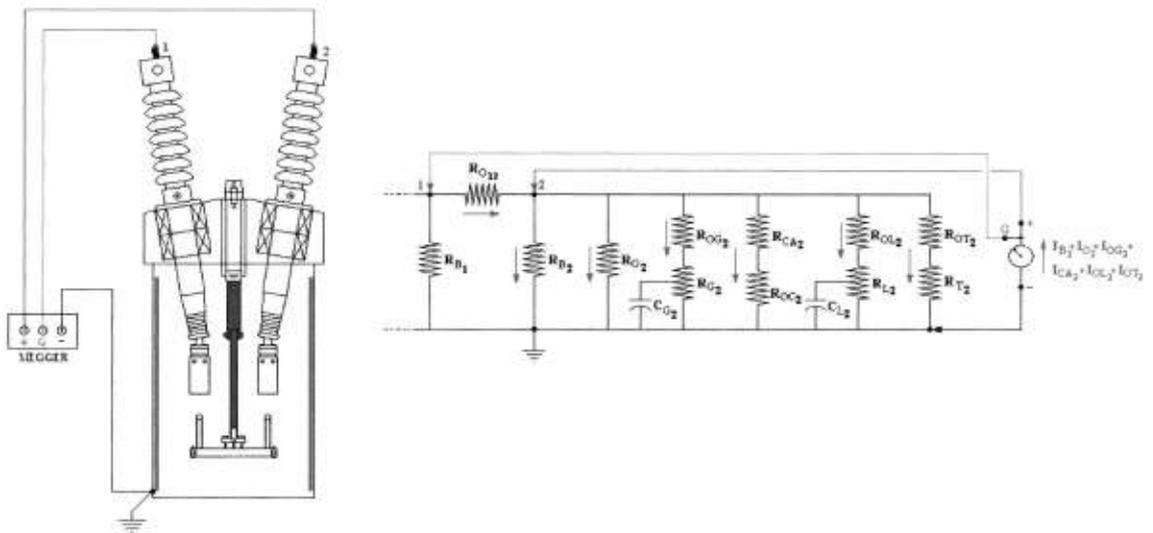
### **Análisis de ensayos aplicados para medida de la resistencia de aislamiento de un interruptor de potencia inmerso en gran volumen de aceite**

#### **Ensayo No. 1**



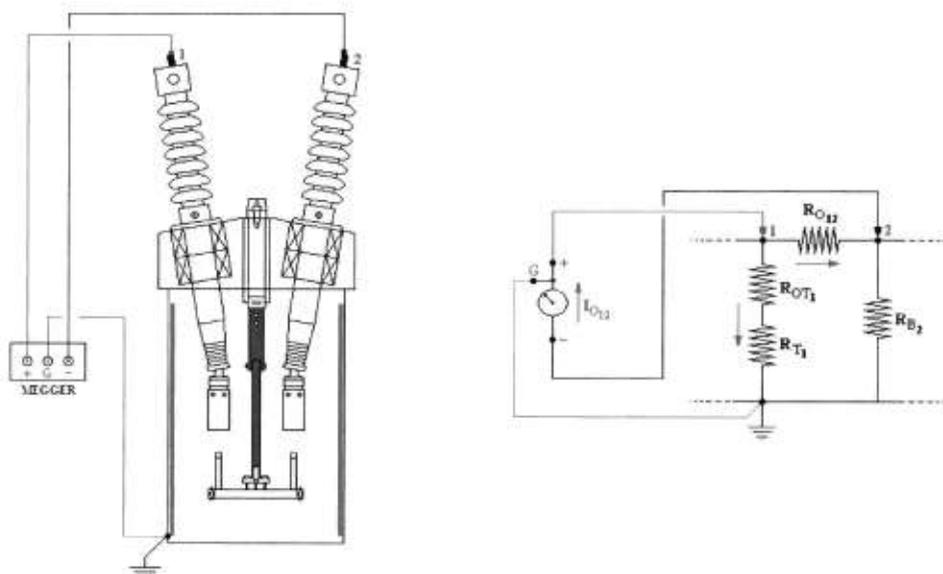
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{B1} + I_{O1} + I_{OG1} + I_{CA1} + I_{OL1} + I_{OT1}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el conductor central del bushing #1 y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{B1} + R_{O1} + R_{OG1} + R_{CA1} + R_{OL1} + R_{OT1}$ .*

## Ensayo No. 2



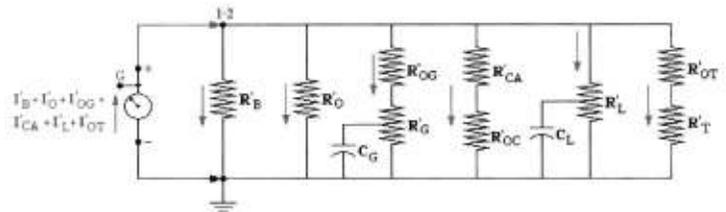
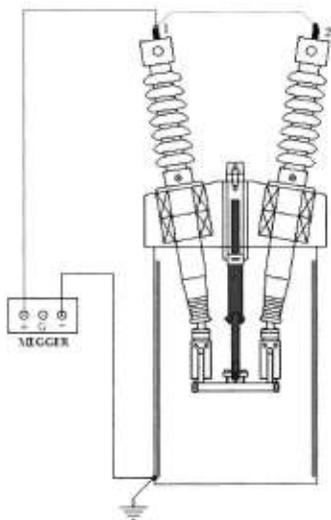
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{B2} + I_{O2} + I_{OG2} + I_{CA2} + I_{OL2} + I_{OT2}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el conductor central del bushing #2 y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{B2} + R_{O2} + R_{OG2} + R_{CA2} + R_{OL2} + R_{OT2}$ .*

## Ensayo No. 3



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{012}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre contactos fijos. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R_{012}$*

#### **Ensayo No. 4**

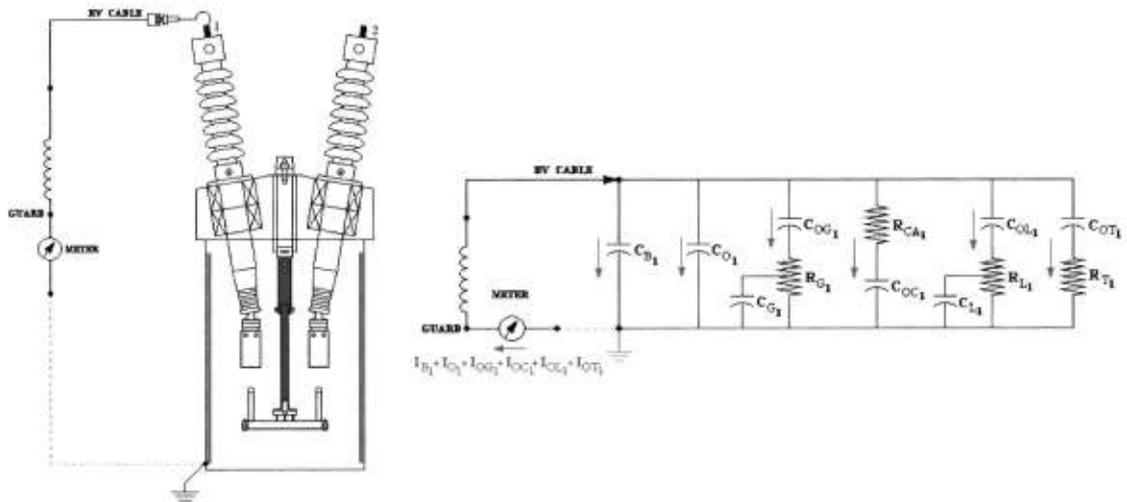


*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I'_B+I'_O+I'_{OG}+I'_{CA}+I'_L+I'_{OT}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre los conductores centrales de ambos bushing's y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en ohms), se representa como  $R'_B+R'_O+R'_{OG}+R'_{CA}+R'_L+R'_{OT}$ .*

## APÉNDICE 5.F2

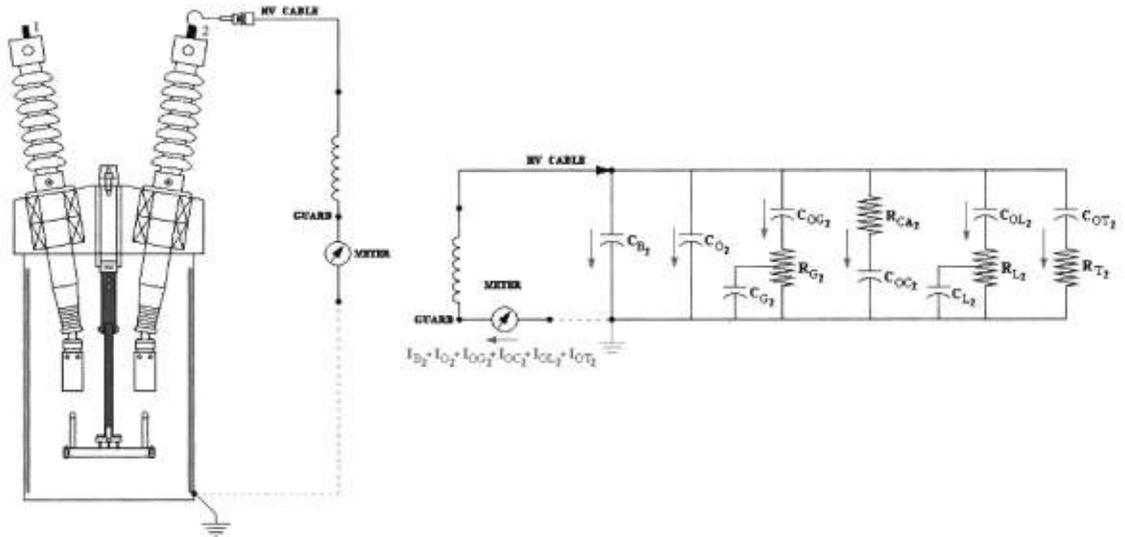
**Análisis de ensayos aplicados para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación del aislamiento de un interruptor de potencia inmerso en gran volumen de aceite**

### Ensayo No. 1 (Modo de ensayo GST-ground red and blue)



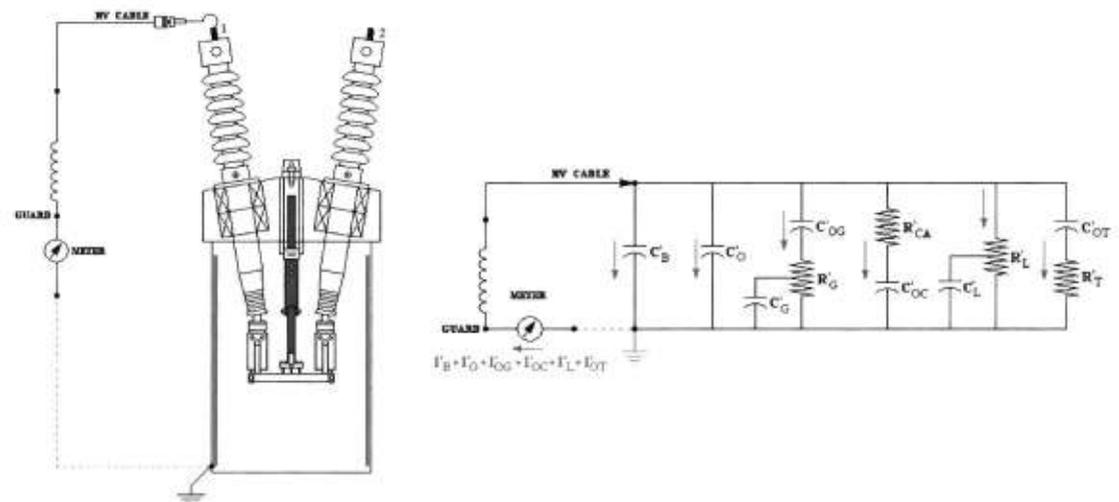
*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{B1} + I_{O1} + I_{OG1} + I_{OC1} + I_{OL1} + I_{OT1}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el conductor central del bushing #1 y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de capacitancia (en picofaradios), se representa como  $C_{B1} + C_{O1} + C_{OG1} + C_{OC1} + C_{OL1} + C_{OT1}$ .*

**Ensayo No. 2 (Modo de ensayo GST-ground red and blue)**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I_{B2} + I_{O2} + I_{OG2} + I_{OC2} + I_{OL2} + I_{OT2}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre el conductor central del bushing #2 y tierra. Dicha corriente, expresada en términos de resistencia (en picofaradios), se representa como  $C_{B2} + C_{O2} + C_{OG2} + C_{OC2} + C_{OL2} + C_{OT2}$ .*

**Ensayo No. 3 (Modo de ensayo GST-ground red and blue)**



*Este ensayo permite analizar la corriente total  $I'_B+I'_O+I'_{OG}+I'_{OC}+I'_L+I'_{OB}$ , que circula a través del aislamiento involucrado entre los conductores centrales de ambos bushing's y tierra. Dicha corriente expresada en términos de capacitancia (en picofaradios) se representa como  $C'_B+C'_O+C'_{OG}+C'_{OC}+C'_L+C'_{OB}$ .*

# FIGURAS ANEXAS

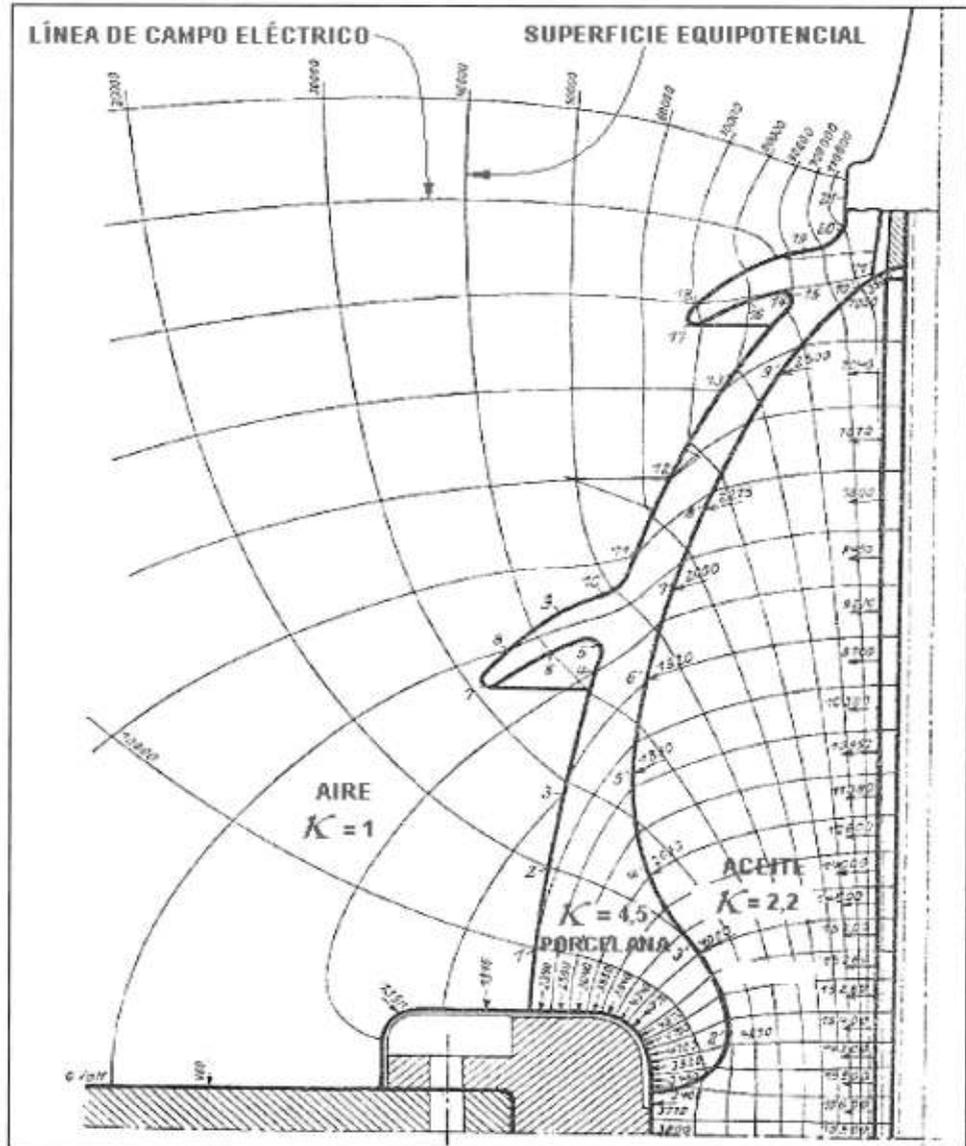


**C.I.B.**

FIGURA ANEXA 1.1

**TÍTULO:**

DISPOSICIÓN DE LAS LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO Y LAS SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES EN UN AISLADOR



**DESCRIPCIÓN:**

Trazado real sistemático del comportamiento de las líneas de campo eléctrico y las superficies equipotenciales en un aislador pasatapas de 120000 Voltios, considerando la disposición refractoria de los distintos materiales aislantes involucrados.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

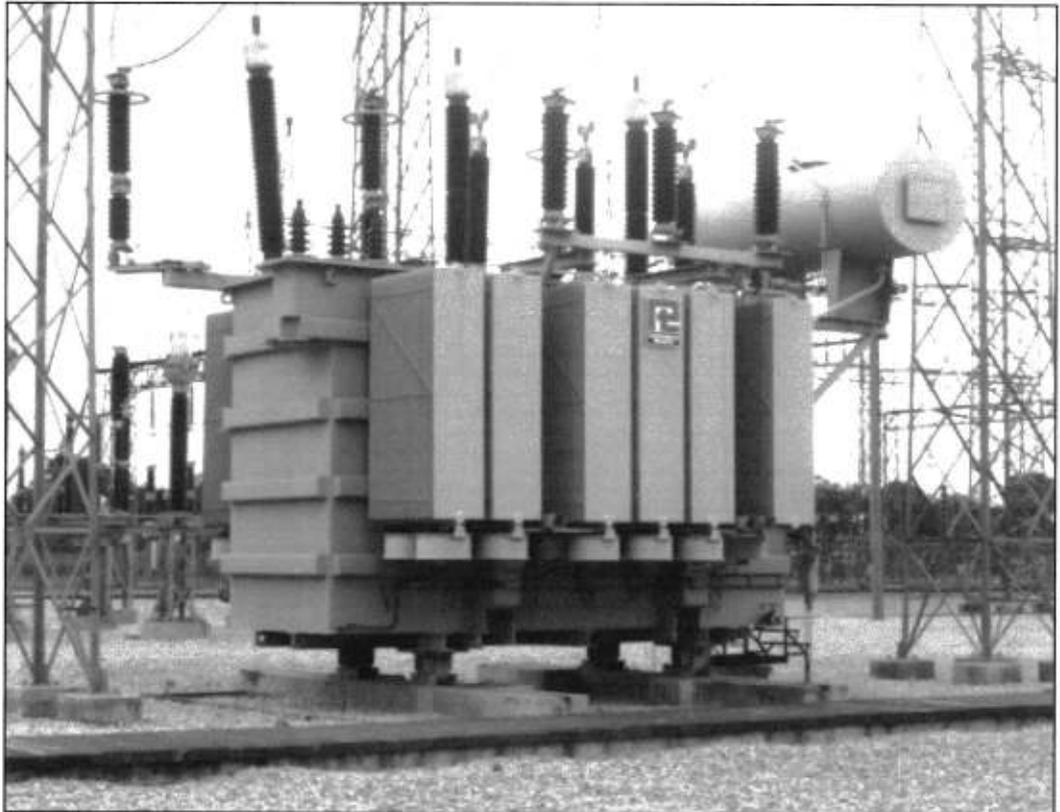
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.1.A

### TÍTULO:

AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO



### DESCRIPCIÓN:

Autotransformador trifásico instalado en la Subestación "MILAGRO" (Parroquia Roberto Astudillo-Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Este posee las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	PAWELS	<b>TIPO DE ENFRIAMIENTO:</b>	ONAN / ONAF / ONAF
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Bélgica	<b>NORMA ACEITE:</b>	IEC 60 296 CLASE I
<b>CAPACIDAD NOMINAL:</b>	225 / 225 / 75 MVA	<b>B.I.L.:</b>	A.T. 750 kV
<b>VOLTAJE NOMINAL:</b>	230 / 138 / 13,8 kV		M.T. 580 kV
<b>TIPO:</b>	NÚCLEO		NEUTRO 150 kV
<b>PESO TOTAL:</b>	122700 Kg		B.T. 150 kV
<b>PESO DEL ACEITE:</b>	34000 Kg		

Posee cambiador de derivaciones sin carga de 5 posiciones

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.1.B

### TÍTULO:

BANCO DE AUTOTRANSFORMADORES MONOFÁSICOS



### DESCRIPCIÓN:

Banco de autotransformadores monofásicos "ATK" instalado en la Subestación "DOS CERRITOS" (Cantón Salitre-Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Los tres transformadores son similares y poseen las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	MITSUBISHI	<b>CANTIDAD DE ACEITE:</b>	16130 Litros
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Japón	<b>TIPO DE ENFRIAMIENTO:</b>	ONAN / ONAF / ONAF
<b>CAPACIDAD NOMINAL:</b>	30 / 40 / 50 MVA	<b>NORMA ACEITE:</b>	IEC 60 296 CLASE I
<b>VOLTAJE NOMINAL:</b>	138 / 69 / 13,8 kV	<b>B.I.L:</b>	A.T. 650 kV
<b>TIPO:</b>	NÚCLEO		M.T. 350 kV
<b>PESO TOTAL:</b>	49500 Kg		NEUTRO 95 kV
<b>PESO DEL ACEITE:</b>	14500 Kg		B.T. 95 kV

Posee cambiador de derivaciones sin carga de 5 posiciones y cambiador de derivaciones bajo carga de 33 posiciones

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.2.A

### TÍTULO:

TRANSFORMADORES DE TENSIÓN (DE POTENCIAL)



### DESCRIPCIÓN:

Transformadores de tensión de la bahía "Tennis" a 69kV de la Subestación "DOS CERRITOS" (Cantón Salitre- Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Estos poseen las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	ABB	<b>MASA TOTAL:</b>	190 Kg
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Suecia	<b>B.I.L.:</b>	140-325 Kg.
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	72 kV	<b>VOLTAJE PRIMARIO:</b>	69000 / $\sqrt{3}$
<b>TIPO:</b>	EMFC 72	<b>VOLTAJE SECUNDARIO:</b>	115 - 115/ $\sqrt{3}$
<b>NORMA:</b>	IEC 60044-2	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz.
<b>AÑO DE PRODUCCIÓN:</b>	2004		

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.2.B

### TÍTULO:

TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO  
(CON ACCESORIOS DE ONDA PORTADORA)



### DESCRIPCIÓN:

Transformador de Tensión Capacitivo de la bahía "Quevedo 1" a 230kV de la Subestación "PASCUALES" (Parroquia Pascuales - Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). En la figura se identifican dos accesorios importantes acoplados a este equipo que son: 1) La trampa de onda y 2) el equipo carrier para transmisión de comunicaciones. Este posee las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	NISSIN ELECTRIC	<b>MASA TOTAL:</b>	1250 Kg
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Japón	<b>B.I.L.:</b>	—
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	242 kV	<b>VOLTAJE PRIMARIO:</b>	230000 / $\sqrt{3}$
<b>TIPO:</b>	PDL-20E-5M	<b>VOLTAJE SECUNDARIO:</b>	115 - 115/ $\sqrt{3}$
<b>CAPACITANCIA NOM.:</b>	0.01 $\mu$ F	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz.
<b>AÑO DE PRODUCCIÓN:</b>	2004		

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

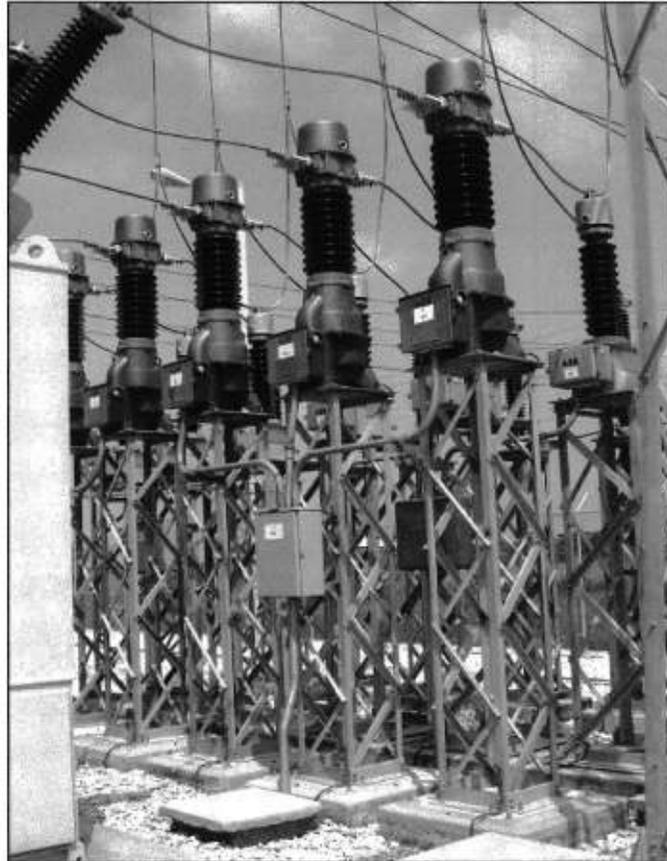
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.3.A

### TÍTULO:

TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(CON NÚCLEO EN LA PARTE INFERIOR)



### DESCRIPCIÓN:

Transformadores de corriente de la bahía "Tennis" a 69kV de la Subestación "DOS CERRITOS" (Cantón Salitre-Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Estos poseen las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	ABB	<b>MASA TOTAL:</b>	385 Kg.
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Suecia	<b>TEMPERATURA:</b>	-40 - +40°C
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	72 kV	<b>B.I.L.:</b>	140 - 325 kV
<b>RELACIÓN:</b>	1500 / 5 / 5 / 5	<b>CORRIENTE TÉRMICA CONT.:</b>	1800 A
<b>TIPO:</b>	IMB 72	<b>CORRIENTE TÉRMICA (I<sub>th</sub>):</b>	20 KA/1Seg.
<b>NORMA:</b>	IEC 60044-1	<b>CORRIENTE DINÁMICA (I<sub>dyn</sub>):</b>	78,8 kA
<b>AÑO DE PRODUCCIÓN:</b>	2004	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

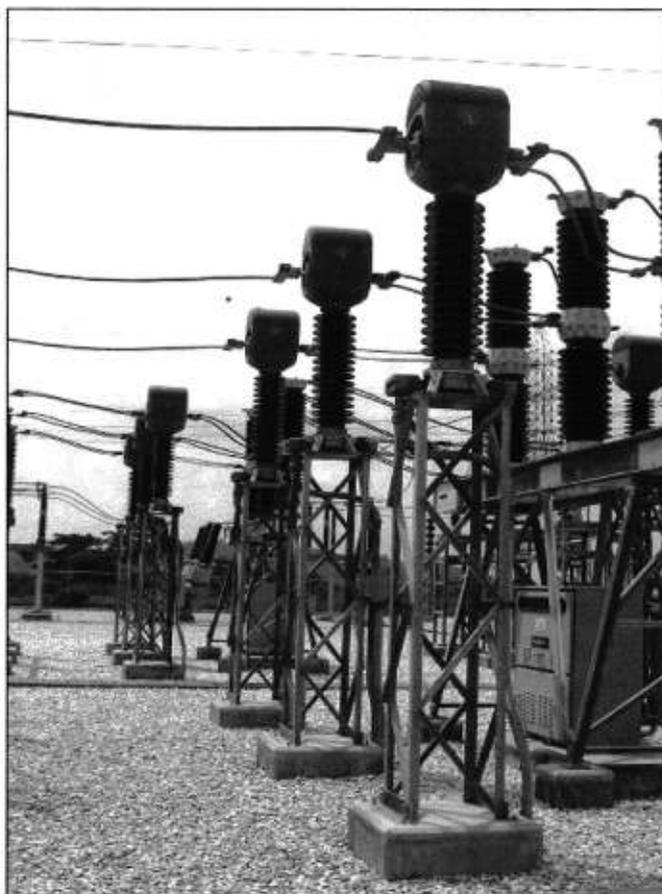
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.3.B

### TÍTULO:

TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(CON NÚCLEO EN LA PARTE SUPERIOR)



### DESCRIPCIÓN:

Transformadores de corriente de la bahía "Policentro" a 138kV de la Subestación "PASCUALES" (Parroquia Pascuales-Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Estos poseen las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	ARTECHE	<b>PESO TOTAL:</b>	410 Kg.
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Munguía-Vizcaya	<b>PESO DEL ACEITE:</b>	32 Kg.
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	145 / 275 / 650 kV	<b>CORRIENTE TÉRMICA (I<sub>th</sub>):</b>	32 kA / 3Seg.
<b>RELACIÓN:</b>	2000 / 5	<b>CORRIENTE DINÁMICA (I<sub>dyn</sub>):</b>	80 kA
<b>TIPO:</b>	CTF-145	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz.
<b>AÑO DE PRODUCCIÓN:</b>	1988		

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

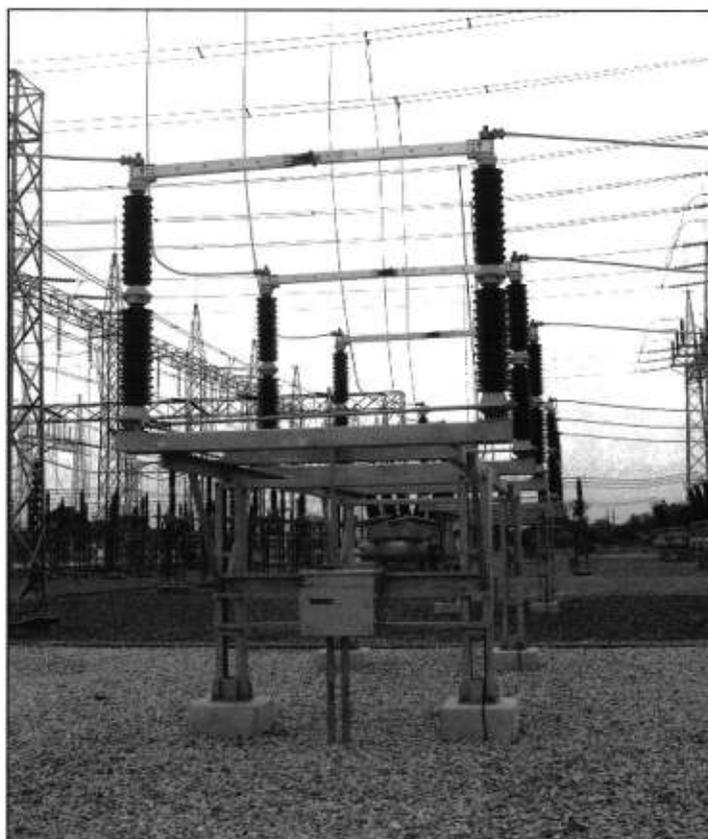
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.4

### TÍTULO:

SECCIONADOR TRIPOLAR



### DESCRIPCIÓN:

Seccionador tripolar tipo E (de corte central) instalado en la bahía "Machala 1" a 230kV de la Subestación "MILAGRO" (Parroquia Roberto Astudillo - Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Este posee las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	LAGO ELECTROMECAÁNICA	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz.
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Argentina	<b>B.I.L.:</b>	1050 / 950 kV.
<b>TIPO:</b>	SLA-2C / 245	<b>CORRIENTE NOM.:</b>	1250 A.
<b>VOLTAJE NOMINAL:</b>	245 kV	<b>CTE. BREVE DURACIÓN:</b>	40 kA / 1 Seg.
<b>AÑO DE CONSTRUCCIÓN:</b>	2005	<b>CTE. DE CRESTA:</b>	100 kA
<b>NORMA:</b>	IEC 62271-120	<b>PESO TOTAL:</b>	1600 Kg.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

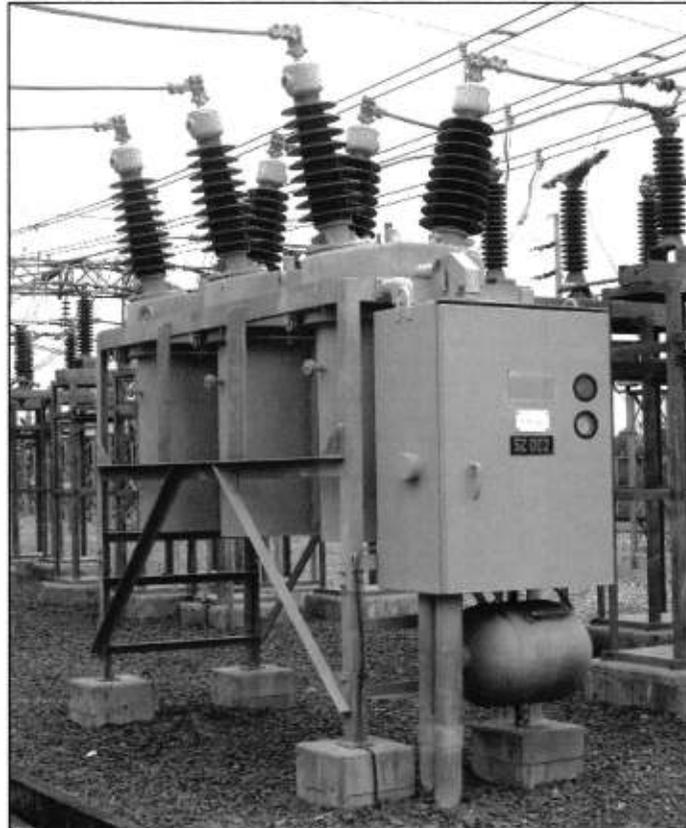
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.5.A

### TÍTULO:

INTERRUPTOR DE POTENCIA  
(TIPO INMERSO EN GRAN VOLUMEN DE ACEITE)



### DESCRIPCIÓN:

Interruptor tripolar de potencia tipo GVO instalado en la bahía de "Transferencia" a 69kV de la Subestación "MILAGRO" (Parroquia Roberto Astudillo - Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Este posee las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	MITSUBISHI	<b>TIEMPO INTERR. NOMINAL:</b>	5 CICLOS
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Japón	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz.
<b>TIPO:</b>	70-GTE-20A	<b>PESO TOTAL CON ACEITE:</b>	3800 Kg.
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	72,5 kV	<b>ACEITE:</b>	1000 Lt.
<b>CORRIENTE NOMINAL:</b>	800 A.	<b>B.I.L.:</b>	350 kV
<b>CTE. CORTOCIRCUITO NOM:</b>	19 kA.		

La operación de CIERRE con resorte y la operación de APERTURA con mecanismo neumático

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

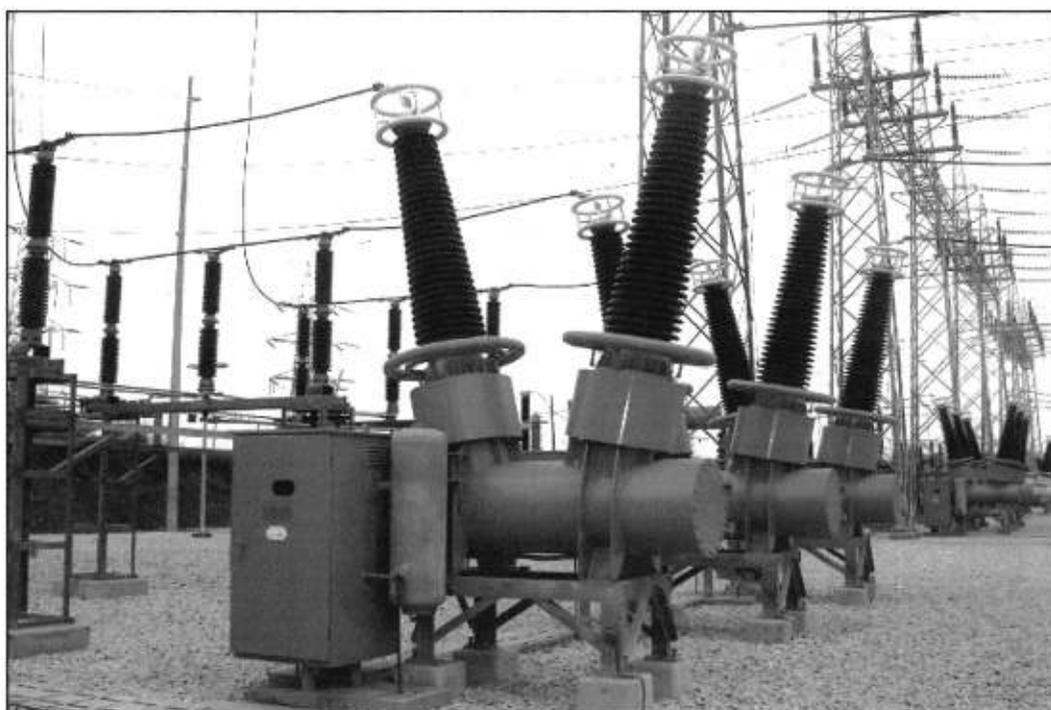
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.5.B

### TÍTULO:

INTERRUPTOR DE POTENCIA  
(TIPO TANQUE MUERTO AISLADO EN GAS SF6)



### DESCRIPCIÓN:

Interruptor tripolar de potencia en SF6, instalado en la bahía "Quevedo" a 230kV de la Subestación "PASCUALES" (Parroquia Pascuales - Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Este posee las siguientes características técnicas:

<b>MARCA:</b>	MITSUBISHI	<b>TIEMPO INTERRUPCIÓN NOM:</b>	2 CICLOS
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	JAPÓN	<b>FRECUENCIA NOMINAL:</b>	60 Hz
<b>TIPO:</b>	200-SFMT-40A	<b>PRESIÓN NOM. DEL GAS:</b>	5 Kg/cm <sup>2</sup> (a 20°C)
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	242 kV	<b>PESO DEL GAS:</b>	175 Kg
<b>CORRIENTE NOMINAL:</b>	1200 A	<b>PESO TOTAL:</b>	2300 Kg
<b>CTE. CORTOCIRCUITO NOM.:</b>	40 kA	<b>B.I.L.:</b>	900 kV

La operación de CIERRE con resorte y la operación de APERTURA con mecanismo neumático.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

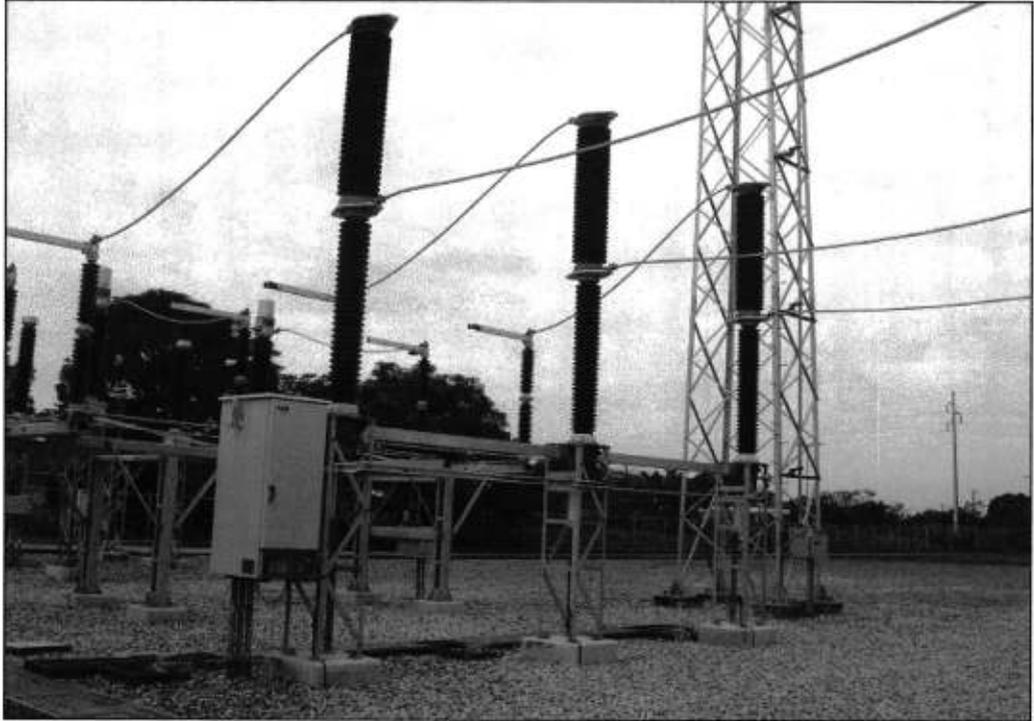
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 2.5.C

**TÍTULO:**

INTERRUPTOR DE POTENCIA  
(TIPO TANQUE VIVO AISLADO EN GAS SF6)



**DESCRIPCIÓN:**

Interruptor tripolar de potencia en SF6, instalado en la bahía "Machala 2" a 230kV de la Subestación "MILAGRO" (Parroquia Roberto Astudillo - Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Este posee las siguientes características:

<b>MARCA:</b>	ABB Power Technologies	<b>PODER DE CIERRE:</b>	104 kA
<b>AÑO DE FABRICACIÓN:</b>	2005	<b>CORRIENTE NOMINAL:</b>	2500 A.
<b>TIPO:</b>	LTB24SE1	<b>CTE. CORTOCIRCUITO NOM.:</b>	40 kA.
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Suecia	<b>PRESIÓN NOM. DEL GAS:</b>	0,80 Mpa.
<b>TENSIÓN NOMINAL:</b>	245 kV	<b>MASA DEL GAS:</b>	24 Kg.
<b>FRECUENCIA:</b>	60Hz	<b>MASA TOTAL:</b>	2599 Kg.

NIVEL DE AISLACIÓN A ALTITUD < 1000 m.:	A TIERRA	ENTRE CONTACTOS ABIERTOS
• A impulso tipo rayo	1050 kV	1050 kV
• A impulso de maniobra	---	---
• A frecuencia industrial	460 kV	460 kV

La operación de APERTURA y CIERRE con resorte

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.6

**TÍTULO:**

EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6  
(ESQUEMA DOBLE BARRA)



**DESCRIPCIÓN:**

Equipo encapsulado en gas SF6, de 6 bahías, esquema doble barra a 138kV.; instalado en la Subestación "Trinitaria" (Sur de Guayaquil-Provincia del Guayas) del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Este posee las siguientes características generales:

VOLTAJE NOMINAL (KV)	145	NIVEL DE AISLAMIENTO (KV)	A IMPULSO TIPO RAYO	650
			A FRECUENCIA INDUSTRIAL	275
INTERRUPTOR	TIPO		Puffer	
	CORRIENTE NOMINAL (A)		800 / 1250 / 1600 / 2000 / 3150 / 4000	
	CTE. NOM. DE CORTO TIEMPO (kA)		31,5 / 40 / 50 / 63	
	CTE. NOM. DE INTERRUPCIÓN (kA)		31,5 / 40 / 50 / 64	
	TIEMPO DE INTERRUPCIÓN (CICLOS)		3 / 5	
SECCIONADOR (AISLADOR)	TIPO		Corte lineal	
	CORRIENTE NOMINAL (A)		800 / 1250 / 1600 / 2000 / 3150 / 4000	
	CTE. NOM. DE CORTO TIEMPO (kA)		31,5 / 40 / 50 / 63	
	MECANISMO DE OPERACIÓN		Manual, motor, motor-resorte cargado, neumático	
SECCIONADOR DE TIERRA	TIPO		Corte lineal	
	CTE. NOM. DE CORTO TIEMPO (kA)		31,5 / 40 / 50 / 63	
	MECANISMO DE OPERACIÓN		Manual, motor-resorte cargado, neumático	
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	TIPO		Núcleo toroidal	
	CORRIENTE PRIMARIA (A)		800 / 1250 / 1500 / 2000 / 3150 / 4000	
	CORRIENTE SECUNDARIA (A)		1 / 5	
TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	TIPO		Devanado o capacitivo	
	VOLTAJE PRIMARIO (kV)		145 / $\sqrt{3}$	
	VOLTAJE SECUNDARIO (V)		115 / $\sqrt{3}$	

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

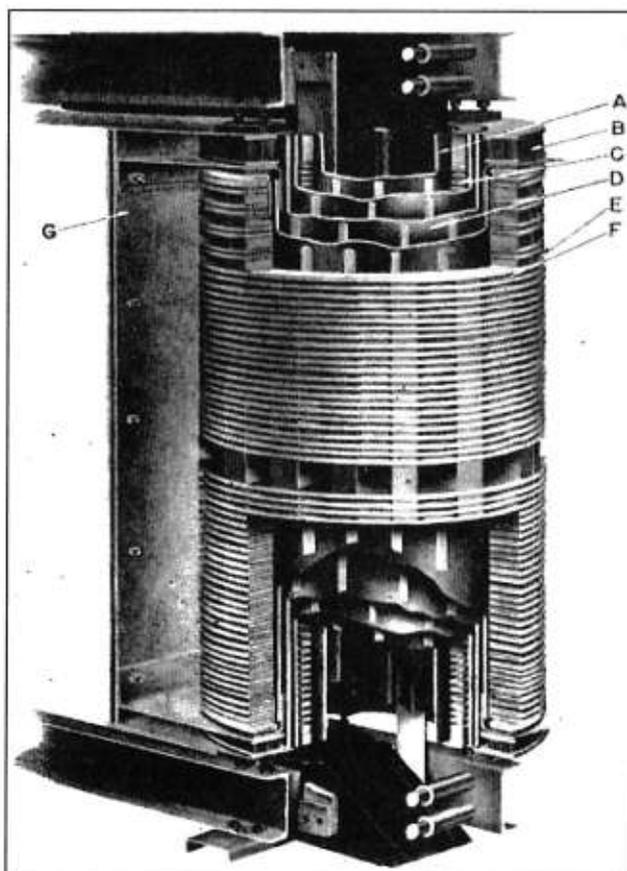
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.7

**TÍTULO:**

ESTRUCTURA DETALLADA DEL AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR



**DESCRIPCIÓN:**

Esta figura representa una fase de un transformador trifásico de alta tensión tipo núcleo, inmerso en aceite aislante.

El corte hecho en parte superior, revela la estructura de tubos y bobinas tanto de alta como de baja tensión.

**(A)** indica el cilindro de material aislante, que permite crear un barrera de aislamiento entre el arrollamiento de bajo voltaje y la estructura del núcleo, y los espacios desnudos entre ellos permite la libre circulación del aceite alrededor de la estructura del núcleo **(B)** indica las arandelas de material aislante y/o anillos angulares ubicados en los extremos del arrollamiento de alta tensión, siendo su función principal, la de proveer un aislamiento efectivo entre este arrollamiento y la estructura del núcleo a potencial de tierra. **(C)** indica las bobinas del arrollamiento de bajo voltaje. **(D)** indica los cilindros de material aislante, que permiten crear una barrera de aislamiento entre los arrollamientos de bajo y alto voltaje, y los espacios desnudos entre ellos permiten la libre circulación del aceite alrededor de la estructura de las bobinas. **(E)** indica los anillos espaciadores de material aislante, que permiten crear una barrera de aislamiento entre capas de bobinas. **(F)** indica las bobinas del arrollamiento de alto voltaje. **(G)** indica la capa de material aislante que envuelve a toda la estructura de esta fase y permite crear una barrera aislante con respecto a las otras dos fases, especialmente con la más cercana.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

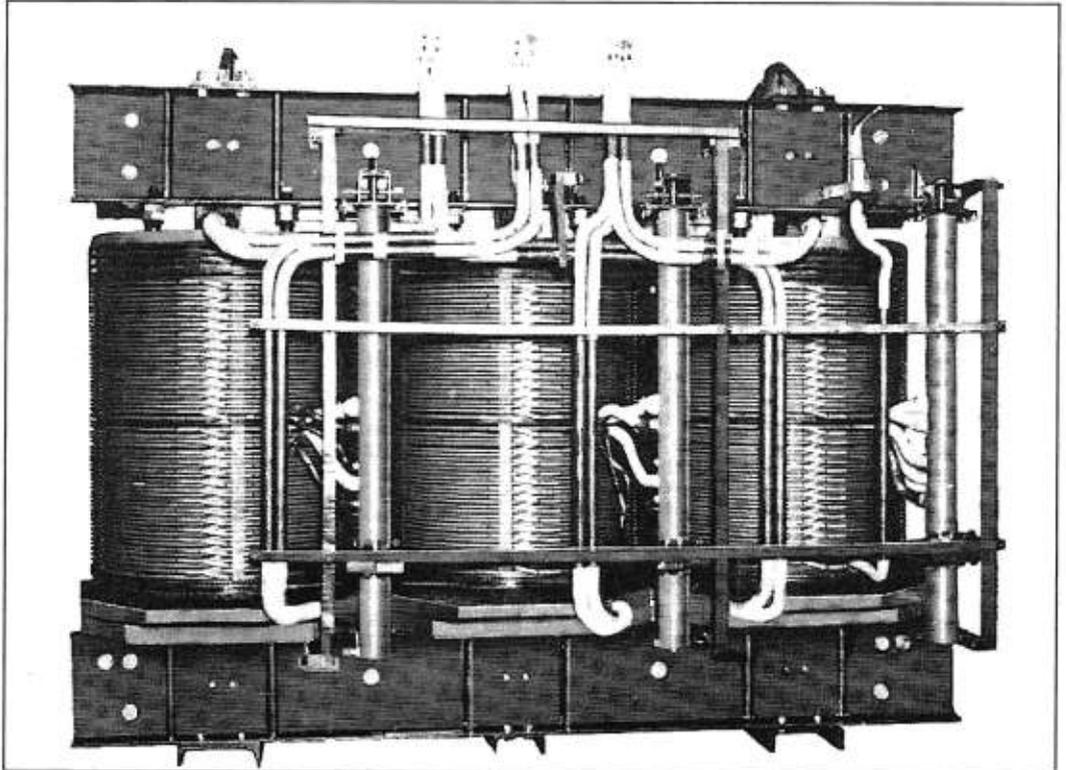
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.8

**TÍTULO:**

SOPORTE Y FIJACIÓN DE LAS PARTES INTERIORES EN UN TRANSFORMADOR



**DESCRIPCIÓN:**

Esta figura ilustra la disposición de los soportes aislantes de las partes interiores de un transformador trifásico de 30 MVA, fabricado por la MITSUBISHI. Estos, se refieren a los travesaños o perfiles tanto horizontales como verticales que sujetan a los conductores que salen de las bobinas, los cuales pueden ser de cartón comprimido o madera. De igual forma, estos conductores se encuentran aislados normalmente con capas de papel kraft, desde que salen de las bobinas, hasta que llegan a sus terminales metálicos de acoplamiento con los terminales inferiores de los respectivos bushing's.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

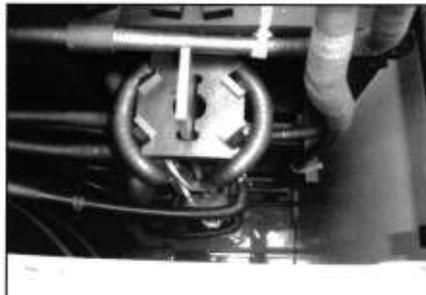


## FIGURAS ANEXAS 2.9.A,B,C,D,E,F

### TÍTULO:

### MATERIALES AISLANTES VISIBLES EN LA PARTE INTERNA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

A



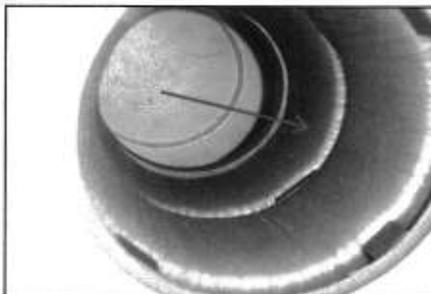
B



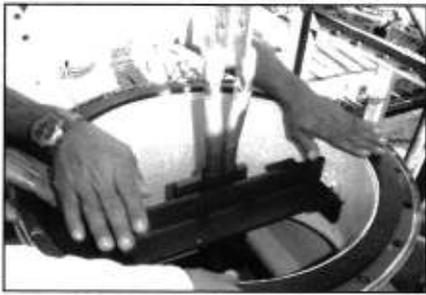
C



D



E



F



### DESCRIPCIÓN:

Estos gráficos muestran la aplicación de varios materiales aislantes dentro de un transformador de potencia y su finalidad se detalla a continuación:

A) Soportes aislantes de los conductores internos de un transformador

B) Anrrandelas de cartón prensado que aíslan la parte superior de las bobinas con la estructura metálica del núcleo.

C) Colocación de tela aislante impregnada con aceite mineral (conocida como piel de gato), alrededor de la conexión de unión entre terminales del conductor que proviene de la bobina y la parte inferior del bushing.

D) Transformadores de corriente tipo toroide aislados con capas de papel kraft impregnado con aceite. Estos se ubican dentro de las cupulas de acentamiento de los bushing's del transformador de potencia.

E) Terminales de conductores que provienen de las bobinas para conexión con terminal inferior de bushing.

F) Conductor aislado con capas de papel kraft y cinta de algodón, el mismo que pasa por el tubo central del bushing tipo capacitivo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

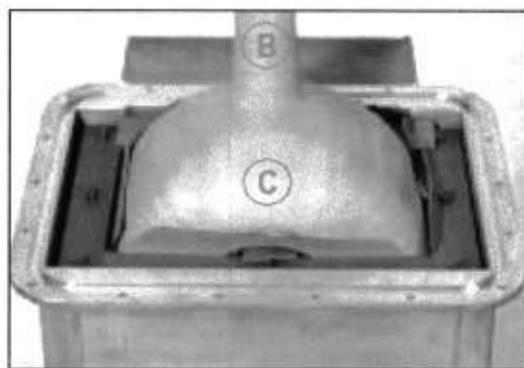
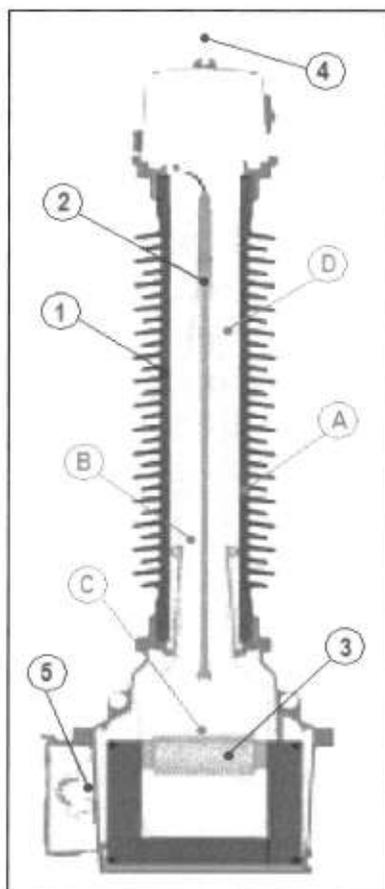
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.10.A

**TÍTULO:**

ESTRUCTURA CONSTRUCTIVA DE UN TRANSFORMADOR DE TENSIÓN (DE POTENCIAL)



**DESCRIPCIÓN:**

Estructura constructiva de un transformador de tensión (TP) para alta tensión. Sus principales partes constitutivas y el detalle de la disposición de los diferentes materiales que lo conforman es el siguiente:

**PRINCIPALES PARTES CONSTITUTIVAS:**

- 1) Cuerpo de porcelana
- 2) Arrollamiento primario
- 3) Núcleo con arrollamiento secundario
- 4) Terminal de arrollamiento primario
- 5) Terminales de arrollamientos secundarios

**DISPOSICIÓN INTERNA DE MATERIALES AISLANTES:**

- A) Porcelana de alúmina (cuerpo principal del TP)
- B) Capas de papel kraft en arrollamiento primario
- C) Capas de papel kraft en arrollamiento secundario
- D) Espacio inmerso de aceite mineral. (Actualmente este espacio se complementa con arena de cuarzo)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

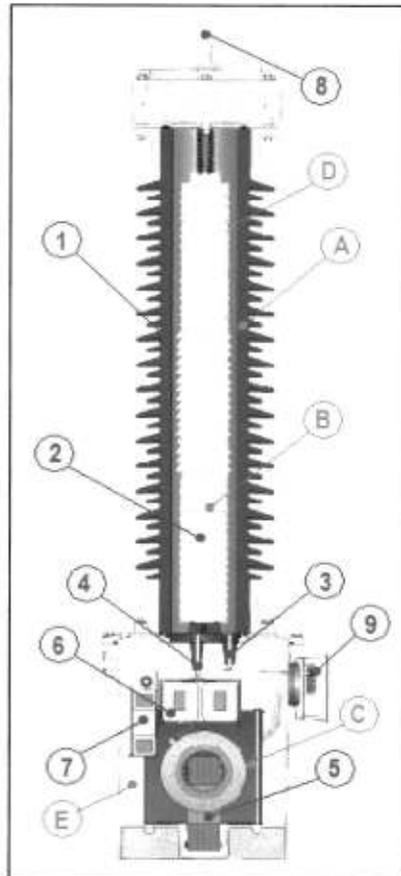
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.10.B

**TÍTULO:**

ESTRUCTURA CONSTRUCTIVA DE UN TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO



**DESCRIPCIÓN:**

Estructura constructiva de un transformador de tensión capacitivo (TPC) para alta tensión. Sus principales partes constitutivas y el detalle de la disposición de los diferentes materiales aislantes que lo conforman es el siguiente:

**PRINCIPALES PARTES CONSTITUTIVAS:**

- 1) Cuerpo de porcelana
- 2) Bobinas de capacitor
- 3) Manguito de la portadora (a tierra)
- 4) Manguito toma de tensión transformador intermedio
- 5) Transformador intermedio
- 6) Reactor en serie
- 7) Bobina de choque
- 8) Terminal primario
- 9) Terminales de arrollamientos secundarios y otros

**DISPOSICIÓN INTERNA DE MATERIALES AISLANTES:**

- A) Porcelana de alúmina (cuerpo principal del TPC)
- B) Hojas de aluminio de bobinas aisladas con papel kraft
- C) Capas de papel kraft en arrollamientos primario y secundario del transformador intermedio
- D) Espacio inmerso de aceite mineral o sintético.
- E) Espacio inmerso de aceite mineral o sintético.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

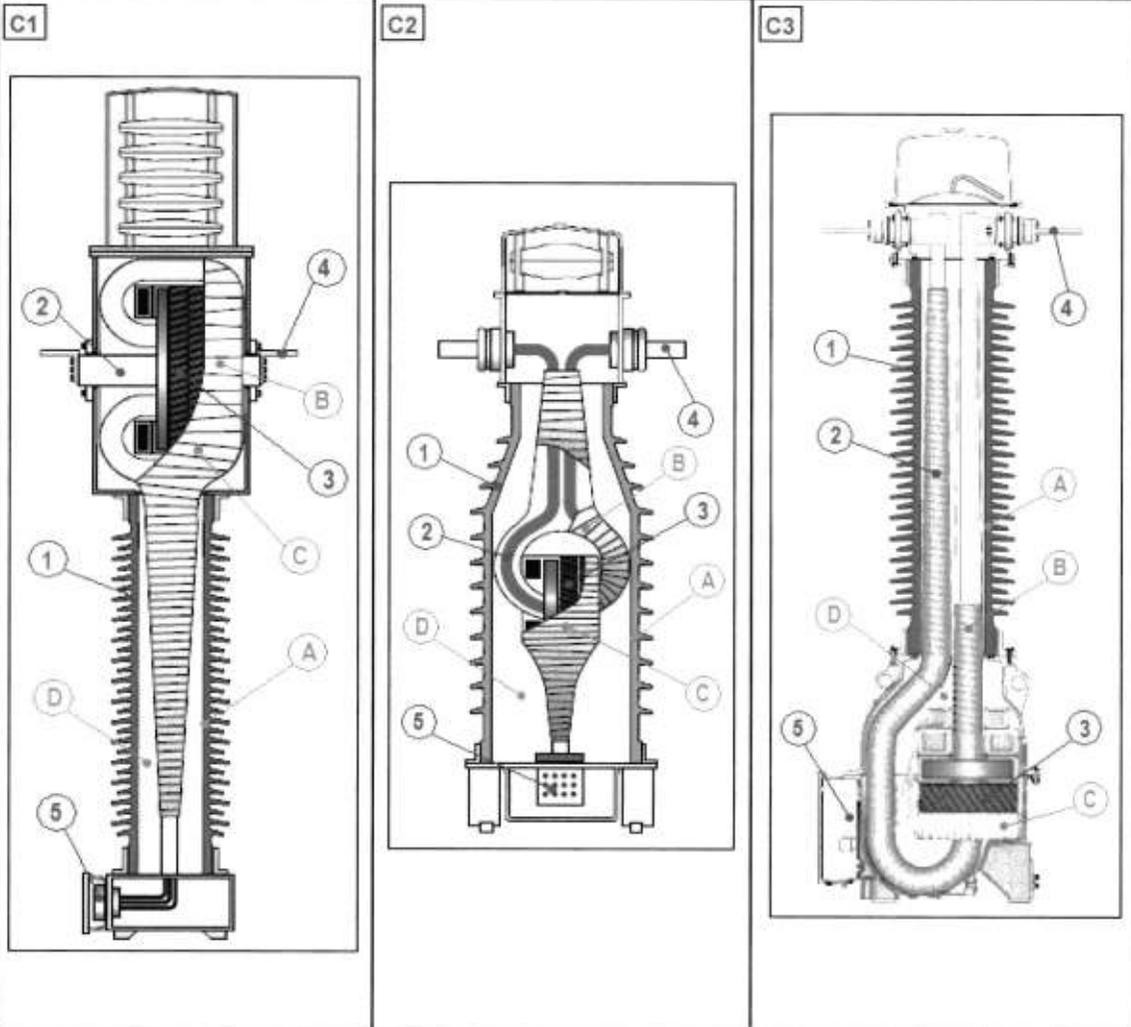
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.10.C

**TÍTULO:**

**ESTRUCTURA CONSTRUCTIVA DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE**



**DESCRIPCIÓN:**

Estructura constructiva de los diferentes tipos de transformadores de corriente (TC), donde: C1) TC tipo 1, C2) TC tipo 2, C3) TC tipo 3. Sus principales partes constitutivas y el detalle de la disposición de los diferentes materiales aislantes que lo conforman, es el siguiente:

**PRINCIPALES PARTES CONSTITUTIVAS:**

- 1) Cuerpo de porcelana
- 2) Arrollamiento primario
- 3) Núcleo con arrollamiento secundario
- 4) Terminales de arrollamiento primario
- 5) Terminales de arrollamientos secundarios

**DISPOSICIÓN INTERNA DE MATERIALES AISLANTES:**

- A) Porcelana de alúmina (cuerpo principal del TC)
- B) Capas de papel kraft en arrollamiento primario
- C) Capas de papel kraft en arrollamiento secundario
- D) Espacio inmerso de aceite mineral. (Actualmente este espacio se complementa con arena de cuarzo)

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.11

**TÍTULO:**

AISLADOR DE PORCELANA DE NÚCLEO SÓLIDO



**DESCRIPCIÓN:**

Corte de un aislador de porcelana de núcleo sólido, empleado como columna aislante soporte de cuchillas de maniobra de un seccionador de potencia.

---

---

---

---

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

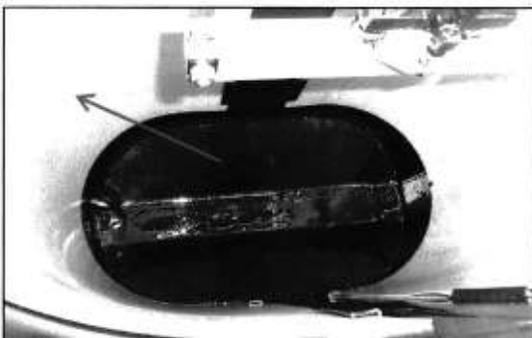


## FIGURAS ANEXAS 2.12.A,B,C,D

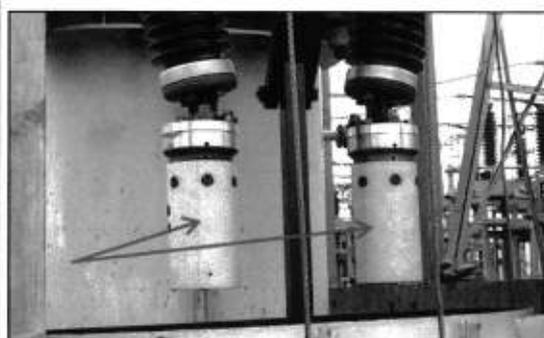
### TÍTULO:

MATERIALES AISLANTES VISIBLES EN LA PARTE INTERNA DEL CUBÍCULO MONOFÁSICO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA DE GRAN VOLUMEN DE ACEITE

A



B



C



D



### DESCRIPCIÓN:

Detalle de la disposición física de los materiales aislantes dentro de un interruptor de potencia inmerso en aceite mineral. La finalidad de cada uno de ellos se detalla a continuación:

- A) Revestimiento interno del tanque, que consiste de una plancha aislante de fibra procesada. Este evita cualquier descarga interna desde la parte interruptora hacia la cuba del equipo.
- B) Cámaras de interrupción de material aislante comprendido de papel laminado con resinas fenólicas o filamento de vidrio. Su función principal es la reducción del arco y su consiguiente liberación de energía con el objetivo de disminuir la deterioración prematura del aceite aislante.
- C) Varilla de operación de madera aislante laminada con resina fenólicas. A esta se acopla el par de contactos móviles tipo cachos de cobre que ingresan o salen de la cámara de interrupción con un movimiento vertical hacia arriba o hacia abajo según sea el caso de la operación realizada (apertura o cierre).
- D) Ensamblaje guía de la varilla de operación (tipo "V"), el cual de igual forma es de madera aislante. Su función principal es permitir que la varilla de operación realice su movimiento totalmente vertical sin que se produzcan desviaciones en el movimiento de los contactos móviles.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

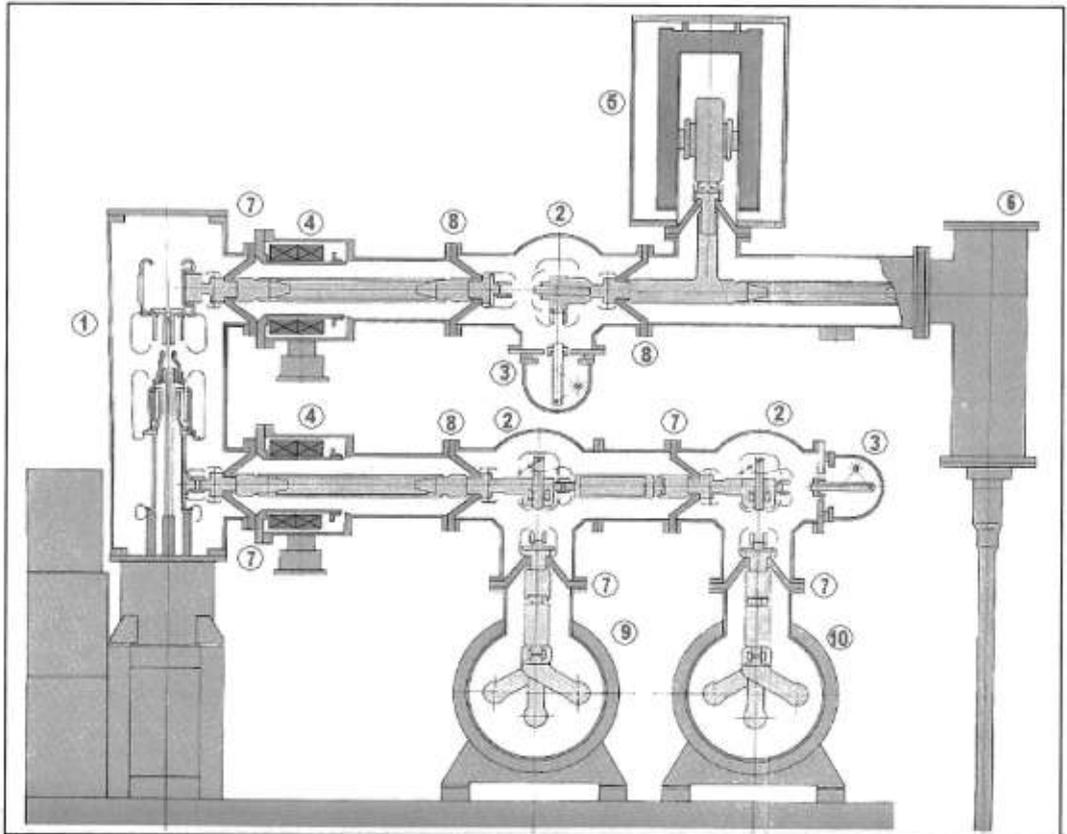
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 2.13

**TÍTULO:**

DETALLE DE LA PARTE INTERNA DE UN EQUIPO ENCAPSULADO A GAS SF6



**DESCRIPCIÓN:**

Corte de un equipo encapsulado de esquema tipo "Doble Barra", donde se muestran sus principales partes constitutivas:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1) Interruptor de Potencia (Simple, con cilindro puffer) | □ Gas SF6                    |
| 2) Seccionador de línea                                  | ■ Partes Vivas               |
| 3) Seccionador de puesta a tierra                        | ■ Partes aislantes           |
| 4) Transformador de Corriente (tipo toroide)             | ■ Transformador de Corriente |
| 5) Transformador de Voltaje                              | ■ Blindaje metálico          |
| 6) Cámara de salida de cable sellado                     |                              |
| 7) Barrera aislante                                      |                              |
| 8) Aislador soporte                                      |                              |
| 9) Barra Principal                                       |                              |
| 10) Barra de Transferencia                               |                              |

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 2.14.A,B,C,D,E,F

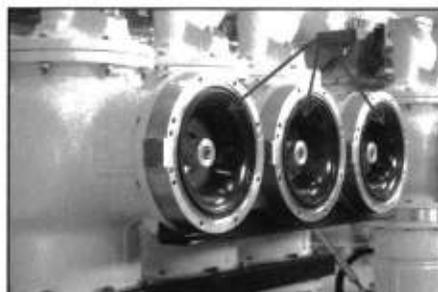
### TÍTULO:

MATERIALES AISLANTES VISIBLES EN LA PARTE INTERNA DE UN EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6

A



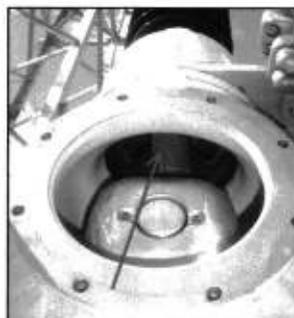
B



C



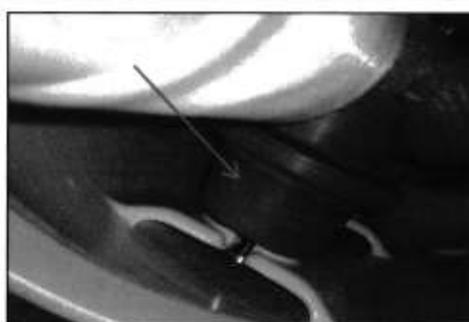
D



E



F



### DESCRIPCIÓN:

Detalle de la disposición física de varios elementos de material aislante en la parte interna de un equipo encapsulado en gas SF6. La finalidad de cada uno de ellos se detalla a continuación:

A) Aislador de resina epoxídica, con contactos (tipo tulipa) embebidos para el acople de barras colectoras de las tres fases.

B) Aisladores de resina epoxídica estancos al gas, con contactos embebidos para acople de barras colectoras de cada fase por separado.

C), D) Aislador de resina epoxídica con acceso de gas, posee embebido un contacto para acople de barra colectoras de cada fase por separado (C) y acople de barra conductora de bushing hueco aislado con el propio gas SF6 (D)

E), F) Aislador de resina epoxídica para soporte de barras colectoras (voltaje 69/ $\sqrt{3}$ )

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

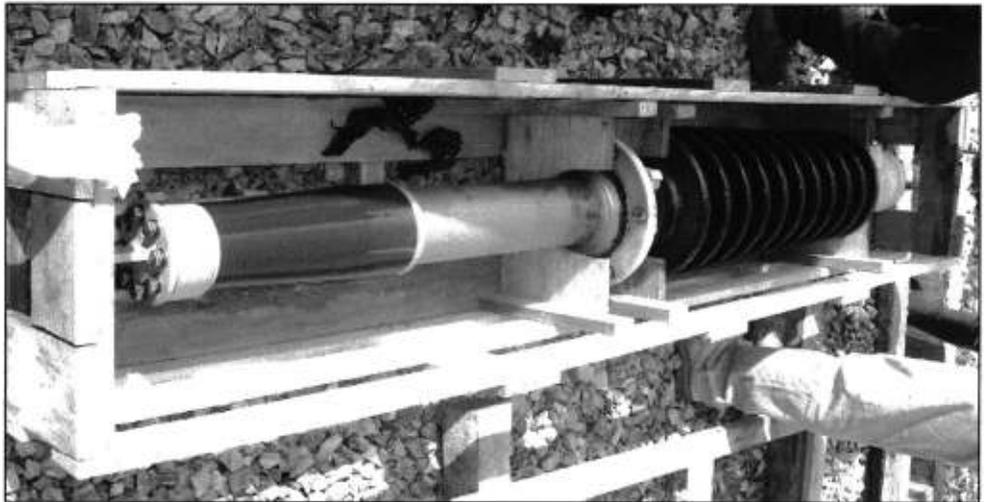


## FIGURAS ANEXAS 2.15.A,B

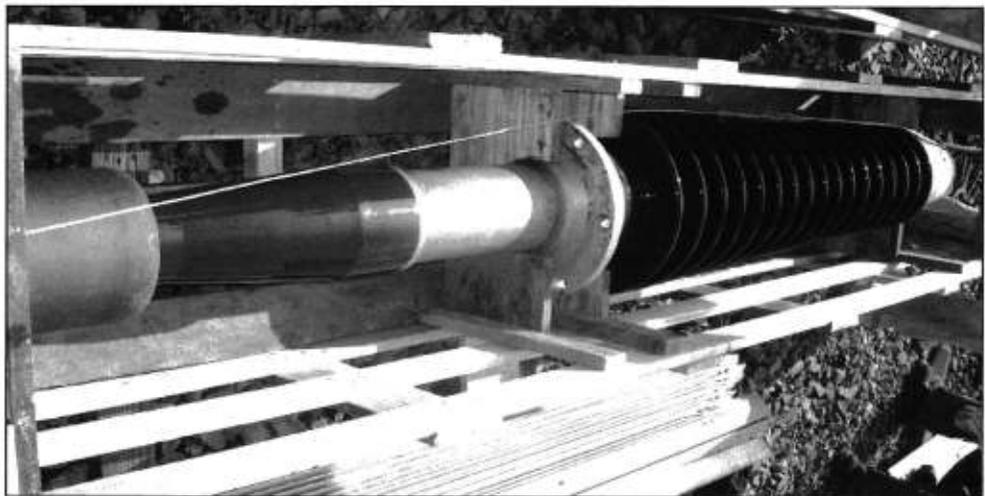
### TÍTULO:

BUSHING'S DE ALTA TENSIÓN

A



B



### DESCRIPCIÓN:

Bushing's de alta tensión que forman parte de un transformador de potencia:

A) Bushing tipo No Capacitivo para nivel de voltaje 69kV, completamente estanco al aceite del transformador. Su aislamiento interno dentro de la porcelana se compone de papel y aceite aislante.

B) Bushing tipo Capacitivo para nivel de voltaje 138 kV, las placas metálicas capacitivas y su aislamiento compuesto de papel y aceite se encuentran entre dos caras de porcelana, dejando un cilindro hueco central para el paso del conductor proveniente del arrollamiento del transformador y que se conecta en el terminal del tope del bushing.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 4.1.A,B,C,D

### TÍTULO:

INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y/O FACTOR DE DISIPACIÓN DEL AISLAMIENTO EN LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN

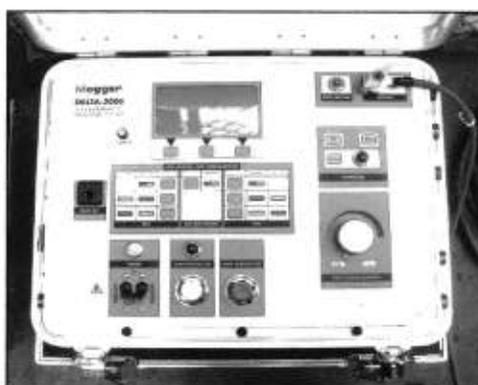
A



B



C



D



### DESCRIPCIÓN:

A) y B) Instrumento automático analizador de aislamiento modelo M4000 de la DOBLE Engineering Company.

Este instrumento permite determinar el Factor de Potencia (en %), pérdidas (en Watts) y Capacitancia del aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión.

C) y D) Instrumento automático analizador de aislamiento modelo DELTA 2000 de la MEGGER Company.

Este instrumento permite determinar el Factor de Disipación (en %), pérdidas (en Watts) y Capacitancia del aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

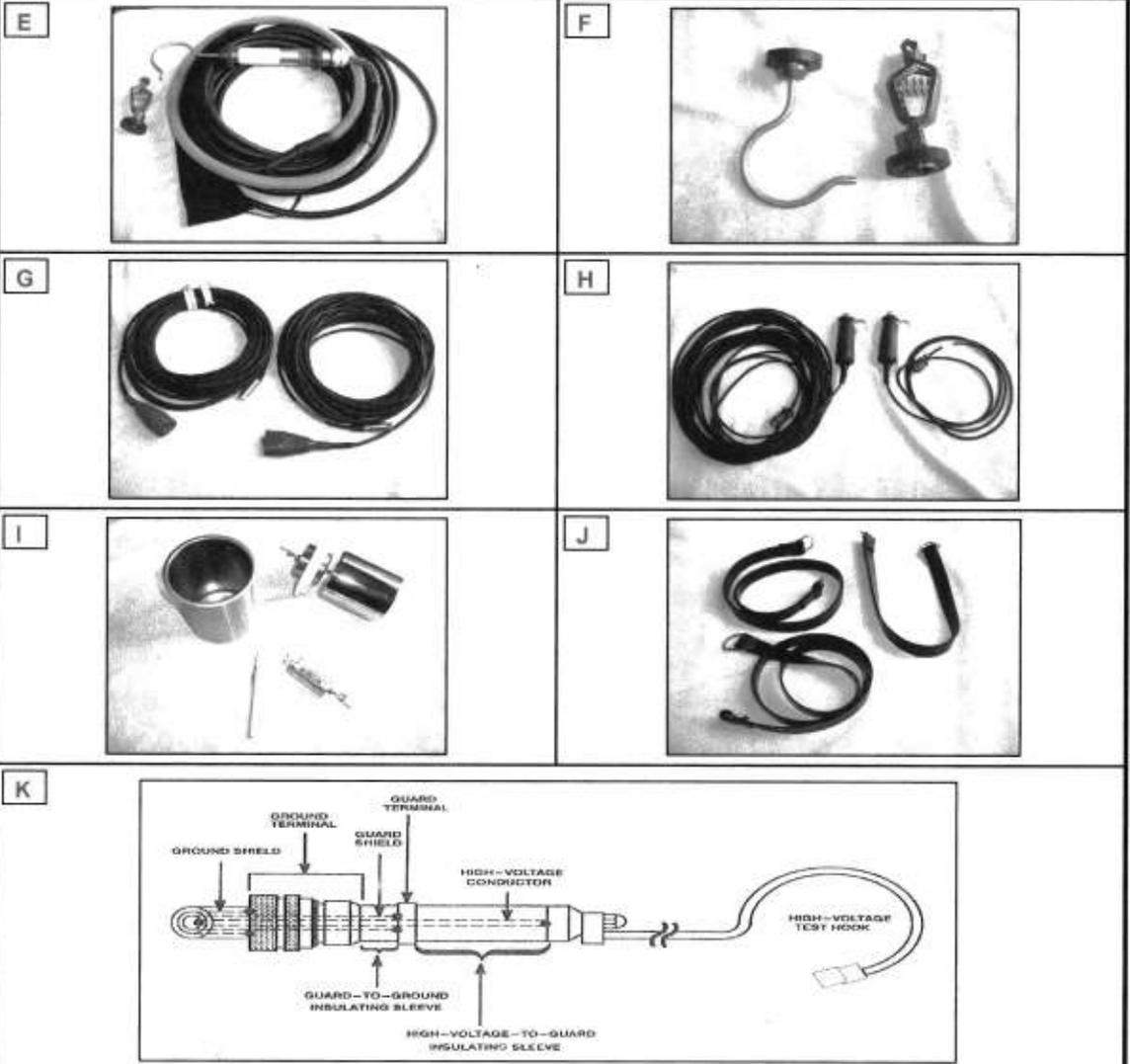
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 4.1.E,F,G,H,I,J,K

**TÍTULO:**

PRINCIPALES ACCESORIOS DE UN INSTRUMENTO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y/O FACTOR DE DISIPACIÓN DEL AISLAMIENTO



**DESCRIPCIÓN:**

E) Cable (con terminal tipo gancho) para aplicación de alto voltaje (de hasta 10kV) al espécimen bajo ensayo.

F) Terminales de cobre tipo gancho y tipo lagarto para conexión a cable de alto voltaje (10kV).

G) Cables de bajo voltaje a conectarse entre el instrumento y el espécimen bajo ensayo (Rojo y Azul).

H) Pulsadores de seguridad para permitir e interrumpir el ensayo.

I) Célula metálica con accesorios para ensayo de líquidos aislantes.

J) Collares semiconductores para ensayo de bushing's

K) Descripción física del terminal tipo gancho para cable de alto voltaje (10kV)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

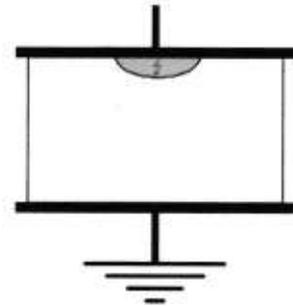
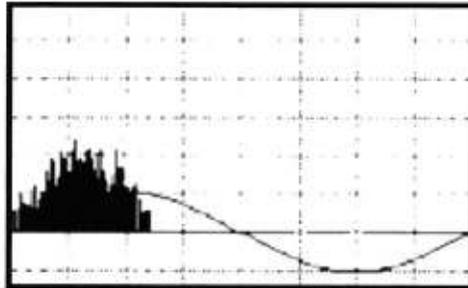


FIGURAS ANEXAS 4.2.A,B,C

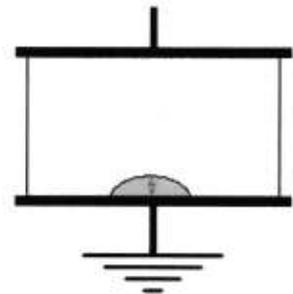
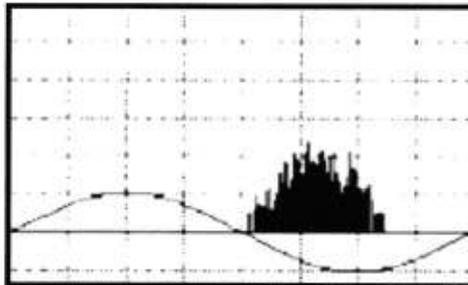
**TÍTULO:**

INTERPRETACIÓN DE SEÑALES TÍPICAS DE DESCARGAS PARCIALES

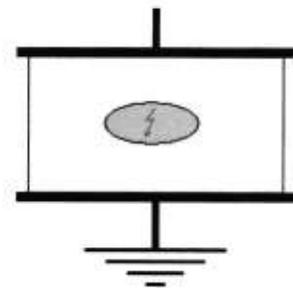
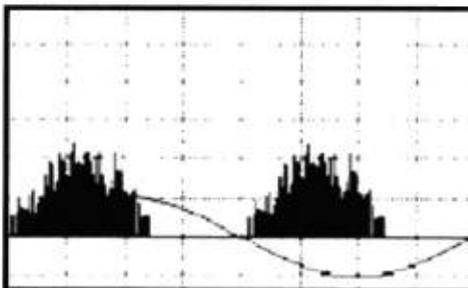
A



B



C



**DESCRIPCIÓN:**

Señales típicas de descargas parciales:

A) Descarga parcial en cavidad localizada en la interfaz conductor - aislamiento de un espécimen bajo ensayo.

B) Descarga parcial en cavidad localizada en la interfaz aislamiento - cuña (potencial de tierra) de un espécimen bajo ensayo.

C) Descarga parcial en cavidad localizada netamente en el aislamiento principal de un espécimen bajo ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

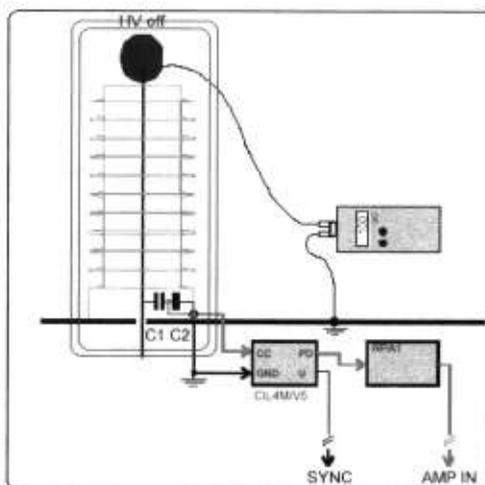


## FIGURAS ANEXAS 4.2.D,E

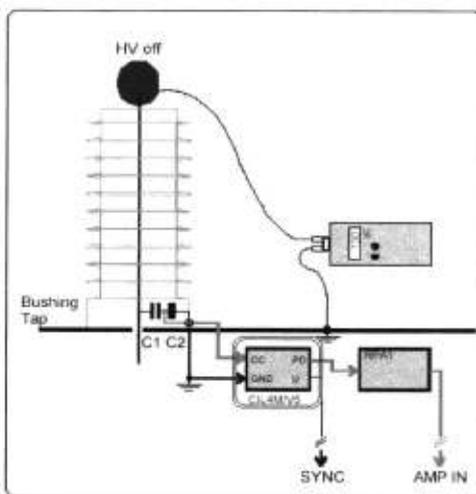
**TÍTULO:**

### INSTRUMENTOS BÁSICOS A EMPLEARSE EN UN CIRCUITO DE MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

**D**



**E**



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumentos básicos fabricados por la compañía INDUCOR, para la medición de descargas parciales presentes en el aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión:

**D) Capacitor de acoplamiento (COUPLER):** normalmente se conecta en paralelo con el espécimen bajo ensayo y cumple la función de un divisor capacitivo. Su voltaje nominal debe ser similar al del equipo a ensayar.

**E) Dispositivo de acoplamiento o impedancia de medición (CUADRIPOLLO):** realiza la medición sincronizada de las descargas y reproduce la forma de onda de la tensión de ensayo.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

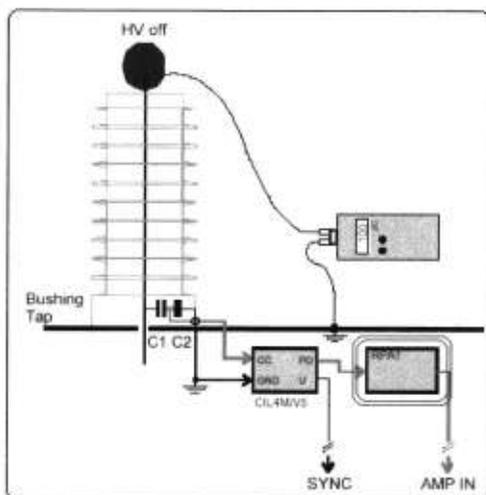


## FIGURAS ANEXAS 4.2.F,G

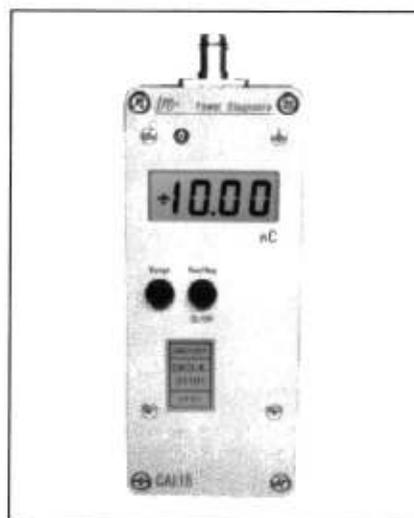
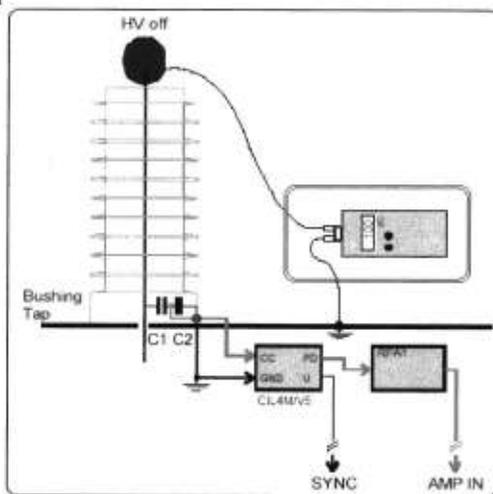
**TÍTULO:**

### INSTRUMENTOS BÁSICOS A EMPLEARSE EN UN CIRCUITO DE MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

**F**



**G**



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumentos básicos fabricados por la compañía INDUCOR, para la medición de descargas parciales presentes en el aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión:

F) **Preamplificador:** eleva las señales de salida del Cuadripolo que van hacia el instrumento de medición ICM

G) **Calibrador:** permite poner el instrumento de medición en sincronismo

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

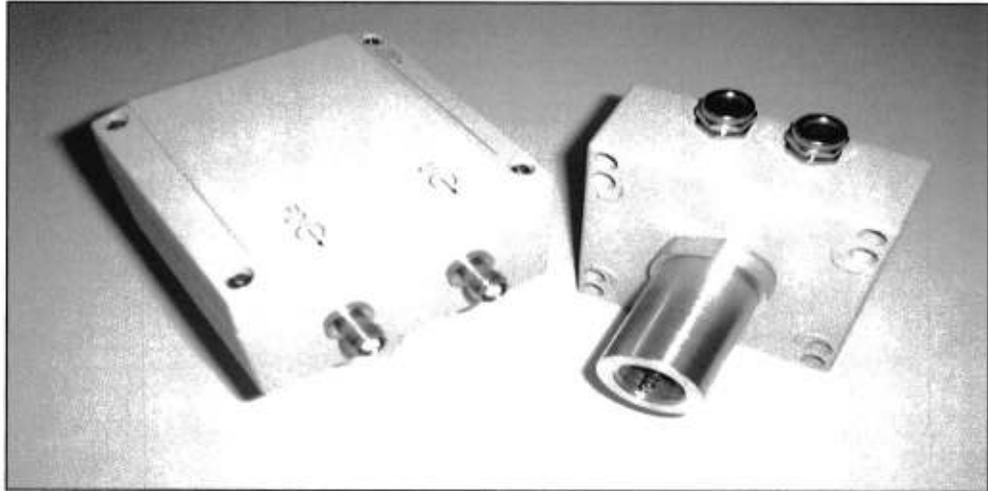


## FIGURAS ANEXAS 4.2.H,I

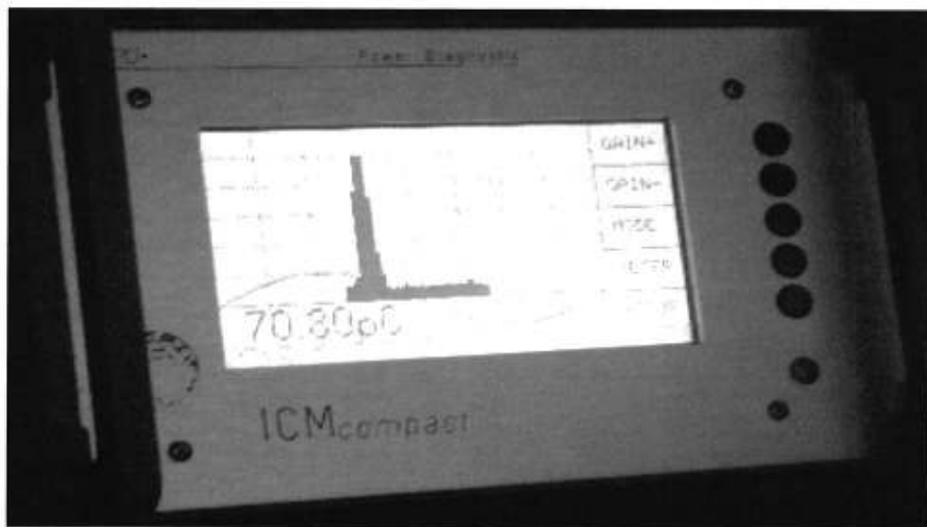
### TÍTULO:

INSTRUMENTOS BÁSICOS A EMPLEARSE EN UN CIRCUITO DE MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

H



I



### DESCRIPCIÓN:

Instrumentos básicos fabricados por la compañía INDUCOR, para la medición de descargas parciales presentes en el aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión:

H) **Acopladores en tap de bushing's capacitivos:** para medición de descargas parciales presentes en su aislamiento interno.

I) **Instrumento de medición:** permite la visualización de las descargas parciales medidas, determinando la carga aparente de la mayor descarga generada. En la gráfica se aprecia una medición en modo "fase resuelta"

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

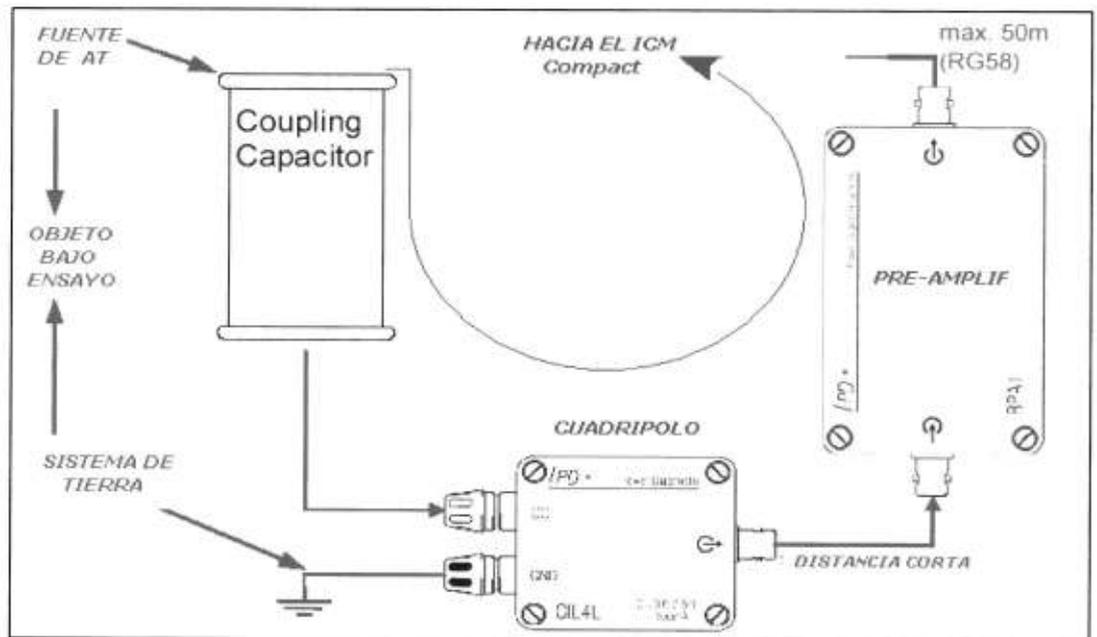
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 4.2.J

**TÍTULO:**

CIRCUITO PARA MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES  
(CONEXIÓN DE INSTRUMENTOS BÁSICOS)



**DESCRIPCIÓN:**

Esquema de conexión de instrumentos básicos para medición de descargas parciales presentes en el sistema de aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

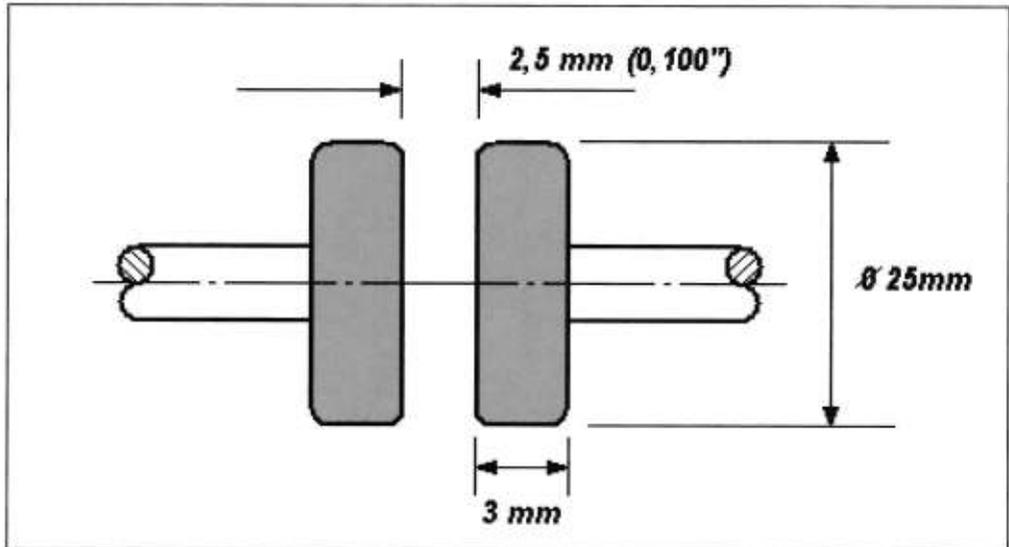


FIGURAS ANEXAS 4.3.A,B

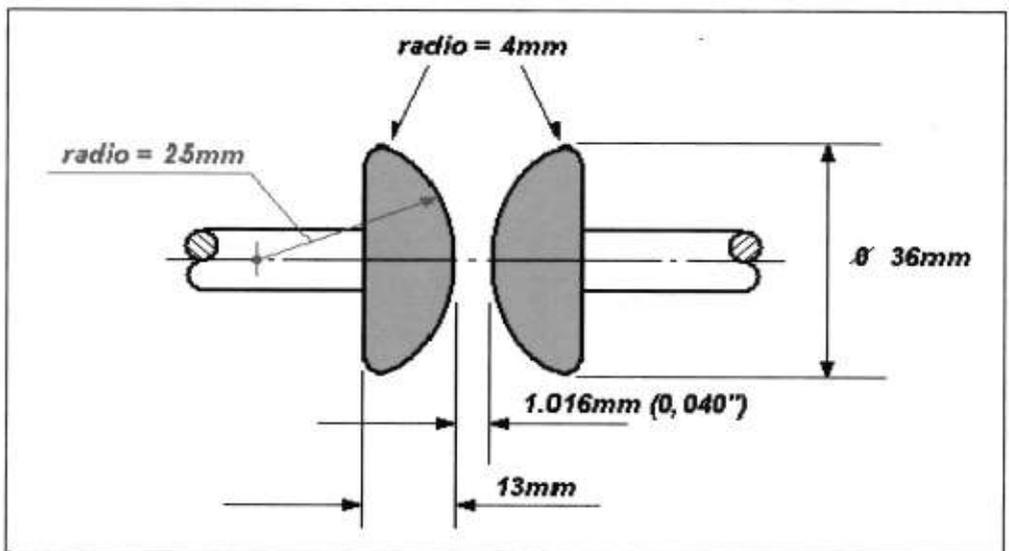
**TÍTULO:**

ELECTRODOS PARA EL ENSAYO DE RIGIDEZ DIELECTRICA DE UN LÍQUIDO AISLANTE

A



B



**DESCRIPCIÓN:**

A) Características técnicas de los electrodos tipo cilindricos, aplicados según norma ASTM D-877 para la medida de la rigidez dieléctrica de un líquido aislante.

B) Características técnicas de los electrodos tipo semiesféricos, aplicados según norma ASTM D-1817 para la medida de la rigidez dieléctrica de un líquido aislante.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 4.3.C,D,E,F,G,H

### TÍTULO:

INSTRUMENTO PARA EL ENSAYO DE MEDICIÓN DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE UNA MUESTRA DE LÍQUIDO AISLANTE EN UN EQUIPO DE ALTA TENSION

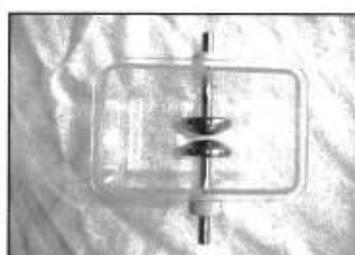
C



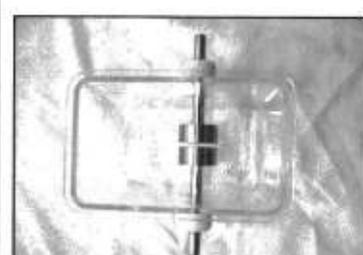
D



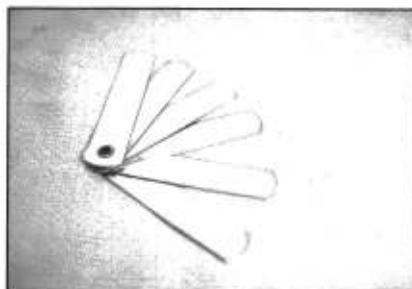
E



F



G



H



### DESCRIPCIÓN:

Instrumento para medición de la rigidez dieléctrica del aceite, modelo OTS60Sx de la MEGGER COMPANY (AVO):

C) Equipo semiautomático de uso en campo para la determinación de la rigidez dieléctrica del aceite aislante.

D) Célula de muestreo para ensayo del líquido aislante con electrodos tipo esféricos (según norma IEC-156)

E) Célula de muestreo para ensayo del líquido aislante con electrodos tipo semiesféricos (según norma ASTM D-1816)

F) Célula de muestreo para ensayo del líquido aislante con electrodos tipo cilindricos (según norma ASTM D-877)

G) Placas metálicas milimetradas para calibración de la distancia entre electrodos dentro de la célula de muestreo

H) Propulsor de doble hélice para homogenizar la muestra de líquido aislante contenida en la célula de muestreo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 4.4.A,B,C,D

**TÍTULO:**

INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO  
DE UN EQUIPO DE ALTA TENSIÓN

A



B



C



D



**DESCRIPCIÓN:**

A) y B) Instrumento para ensayo de medida de la resistencia de aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión.

Modelo 1010 de la AEMC Instruments

Principio de accionamiento: manual con manivela

C) y D) Instrumento para ensayo de medida de la resistencia de aislamiento de un equipo eléctrico de alta tensión.

Modelo S1-5001 de la MEGGER Company (AVO).

Principio de accionamiento: electrónicos con rectificador y alimentación AC

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

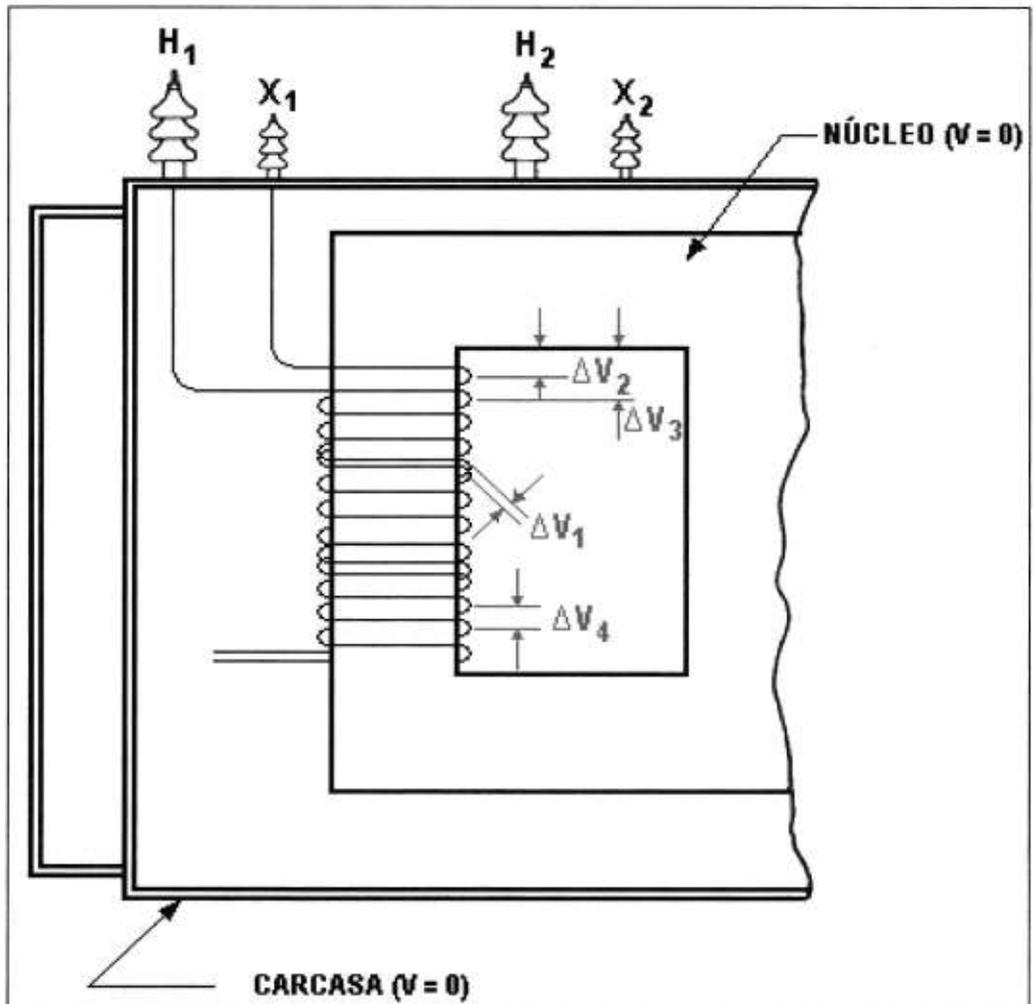
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 4.5

**TÍTULO:**

GRADIENTES DE POTENCIAL QUE SE GENERAN DENTRO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN SERVICIO



**DESCRIPCIÓN:**

Gradientes de potencial que se generan internamente en un transformador de potencia y que requieren de un buen aislamiento:

$\Delta V_1$ ) Gradiente de potencial entre bobinas de alta tensión y baja tensión

$\Delta V_2$ ) Gradiente de potencial entre bobinas de baja tensión y la masa.

$\Delta V_3$ ) Gradiente de potencial entre bobinas de alta tensión y la masa.

$\Delta V_4$ ) Gradiente de potencial entre espiras del enrollamiento de alta tensión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

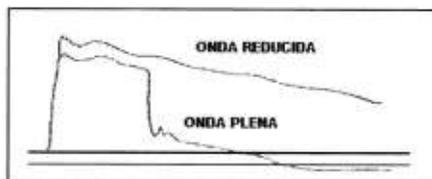


FIGURAS ANEXAS 4.6.A,B,C,D,E,F,G,H

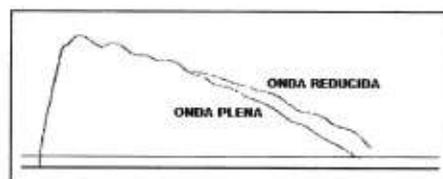
**TÍTULO:**

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE VOLTAJE DE IMPULSO  
APLICADOS A UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

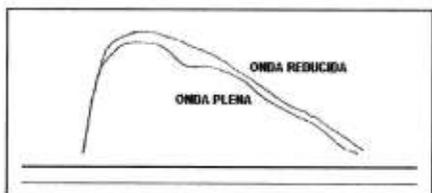
A



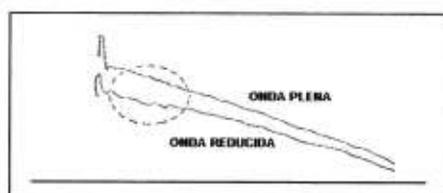
B



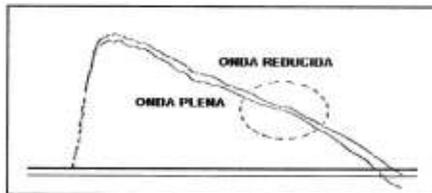
C



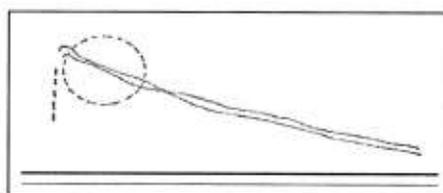
D



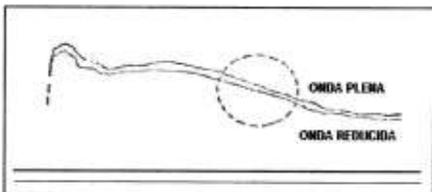
E



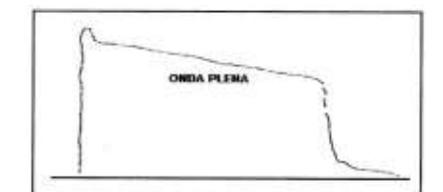
F



G



H



**DESCRIPCIÓN:**

A) Defecto donde el 8.5% del arrollamiento está en corto, más o menos en su parte central

B) Defecto producto de una corona considerable.

C) Representación de una falla de bobina a bobina o de sección a sección

D) Representación de una falla de bobina a bobina en la entrada del arrollamiento

E) Representación de una falla de bobina a bobina en el centro del arrollamiento

F) Defecto donde solamente el 3% del arrollamiento está en corto en la entrada del transformador

G) Defecto donde solamente el 0,2% del arrollamiento está en corto, a aproximadamente el 35% de la entrada

H) Defecto referente a una descarga en el ducto de aceite del núcleo del transformador

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 4.7.A,B,C

### TÍTULO:

INSTRUMENTO PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL ACEITE  
(SEGÚN MÉTODO NORMALIZADO ASTM D-1533)

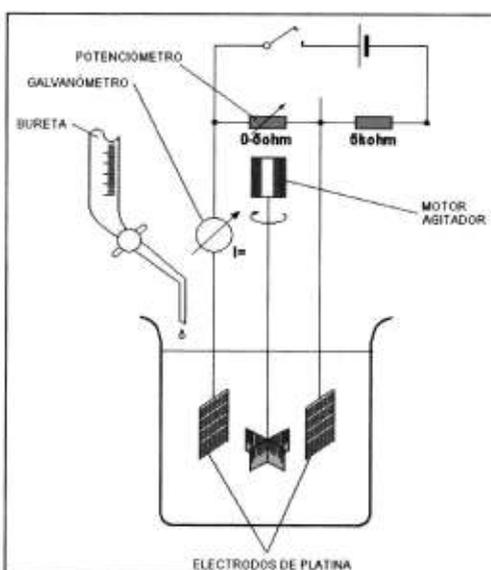
A



B



C



### DESCRIPCIÓN:

A) Titulador coulométrico automático Karl Fischer (de laboratorios de TRANSEQUIPOS)

B) Especialista del laboratorio de TRANSEQUIPOS (Colombia), realizando el ensayo de determinación del contenido de agua de una muestra de aceite a través del instrumento de ensayo Karl Fischer. El proceso se da de esta forma:

Se inyecta una muestra de aceite en el dispositivo, el cual añade reactivos de forma automática hasta alcanzar el punto final, momento en que el dispositivo detiene la dosificación y calcula electrónicamente el contenido de humedad (en ppm) en el aceite a partir del volumen inyectado y la cantidad de reactivo consumido.

C) Diagrama del principio de la titulación amperimétrica del método de Karl Fischer según norma ASTM D-1533, para la determinación del contenido de agua en una muestra de aceite aislante.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

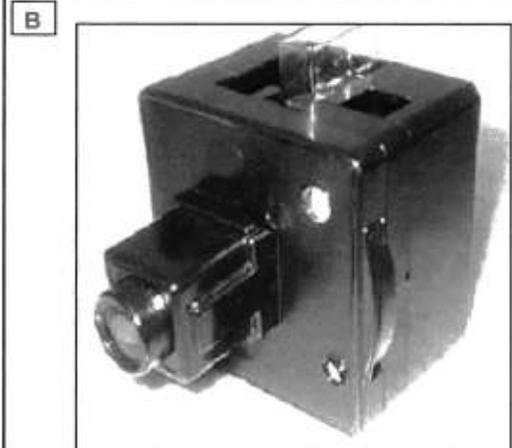
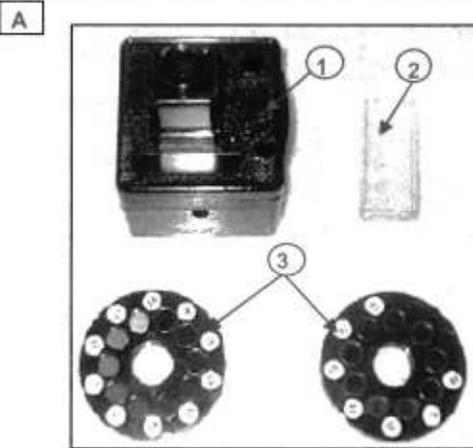
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 4.8.A,B,C

### TÍTULO:

INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO DE EXAMEN VISUAL Y COLOR DEL ACEITE  
(SEGÚN MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM D.1500 Y D.1524 )



### DESCRIPCIÓN:

A) Accesorios empleados para el ensayo de color del aceite según método ASTM D.1500, donde: 1) Visor para comparación de la muestra de aceite con los colores estándar de los discos, 2) Envase rectangular transparente, para colocación de la muestra de aceite, 3) Discos con plaquetas de colores estándar.

B) Modo de análisis de color de una muestra de aceite en el visor comparador.

C) Placas de comparación para ensayo en campo de color del aceite según método ASTM D.1524.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

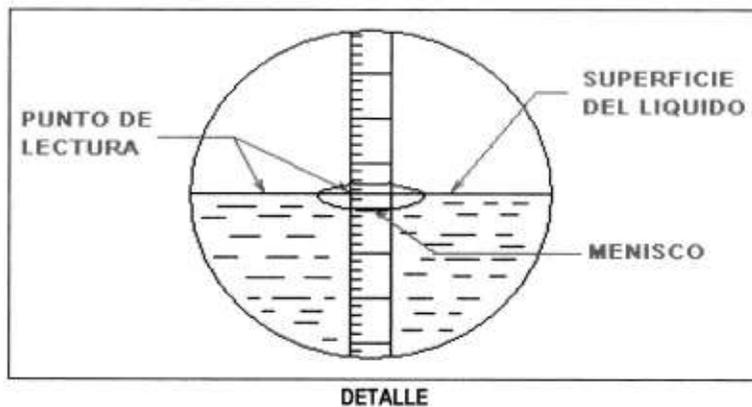
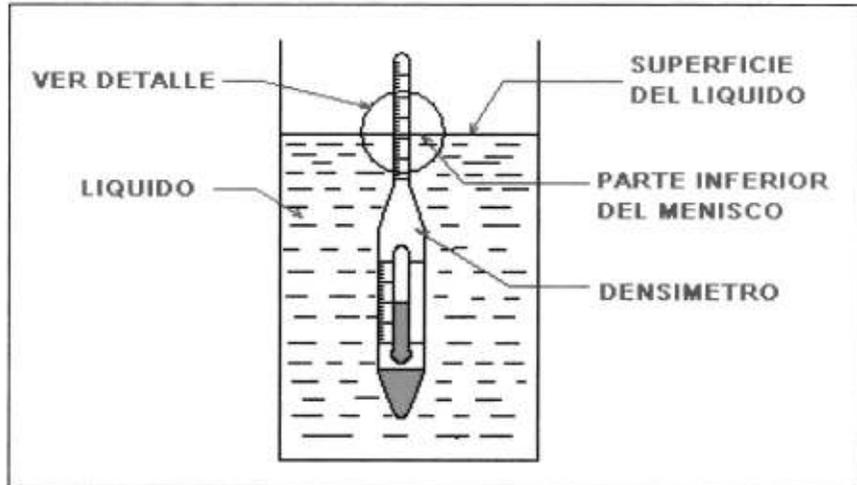
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 4.9

**TÍTULO:**

ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA O GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL ACEITE  
(SEGÚN MÉTODO NORMALIZADO ASTM D.1298)



**DESCRIPCIÓN:**

Lecturas de la escala del densímetro en la aplicación del método de ensayo normalizado ASTM D.1298

Cuando la temperatura fuera estable y el densímetro estuviera flotando libremente apartado de las paredes laterales de la probeta, el punto de lectura será tomado conforme indica esta figura.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 4.10

**TÍTULO:**

INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN DEL ACEITE (SEGÚN MÉTODO NORMALIZADO ASTM D-974)



**DESCRIPCIÓN:**

Esquematización del ensayo para la determinación del número de neutralización de una muestra de aceite aislante según método normalizado ASTM D.974. Donde:

- 1) Frasco conteniendo solución alcohólica de Hidróxido de Potasio (KOH)
- 2) Dispositivo de titulación que añade pequeñas cantidades de KOH en la mezcla o reacción
- 3) Recipiente de reacción
- 4) Controlador de peso de la reacción

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

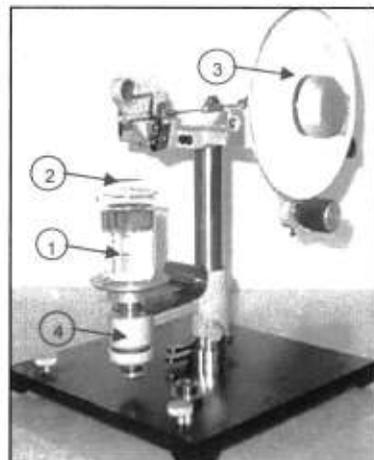


## FIGURAS ANEXAS 4.11.A,B

### TÍTULO:

INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN INTERFACIAL DEL ACEITE  
(SEGÚN MÉTODOS NORMALIZADOS ASTM D-971 Y ASTM D-2285)

A



B



### DESCRIPCIÓN:

A) Tensiómetro aplicado en laboratorio para el ensayo de Tensión Interfacial del aceite, según método normalizado ASTM D.971 (Método del anillo). Donde: 1) Vaso de precipitado con agua destilada y aceite aislante, 2) Anillo de platina (dimensiones conocidas), 3) Disco rotativo con escala en Dinasc/cm, 4) Plataforma móvil

B) Tensiómetro aplicado en campo para el ensayo de Tensión Interfacial del aceite, según método normalizado ASTM D.2285 (Método de la gota de agua). Donde: 1) Vaso precipitado con muestra de aceite 2) Jeringa de precisión, 3) Regulador de escala en Dinasc/cm, 4) Aguja de jeringa de precisión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

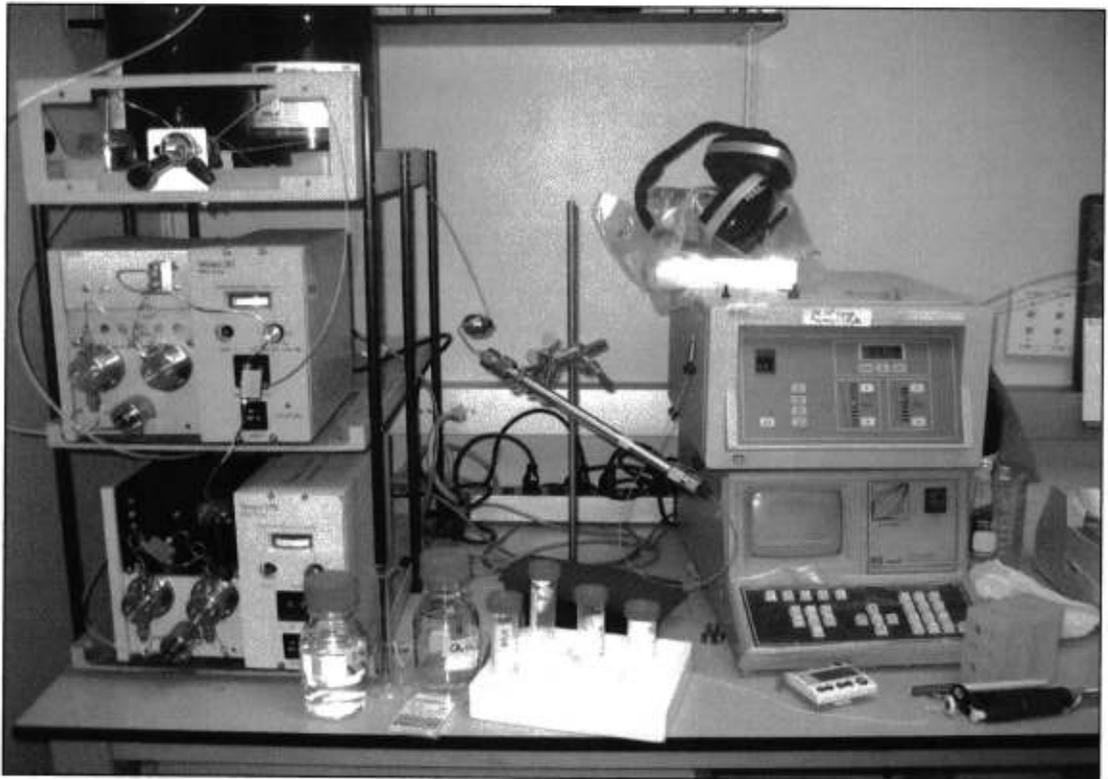
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 4.12

**TÍTULO:**

INSTRUMENTOS PARA LA DETERMINACION DEL CONTENIDO DE FURANOS EN EL ACEITE  
(SEGÚN METODO NORMALIZADO ASTM D.924)



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumentos para análisis de cromatografía líquida de alta resolución (High Performance Liquid Chromatography - HPLC) que permite medir los cinco compuestos furánicos de mayor importancia de una muestra de aceite.

---

---

---

---

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

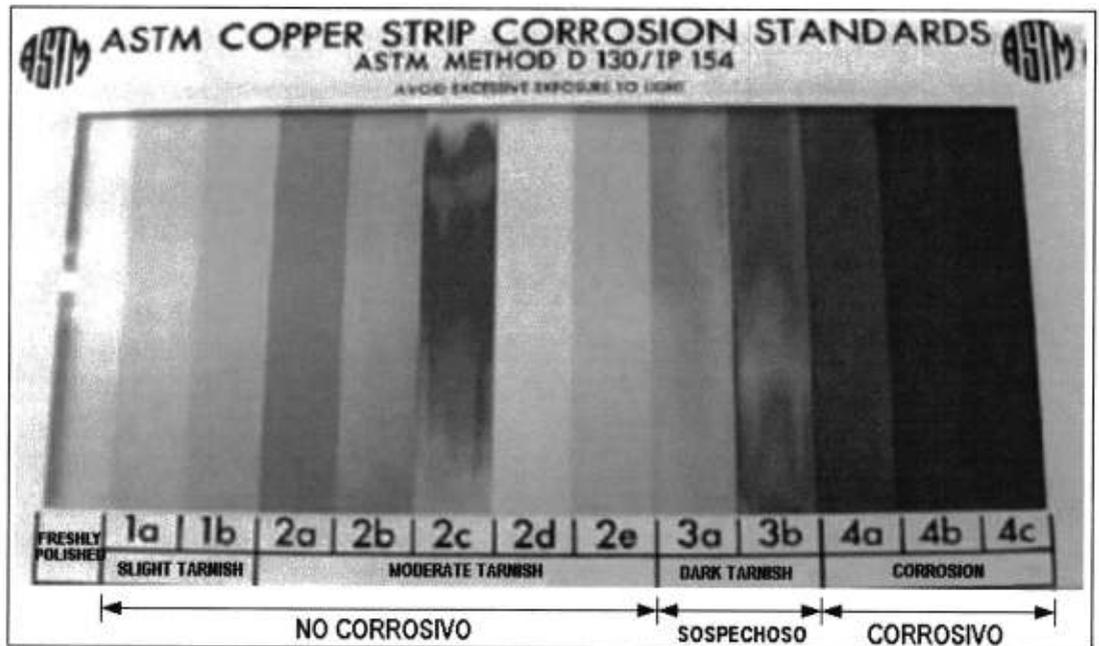
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 4.13

**TÍTULO:**

PLANTILLA PARA CLASIFICAR UN ACEITE COMO CORROSIVO O NO CORROSIVO  
(SEGÚN METODO NORMALIZADO ASTM D.130)



**DESCRIPCIÓN:**

Plantilla aplicada según método normalizado ASTM D.130, para cuestionar un aceite aislante como CORROSIVO o NO CORROSIVO.

Esta presenta varias láminas dispuestas en forma vertical ordenadas de acuerdo a su estado de corrosión, las cuales son comparadas con la lámina de cobre que fue sometida a ensayos de azufre corrosivo según métodos normalizados ASTM D.1275-A y D.1275-B.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

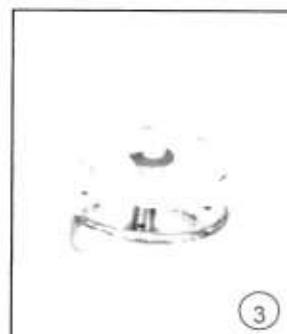
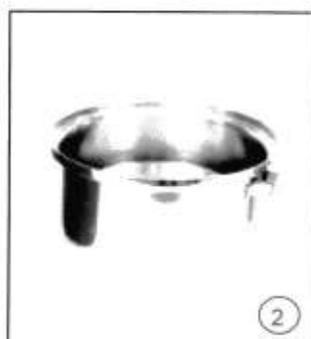
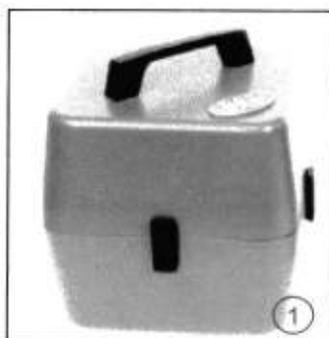


FIGURAS ANEXAS 4.14.A,B

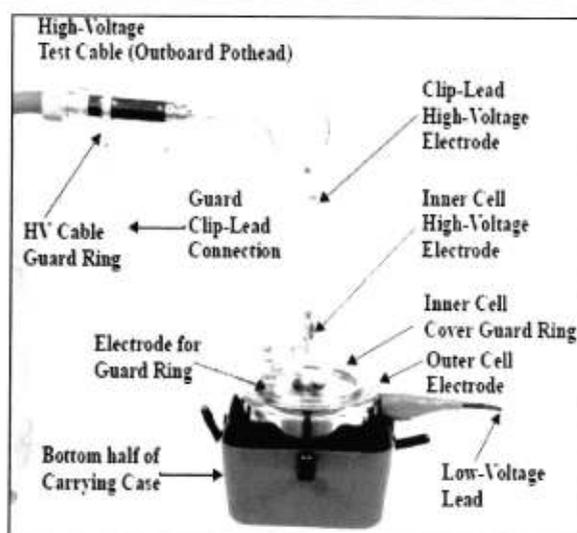
**TÍTULO:**

INSTRUMENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y/O FACTOR DE DISIPACIÓN DEL ACEITE (SEGÚN MÉTODO NORMALIZADO ASTM D.924)

A



B



**DESCRIPCIÓN:**

- A) Instrumentos para ensayo de determinación del factor de potencia y/o factor de disipación de un líquido aislante, según método normalizado ASTM D.924. Donde: 1) Caja para transportar la célula de muestreo y sus accesorios, 2) Célula de muestreo (electrodo de prueba externo), 3) Tapa de célula (electrodo de prueba interno) para inyección de alto voltaje.
- B) Esquema de conexiones para el ensayo de Factor de Potencia y/o Factor de Disipación de una muestra de líquido aislante.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

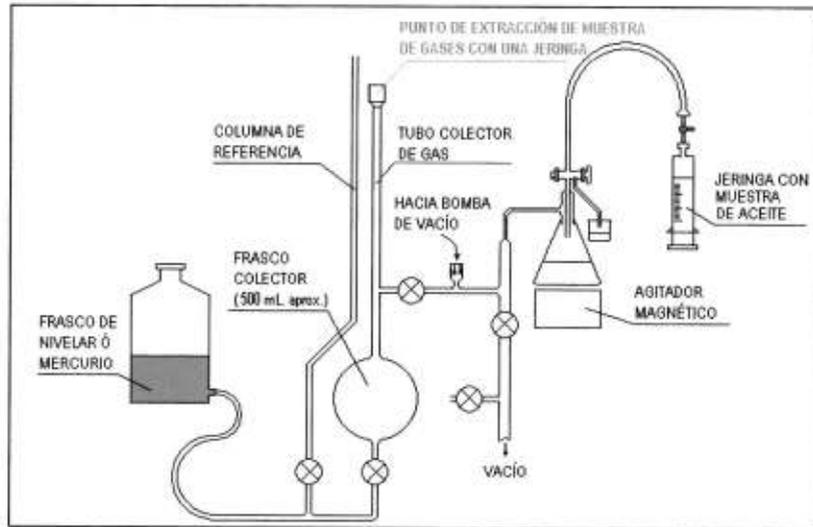


FIGURAS ANEXAS 4.15.A,B

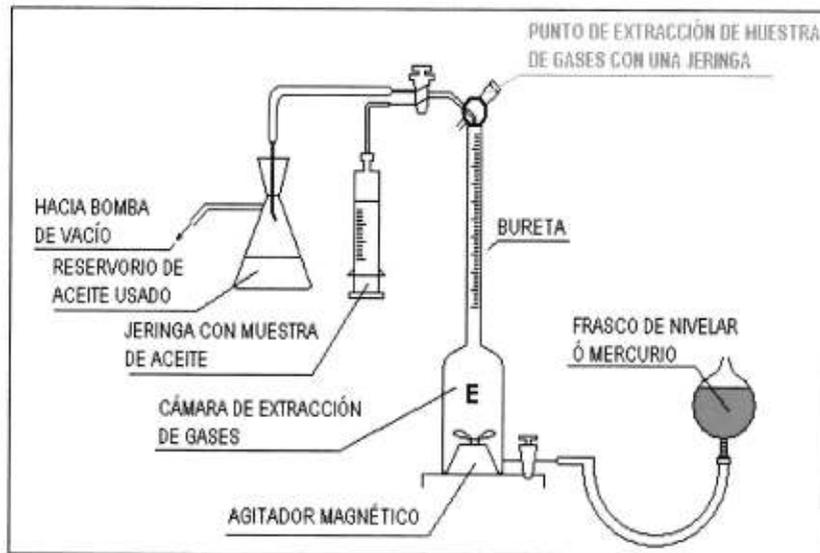
TÍTULO:

INSTRUMENTOS PARA LA EXTRACCIÓN DE GASES DISUELTOS EN UNA MUESTRA DE ACEITE

A



B



DESCRIPCIÓN:

A) Esquema de conexiones de instrumentos en laboratorio para la extracción de gases disueltos en una muestra de aceite aislante, según método normalizado ASTM D-3612/79

B) Esquema de conexiones de instrumentos en laboratorio para la extracción de gases disueltos en una muestra de aceite aislante, según método normalizado NBR-7070 de la ABNT

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 4.15.C,D

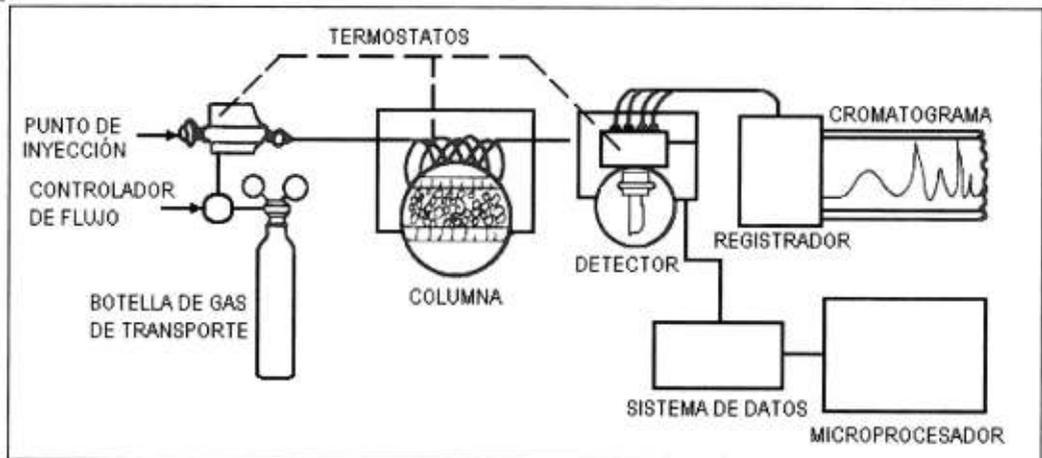
**TÍTULO:**

INSTRUMENTO CROMATÓGRAFO PARA ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS EN EL ACEITE

C



D



**DESCRIPCIÓN:**

C) Instrumento Cromatógrafo, para analizar la cantidad de gases disueltos en una muestra de aceite aislante (cromatografía de gases disueltos en el aceite)

B) Representación esquemática de un sistema de análisis cromatográfico (esquema básico de un cromatógrafo)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

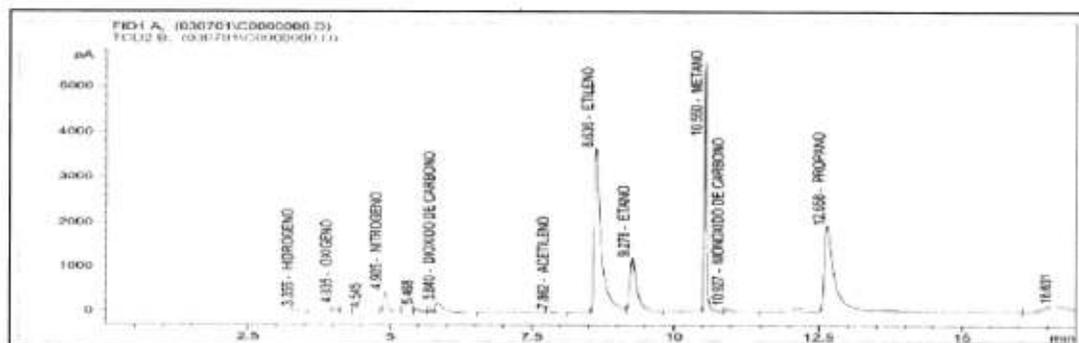
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 4.15.E

**TÍTULO:**

RESULTADOS DE UN CROMATÓGRAFO



#	Compuesto	T. retenc (min)	Area	Fact. Res	Concentra (ppm v/v)
1	HIDROGENO	3.355	108.538	1.751	190.010
2	OXIGENO	4.035	407.591	12.977	5289.397
3	NITROGENO	4.905	1778.721	16.509	29364.672
4	DIOXIDO DE C	5.840	2188.192	1.819	3981.051
5	ACETILENO	7.862	103.706	0.129	13.374
6	ETILENO	8.636	33098.367	0.115	3812.628
7	ETANO	9.278	11063.965	0.162	1797.379
8	METANO	10.550	14523.183	0.113	1640.401
9	MONOXIDO DE	10.927	433.322	0.082	35.425
10	PROPANO	12.658	23717.867	0.257	6105.253

**DESCRIPCIÓN:**

E) Presentación de resultados emitidos por un equipo cromatógrafo, del análisis de contenidos de gases en una muestra de aceite.

---



---



---



---

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



**FIGURAS ANEXAS 4.16.A,B**

**TÍTULO:**

ROTULOS DE IDENTIFICACIÓN DE LOS ENVASES DE MUESTREO DE ACEITE EN CAMPO

**A**

Empresa: _____	Localización: _____
ID equipo: _____	Fecha de muestreo: _____
Marca: _____	Temp. Amb. (°C): _____
No. Serie: _____	Temp. Aceite (°C): _____
Fabricante: _____	%HR aire: _____
Tensión Nominal: _____	Punto de muestreo: _____
Capacidad Nominal: _____	Aceite: Reemplazado <input type="checkbox"/>
Tipo: Con colchón de N2: <input type="checkbox"/>	Reacondicionado <input type="checkbox"/>
Con conservador: <input type="checkbox"/>	Recuperado <input type="checkbox"/>
Observación: _____	
Muestreado por: _____	Analizado por: _____

**B**

<b>LAB TEST REQUISITION: SYRINGE SAMPLE</b>		<b>MORGAN SCHAFFER</b>	
NAME: _____ COMPANY: _____		6800 Columbia, Box 188, Lubbock, TX 79403 Tel: 817-795-1700 Fax: 817-795-1704 www.morganschafter.com	
ADDRESS: _____		MS JOB: _____	
MUST BE FILLED IN	P.O.#: _____ AUTHORIZATION: _____	<b>ANALYSES REQUIRED</b>	MUST BE FILLED IN
GAS IN OIL SULFUR LOWER	WATER CONTENT	IMPURITIES CONTENT	METAL CONTENT
EQUIP. DESCRIP. _____ LOCATION _____			
MVA _____ KV _____ YEAR BUILT _____ OIL TEMP. _____ °C REMARKS OTHER TESTS _____	MANUFACTURER _____ LITRES GALLONS _____ SAMPLING POINT _____	SERIAL # _____ DATE _____ / _____ / _____ SYRINGE # _____ CALIBRO READING _____	

**DESCRIPCIÓN:**

A) Rótulo de identificación de una muestra de aceite tomada en campo a través de una botella, la cual será posteriormente analizada en en laboratorio mediante ensayos fisico-químico y/o eléctrico.

B) Rótulo de identificación de una muestra de aceite tomada en campo a través de una jeringa, la cual será posteriormente analizada en en laboratorio mediante ensayos de análisis cromatográfico de gases disueltos.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

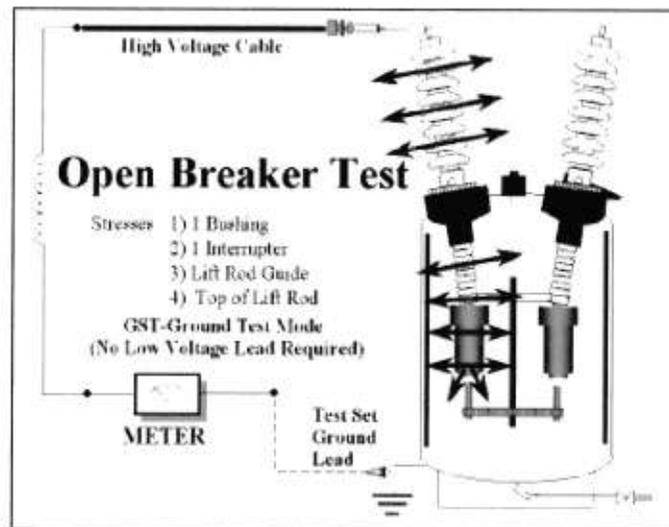


FIGURAS ANEXAS 4.17.A,B

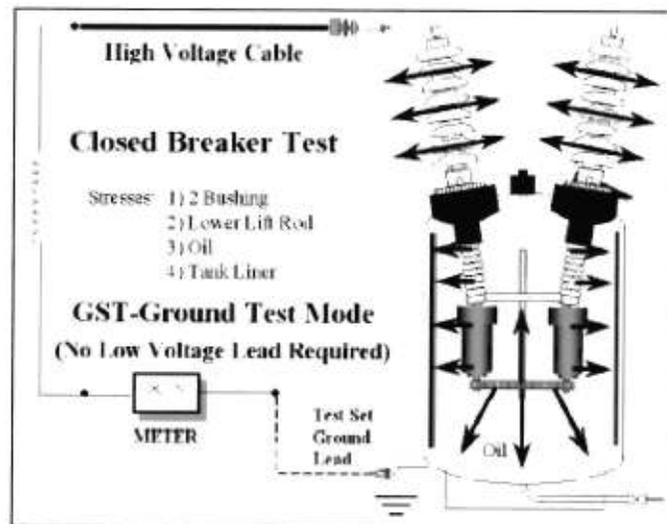
**TÍTULO:**

INTERPRETACIÓN FÍSICA DEL ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y/O FACTOR DE DISIPACIÓN DEL AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR TIPO GVO

**A**



**B**



**DESCRIPCIÓN:**

A) Componentes internos de material aislante, involucrados en el ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación de un polo del interruptor tipo GVO en posición "ABIERTO"

B) Componentes internos de material aislante, involucrados en el ensayo para la determinación del factor de potencia y/o factor de disipación de un polo del interruptor tipo GVO en posición "CERRADO".

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

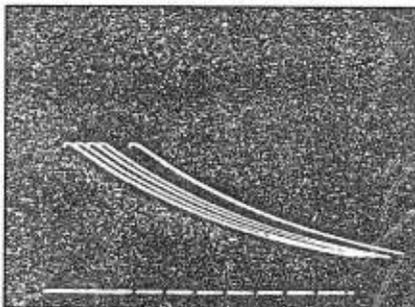
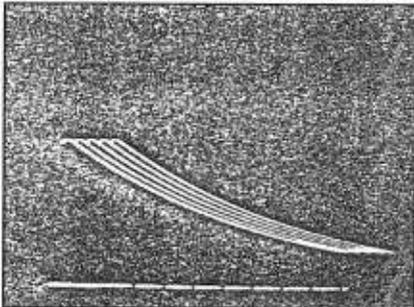
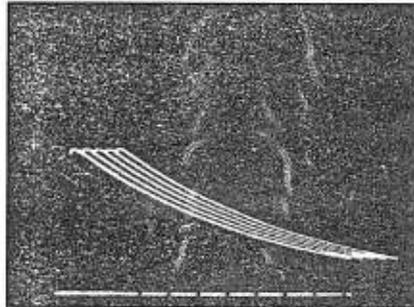


FIGURAS ANEXAS 4.18.A,B

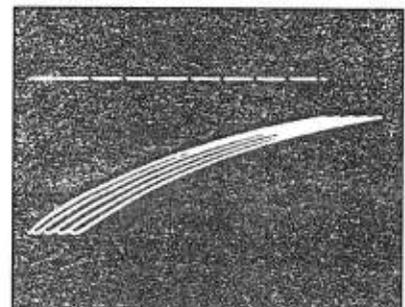
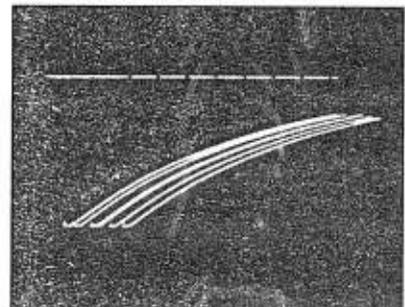
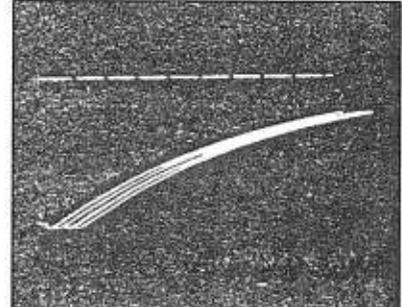
**TÍTULO:**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE VOLTAJE DE IMPULSO APLICADOS A UN EQUIPO ENCAPSULADO

**A**



**B**



**DESCRIPCIÓN:**

A) Resultados de 15 ondas de impulso de polaridad positiva, aplicadas para el ensayo en fábrica de un equipo encapsulado.

B) Resultados de 15 ondas de impulso de polaridad negativa, aplicadas para el ensayo en fábrica de un equipo encapsulado.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 5.1.A

### TÍTULO:

TRANSFORMADOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO I  
(RESERVA DE BANCO ATK "S/E DOS CERRITOS")



#### DATOS GENERALES DEL EQUIPO EQUIPMENT GENERAL DATA TRANSFORMADOR TRANSELECTRIC S-E Dos Cerritos

**ABB**

Cliente / Customer:

TRANSELECTRIC S-E Dos Cerritos

Fabricante / Manufacturer	ABB
Número de serie / Serial Number	200515
Año de construcción / Year	2008
Normas Aplicables / Standard	IEC
Número de Diseño / Design number	018030013518
Potencia / Power	33.44 55 MVA
Tipo de enfriamiento / Type of cooling	ONAN/ONAF / ONAF 0
Número de fases / Number of phases	3
Frecuencia / Frequency	60 Hz
Voltage AT (V) / High voltage level	230 / 5 ± 16 ± 0.825 % kV
Voltage MT (V) / Medium voltage level	69 / 3 kV
Voltage BT (V) / Low voltage level	13.8 kV
Grupo de Conexión / Connection	YNynD11

### DESCRIPCIÓN:

Transformador de potencia 230/69/13.8kV-55/55/18,3 MVA, instalado en la Subestación "Dos Cerritos" (Prov. del Guayas) perteneciente a la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

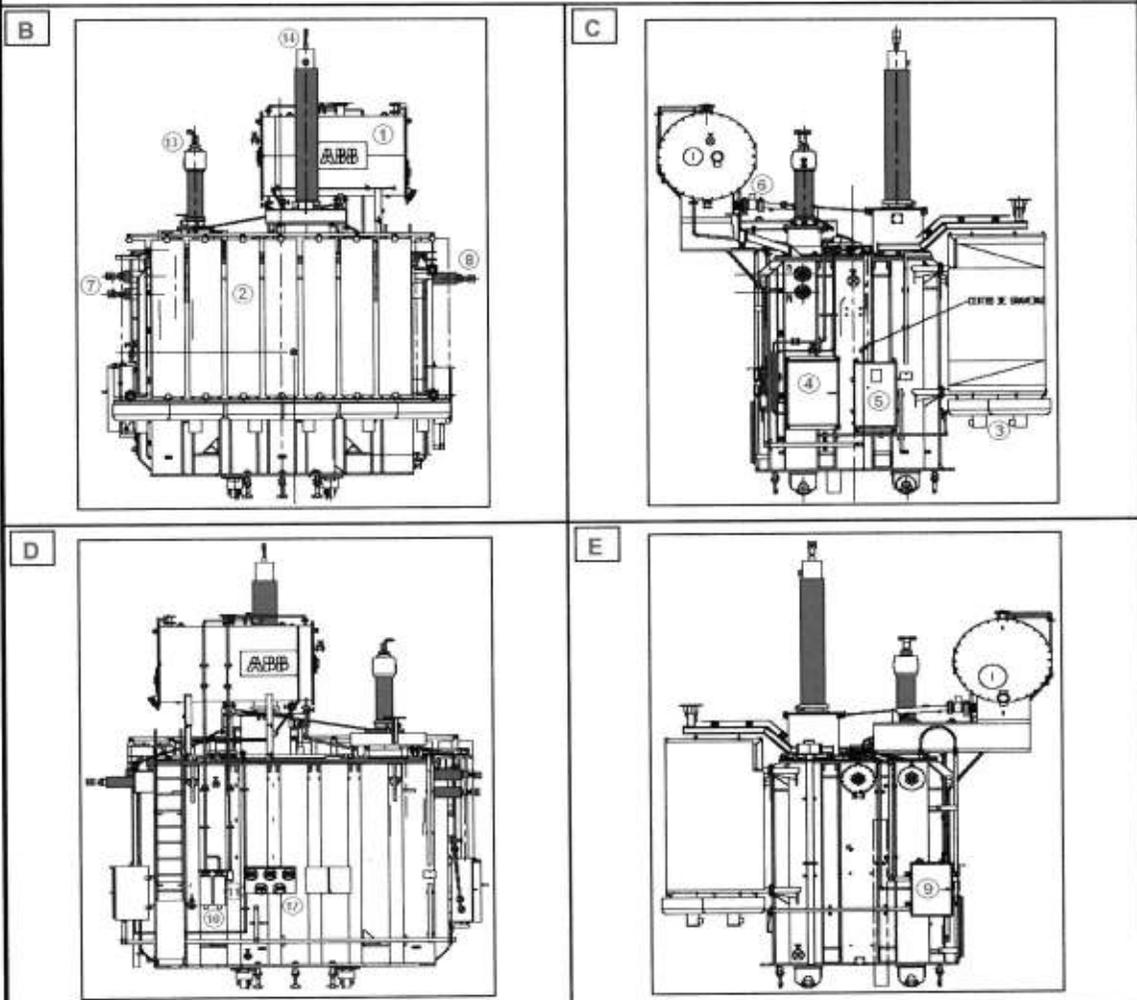
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.1.B,C,D,E

**TÍTULO:**

**VISTAS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO I  
(RESERVA DE BANCO ATK "S/E DOS CERRITOS")**



**DESCRIPCIÓN:**

Vistas del transformador de potencia analizado en el CASO I, instalado en la posición de RESERVA del banco ATK de la Subestación "Dos Cerritos". Detalle de sus principales componentes:

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Conservador con membrana de neopreno</li> <li>2) Radiadores</li> <li>3) Ventiladores</li> <li>4) Gabinete de purificador de aceite del LTC</li> <li>5) Gabinete de mando local LTC</li> <li>6) Rele Buchholz</li> <li>7) Bushing's de neutro de los arrollamientos AT y MT (N<sub>1</sub>)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>8) Bushing's de arrollamiento terciario 13,8kV (3a,3b)</li> <li>9) Gabinete de control local de sistema de enfriamiento</li> <li>10) Columnas deshumidificadoras de la cuba del transformador</li> <li>11) Columna deshumidificadora de la llave de conmutación</li> <li>12) Medidores de temperatura de aceite y arrollamientos</li> <li>13) Bushing de arrollamiento AT 230kV (A)</li> <li>14) Bushing de arrollamiento MT 69kV (a)</li> </ul> |
|---|---|

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 5.2

### TÍTULO:

INSTRUMENTO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA CASO I



### DESCRIPCIÓN:

Instrumento S1-5001 de la Megger Company, utilizado en el CASO I para el análisis y diagnóstico del estado del aislamiento del transformador de potencia en referencia, a partir de la medida de su resistencia al paso de la corriente de fuga.

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

- Equipo de fácil transportación, por tener un peso aproximado de 5 a 7 Kg incluyendo sus accesorios
- Equipo de medición que puede ser analógico y/o digital.
- Rango de temperatura de operación de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$
- Alimentación de  $120\text{ Vac} \pm 10\%$  a  $60\text{Hz}$
- Permite inyectar un voltaje para prueba de  $50\text{ V}$ , a  $10\text{ kV}$  de corriente directa.
- Medida de resistencia de aislamiento con un rango de  $10\text{ k}\Omega$  a  $20\text{ T}\Omega$
- Permite inyectar una corriente de prueba de  $0,01\text{nA}$  a  $5\text{mA}$ .
- Capacidad de corriente de cortocircuito de  $1\text{mA}$  a  $3\text{mA}$ .
- Medida de capacitancia del aislamiento con un rango de  $10\text{ nF}$  a  $50\mu\text{F}$  (dependiendo del voltaje aplicado)
- Exactitudes para medición de resistencia de aislamiento de  $\pm 5\%$  a  $1\text{T}\Omega$  y  $\pm 20\%$  a  $10\text{-}20\text{ T}\Omega$ , para medición de corriente de  $\pm 5\% \pm 0,2\text{ nA}$  en todos los voltajes y para medición de capacitancias de  $\pm 5\% \pm 5\text{nF}$ .
- Tiempo de carga del capacitor  $<5\text{Seg}$ . por  $\mu\text{F}$  a  $3\text{mA}$ .
- Tiempo de descarga del capacitor  $<120\text{mSeg}$ . por  $\mu\text{F}$  para descarga desde  $5000\text{ V}$ . a  $50\text{ V}$ . y  $<250\text{mSeg}$ . Para descarga desde  $10000\text{ V}$ . a  $50\text{ V}$ .
- Rango de tiempo para la prueba de 99 minutos y 59 segundos desde el comienzo de la prueba.
- Rango de Humedad Relativa para la medición, de  $90\% \text{ RH}$  no condensable a  $40^{\circ}\text{C}$ .

### ACCESORIOS PRINCIPALES:

- Tres cables de prueba para alto voltaje, cada uno correspondiente a los terminales "GUARD" (azul), "LINE" (rojo) y "EARTH" (negro). Todos con una longitud aproximada de 20 a 25 metros, con el fin de permitir su conexión a los bushing's de los equipos de alta tensión mediante sus terminales tipo largato.
- Cables varios para puentes entre bushing's, con terminales tipo largato.
- Instrumento padrón para calibración de equipo de prueba

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.3

**TÍTULO:**

INSTRUMENTO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DEL AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA CASO I



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumento modelo M4100 de la Doble Engineering Company, utilizado en el CASO I para el análisis y diagnóstico del estado del aislamiento del transformador de potencia en referencia, a partir de la determinación de su factor de potencia, capacitancia y pérdidas por calentamiento:

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:**

- Equipo de fácil transportación al campo, por tener un peso aproximado de 70 a 100 Kg incluyendo sus accesorios
- Equipo de medición que puede ser analógico y/o digital. Últimamente dispone de un computador personal con uso de un software que hace de interfaz operador-equipo analizador, para la ejecución automática de las pruebas.
- Rango de temperatura de operación de -20°C a 50°C
- Alimentación de 120 o 240 Vac  $\pm$  10% a 60Hz
- Permite inyectar un voltaje para prueba de 0 a 12 KV alternos, continuamente ajustables.
- Permite inyectar una corriente de prueba de 300mA
- Medida de un factor de potencia con un rango de 0 a 100%, capacitancia de 0 $\mu$ F a 100  $\mu$ F y pérdidas de 0 a 2kW
- Exactitudes para medición de factor de potencia  $\pm$ ( 0,01%), para mediciones de pérdidas  $\pm$ (0,5mW) y para mediciones de capacitancia  $\pm$ (0,01pF)

**ACCESORIOS PRINCIPALES:**

- Cable de prueba para alto voltaje, con doble apantallamiento y aislamiento para 15KV. Su longitud aproximada es de 20 a 25 metros, con el fin de permitir su conexión a los bushing's de los equipos de alta tensión.
- Terminal tipo gancho para conexión del conductor central del cable de prueba de alto voltaje. Este contiene un anillo que conecta la pantalla interna del cable al circuito de guarda y una base de aluminio que conecta la pantalla externa al
- Cable de cobre aislado para conexión a tierra del equipo de prueba.
- Dos cables de prueba para bajo voltaje, color rojo y color azul, teniendo en sus extremos conectores para conexión al equipo de prueba y terminales lagarto para conexión al espécimen bajo prueba. Su longitud aproximada es de 20 a 25 metros, con el fin de permitir su conexión a los bushing's de Iso equipos de alta tensión.
- Dos palancas pulsadoras para interrupción segura de la prueba.
- Collares metálicos o de caucho conductor para prueba del aislamiento de los bushing's tipo no capacitivos.
- Célula metálica para medición del factor de potencia de una muestra de líquido dieléctrico.
- Cables varios para puentes entre bushing's, con terminales tipo lagarto.
- Célula metálica para medición del factor de potencia de una muestra de líquido dieléctrico.
- Instrumento patrón para calibración de equipo de prueba
- Conectores para tap's de prueba de bushing's capacitivos.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



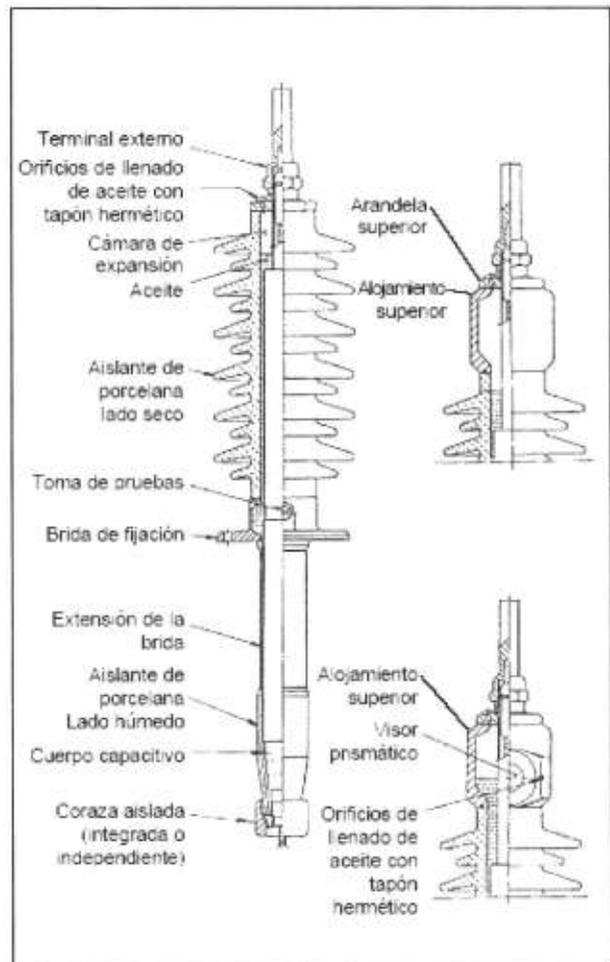


**C.I.B.**

FIGURA ANEXA 5.4.A

**TÍTULO:**

BUSHING "A" TIPO CAPACITIVO DEL LADO DE ALTA TENSIÓN 230KV  
DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO I



**DESCRIPCIÓN:**

Bushing tipo GOB de aislamiento capacitivo, fabricado por ABB-Suecia, instalado en el lado AT 230kV del transformador en referencia del CASO I. Perteneciente a la posición de RESERVA del banco ATK de la Subestación "Dos Cerritos"

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

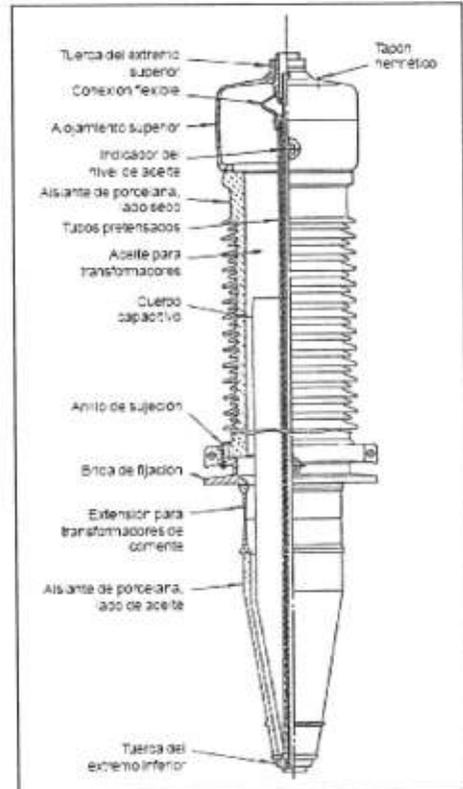
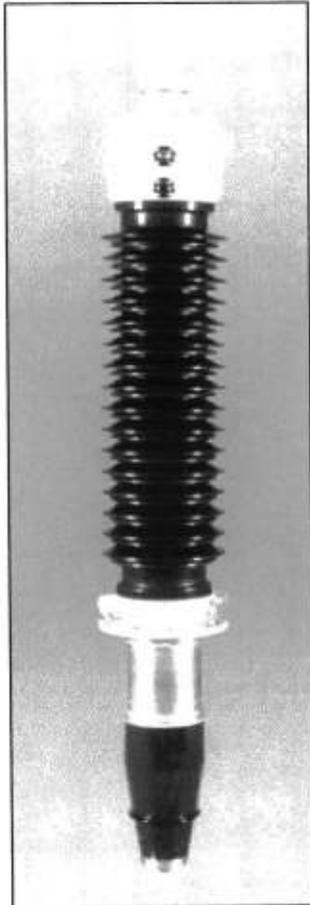
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.4.B

**TÍTULO:**

BUSHING "a" TIPO CAPACITIVO DE LADO DE BAJATENSIÓN 69KV  
DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO I



**DESCRIPCIÓN:**

Bushing tipo GOE de aislamiento capacitivo, fabricado por ABB-Suecia, instalado en el lado BT 69kV del transformador en referencia del CASO I. Perteneciente a la posición de RESERVA del banco ATK de la Subestación "Dos Cerritos"

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

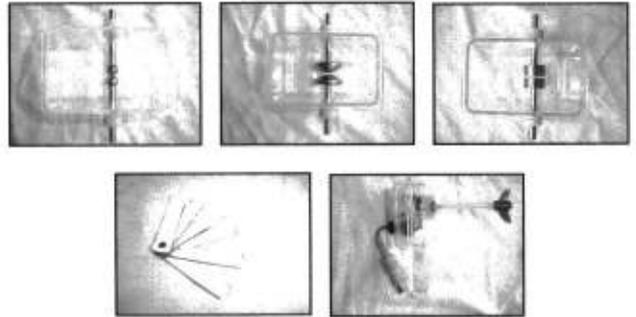
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.5

**TÍTULO:**

INSTRUMENTO PARA EL ENSAYO DE MEDIDA DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA  
DEL ACEITE AISLANTE CASO I



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumento utilizado en el CASO I, para el análisis y diagnóstico del estado del aceite aislante del transformador de potencia en referencia, a partir de la medida de su tensión de ruptura o rigidez dieléctrica:

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:**

- Equipo de fácil transportación al campo, por tener un peso aproximado de 17,5Kg incluyendo sus accesorios
- Su operación es simple y los valores de voltaje aplicado entre electrodos son mostrados en un display tipo LED.
- Cuenta con un microprocesador controlado de operación semiautomática, que permite la selección de la norma estándar a aplicar según el tipo de electrodos usado: Esféricos (IEC156), Semiesféricos (VDE0370 / ASTM-D1816) y Cilíndricos (ASTM-D877). El rango de elevación de voltaje según la norma aplicada, depende de esta selección.
- Permite aplicar un voltaje alterno de hasta 60KV entre electrodos. Cuenta con un transformador de 500 VA
- Alimentación de 120 o 240 Vac  $\pm$  10% a 60Hz
- Exactitudes para medición de voltaje aplicado entre electrodos  $\pm$ (2% de la lectura  $\pm$  3 dígitos)
- Rango de temperatura de operación de 0 a 40°C

**ACCESORIOS PRINCIPALES:**

- Láminas de aluminio milimetradas, para calibración de espacio entre electrodos.
- Célula de 0,5 litros con electrodos esféricos según norma IEC 156 (tapa con o sin agitador de muestra)
- Célula de 0,5 litros con electrodos semiesféricos según norma VDE0370 (tapa sin agitador) y según norma ASTM-D1816 (tapa con agitador)
- Célula de 0,5 litros con electrodos cilíndricos según norma ASTM-D877 (tapa sin agitador)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

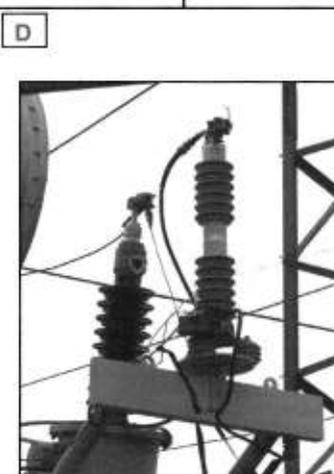
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.6.A,B,C,D,E

### TÍTULO:

### ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE S/E "DOS CERRITOS" (CASO I)



### DESCRIPCIÓN:

- A), B) Ejecución de ensayos dieléctricos para la determinación del factor de potencia, capacitancia y pérdidas en el sistema de aislamiento del transformador, mediante el uso del instrumento analizador de aislamiento M4100 de la Doble Engineering Company.
- C) Presentación de resultados en pantalla del instrumento de ensayo M4100 de la Doble Engineering Company.
- D) Conexiones entre el transformador y el instrumento de ensayo.
- E) Conexiones entre el tap de derivación de los bushing's y el instrumento de ensayo, para el análisis de su aislamiento capacitivo interno.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

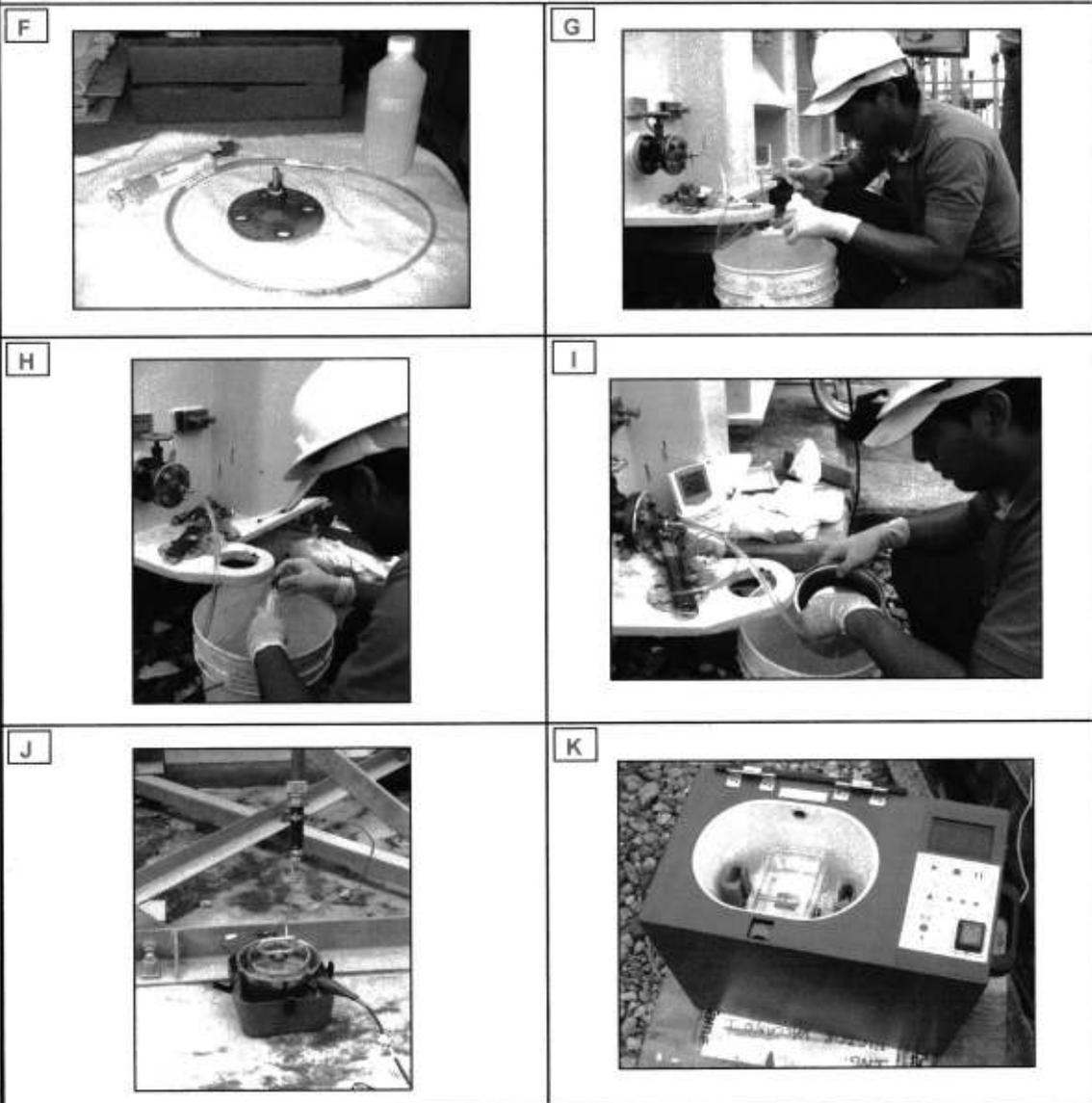
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 5.6.F,G,H,I,J,K

**TÍTULO:**

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL ACEITE AISLANTE EN CAMPO  
TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE S/E "DOS CERRITOS" (CASO I)



**DESCRIPCIÓN:**

- F) Accesorios para la toma de muestras del aceite aislante inmerso en el transformador, a ser analizadas en laboratorio.
- G) Toma de muestra del aceite aislante para análisis en laboratorio mediante ensayos fisico-químicos.
- H) Toma de muestra del aceite aislante para análisis en laboratorio mediante ensayo cromatográfico de gases disueltos.
- I) Toma de muestra del aceite aislante para análisis en campo mediante ensayo de determinación de su factor de potencia
- J) Ejecución del ensayo de determinación del factor de potencia de la muestra de aceite tomada.
- K) Ejecución del ensayo de medida de la tensión de ruptura o rigidez dieléctrica de la muestra de aceite tomada.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

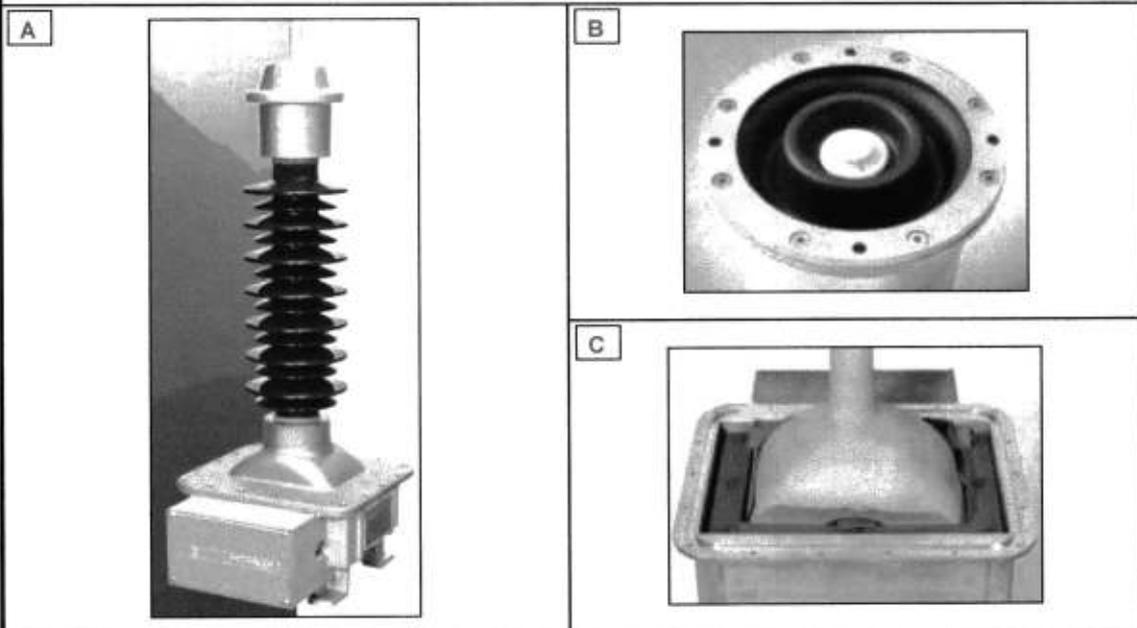
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.7.A,B,C,D

**TÍTULO:**

**TRANSFORMADOR DE TENSIÓN (DE POTENCIAL) ANALIZADO EN CASO II.A  
(BARRA PRINCIPAL A 69KV S/E RIOBAMBA)**



		EOF 24	EOF 36	EOF 52	EOF 72	
<div style="display: flex; align-items: center;"> </div>	Type / Tipo					
	Tensión máxima del sistema	kV	24	36	52	72
	Tensión de prueba a frecuencia industrial	kV	50	70	95	140
	Tensión de prueba al impulso tipo rayo	kV	125	170	250	325
	Frecuencia	Hz	16.7 / 50 / 60			
	Potencia nominal máxima, clase 0.2	VA	200			
	Número de devanados secundarios		≤ 4			
	Potencia térmica límite	VA	≤ 1500			
	Clases de precisión		0.1 - 3; 3P/ 6P			

**DESCRIPCIÓN:**

Transformador de tensión monofásico para 69kV, instalado por 3 en la Subestación "Riobamba" (Prov. del Chimborazo) perteneciente a la Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión:

- A) Modelo del transformador de tensión monofásico, tipo pedestal para 69kV
- B) Membrana de fluoroelastómero para expansión normal del aceite contenido en el transformador, que se da con la variación de la temperatura. De sellado completamente hermético y libre de mantenimiento.
- C) Aislamiento del núcleo y arrollamientos con material aislante celulósico. Núcleo montado horizontalmente, diseñado para ahorrar espacio y asegurar la mejor protección contra la ferro-resonancia.
- D) Información técnica característica del equipo.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

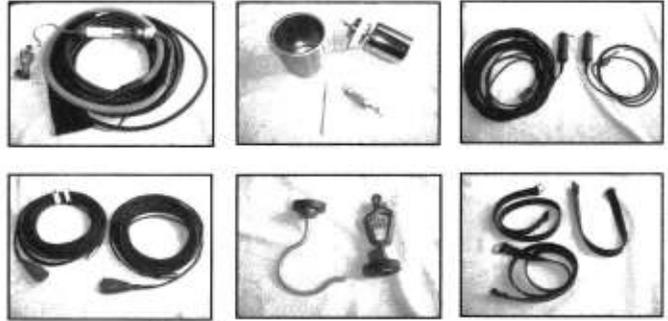
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.8

**TÍTULO:**

INSTRUMENTO UTILIZADO PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE DISIPACIÓN DEL AISLAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN CASO II.A



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumento modelo DELTA-2000 de la Megger Company, utilizado en el CASO II para el análisis y diagnóstico del estado del aislamiento de tres transformadores de tensión, a partir de la determinación de su factor de disipación (potencia), capacitancia y pérdidas por calentamiento:

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:**

- Equipo de fácil transportación al campo, por tener un peso aproximado de 70 a 100 Kg incluyendo sus accesorios
- Equipo de medición digital.
- Rango de temperatura de operación de -50°C a 60°C
- Alimentación de 120 o 240 Vac  $\pm$  10% a 60Hz
- Permite inyectar un voltaje para prueba de 0 a 12 KV alternos, continuamente ajustables.
- Permite inyectar una corriente de prueba de 100mA (máximo 200mA)
- Medida de un factor de potencia con un rango de 0 a 90%, capacitancia de 1pF a 1,1  $\mu$ F y pérdidas de 0 a 2kW
- Exactitudes para medición de factor de disipación  $\pm$ (2% de la lectura + 0,05%), para mediciones de pérdidas  $\pm$ (2% de la lectura + 1mW) y para mediciones de capacitancia  $\pm$ (0,5% de la lectura + 2pF) en modo UST y  $\pm$ (0,5% de la lectura + 6pF) en modo GST

**ACCESORIOS PRINCIPALES:**

- Cable de prueba para alto voltaje, con doble apantallamiento y aislamiento para 15KV. Su longitud aproximada es de 20 a 25 metros, con el fin de permitir su conexión a los bushing's de los equipos de alta tensión.
- Terminal tipo gancho para conexión del conductor central del cable de prueba de alto voltaje. Este contiene un anillo que conecta la pantalla interna del cable al circuito de guarda y una base de aluminio que conecta la pantalla externa al
- Cable de cobre aislado para conexión a tierra del equipo de prueba.
- Dos cables de prueba para bajo voltaje, color rojo y color azul, teniendo en sus extremos conectores para conexión al equipo de prueba y terminales lagarto para conexión al espécimen bajo prueba. Su longitud aproximada es de 20 a 25 metros, con el fin de permitir su conexión a los bushing's de los equipos de alta tensión.
- Dos palancas pulsadoras para interrupción segura de la prueba.
- Collares metálicos o de caucho conductor para prueba del aislamiento de los bushing's tipo no capacitivos.
- Célula metálica para medición del factor de potencia de una muestra de líquido dieléctrico.
- Cables varios para puentes entre bushing's, con terminales tipo lagarto.
- Célula metálica para medición del factor de potencia de una muestra de líquido dieléctrico.
- Instrumento patrón para calibración de equipo de prueba
- Conectores para tap's de prueba de bushing's capacitivos.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.9.A,B,C,D,E,F

### TÍTULO:

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN CAMPO  
TRANSFORMADORES DE TENSIÓN A 69KV DE S/E "RIOBAMBA" (CASO II.A)



### DESCRIPCIÓN:

- A) Limpieza de la porcelana previamente a la ejecución de los ensayos
- B) Conexiones entre el instrumento de ensayo para medida de la resistencia de aislamiento y el equipo a ser analizado.
- C) Ejecución del ensayo para medida de la resistencia de aislamiento de los transformadores en referencia.
- D) Conexiones entre el instrumento de ensayo para determinación del factor de disipación del aislamiento y el equipo a ser analizado.
- E) Vista panorámica de los transformadores de tensión en referencia y el instrumento de ensayo
- F) Ejecución del ensayo para determinación del factor de disipación del aislamiento del transformador en referencia.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

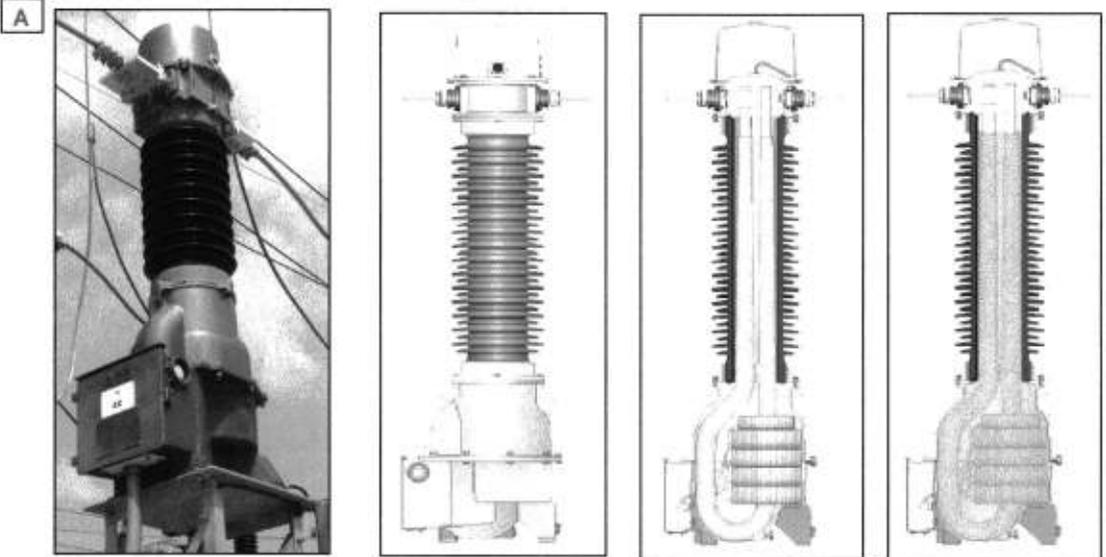
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.10.A,B

**TÍTULO:**

**TRANSFORMADOR DE CORRIENTE ANALIZADO EN CASO II.B  
(BAHÍA DE CAPACITORES 69kV DE S/E STA. ELENA)**



**B**

ABB Power Technologies AB		CE		Made in Sweden	
Transformador de corriente	Tipo	IMS 72	Relación	600/5/5/5	
Normas	I/C 60044-1	Tensión máxima	72.5 kV	No.	8705 686-671
Año de producción	2005	Nivel de aislamiento	140-325 kV	Frecuencia	60 Hz
Masa total	385 kg	Corriente térmica continua	720 A	Rn	20 kA / 1s
Distancia de fuga	2310 mm	Altitud de operación, max.	1000 m	Idyn	50 kA
Temperatura	<30 + -40°C				

Inclinación max 60° durante transporte o almacenamiento.



1S1	1S2	1S3	1S4	1S5
2S1	2S2	2S3	2S4	2S5
3S1	3S2	3S3	3S4	3S5

Terminal	Rel. (A)	Potencia / Clase	Rct
1S2-1S3	50/5		
1S1-1S2	100/5		
1S1-1S3	150/5		
1S4-1S5	200/5		
1S3-1S4	250/5		
1S2-1S4	300/5		
1S1-1S4	400/5		
1S3-1S5	450/5		
1S2-1S5	500/5		
1S1-1S5	600/5	60VA 0.2	
2S2-2S3	50/5		
2S1-2S2	100/5		
2S1-2S3	150/5		
2S4-2S5	200/5		
2S3-2S4	250/5		
2S2-2S4	300/5		
2S1-2S4	400/5		
2S3-2S5	450/5		
2S2-2S5	500/5		
2S1-2S5	600/5	60VA 5P20	
3S2-3S3	50/5		
3S1-3S2	100/5		
3S1-3S3	150/5		
3S4-3S5	200/5		
3S3-3S4	250/5		
3S2-3S4	300/5		
3S1-3S4	400/5		
3S3-3S5	450/5		
3S2-3S5	500/5		
3S1-3S5	600/5	60VA 5P20	

**DESCRIPCIÓN:**

Transformador de corriente para 69kV, instalado por 3 en la Subestación "Sta. Elena" (Prov. Del Guayas) perteneciente a la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión:

A) Detalle físico real interno y externo del transformador de corriente.

B) Información técnica característica del equipo.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 5.11.A,B,C,D

**TÍTULO:**

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN CAMPO  
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE A 69KV DE S/E "SANTA ELENA" (CASO II.B)

A



B



C



D



**DESCRIPCIÓN:**

A) Ejecución del ensayo para medida de la resistencia de aislamiento de los transformadores en referencia.

B) Vista panorámica de los tres transformadores de corriente en referencia.

C) Ejecución del ensayo para determinación del factor de potencia del aislamiento de los transformadores en referencia.

D) Conexiones entre el instrumento de ensayo para determinación del factor de potencia del aislamiento y el transformador de corriente.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

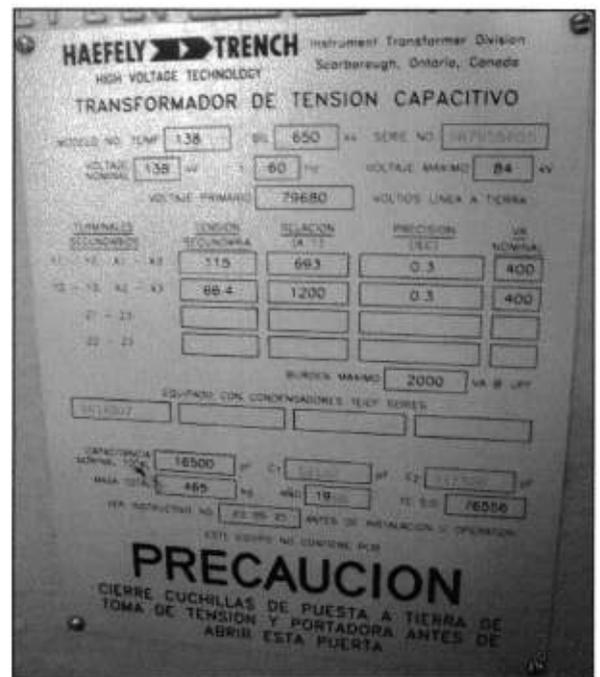
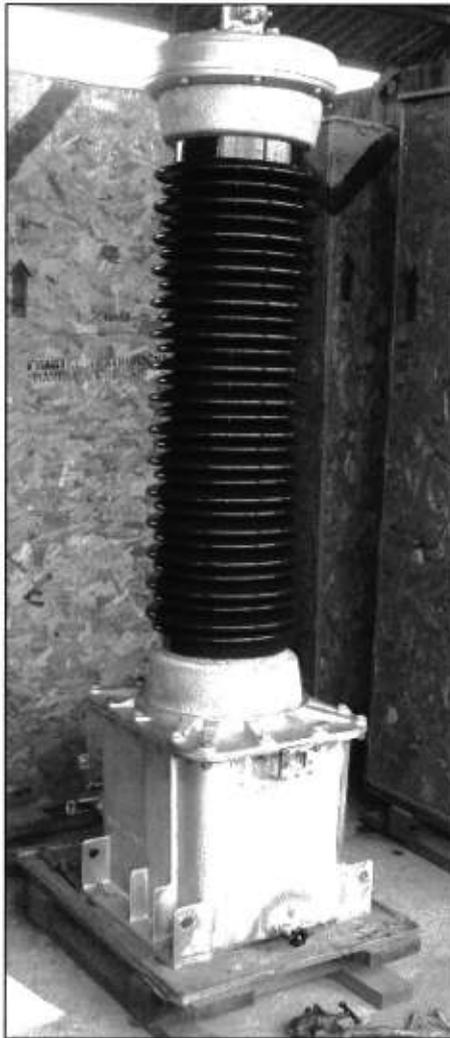
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.12.A

**TÍTULO:**

TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO ANALIZADO EN CASO II.C  
(BAHÍA DE TRANSFORMADOR "ATQ" A 138kV DE S/E POSORJA)



**DESCRIPCIÓN:**

Transformador de Tensión Capacitivo para 138kV, instalado en la Subestación "Posorja" (Prov. del Guayas) perteneciente a la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión:

Marca HAEFELY TRENCH, No. Serie: 987655605, Modelo TEIMF 138,  $V_{\text{primario}}=138\text{KV}/\sqrt{3}$ ,  $V_{\text{secundario}}=115-115/\sqrt{3}$ , Capacitancias  $C1=19122\text{pF}$  y  $C2=117576\text{pF}$

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

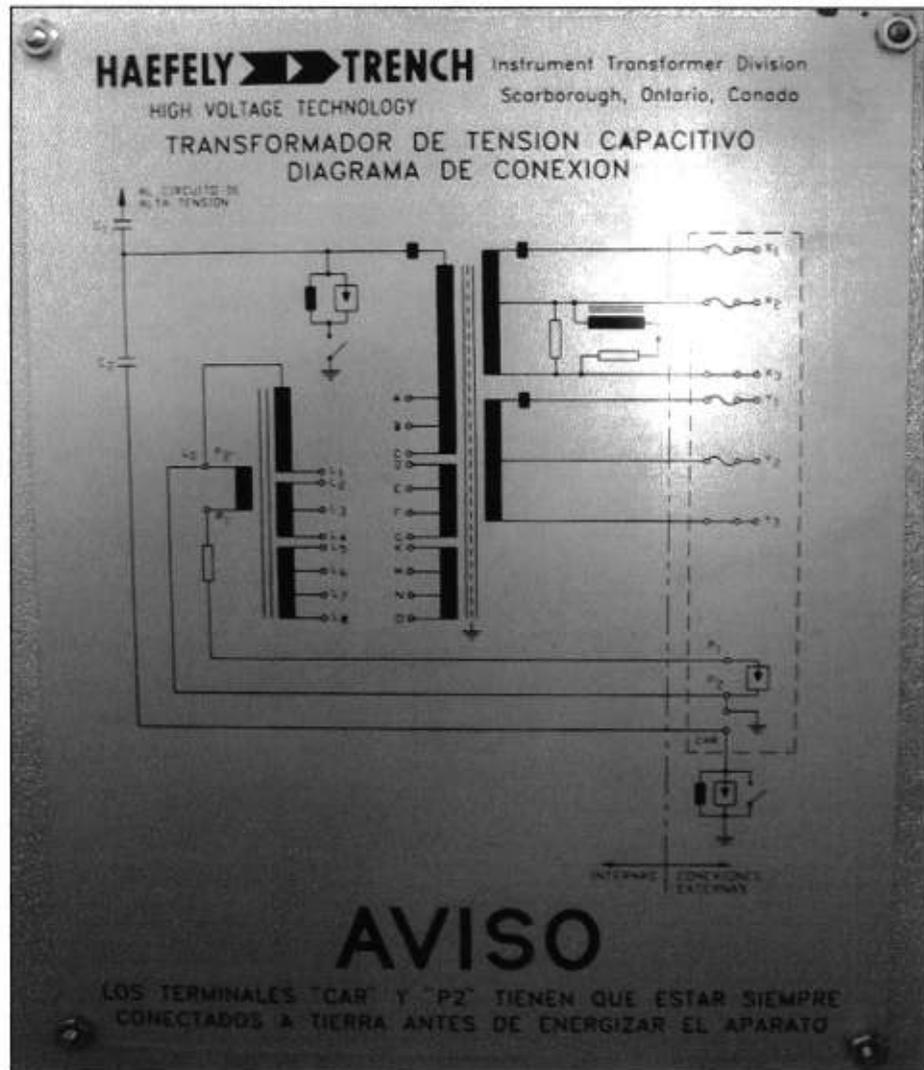
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.12.B

**TÍTULO:**

ESQUEMA INTERNO TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO ANALIZADO EN CASO II.C  
(BAHÍA DE TRANSFORMADOR ATQ A 138kV DE S/E POSORJA)



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama esquemático (dato de placa) del Transformador de Tensión Capacitivo de referencia en el Caso II.C  
Se puede apreciar la existencia de sus principales componentes tales como: los módulos capacitivos en serie C1 y C2,  
las Bobinas de choque y de drenaje, el Transformador intermedio de tensión y sus respectivas tomas secundarias X y Y.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 5.13.A,B,C

**TÍTULO:**

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN CAMPO  
TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO A 138kV DE S/E "POSORJA" (CASO II.C)

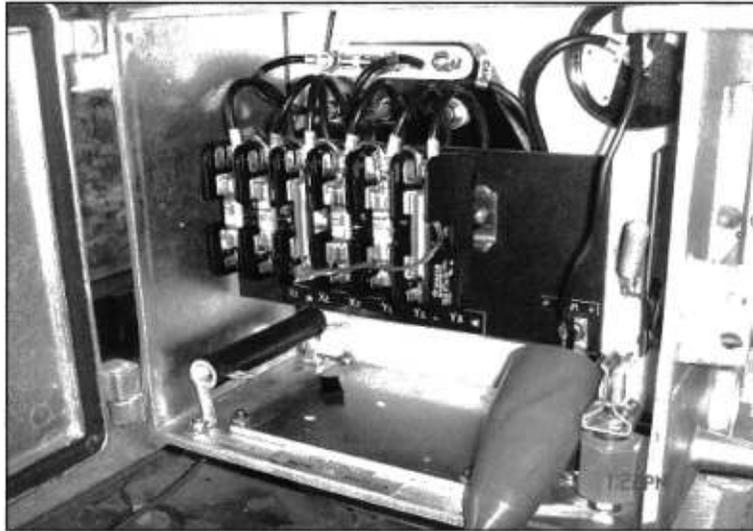
A



B



C



**DESCRIPCIÓN:**

A) Ejecución del ensayo para medida de la resistencia de aislamiento del transformador en referencia.

C) Ejecución del ensayo para determinación del factor de potencia del aislamiento del transformador en referencia.

D) Muestra de las conexiones de ensayo realizadas en la caja secundaria del transformador en referencia.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.14

**TÍTULO:**

SECCIONADOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO III  
(BAHÍA "MACHALA 1" A 230KV DE LA S/E MILAGRO)



<b>milago</b> electromecánica s.a.	
SECCIONADOR DE A.T.	O. de C. N° 2-50018
Tipo	N° 247
Año de construcción 2005	Tensión nominal 245 KV.
Frecuencia 60 Hz.	B.I.L. 95 KV.
Corriente nominal 1200 A.	I. de breve duración 1 Seg. 40 KA.
I. de cresta 100 KA.	Norma de fabr. IEC 62271-102 Peso
Cjal. Noya 1578 - Lanus O. - Buenos Aires - Argentina - TEL. (5411)4249-1009 - ventas@lagoelectromecanica.com	

**DESCRIPCIÓN:**

Seccionador tripolar 89-241 a 230KV, analizado en el caso III. Instalado en la Bahía "Machala 1" de la Subestación "MILAGRO" (Provincia del Guayas) perteneciente a la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T).  
Compuesto de dos aisladores por polo (de un solo punto de ruptura), posee mando mecánico motorizado y manual (con manivela) para apertura y cierre de sus tres polos.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

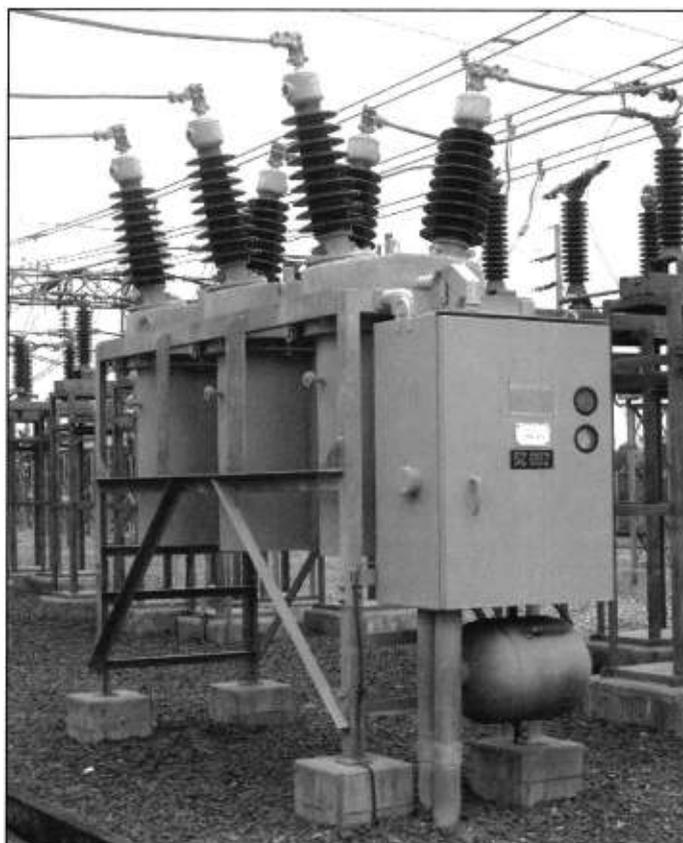
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 5.15

### TÍTULO:

INTERRUPTOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO IV  
(BAHÍA "MILAGRO 2" A 69kV DE LA S/E MILAGRO)



### DESCRIPCIÓN:

Interruptor de potencia (tipo GVO) 52-032 a 69KV, analizado en el caso IV. Instalado en la Bahía "Milagro 2" de la Subestación "MILAGRO" (Provincia del Guayas) perteneciente a la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión (S.N.T). Sus principales características técnicas, extraídas de la placa de identificación, son las siguientes:

<b>MARCA:</b>	MITSUBISHI	<b>CTE. CORTOCIRCUITO NOM:</b>	19 kA.
<b>LUGAR DE FABRICACIÓN:</b>	Japón	<b>TIEMPO INTERR. NOMINAL:</b>	5 CICLOS
<b>TIPO:</b>	70-GTE-20A	<b>FRECUENCIA:</b>	60 Hz.
<b>No. SERIE</b>	81433	<b>PESO TOTAL CON ACEITE:</b>	3800 Kg.
<b>TENSIÓN MÁXIMA:</b>	72,5 kV	<b>ACEITE:</b>	1000 Lt.
<b>CORRIENTE NOMINAL:</b>	800 A.	<b>B.I.L.:</b>	350 kV

La operación de CIERRE con resorte y la operación de APERTURA con mecanismo neumático

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

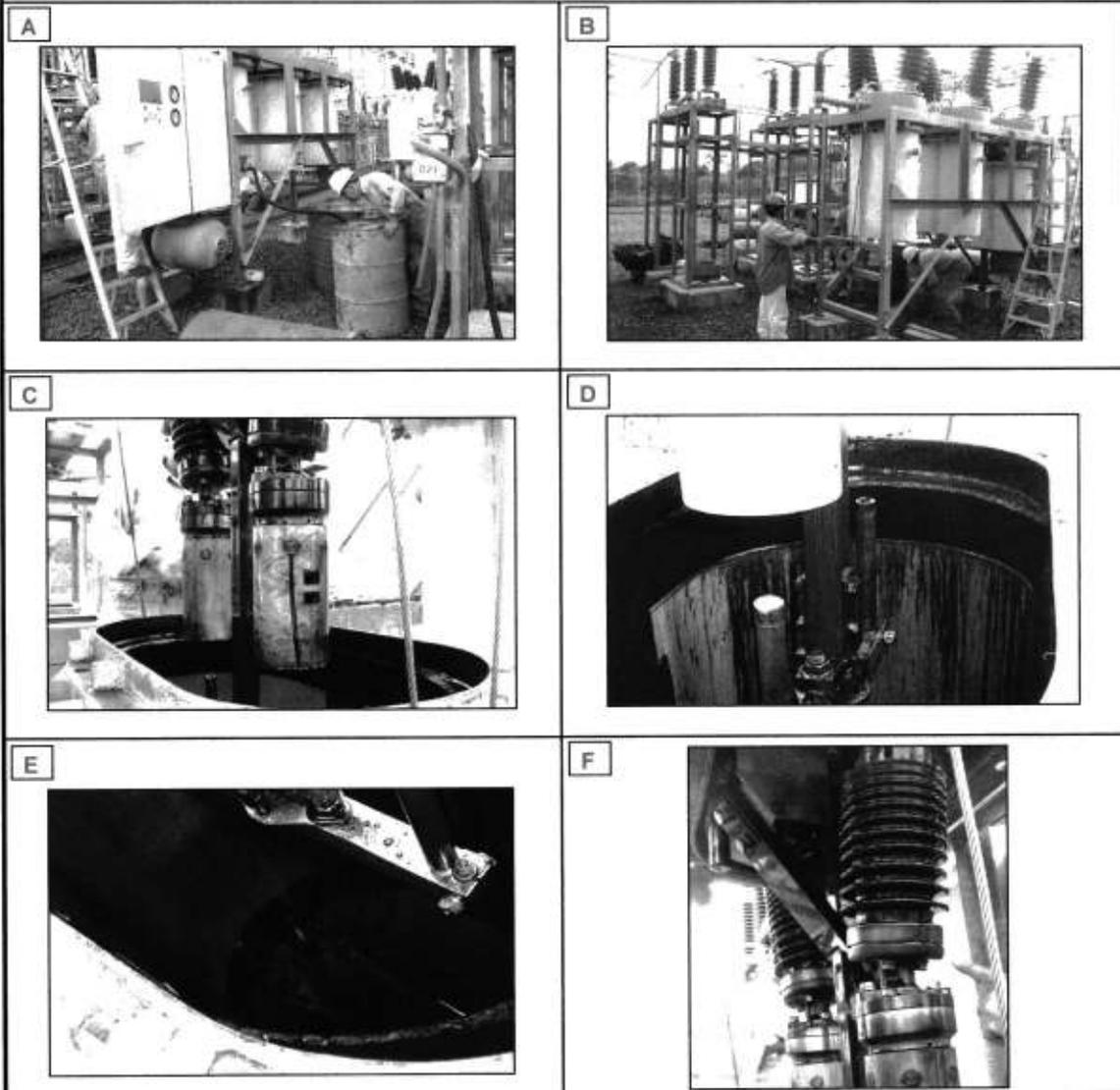
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.16.A,B,C,D,E,F

### TÍTULO:

INSPECCIÓN INTERNA DE INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO GVO  
(52-032 / BAHÍA "MILAGRO 2" DE S/E MILAGRO)



### DESCRIPCIÓN:

Inspección interna del interruptor 52-032, luego del análisis de los resultados de ensayos dieléctricos realizados:

A) Retiro de aceite mineral aislante de la cuba o tanque del primer polo del interruptor en referencia.

B) Descarga de la cuba o tanque del primer polo del interruptor en referencia.

C), F) Inspección de las rejillas de desionización (cámaras de interrupción) y aisladores. Presencia de carbón visible

D) Inspección de las cuchillas y su respectiva varilla de operación. Presencia de carbón visible

E) Inspección interna del tanque, especialmente del revestimiento aislante de sus paredes. Presencia de carbón visible

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.17.A,B,C,D,E,F

### TÍTULO:

INSPECCIÓN INTERNA DE INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO GVO  
(52-002 / BAHÍA "TRANSFERENCIA" DE S/E MILAGRO)

A



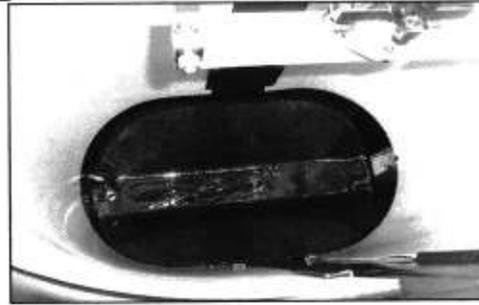
B



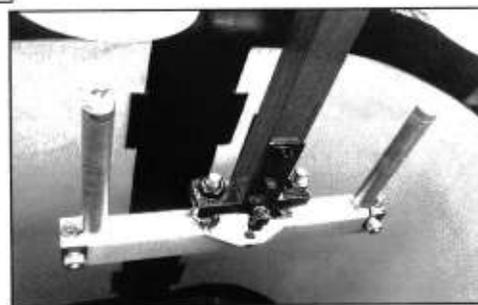
C



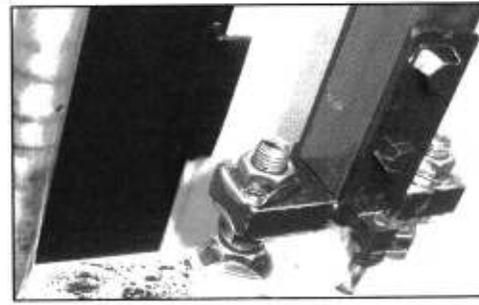
D



E



F



### DESCRIPCIÓN:

Inspección interna del interruptor 52-002, luego del análisis de los resultados de ensayos dieléctricos realizados:

A), B) Descarga de la cuba o tanque del primer polo del interruptor en referencia.

C) Inspección de las rejillas de desionización (cámaras de interrupción) y aisladores. Apariencia limpia

D) Inspección interna del tanque, especialmente del revestimiento aislante de sus paredes. Apariencia limpia

E), F) Inspección de las cuchillas y su respectiva varilla de operación. Presencia leve de carbón en superficie de brazo porta-cuchillas.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 5.18.A,B,C,D,E,F

**TÍTULO:**

MANTENIMIENTO DE LIMPIEZA INTERNA INTERRUPTOR TIPO GVO  
(52-032 / BAHÍA "MILAGRO 2" DE S/E MILAGRO)

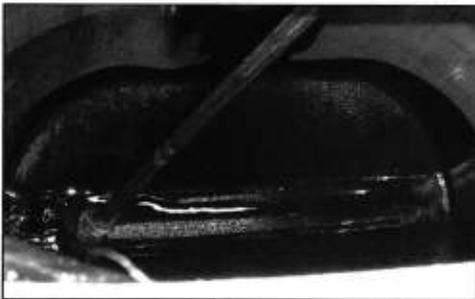
A



B



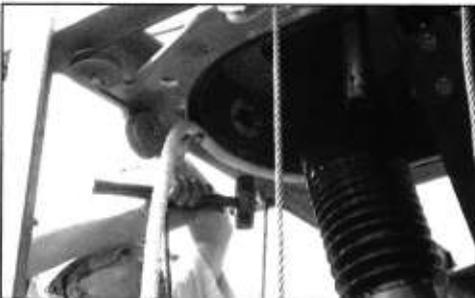
C



D



E



F



**DESCRIPCIÓN:**

Mantenimiento de limpieza interna del interruptor 52-032:

A), B) Lavado (retiro de carbón) de los aisladores soporte de las cámaras de interrupción, utilizando aceite aislante limpio.

C) Lavado y limpieza (retiro de carbón) de la parte interna de la cuba o tanque de cada polo.

D) Limpieza minuciosa de las cámaras de interrupción, utilizando tela pañal.

E) Instalación de empaque de prensa-estopa para la hermeticidad del tanque, evitando el ingreso de humedad.

F) Tratamiento de reacondicionamiento del aceite aislante del interruptor, mediante el uso de una máquina de termovacío.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

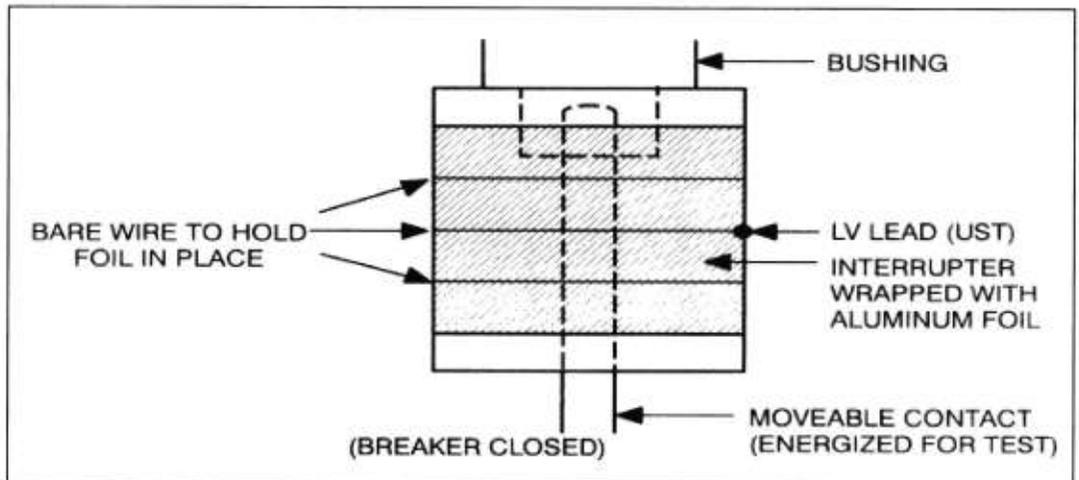


FIGURAS ANEXAS 5.19.A,B

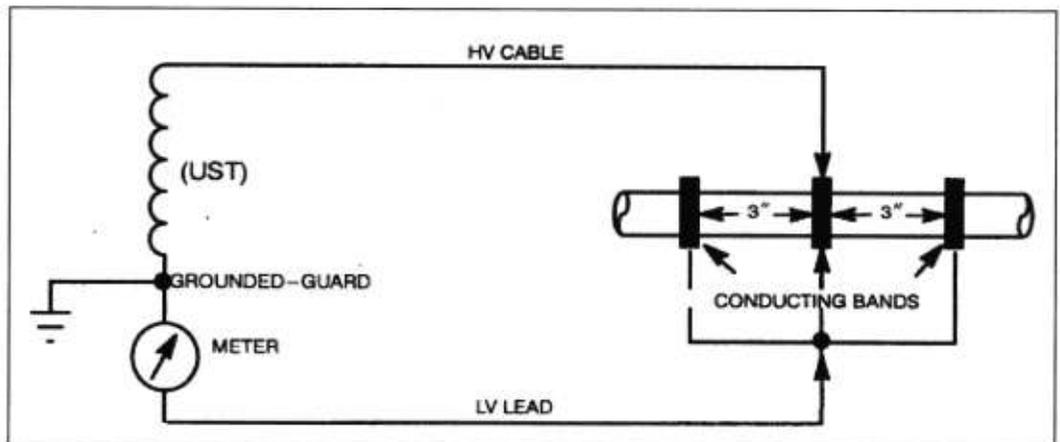
**TÍTULO:**

MÉTODOS DE ENSAYOS DE ELEMENTOS AISLANTES POR SEPARADO  
DE UN INTERRUPTOR TIPO GVO

A



B



**DESCRIPCIÓN:**

Métodos de ensayo para la determinación del factor de potencia (pérdidas en watts) de elementos aislantes por separado, que conforman el interruptor tipo G.V.O.

A) Método de ensayo de la cámara de interrupción. Seleccionar el modo UST en el instrumento

B) Método de ensayo de la varilla de operación. Seleccionar el modo UST en el instrumento

Estos ensayos se consideran especiales, aplicados con fines investigativos.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.20

**TÍTULO:**

EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6 ANALIZADO EN CASO V  
(S/E SALITRAL A 69KV)

<b>SIEMENS</b>	
Año de fabricación / N°	2005 / K 31250631
Modelo	8DN9-2
Tensión asignada	$U_i$ 72,5 kV
Tensión asignada al impulso de rayo	$U_p$ 325 kV
Tensión asignada de corta duración a frec.ind.CA	$U_s$ 140 kV
Frecuencia asignada	$f_r$ 60 Hz
<b>Corriente asignada</b>	
Barras colectoras	$I_r$ 3150 A
Bahía	$I_b$ 3150 A
<b>Corriente asignada de corta duración</b>	
	$I_s$ 50 kA
<b>Densidad asignada del cortacircuito</b>	
	$I_d$ 1 s
<b>Intensidad de potencia</b>	
Corriente asignada al cortacircuito de interrupción	$I_{cc}$ 50 kA
Factor del primer pico	$F_{pp}$ 1,3
Ciclo asignado de apertura	0-0,2y-0,0-0,0
Temperatura máxima asignada en operación de línea	$T_m$ 12,5 kA
<b>Indicaciones de peso SF6 por planta en estado de montaje</b>	
Peso del gas SF6	$m$ 2700 kg
Peso instalado del gas SF6	$M$ 711 kg
Temperatura ambiente	$t_a$ +5 ... +40 °C
Indicaciones sobre los gases de escape: SF6, SF4, SO2	
MADE IN GERMANY	



**DESCRIPCIÓN:**

Equipo encapsulado en gas SF6 fabricado por SIEMENS-Alemania (tipo 8DN9 para 69kV), analizado en Caso V. Instalado en nuevo patio de 69 kV en la Subestación "Salitral" (Prov. Del Guayas) perteneciente a la Zona Occidental del Sistema Nacional de Transmisión. Comprende de un esquema de doble barra colectoras compuesta por diez celdas o bahías individuales, de las cuales una cumple la función de acoplador de barras y las nueve restantes cumplen la función de posiciones de línea.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

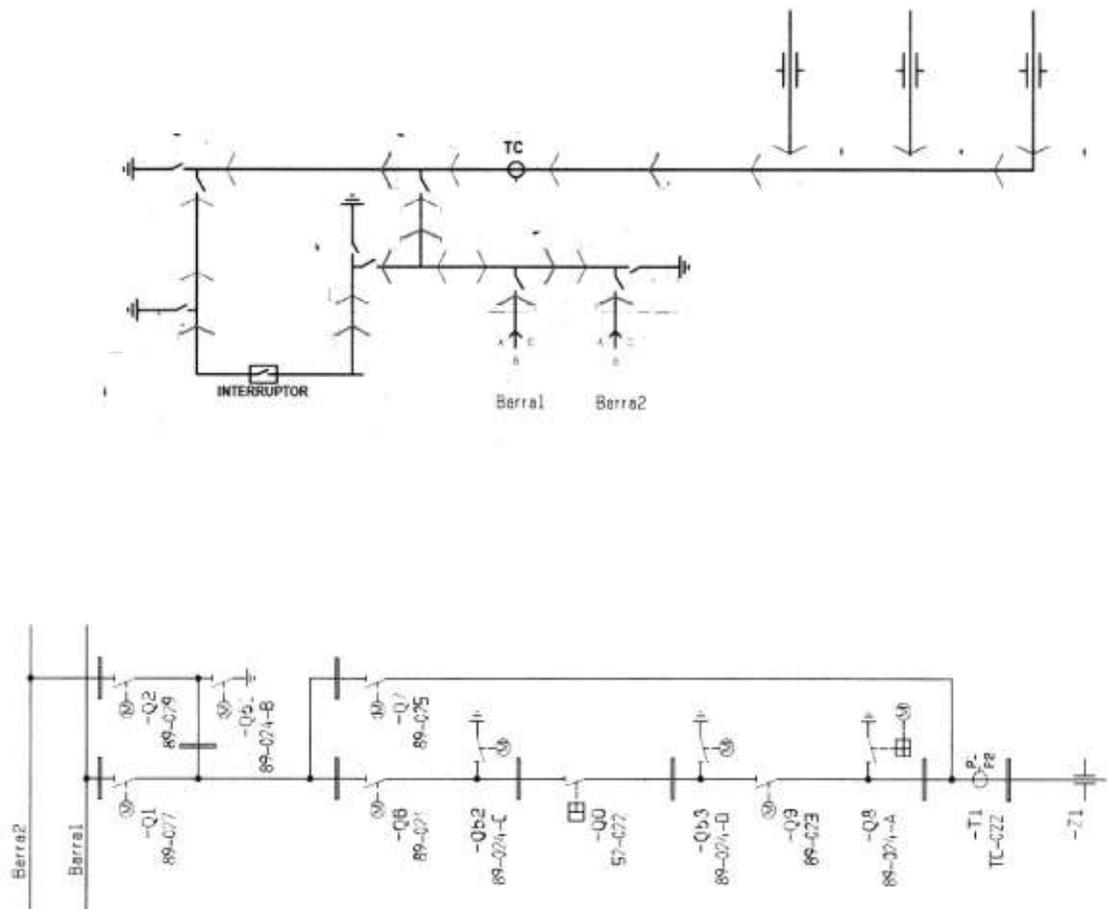
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.21.A

**TÍTULO:**

DISPOSICIÓN FÍSICA BAHÍA DE LÍNEA CON SALIDA MEDIANTE BUSHING'S  
EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6 S/E SALITRAL A 69KV (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

Disposición física de bahía de línea "ELECTROGUAYAS 2" con salida mediante bushing's, la misma que se compone de: 3 Seccionadores de línea de mando manual-motorizado (89-023, 89-021, 89-025), 2 Seccionadores selectores de barra de mando manual-motorizado (89-027 y 89-029), 1 Seccionador de tierra rápida de mando manual-motorizado con carga de resorte (89-024-A), 3 Seccionadores de tierra normal de mando manual-motorizado (89-024-B, 89-024-C, 89-024-D), 1 Interruptor tipo tanque muerto (52-022) y 1 Transformador de Corriente (x fase) de 4 núcleos secundarios (tipo toroidal).  
Dispone de siete compartimentos estancos (delimitados con franjas rojas) cuyo gas se monitorea mediante densímetros.  
Este esquema es similar para las otras bahías de línea que conforman el equipo encapsulado en referencia: "CATEG 1", "CATEG 2", "TRANSELECTRIC 1" y "TRANSELECTRIC 2".

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

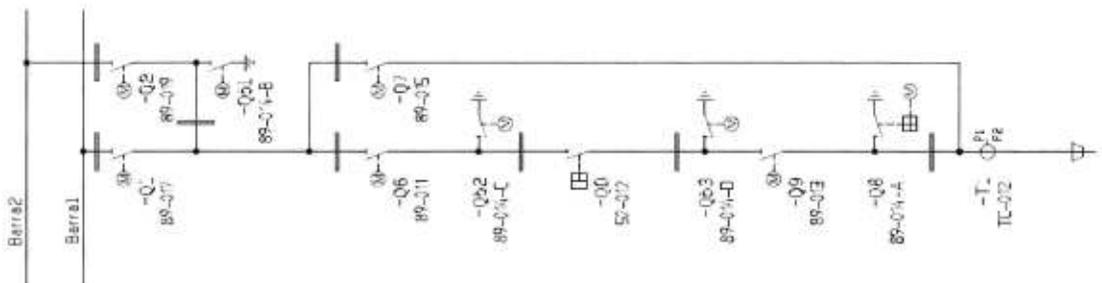
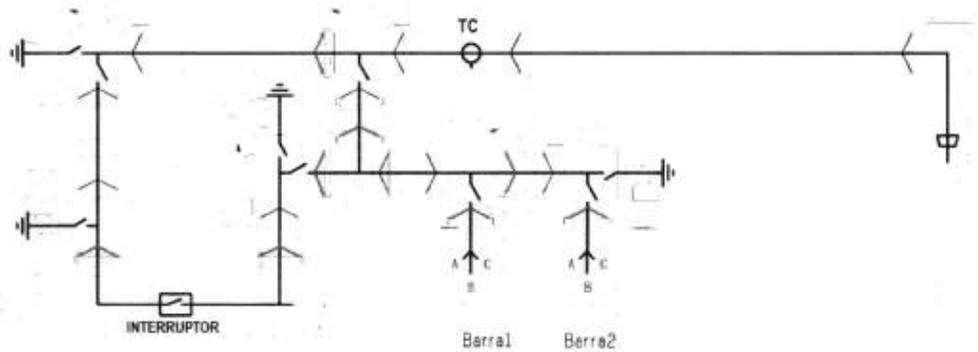
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.21.B

**TÍTULO:**

DISPOSICIÓN FÍSICA BAHÍA DE LÍNEA CON SALIDA MEDIANTE CABLE AISLADO  
(EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6 S/E SALITRAL A 69KV)



**DESCRIPCIÓN:**

Disposición física de bahía de línea "ELECTROGUAYAS 1" con salida mediante cable de potencia aislado, la misma que se compone de: 3 Seccionadores de línea de mando manual-motorizado (89-013, 89-011, 89-015), 2 Seccionadores selectores de barra de mando manual-motorizado (89-017 y 89-019), 1 Seccionador de tierra rápida de mando manual-motorizado con carga de resorte (89-024-A), 3 Seccionadores de tierra normal de mando manual-motorizado (89-024-B, 89-024-C, 89-024-D), 1 Interruptor tipo tanque muerto (52-022) y 1 Transformador de Corriente (por fase) de 4 núcleos. Esta dispone de siete compartimentos estancos (delimitados con franjas rojas) cuyo gas se monitorea mediante densímetro secundarios (tipo toroidal). Este esquema es similar para las otras bahías de línea que conforman el equipo encapsulado en referencia: "CATEG 3", "ELECTROQUIL 1", "ELECTROQUIL 2".

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

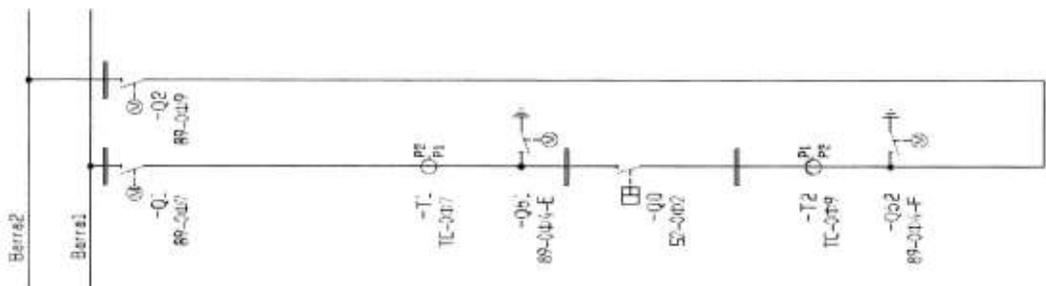
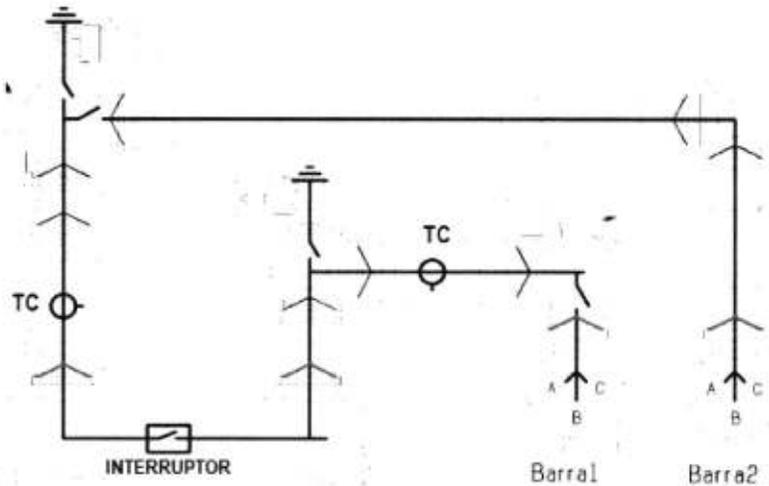
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.21.C

**TÍTULO:**

DISPOSICIÓN FÍSICA BAHÍA DE ACOPLADOR DE BARRAS  
(EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6 S/E SALITRAL A 69KV)



**DESCRIPCIÓN:**

Disposición física de la bahía de "ACOPLADOR DE BARRAS", la misma que se compone de: 2 Seccionadores selectores de barra de mando manual-motorizado (89-0Φ7 y 89-0Φ9), 2 Seccionadores de tierra normal de mando manual-motorizado (89-0Φ4-E y 89-0Φ4-F), 1 Interruptor tipo tanque muerto (52-0Φ2), 2 Transformadores de Corriente (por fase) de 2 núcleos secundarios (tipo toroidal).

Dispone de tres compartimentos estancos (delimitados con franjas rojas) cuyo gas se monitorea mediante densímetros.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

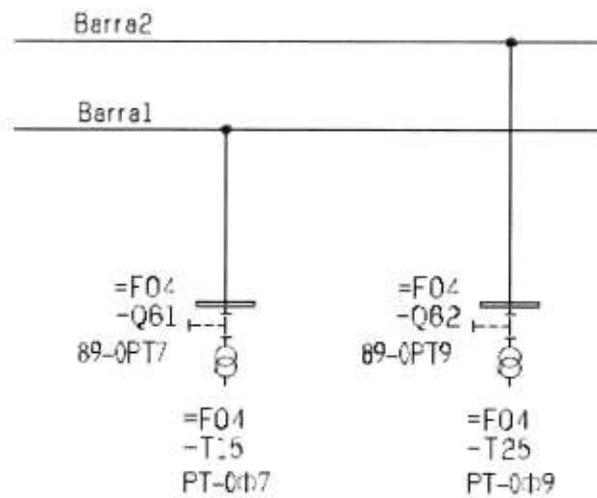
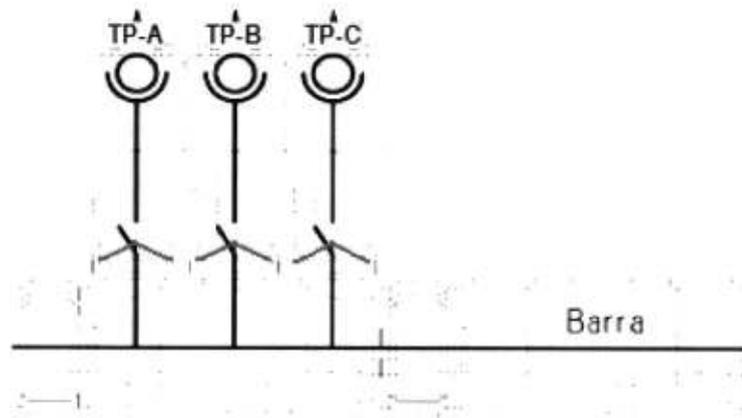
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.21.D

**TÍTULO:**

DISPOSICIÓN FÍSICA TRANSFORMADORES DE POTENCIAL DE BARRAS  
(EQUIPO ENCAPSULADO EN GAS SF6 S/E SALITRAL A 69KV)



**DESCRIPCIÓN:**

Disposición física de los transformadores de potencial de barras 1 y 2 (total tres por barra). El arrollamiento de cada uno de estos transformadores se encuentra estanco en un solo compartimento, y su conexión principal hacia las barras colectoras se realiza por intermedio de interruptores de manivela que permiten aislarlos exclusivamente para los ensayos de alta tensión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

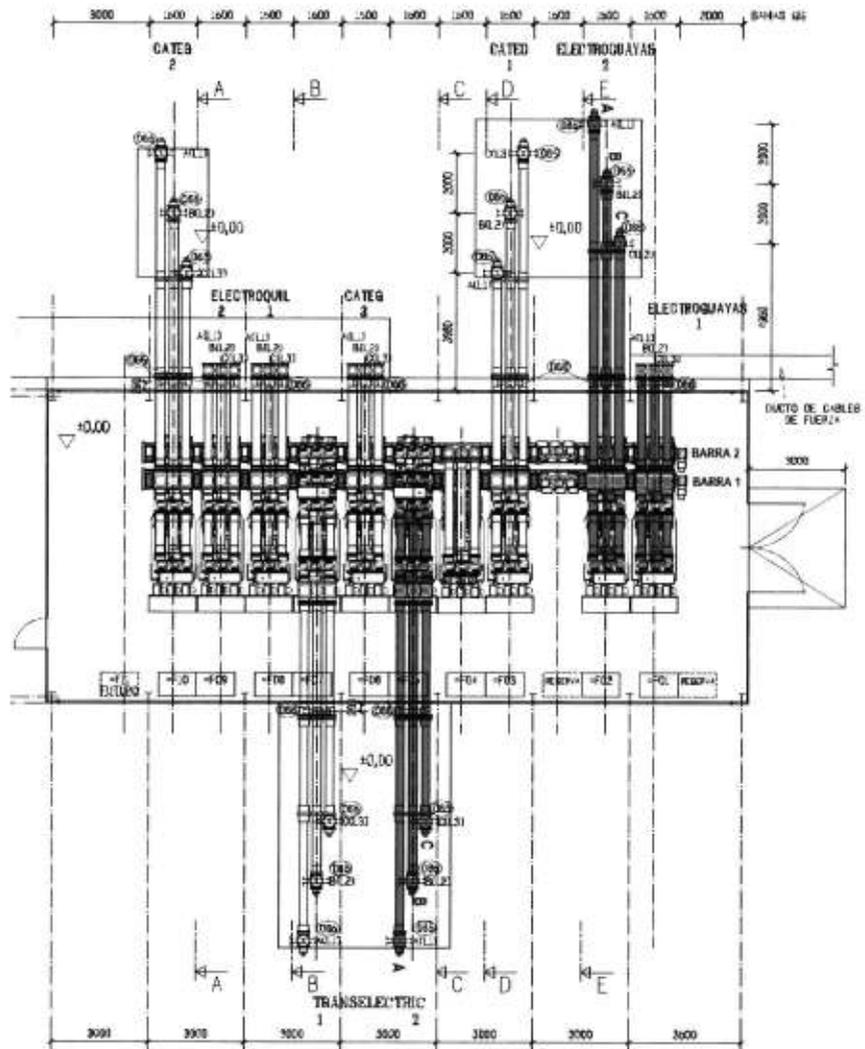
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.22.A

**TÍTULO:**

PRIMERA SECCIÓN SOMETIDA AL ANÁLISIS DE SU AISLAMIENTO  
EQUIPO ENCAPSULADO DE S/E SALITRAL A 69KV (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

Primera sección del equipo encapsulado en referencia, cuyo aislamiento se ha sometido al ensayo de alto voltaje con circuito de resonancia AC en serie de frecuencia variable. Esta sección involucra toda la barra 1 y las bahías de línea "TRANSELECTRIC 2" (punto de referencia), "ELECTROGUAYAS 1" y "ELECTROGUAYAS 2". Las otras secciones se mantuvieron aisladas del ensayo mediante la apertura de sus seccionadores selectores de barra 89-077 y 89-079. Los transformadores de potencial no fueron desconectados por que la frecuencia de ensayo era próxima a 80Hz. Se tomaron como referencia los terminales de los bushings de salida de la bahía "TRANSELECTRIC 2", para la aplicación del alto voltaje de ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

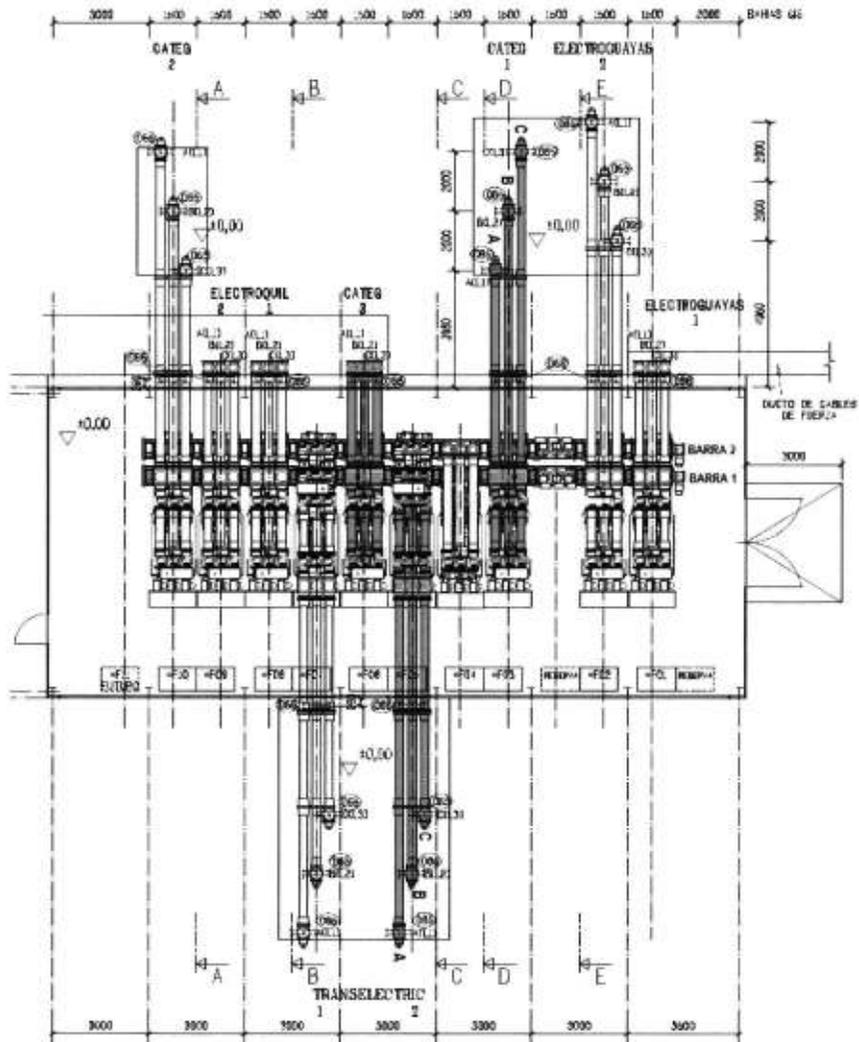
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.22.B

**TÍTULO:**

SEGUNDA SECCIÓN SOMETIDA AL ANÁLISIS DE SU AISLAMIENTO  
EQUIPO ENCAPSULADO DE S/E SALITRAL A 69KV (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

Segunda sección del equipo encapsulado en referencia, cuyo aislamiento se ha sometido al ensayo de alto voltaje con circuito de resonancia AC en serie de frecuencia variable. Esta sección involucra toda la barra 1 y las bahías de línea "TRANSELECTRIC 2" (punto de referencia), "CATEG 1" y "CATEG 3". Las otras secciones se mantuvieron aisladas del ensayo mediante la apertura de sus seccionadores selectores de barra 89-077 y 89-079.

Los transformadores de potencial no fueron desconectados por que la frecuencia de ensayo era próxima a 80Hz.

Se tomaron como referencia los terminales de los bushings de salida de la bahía "TRANSELECTRIC 2", para la aplicación del alto voltaje de ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

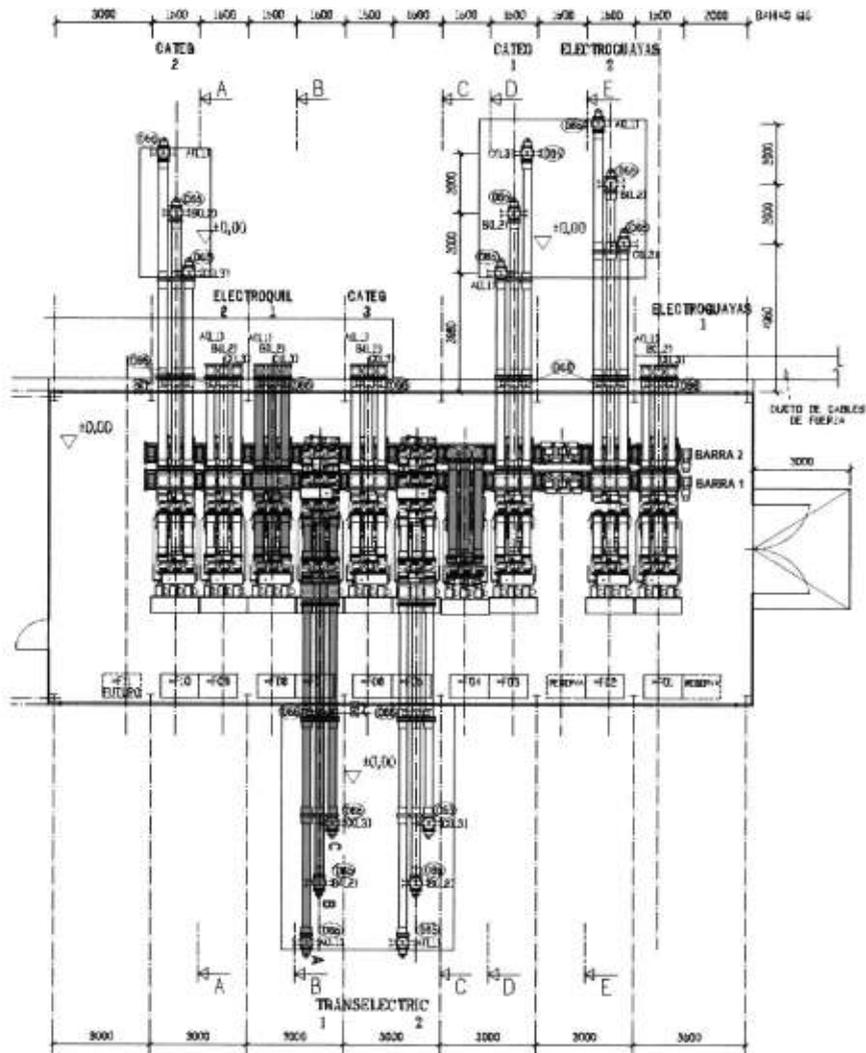
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.22.C

**TÍTULO:**

TERCERA SECCIÓN SOMETIDA AL ANÁLISIS DE SU AISLAMIENTO  
EQUIPO ENCAPSULADO DE S/E SALITRAL A 69KV (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

Tercera sección del equipo encapsulado en referencia, cuyo aislamiento se ha sometido al ensayo de alto voltaje con circuito de resonancia AC en serie de frecuencia variable. Esta sección involucra ambas barras 1 y 2, la bahía del "ACOPLADOR", las bahías de línea "TRANSELECTRIC 1" (punto de referencia) y "ELECTROQUIL 1". Las otras secciones se mantuvieron aisladas del ensayo mediante la apertura de sus seccionadores selectores de barra 89-077 y 89-079. Los transformadores de potencial no fueron desconectados por que la frecuencia de ensayo era próxima a 80Hz. Se tomaron como referencia los terminales de los bushings de salida de la bahía "TRANSELECTRIC 1", para la aplicación del alto voltaje de ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

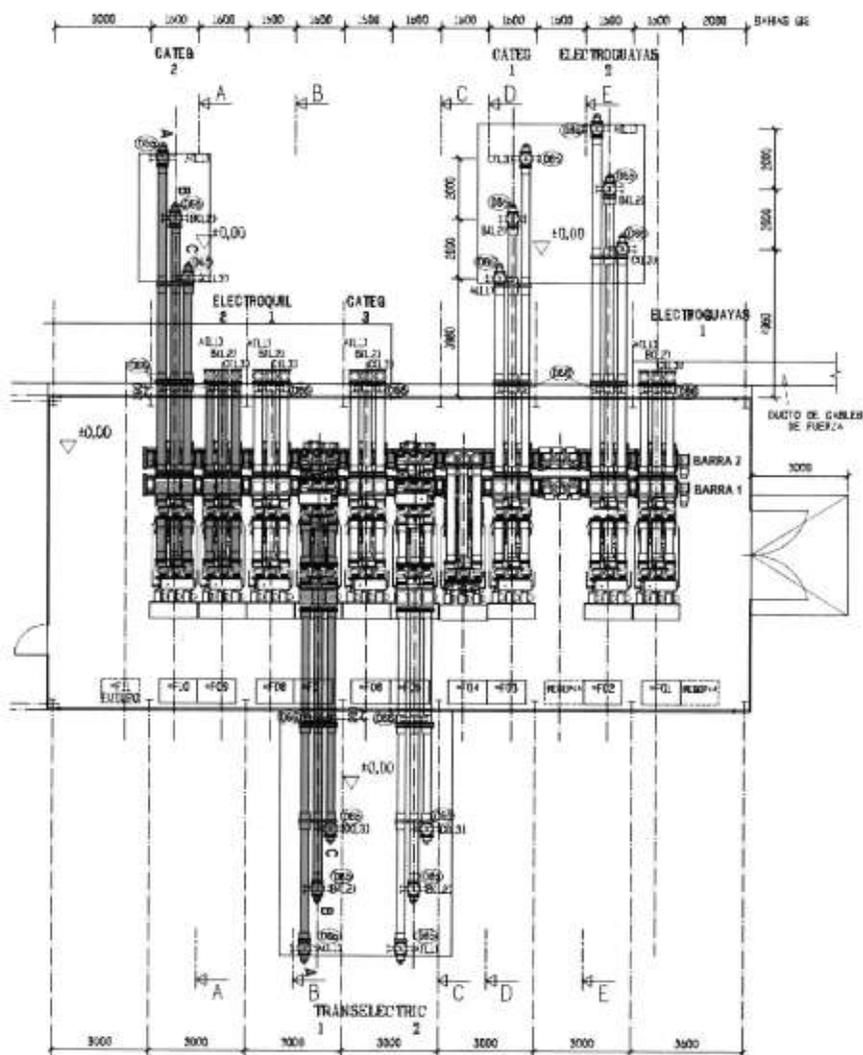
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.22.D

**TÍTULO:**

CUARTA SECCIÓN SOMETIDA AL ANÁLISIS DE SU AISLAMIENTO  
EQUIPO ENCAPSULADO DE S/E SALITRAL A 69KV (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

Tercera sección del equipo encapsulado en referencia, cuyo aislamiento se ha sometido al ensayo de alto voltaje con circuito de resonancia AC en serie de frecuencia variable. Esta sección involucra toda la barra 2 y las bahías de línea "TRANSELECTRIC 1" (punto de referencia), "CATEG 2" y "ELECTROQUIL 2". Las otras secciones se mantuvieron aisladas del ensayo mediante la apertura de sus seccionadores selectores de barra 89-077 y 89-079.

Los transformadores de potencial no fueron desconectados por que la frecuencia de ensayo era próxima a 80Hz.

Se tomaron como referencia los terminales de los bushings de salida de la bahía "TRANSELECTRIC 1", para la aplicación del alto voltaje de ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

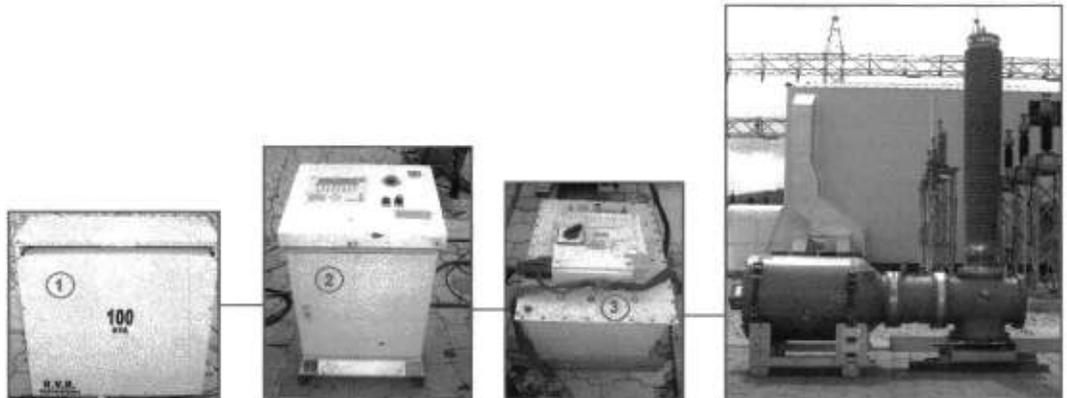
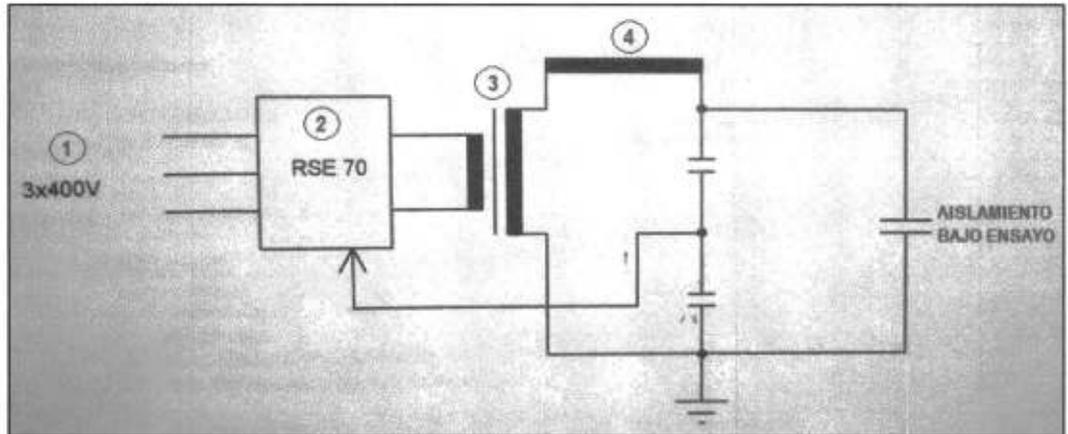
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.23

**TÍTULO:**

IMPLANTACIÓN EN CAMPO DEL CIRCUITO DE ENSAYO DIELECTRICO  
DE ALTA TENSIÓN CON FRECUENCIA VARIABLE (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

Implantación en campo del circuito de ensayo de alta tensión, con resonancia AC en serie de frecuencia variable, donde:

- 1) Transformador de voltaje 3Φ, 100KVA, que permitió transformar el voltaje de 208Vac de los servicios auxiliares de la subestación a 400Vac requeridos por la unidad de control RSE 70.
- 2) Unidad RSE 70 de control y alimentación, para ajuste de frecuencia y voltaje de ensayo.
- 3) Transformador excitador para excitación del circuito de resonancia (29KVA, 19KV, 1.5 Amp.)
- 4) Reactor de alta tensión para la generación de altos voltajes de ensayo (720 Henrios)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 5.24.A,B,C

### TÍTULO:

MÓDULO DE CONTROL Y VARIADOR DE FRECUENCIA "RSE70"  
PRINCIPAL COMPONENTE DEL CIRCUITO DE ENSAYO (CASO V)

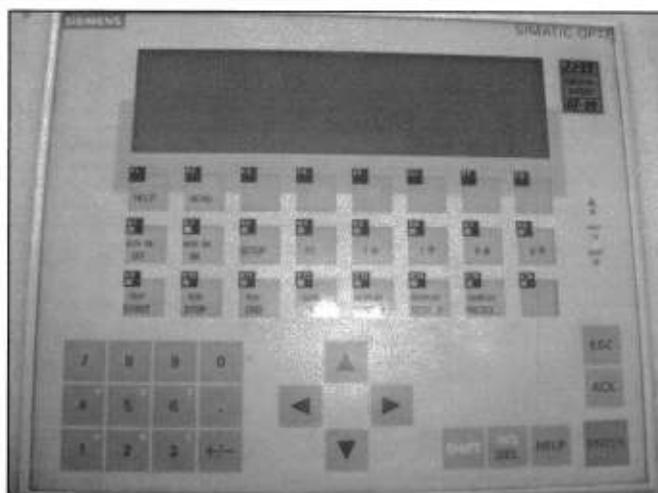
A



B



C



### DESCRIPCIÓN:

Características del módulo de control y variador de frecuencia del circuito ensayo de alta tensión "RSE 70":

- A) Vista frontal del módulo RSE 70, donde se aprecia la pantalla de ingreso de parámetros y mando del ensayo, el pulsador de paro de EMERGENCIA, el pulsador de apagado normal y llave para encendido del módulo.
- B) Vista posterior del módulo RSE 70, donde se aprecian: los puertos varios para conexión de medidor de descargas parciales durante el ensayo y comunicación con computadora para descarga de resultados, los plugs tanto para recepción de alimentación de 400Vac (3Φ) proveniente de la fuente principal, como para la entrega de voltaje de ensayo a frecuencia variable hacia el transformador excitador.
- C) Pantalla de ingreso de parámetros, visualización de resultados y mando del ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 5.25.A,B,C

**TÍTULO:**

DATOS DE PLACA DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL CIRCUITO DE ENSAYO  
DIELÉCTRICO DE ALTA TENSIÓN (CASO V)

**A**



RVR TRANSFORMADORES			
TRANSFORMADOR TIPO SECO			
FASES:	KVA:	S/N:	
ENTRADA:	240	V.	2200
SALIDA:	400	V.	2200
Uz	2.2	% 75°C	F: 60 Hz Año: 2007
CONEXION	VV		
PESO TOTAL:	295	Kg	REFERENCIA 002

**B**



Hersfeller	Guth GmbH	Gerat	NT293-0199
Serien-Nr.	220101/2002301/1	Leistung	29 kVA
Ausgangs- spannung	19 kV	Ausgangs- strom	1,5 A
Isolation	28,5 kV	Netz	2x 550 V / 60 Hz

**C**



Resonanzdrossel		RITZ	
Typ	STED 1/680	Fabr.Nr.	727139
Baujahr	2001	L =	720 H
550/680/1050	kV	1.5 A	15'
E	50...250	2.0 A	3'
Gewicht:	780 kg	1.0 A	60'
SF <sub>6</sub> -Gasfüllung	NICHT EVAKUIEREN !		
	max. Fülldruck	D <sub>0</sub> = 5	bar 20°C
	min. Betriebsdruck	D <sub>0</sub> = 4	bar 20°C
	Transportdruck	D <sub>0</sub> = 0,2	bar 20°C

**DESCRIPCIÓN:**

Principales componentes del circuito de ensayo de alta tensión, con resonancia AC en serie de frecuencia variable:

A) Datos de placa del transformador principal de alimentación del circuito de ensayo.

B) Datos de placa del transformador excitador.

C) Datos de placa del reactor de alto voltaje.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

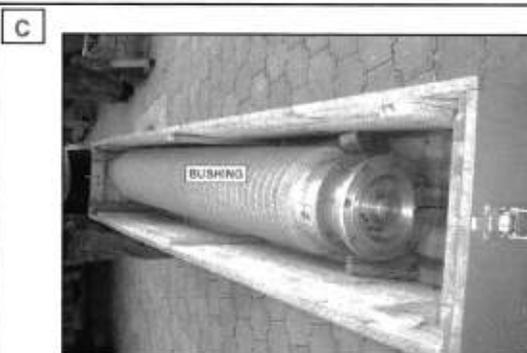
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 5.26.A,B,C,D,E,F

**TÍTULO:**

ENSAMBLAJE DEL EQUIPO REACTOR EN CAMPO PARA ENSAYO DIELECTRICO DE EQUIPO ENCAPSULADO S/E SALITRAL A 69KV (CASO V)



**DESCRIPCIÓN:**

- A) Inspección y limpieza interna del equipo reactor.
- B) Ensamblaje del equipo reactor.
- C) Bushing tipo hueco, aislado internamente con gas SF6. Para aplicación de alto voltaje generado.
- D) Erección de bushing para instalación en equipo reactor.
- E) Instalación de contacto principal tipo barra en conductor interno del bushing.
- F) Secado interno y llenado con gas SF6 del equipo reactor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

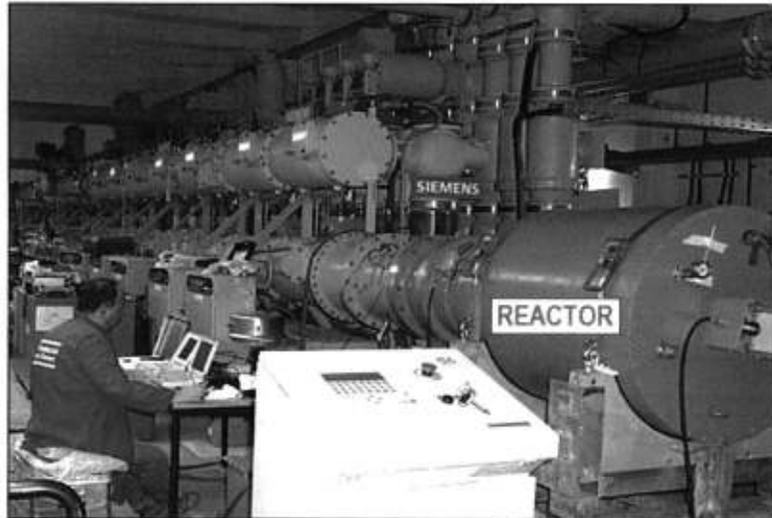
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.27

**TÍTULO:**

ACOPLAMIENTO DIRECTO DEL EQUIPO REACTOR AL EQUIPO ENCAPSULADO  
PARA EL ENSAYO DIELECTRICO DE ALTA TENSION



**DESCRIPCIÓN:**

Método alternativo de acoplamiento del equipo reactor del circuito de resonancia, a las barras del equipo encapsulado cuyo aislamiento requiere ser analizado.

A diferencia del circuito implantado para el análisis del caso en referencia, no se utiliza un bushing y la conexión del reactor al equipo encapsulado se lo realiza a través de un compartimento especial de acoplamiento que une el contacto principal tipo esfera a las tres barras colectoras del espécimen bajo ensayo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 5.28.A,B,C

**TÍTULO:**

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO  
EQUIPO ENCAPSULADO A 69KV DE S/E "SALITRAL" (CASO V)

A



B



C



**DESCRIPCIÓN:**

A) Aplicación del ensayo de alta tensión de resonancia AC con frecuencia variable para el análisis del aislamiento del equipo encapsulado en gas SF6 a 69kV, instalado en la Subestación "Salitral".

B) Conexión de cable #14 en el bushing del equipo reactor, para aplicación del alto voltaje de ensayo a las entradas del equipo encapsulado.

C) Conexión de cable #14 en los bushing's de la bahía TRANSELECTRIC 1 para recepción del alto voltaje de ensayo proveniente del bushing del reactor del circuito de resonancia.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

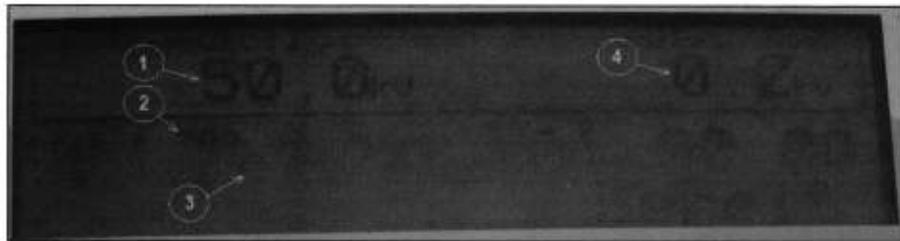


FIGURA ANEXA 5.29.A,B,C,D

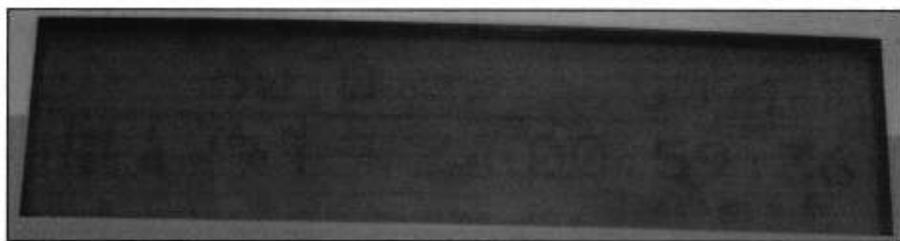
**TÍTULO:**

LECTURAS DEL PRIMER ENSAYO REALIZADO (SECCIÓN 1 - POLO "A")  
EQUIPO ENCAPSULADO A 69KV DE S/E "SALITRAL" (CASO V)

A



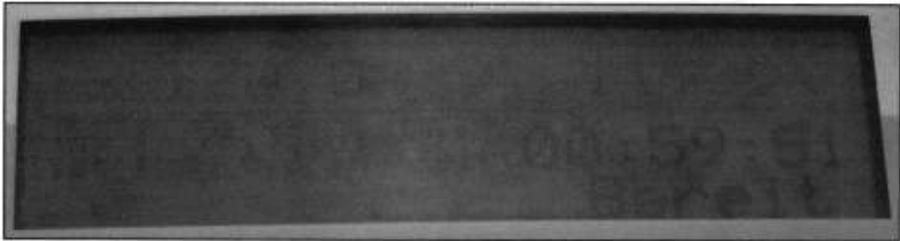
B



C



D



**DESCRIPCIÓN:**

- A) Pantalla inicial de ingreso de parámetros, donde 1) Primer voltaje requerido (parámetro ingresado), 2) Frecuencia máx. inicial aplicada por el equipo (300Hz), 3) Corriente inicial presente (0 Amp.) y 4) Voltaje inicial previo a su incremento.
- B) Primera lectura de resultados, donde: 50.1kV es el voltaje inyectado durante 15 minutos, 76.36Hz es la frecuencia de resonancia y 0,1 Amp. la corriente de fuga presente en el aislamiento con el respectivo voltaje de ensayo aquí aplicado.
- C) Segunda lectura de resultados, donde: 72.1kV es el voltaje inyectado durante 3 minutos, 76.36Hz es la frecuencia de resonancia y 0,2 Amp. la corriente de fuga presente en el aislamiento con el respectivo voltaje de ensayo aquí aplicado.
- D) Tercera lectura de resultados, donde: 119.9kV es el voltaje inyectado en ese momento, 76.36Hz es la frecuencia de resonancia y 0,3 Amp. la corriente de fuga presente en el aislamiento con el respectivo voltaje de ensayo aquí aplicado.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

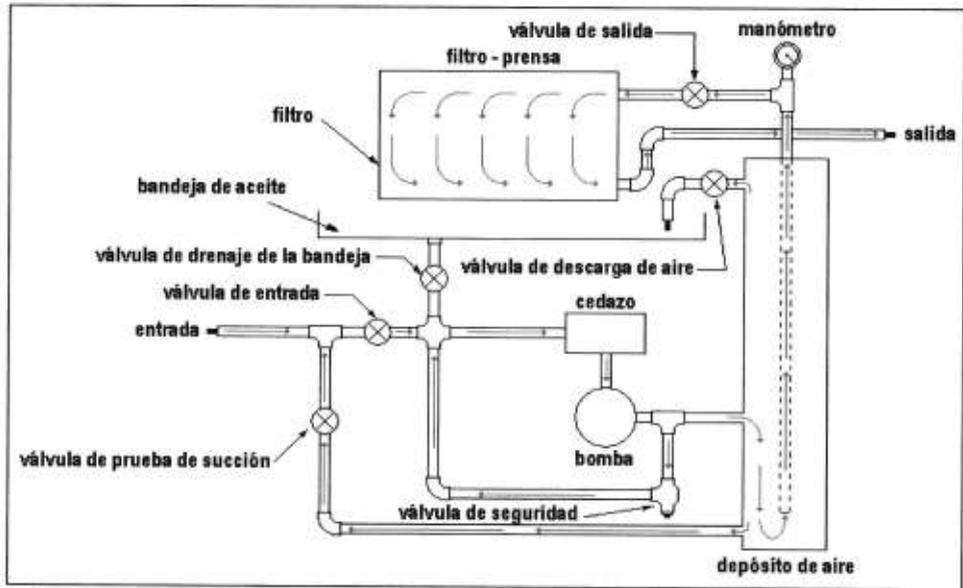


FIGURAS ANEXAS 6.1.A,B,C,D

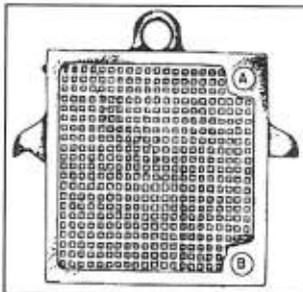
TÍTULO:

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA MÁQUINA DE FILTRO-PRENSA

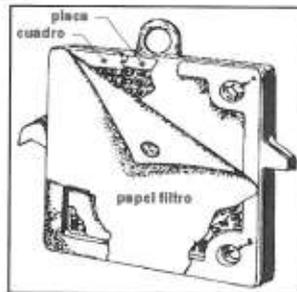
A



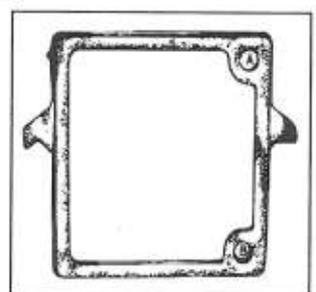
B



C



D



DESCRIPCIÓN:

A) Diagrama esquemático de una máquina de filtro-prensa, utilizada para el reacondicionamiento del aceite aislante de un transformador de potencia.

B) Placa o rejilla metálica que forma parte del filtro

C) Conjunto de filtro-prensado (placa-cuadro-papel filtro)

D) Cuadro o bastidor que forma parte del filtro

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

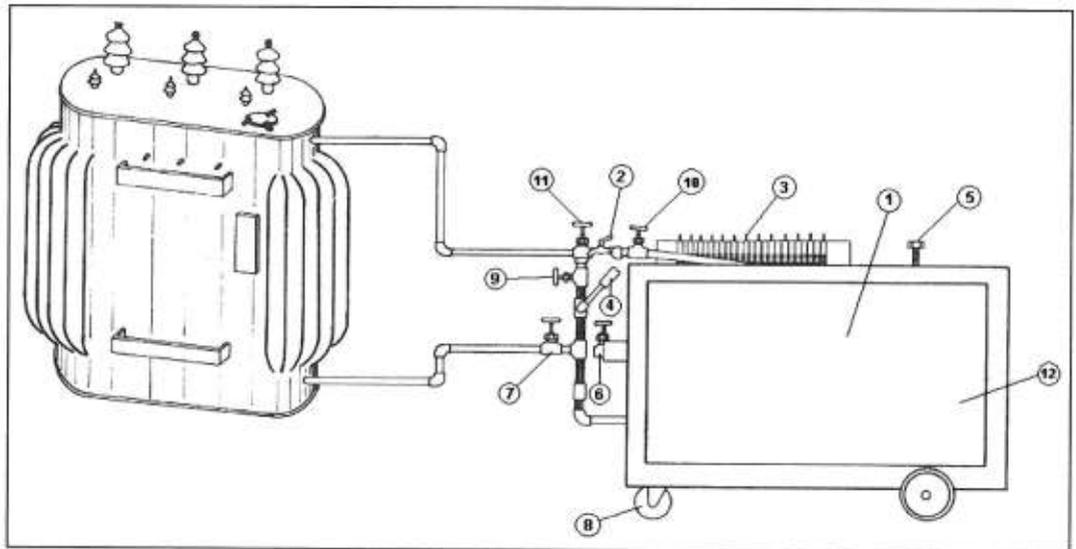
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.2

**TÍTULO:**

CONEXIÓN ENTRE UNA MÁQUINA DE FILTRO-PRESA Y UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama de conexión entre una máquina de filtro-prensa y un transformador de potencia cuyo aceite dieléctrico será reacondicionado. Donde, sus principales componentes son:

- |   |                         |
|---|-------------------------|
| 1) Bandeja recolectora de aceite        | 7) Válvula de entrada   |
| 2) Llave para toma de muestra de aceite | 8) Rueda giratoria      |
| 3) Conjunto de filtro-prensado          | 9) Válvula de by-pass   |
| 4) Manómetro                            | 10) Válvula de mezclado |
| 5) Tornillo de purga                    | 11) Válvula de salida   |
| 6) Válvula de admisión                  | 12) Tanque de mezclado  |

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

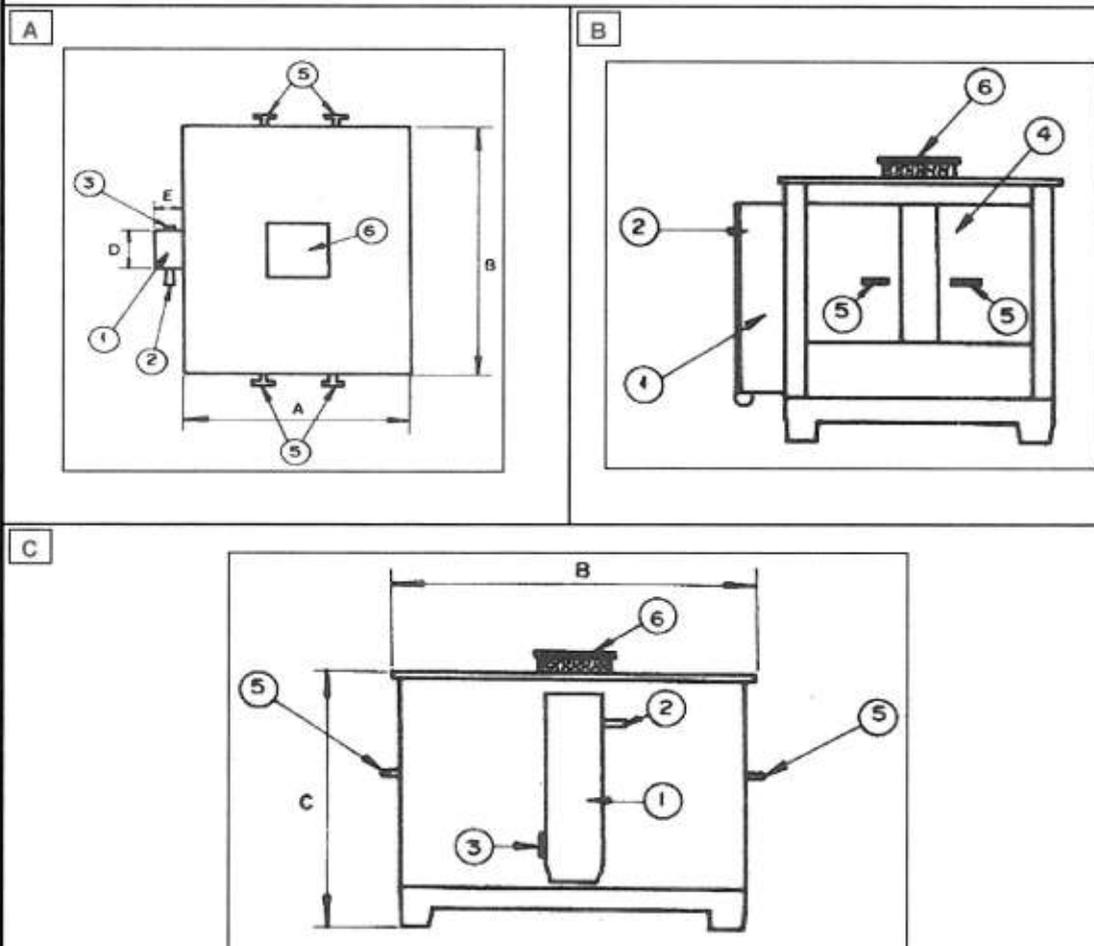
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 6.3.A,B,C

TÍTULO:

ESTUFA PARA SECADO DE PAPEL FILTRO



DESCRIPCIÓN:

A) Vista superior de una estufa para secado del papel filtro

B) Vista frontal de una estufa para secado del papel filtro

C) Vista lateral de una estufa para secado del papel filtro

Donde sus principales partes constitutivas se detallan a continuación:

(1) Caja de control

(2) Interruptor

(3) Puerto de alimentación 110Vac / 220 Vac

(4) Puertas de los compartimentos

(5) Picaporte de las puertas

(6) Chimenea de exhaustación espontánea

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

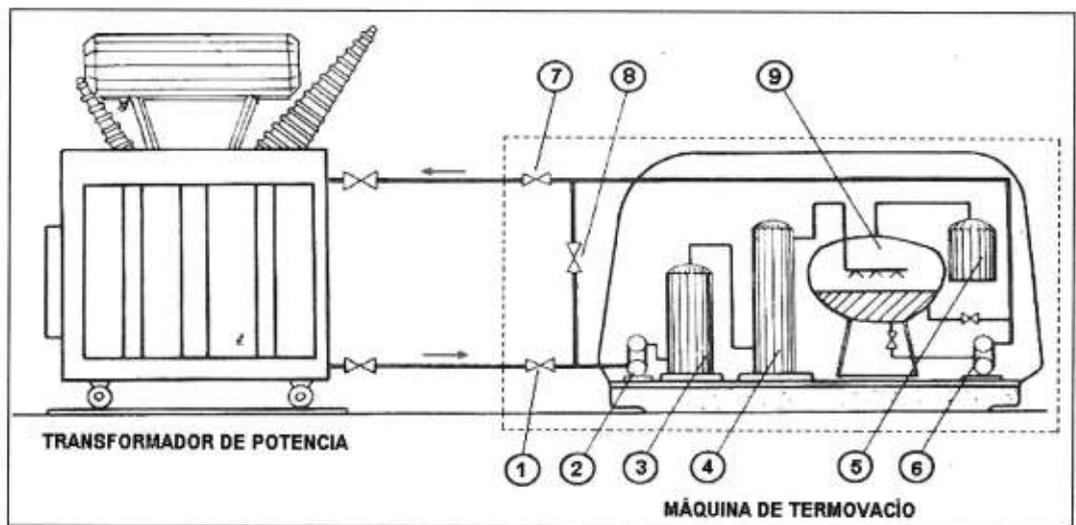




FIGURA ANEXA 6.5

**TÍTULO:**

ESQUEMA DE CONEXIÓN PARA REACONDICIONAMIENTO DEL ACEITE EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA DESENERGIZADO



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama de conexión entre una máquina de termovacio y un transformador de potencia DESENERGIZADO, cuyo aceite dieléctrico será reacondicionado. Donde:

- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| 1) Válvula de entrada de aceite a la máquina | 6) Bomba de descarga o salida  |
| 2) Bomba de succión o entrada                | 7) Válvula de salida de aceite |
| 3) Grupo de calefacción                      | 8) Válvula de by-pass          |
| 4) Filtro                                    | 9) Cámara de vacío             |
| 5) Bomba de vacío                            |                                |

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

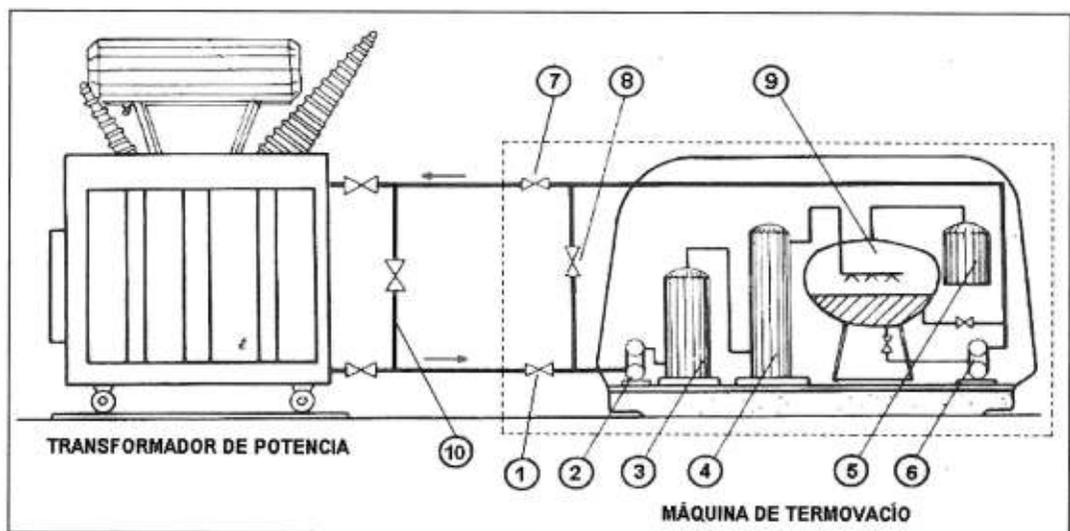
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.6

**TÍTULO:**

ESQUEMA DE CONEXIÓN PARA REACONDICIONAMIENTO DEL ACEITE EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA ENERGIZADO



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama de conexión entre una máquina de termovacío y un transformador de potencia ENERGIZADO, cuyo aceite dieléctrico será reacondicionado. Donde:

- |  |   |
|--|---|
| 1) Válvula de entrada de aceite a la máquina | 6) Bomba de descarga o salida               |
| 2) Bomba de succión o entrada                | 7) Válvula de salida de aceite              |
| 3) Grupo de calefacción                      | 8) Válvula de by-pass interno de la máquina |
| 4) Filtro                                    | 9) Cámara de vacío                          |
| 5) Bomba de vacío                            | 10) By-pass externo                         |

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

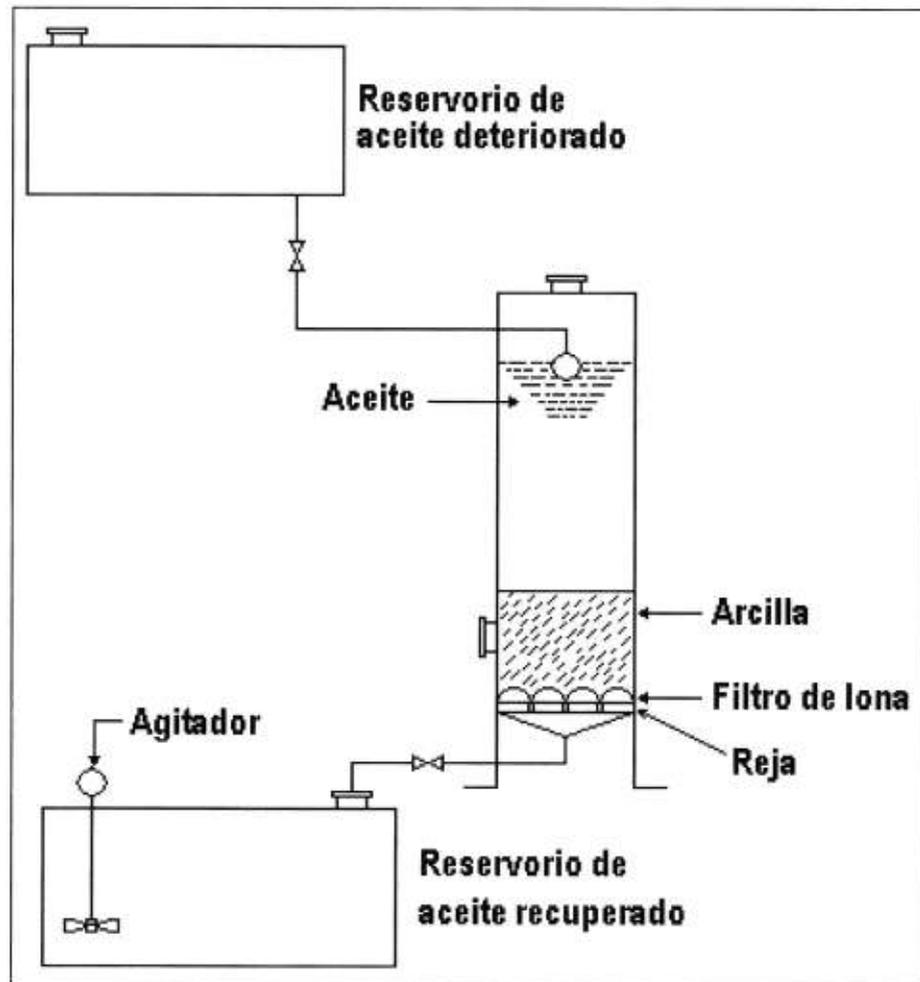
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.7

**TÍTULO:**

ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL MÉTODO DE PERCOLACIÓN POR GRAVEDAD



**DESCRIPCIÓN:**

Esquema de instalación para recuperación del aceite aislante deteriorado, aplicando el método de percolación por gravedad.

Aquí, el aceite fuerza su paso a través del adsorbente por su propio peso a través de la columna de percolación siendo finalmente almacenado en un reservorio. El volumen de aceite percolado por hora es de 39 litros por 0,1m<sup>2</sup> de área de adsorbente.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

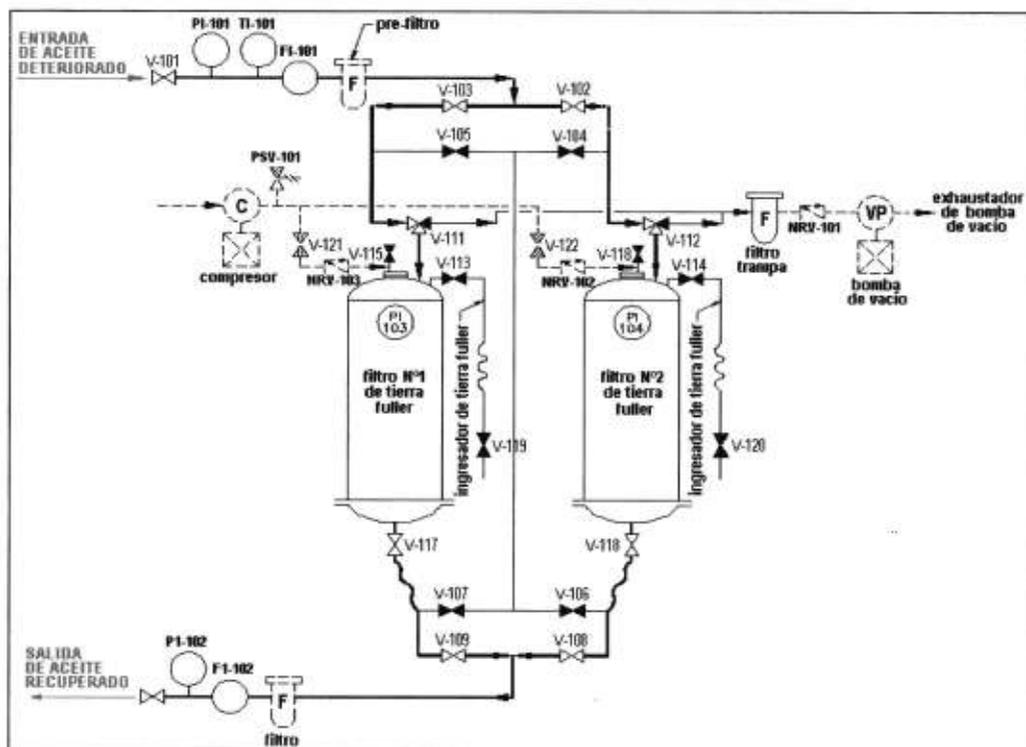
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.8

**TÍTULO:**

ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL MÉTODO DE PERCOLACIÓN POR PRESIÓN



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama esquemático de un sistema de filtrado a presión con dos columnas de tierra fuller (marca ENERVAC), utilizado para la recuperación del aceite aislante mediante su acople con la máquina de termovacío. Donde:

<b>C:</b>	Compresor
<b>F:</b>	Filtro
<b>FI:</b>	Indicador de flujo
<b>NRV:</b>	Válvula de un sentido

<b>PI:</b>	Indicador de presión
<b>PSV:</b>	Válvula de alivio de presión
<b>V:</b>	Válvula
<b>VP:</b>	Bomba de vacío

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.9

TÍTULO:

MUESTRAS DE TIERRA FULLER



DESCRIPCIÓN:

Aspecto físico de la tierra fuller en estado de saturación y previamente a ser usada.

---

---

---

---

---

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

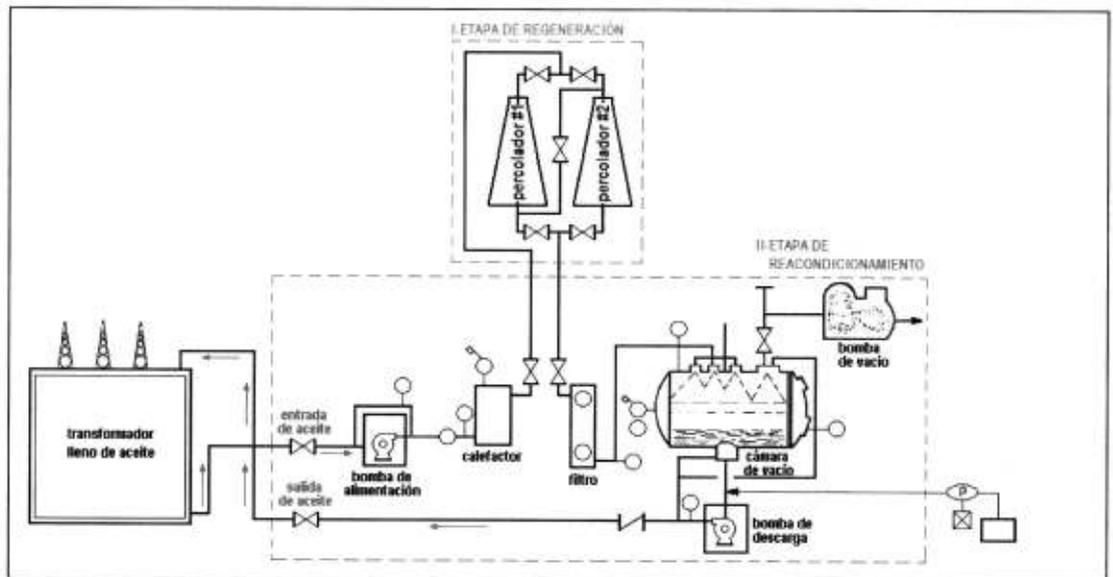
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.10

**TÍTULO:**

ESQUEMA DE IMPLANTACIÓN PARA REGENERACIÓN DEL ACEITE EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA



**DESCRIPCIÓN:**

Esquema de implantación para la regeneración del aceite aislante en un transformador de potencia (Equipo de percolación acoplado a la máquina de termovacio). Este esquema se divide en tres etapas que son:

- I) Etapa de Regeneración - Donde el aceite aislante luego de ser calentado a su temperatura de punto de anilina (mediante los calefactores de la máquina de termovacio), es ingresado a presión dentro de los percoladores de material adsorbente (por lo general tierra fuller)
- II) Etapa de Reacondicionamiento - Donde el aceite aislante luego de ser filtrado en los percoladores, retorna a la máquina de termovacio para mediante un filtro de partículas ingresar a la cámara de vacío para su desgasificación.
- III) Etapa de Aplicación de Inhibidor - Donde el aceite aislante luego de ser desgasificado y previamente a su retorno al transformador, recibe cierta cantidad de inhibidor (que pudo ser perdido en la etapa de regeneración).

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

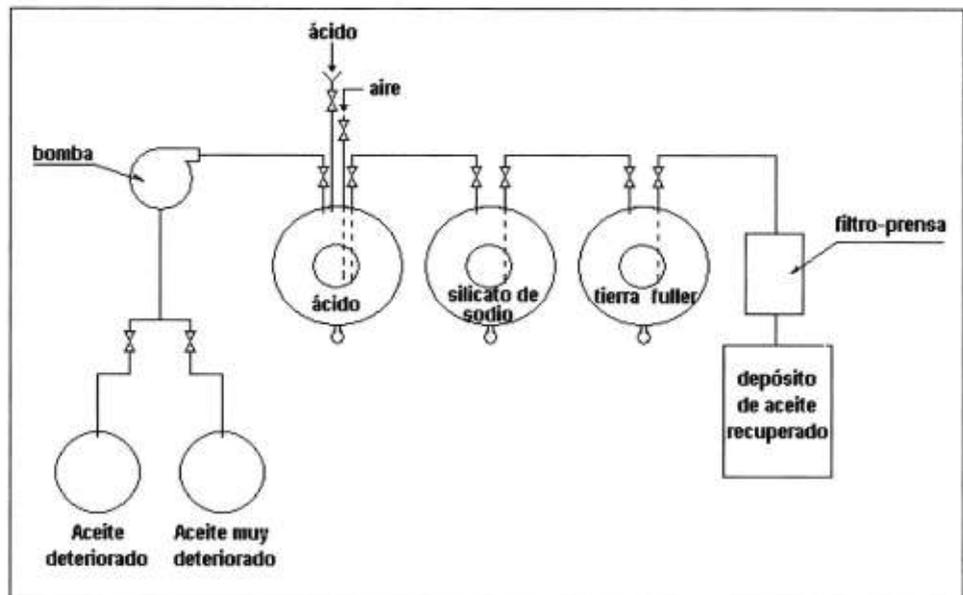


FIGURAS ANEXAS 6.11.A,B

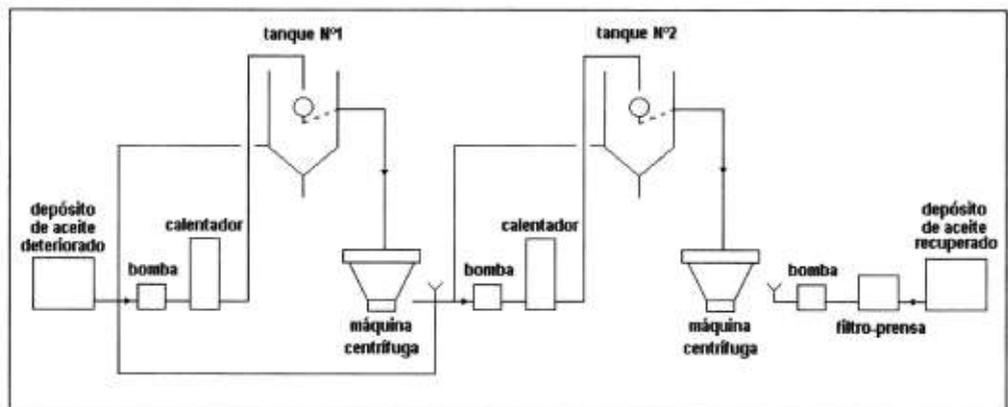
TÍTULO:

ESQUEMAS DE INSTALACIÓN DE LOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO QUÍMICO PARA REGENERACIÓN DEL ACEITE AISLANTE

A



B



DESCRIPCIÓN:

A) Esquemas de instalación para la recuperación del aceite aislante por tratamiento químico con ácido sulfúrico

B) Esquemas de instalación para la recuperación del aceite aislante por tratamiento químico con trifosfato de sodio.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

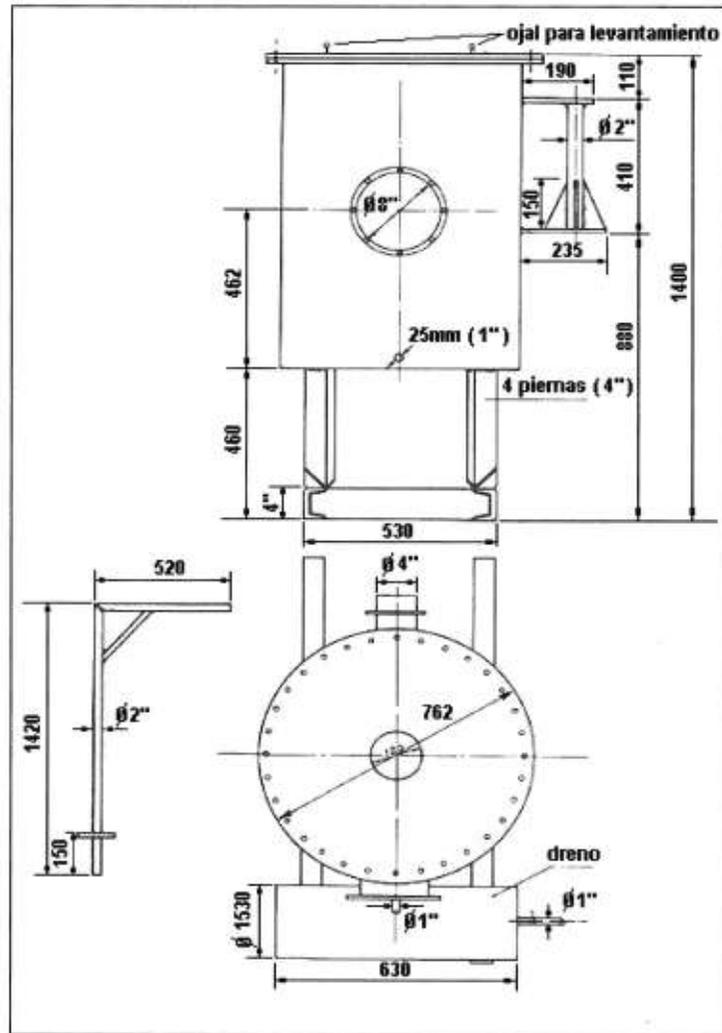
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.12.A

TÍTULO:

BOMBA CRIOGÉNICA  
(VISTA GENERAL)



DESCRIPCIÓN:

Detalle de vista general de una bomba criogénica, con capacidad para 70Kg. de hielo seco (marca KEYSTONE), utilizada para el secado de transformadores de potencia.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

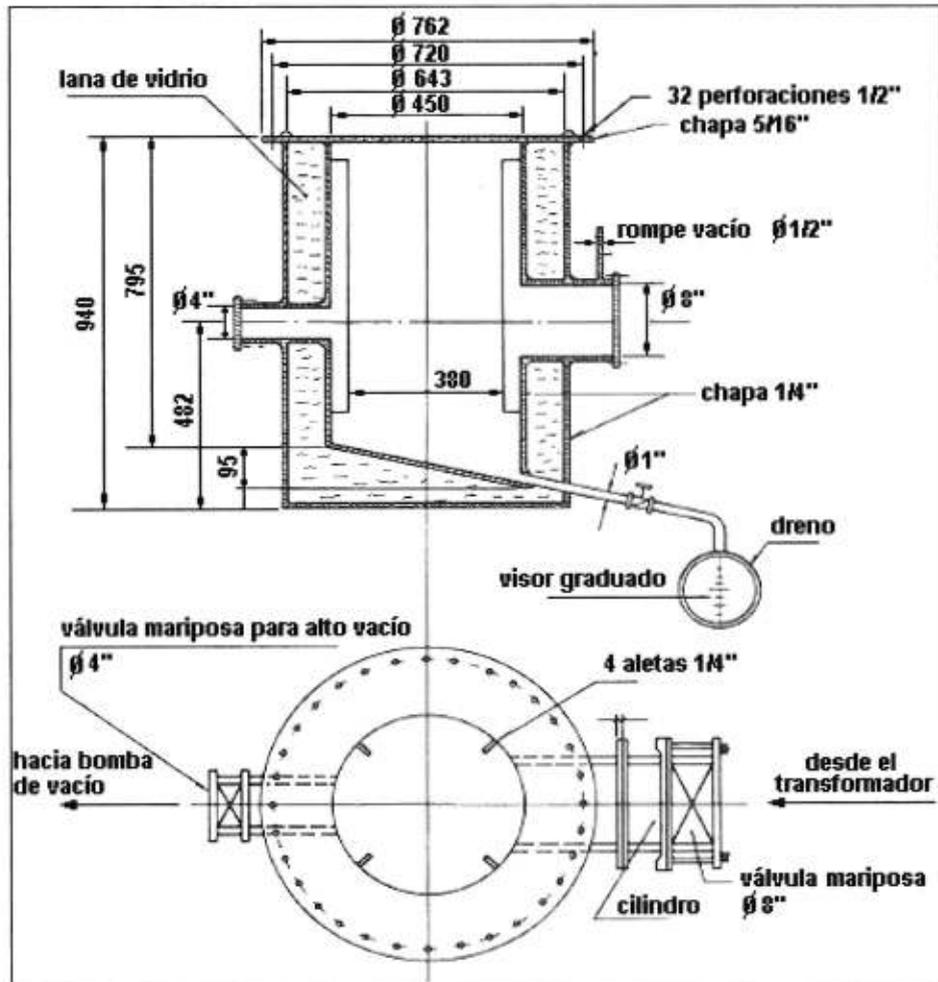
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.12.B

TÍTULO:

BOMBA CRIOGÉNICA  
(VISTA DE CUERPO)



**DESCRIPCIÓN:**

Detalle de vista de cuerpo de una bomba criogénica, con capacidad para 70Kg. de hielo seco (marca KEYSTONE), utilizada para el secado de transformadores de potencia.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión





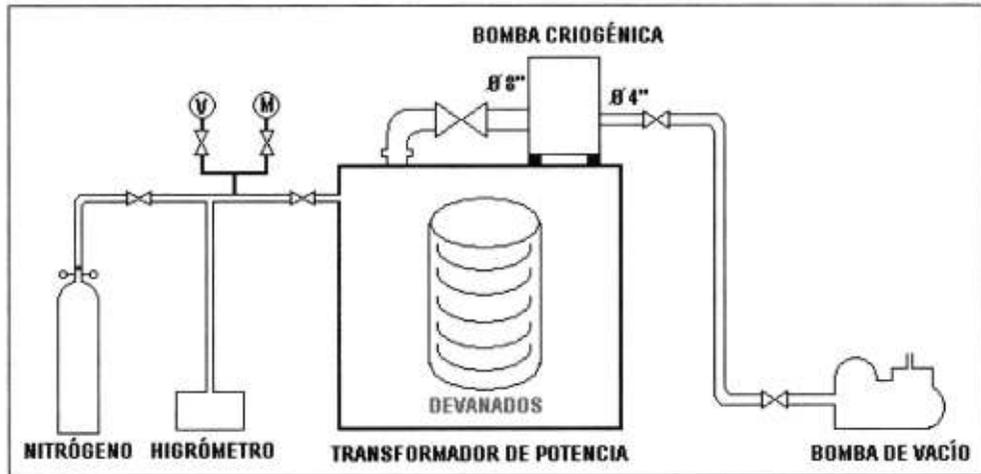
**C.I.B**

FIGURAS ANEXAS 6.13.A,B

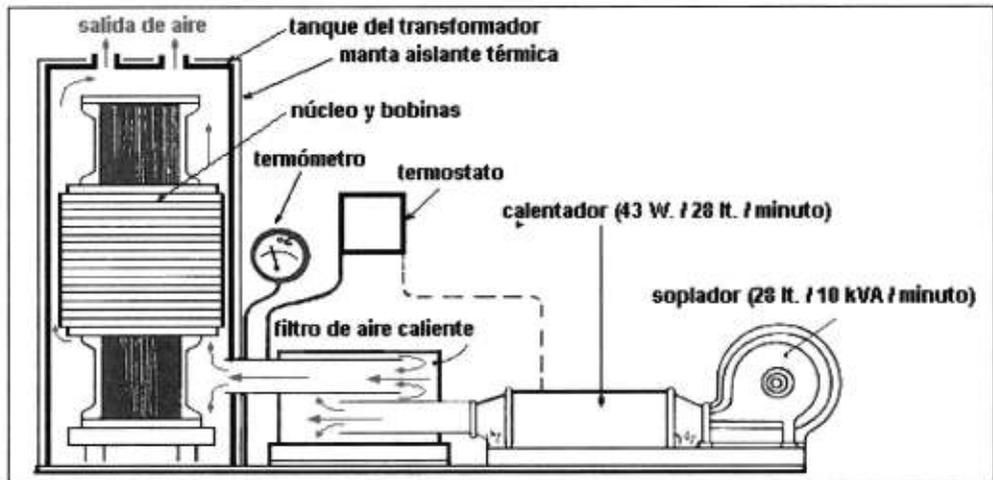
TÍTULO:

ESQUEMAS DE INSTALACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SECADO CRIOGÉNICO Y CIRCULACIÓN DE AIRE CALIENTE

A



B



DESCRIPCIÓN:

A) Esquema de instalación para secado interno de un transformador de potencia, aplicando el proceso criogénico.

B) Esquema de instalación para secado interno de un transformador de potencia, aplicando el proceso de circulación de aire caliente dentro del tanque.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

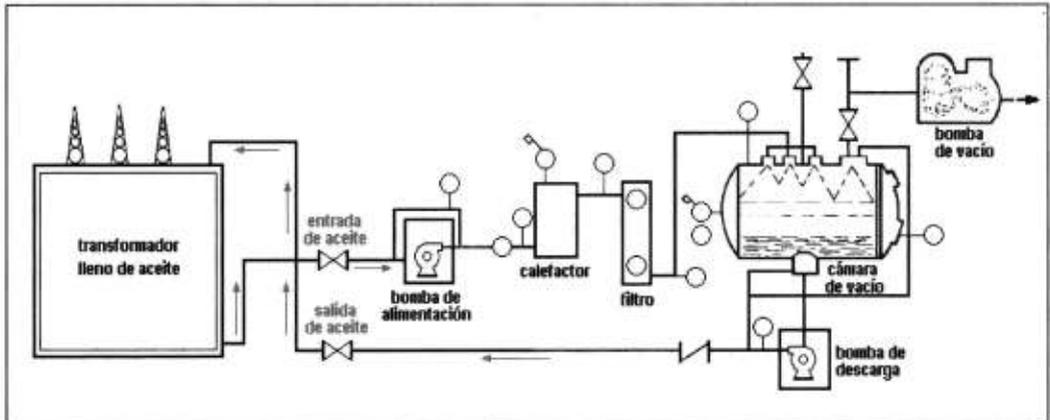


FIGURAS ANEXAS 6.14.A,B

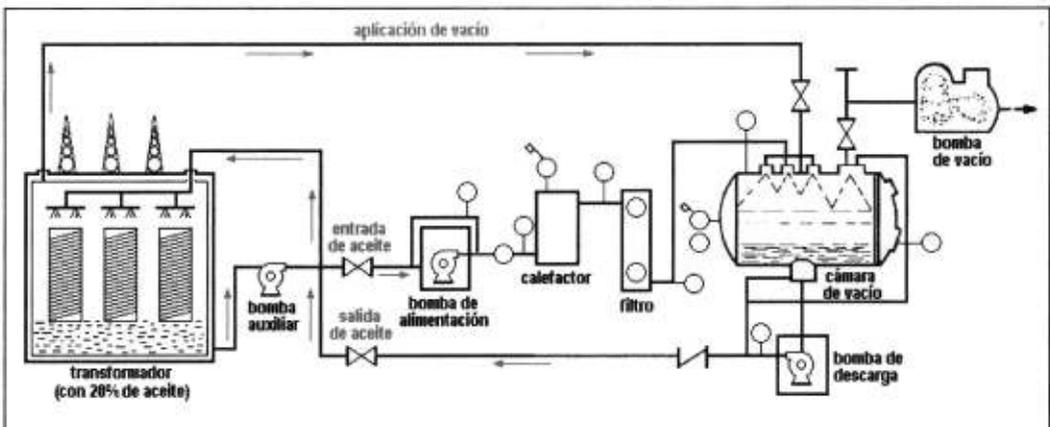
**TÍTULO:**

ESQUEMAS DE INSTALACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SECADO CON CIRCULACIÓN Y ASPERSIÓN DE ACEITE CALIENTE

A



B



**DESCRIPCIÓN:**

A) Esquema de instalación para secado interno de un transformador de potencia, aplicando el proceso de recirculación de aceite caliente.

B) Esquema de instalación para secado interno de un transformador de potencia, aplicando el proceso de aspersión de aceite caliente sobre los arrollamientos.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

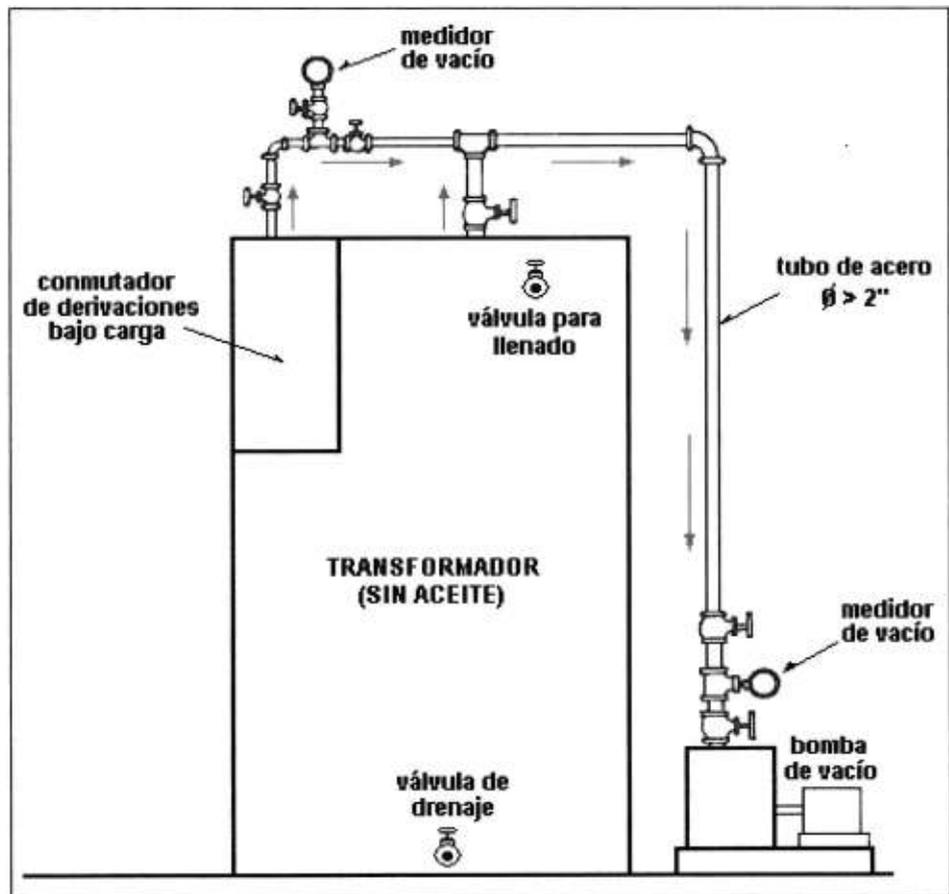
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.15

**TÍTULO:**

ESQUEMA DE INSTALACIÓN DEL MÉTODO DE SECADO CON ALTO VACÍO



**DESCRIPCIÓN:**

Esquema de instalación para secado interno de un transformador de potencia, aplicando alto vacío a la cuba.

Se aprecia la implantación de una conexión adicional al conmutador de derivaciones bajo carga con el fin de igualar las presiones con la parte interna de la cuba.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

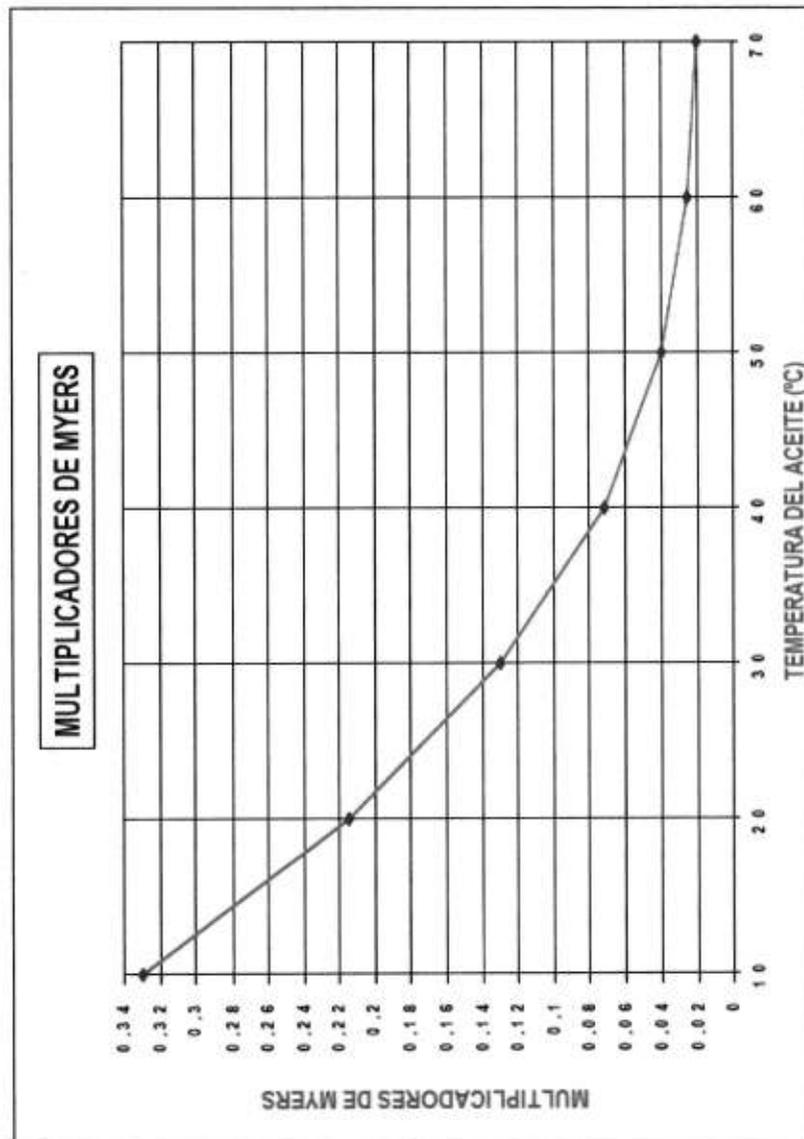
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.16

TÍTULO:

CURVA DE LA S.D MYERS



**DESCRIPCIÓN:**

Curva establecida por la S.D Myers, que permite conocer el porcentaje de agua por peso seco en la celulosa aplicando directamente el multiplicador obtenido al valor en ppm de contenido de agua en el aceite, teniendo en cuenta la temperatura del fondo del transformador que es la más baja y en la que se tiene máxima afinidad del papel con el agua.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

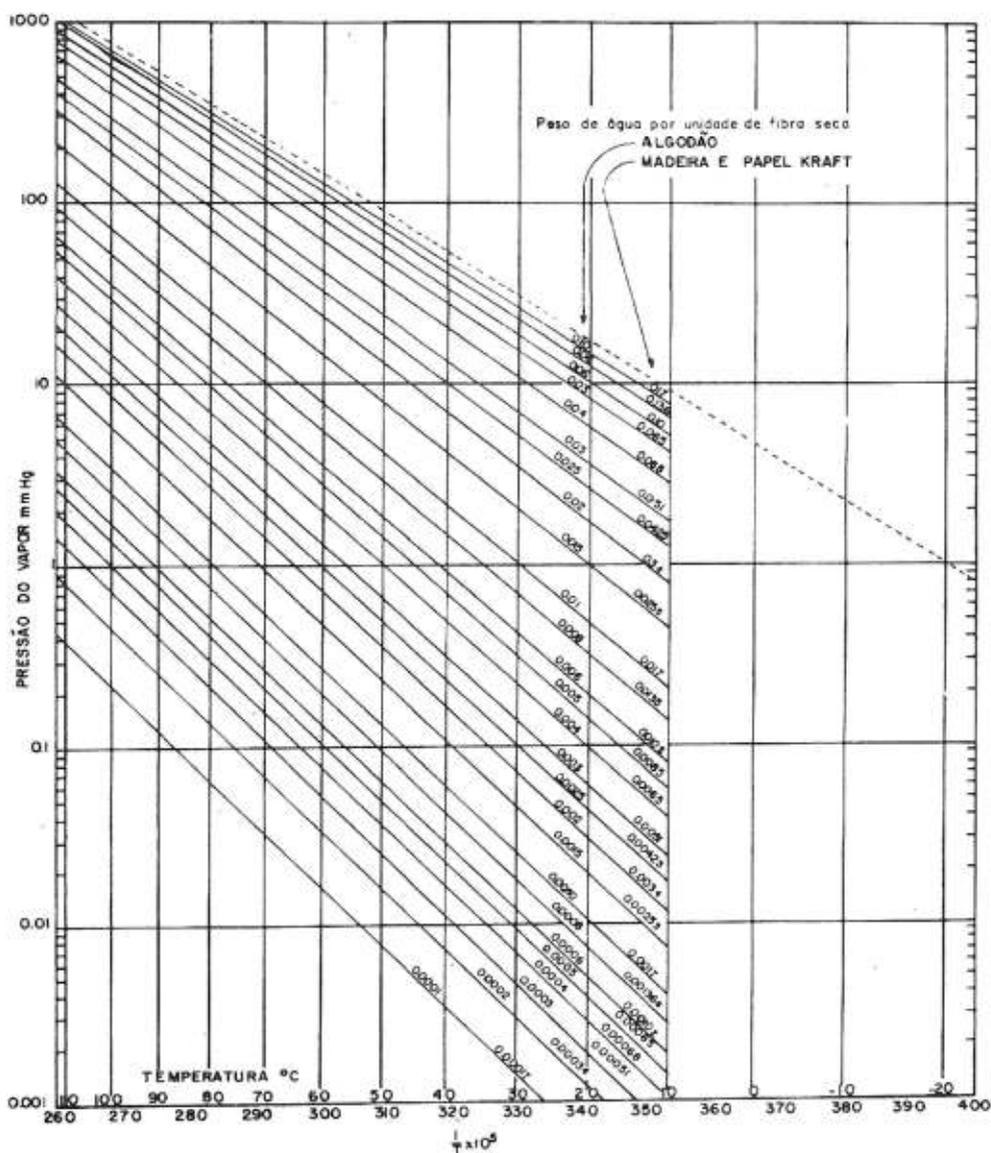
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.17

TÍTULO:

GRÁFICO DE PIPER



**DESCRIPCIÓN:**

Gráfico de John D. Piper que relaciona la concentración de agua en materiales fibrosos y la presión del vapor en el espacio gaseoso, en las condiciones de equilibrio de 10°C a 110°C.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

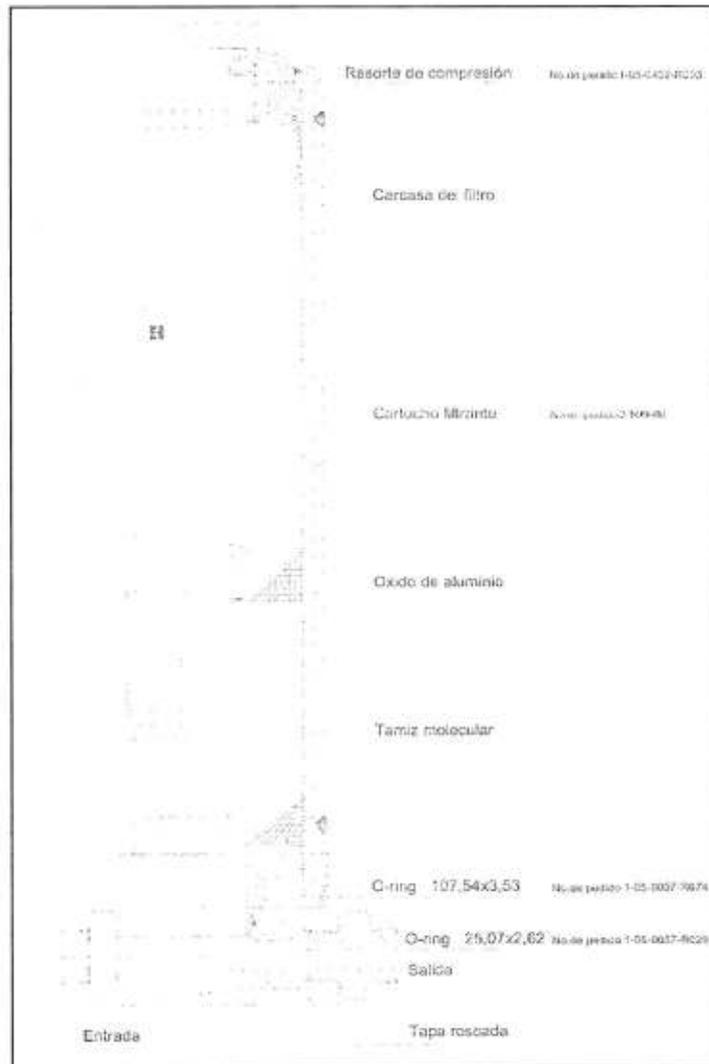
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.18

**TÍTULO:**

**CARTUCHO FILTRANTE DE GAS SF6**



**DESCRIPCIÓN:**

Cartucho filtrante previsto para adsorber humedad y productos de descomposición del gas SF6. Consta de un tubo metálico, llenado con aproximadamente 1,7 Kg de óxido de aluminio (granos de  $\Phi=2$  a 5mm) y 0,6 Kg de tamiz molecular (granos de  $\Phi=4$ mm). Por lo general permite obtener un punto de rocío inferior a  $-50^{\circ}\text{C}$  en un proceso de secado.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

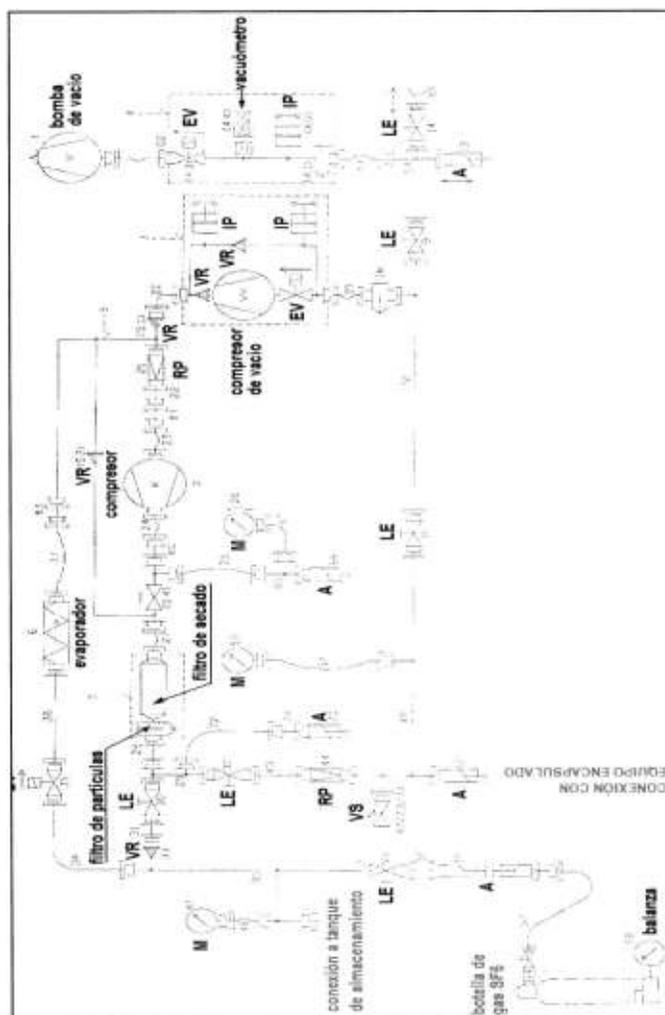
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.19

**TÍTULO:**

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA MAQUINA DE TRATAMIENTO DE GAS SF6



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama esquemático de una máquina de tratamiento de gas SF6 (marca DILO), utilizada para filtrado de dicho gas (tanto en el proceso de llenado como en el de extracción) y evacuación (secado) del compartimento de un equipo encapsulado. Donde:

**A:** Acoplamiento  
**VS:** Válvula de seguridad  
**RP:** Reductor de presión

**RP:** Reductor de presión  
**VR:** Válvula de retención  
**EV:** Electroválvula

**LE:** Llave esférica  
**IP:** Interruptor de presión

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

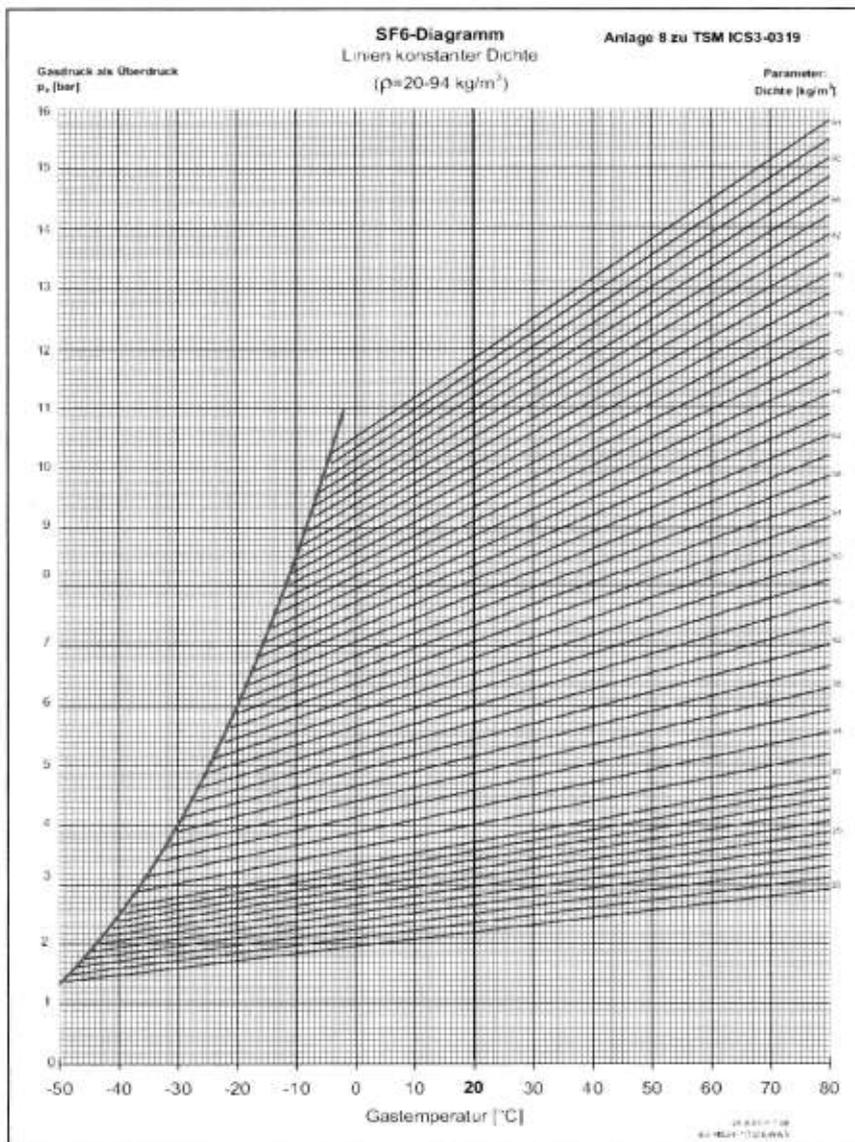
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.20

**TÍTULO:**

**CURVA DE CORRECCIÓN DE PRESIÓN DE GAS SF6 POR TEMPERATURA  
EN FUNCIÓN DE SU DENSIDAD**



**DESCRIPCIÓN:**

Curva de corrección de la presión de gas SF6 de un compartimento, por variaciones de la temperatura en función de su densidad.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

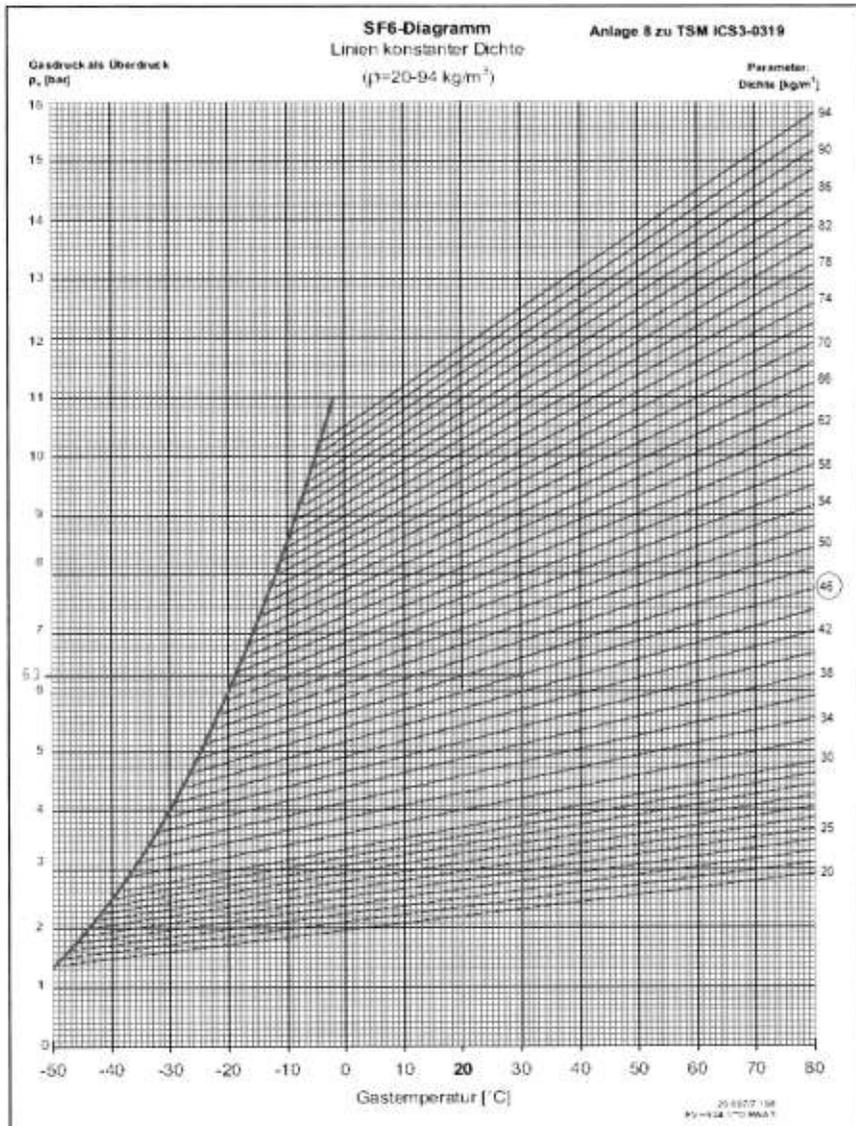
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.21

**TÍTULO:**

APLICACIÓN DE LA CURVA DE CORRECCIÓN DE PRESIÓN DE GAS SF6 POR TEMPERATURA EN FUNCIÓN DE SU DENSIDAD



**DESCRIPCIÓN:**

Aplicación de la curva de corrección de la presión de gas SF6 de un compartimento, por variaciones de la temperatura en función de su densidad. Análisis del ejemplo detallado en el ítem 5 del literal 6.2.1.4.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

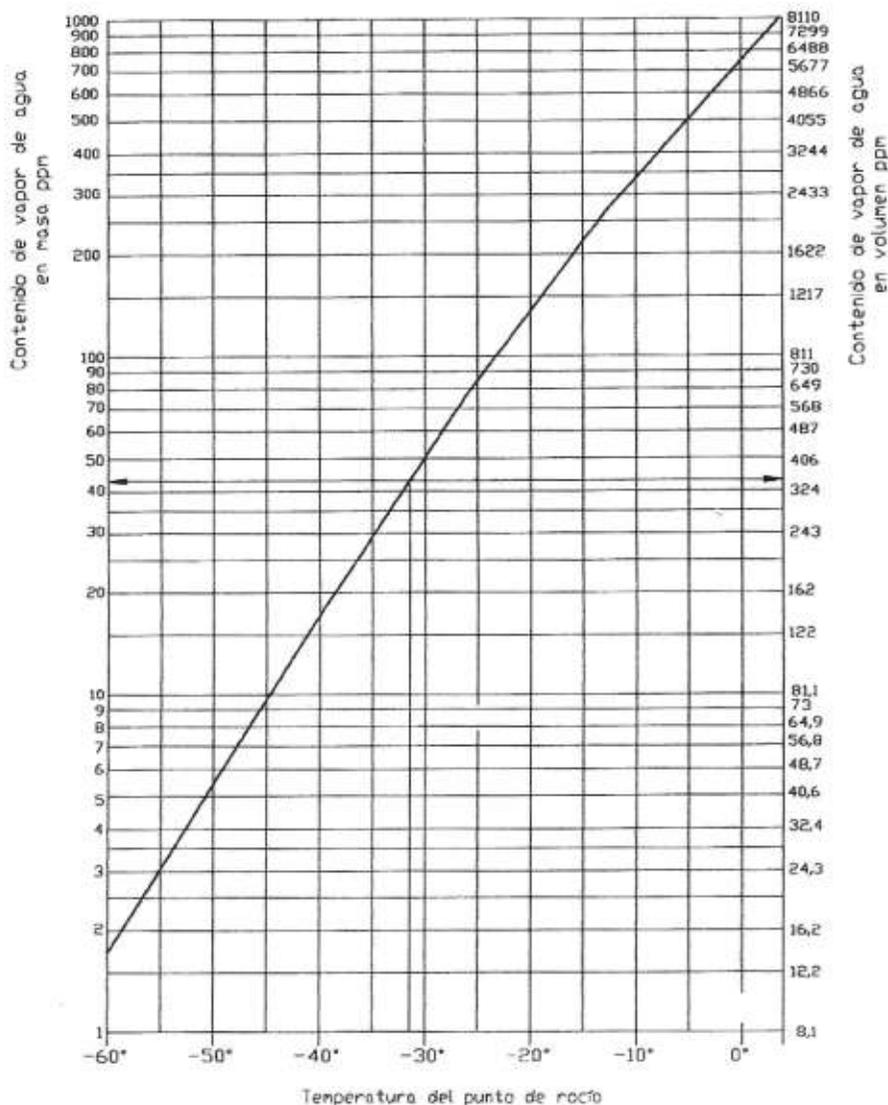
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.22

**TÍTULO:**

CURVA DE RELACIÓN DE LA TEMPERTAURA DEL PUNTO DE ROCÍO CON EL CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA EN EL GAS SF6



**DESCRIPCIÓN:**

Curva para la conversión de la temperatura de punto de rocío (en °C) del gas SF6, en contenido de vapor de agua en masa o en volumen ppm.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

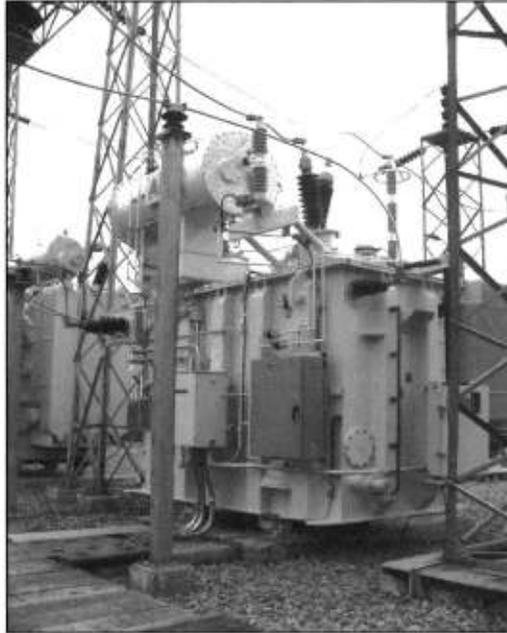
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 6.23

### TÍTULO:

TRANSFORMADOR DE POTENCIA ANALIZADO EN CASO I.A  
(RESERVA DE BANCO ATK "S/E MACHALA")



#### DATOS GENERALES DEL EQUIPO EQUIPMENT GENERAL DATA AUTOTRANSFORMADOR TRANSELECTRIC S-E Machala

**ABB**

Cliente - Customer:

TRANSELECTRIC S-E Machala

Fabricante - Manufacturer:	ABB
Numero de serie - Serial Number:	200513
Año de construcción - Year:	2006
Normas Aplicables - Standard:	ANSI
Numero de Diseño - Design number:	0202000013416/15
Potencia - Power:	20.26.7.33.3 MVA
Tipo de enfriamiento - Type of cooling:	ONAN-ONAF1-ONAF2
Numero de fases - Number of phases:	1
Frecuencia - Frequency:	60 Hz
Voltage AT (V) - High voltage level:	138 - 0.82 x 2.5 % kV
Voltage MT (V) - Medium voltage level:	69 - 0.8 x 16 x 0.625 % kV
Voltage BT (V) - Low voltage level:	13.8 kV
Grupo de Conexión - Connection:	YNyn0d11

### DESCRIPCIÓN:

Transformador de potencia 138/69/13.8kV - 20/26.7/33 MVA, instalado en la Subestación "Machala" (Prov. Del Oro) parte de la Zona Sur del Sistema Nacional de Transmisión.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 6.24.A,B,C,D,E

**TÍTULO:**

TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE CASO I.A  
(ETAPA DE ENSAMBLAJE)

A



B



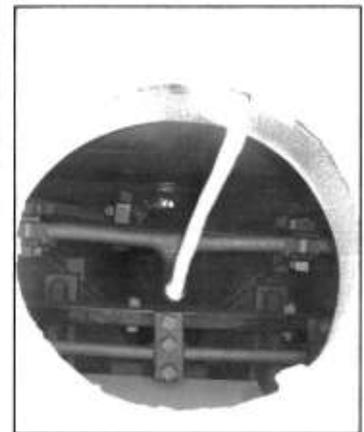
C



D



E



**DESCRIPCIÓN:**

- A) Inyección de nitrógeno seco para instalación de bushing's.
- B) Instalación de bushing de porcelana sólida correspondiente al neutro del transformador.
- C) Erección de bushing mediante grúa, para su posterior instalación.
- D) Instalación de bushing tipo capacitivo correspondiente al arrollamiento de 138kV del autotransformador.
- E) Conexión interna del conductor del bushing al arrollamiento de 138kV. Apreciación del aislamiento celulósico interno del transformador expuesto al aire ambiente durante la instalación de los bushing's.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

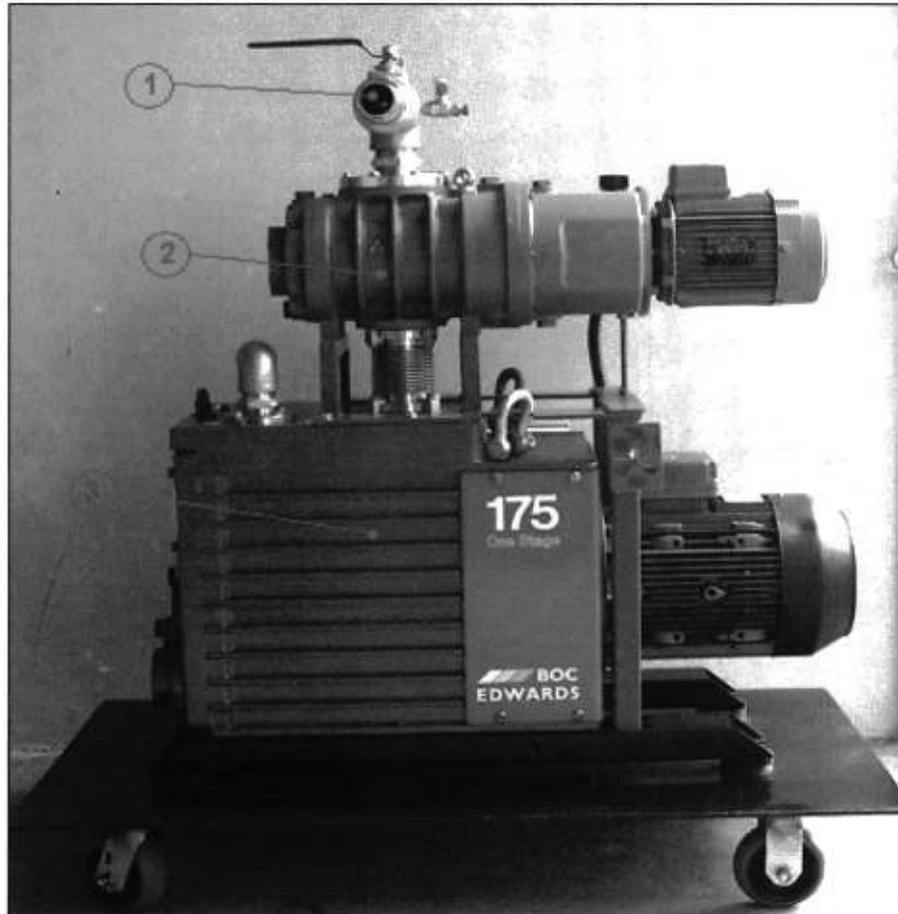
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.25

**TÍTULO:**

EQUIPO DE SECADO CON APLICACIÓN DE ALTO VACÍO  
(APLICADO EN EL CASO I.A)



**DESCRIPCIÓN:**

Sistema BOC EDWARDS aplicado en el secado interno del transformador Caso IA, compuesto por una bomba de vacío rotatoria y una bomba booster mecánica, cuyas características principales son las siguientes:

- 1) Conexión de 2" para manguera de interconexión con transformador.
- 2) Bomba booster mecánica: modelo EH500IND, motor 2.2KW / 3455rpm / 8 Amp. / 208 Vac 3Φ / 74Kg, presión diferencial de 0 a 90 mbar (0 a  $9 \times 10^3$ Pa).
- 3) Bomba de vacío rotatoria: modelo E1M175S, motor 6.5KW / 1740rpm / 24 Amp. / 208 Vac 3Φ / 194Kg, máximo desplazamiento de 214m<sup>3</sup>/h, Presión de último vacío de 0.05mbar (5Pa)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

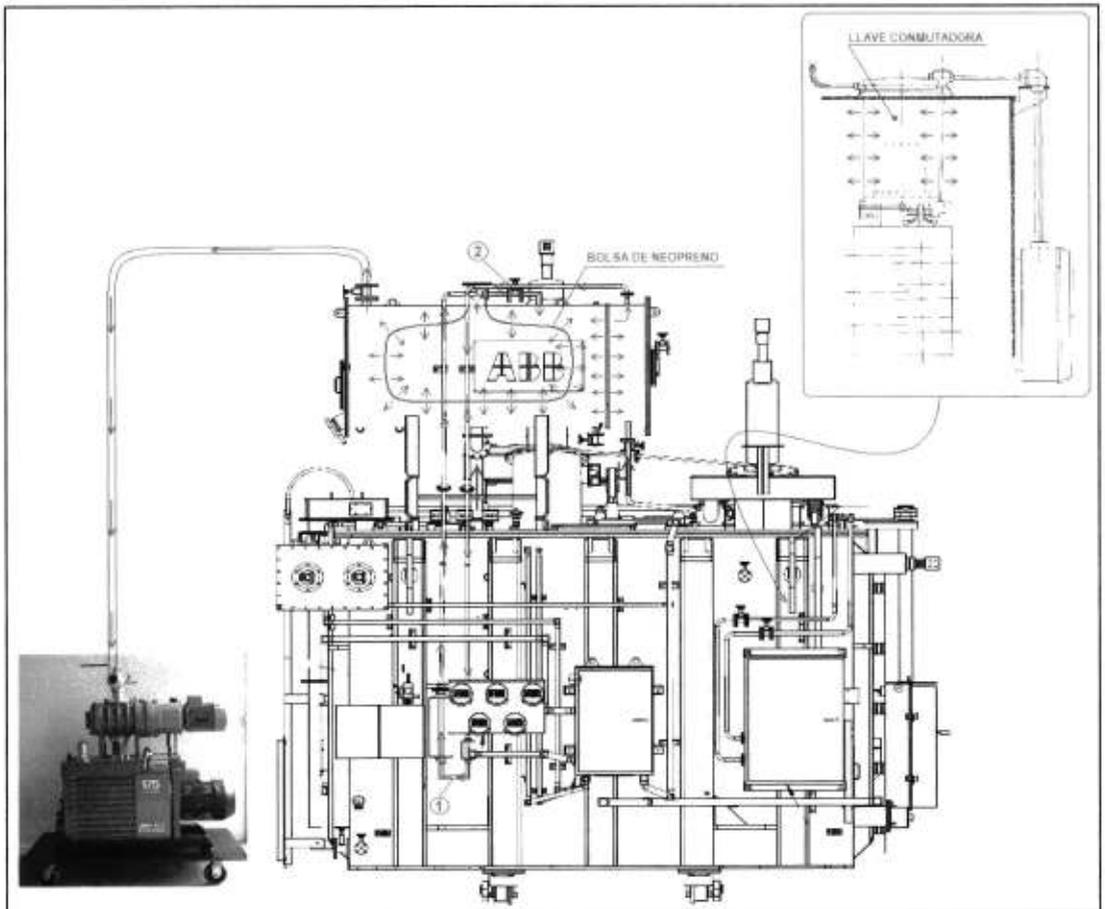
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.26

**TÍTULO:**

DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE VACÍO  
(SECADO INTERNO DE TRANSFORMADOR CASO I.A)



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama esquemático sobre las presiones internas a establecerse con la aplicación de alto vacío al transformador de potencia de referencia en el CASO I.A. De acuerdo a este análisis se determinó la necesidad de establecer ciertos by-pass, requeridos para igualar las presiones entre los compartimientos internos del equipo, tales como:

- 1) By-pass efectuado en campo, con el fin de igualar las presiones entre el compartimento de la llave conmutadora y la parte interna de la cuba.
- 2) By-pass propio del equipo, habilitado con el fin de igualar las presiones entre la bolsa de neopreno y la parte interna del conservador.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.27.A,B,C

**TÍTULO:**

PROCESO DE SECADO INTERNO DEL TRANSFORMADOR EN CAMPO  
(CASO I.A)

A



B



C



**DESCRIPCIÓN:**

A) Aplicación del método de secado interno del transformador de potencia mediante bomba de alto vacío. Interconexión establecida con manguera de 2" desde el conservador.

B) Conexión de vacuómetro, para monitoreo de la presión de vacío establecida en el transformador durante el proceso de secado.

C) Muestra de la lectura del vacuómetro (0.61 Torr alcanzados luego de 4 horas de haber obtenido 1 Torr) del ejemplo en referencia.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

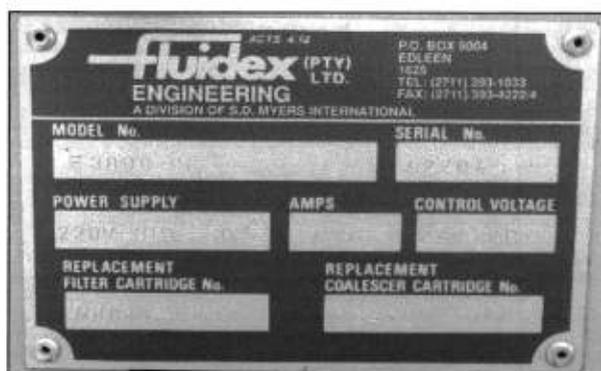
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.28

**TÍTULO:**

MÁQUINA DE TERMOVACÍO  
(APLICADA EN EL CASO I.A)



**DESCRIPCIÓN:**

Máquina para reacondicionamiento del aceite aislante con deshidratación al vacío. Marca FLUIDEX, modelo E3000-S, fuente de alimentación requerida 220Vac / 3Φ / 3HP / 135 Amp., posee los siguientes accesorios: dos resistencias para calefacción (27KW y 18KW), un filtro de partículas de 0.2μ, cámara con cartuchos de fibra de vidrio para deshidratación del aceite con aplicación de vacío, bomba de vacío con desplazamiento nominal de 64m<sup>3</sup>/h y con presión final ≤0.5mbar

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

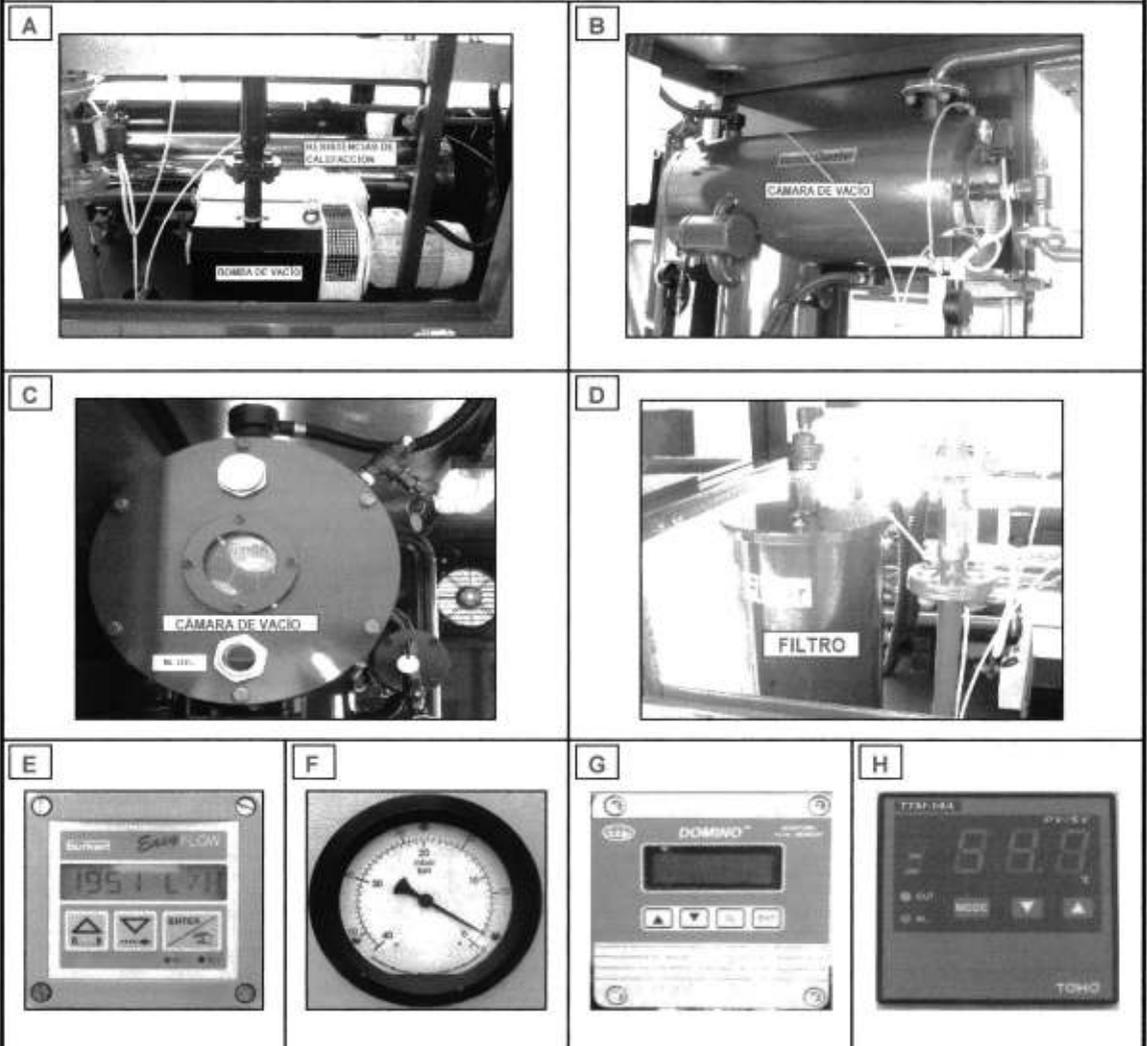
**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 6.29.A,B,C,D,E,F,G,H

**TÍTULO:**

PRINCIPALES COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE TERMOVACÍO  
(APLICADA EN EL CASO I.A)



**DESCRIPCIÓN:**

- A) Bomba de vacío (de paletas rotativas) y módulo con resistencias para calefacción del aceite.
- B) Vista lateral de la cámara de vacío utilizada para la desgasificación del aceite
- C) Vista frontal de la cámara de vacío, en cuya mirilla central se pueden apreciar los cartuchos de fibra de vidrio.
- D) Filtro para retención de partículas en el aceite.
- E) Medidor del flujo de aceite establecido en la máquina (en litros/hora)
- F) Vacuómetro de la cámara de vacío (en Torr)
- G) Medidor de contenido de agua en el aceite, conectado a la entrada de la máquina (en ppm)
- H) Medidor de temperatura aplicada en el aceite con el uso de las resistencias de calefacción (°C)

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

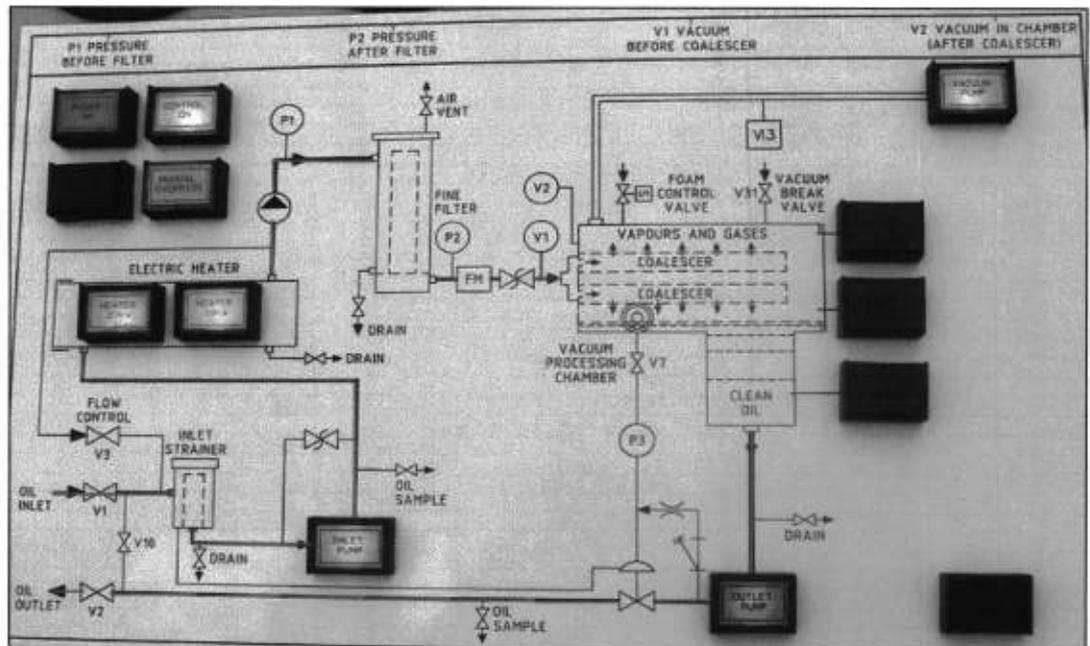
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.29.I

**TÍTULO:**

DIAGRAMA DE REACONDICIONAMIENTO DEL ACEITE  
(APLICADO CON LA MÁQUINA DE TERMOVACÍO DEL CASO I.A)



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama característico de la máquina de termovacío utilizada en el reacondicionamiento del aceite aislante del transformador de referencia en el Caso IA:

El aceite contenido en el transformador o tanque de almacenamiento es extraído por la bomba de entrada (INLET PUMP) dirigiéndose hacia el grupo de resistencias de calefacción de 27KW y 18KW respectivamente (ELECTRIC HEATER), seguidamente pasa por un filtro (AFTER FILTER) para luego ingresar a la cámara de deshidratación al vacío (VACUUM PROCESSING CHAMBER) por intermedio de los cartuchos de fibra de vidrio. Finalmente el aceite es expulsado de regreso mediante la bomba de salida (OUTLET PUMP).

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

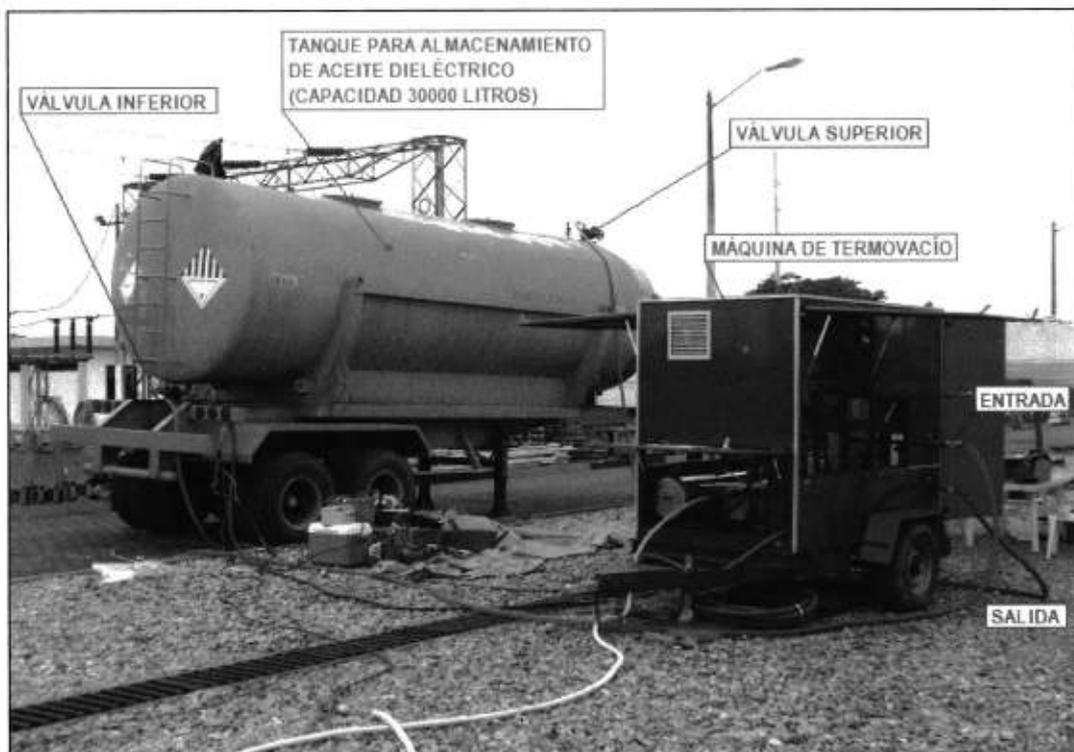
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.30

**TÍTULO:**

RECONDICIONAMIENTO DEL ACEITE DEL TRANSFORMADOR EN CAMPO  
(CASO I.A)



**DESCRIPCIÓN:**

Reacondicionamiento del aceite en campo con la aplicación del método de deshidratación al vacío o termovacío.

Primera etapa de aplicación de este método, previamente a la inmersión del aceite aislante en el transformador.

Tanque de almacenamiento contiene 17413 litros de aceite requeridos por el transformador. El método fue aplicado por un total de tres recirculaciones o tres pasadas de la cantidad total descrita.

El aceite es extraído desde la válvula inferior y retornado por la válvula superior.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURAS ANEXAS 6.31.A,B,C,D,E

### TÍTULO:

### EQUIPO ENCAPSULADO DE CASO I.B (ETAPA DE ENSAMBLAJE)

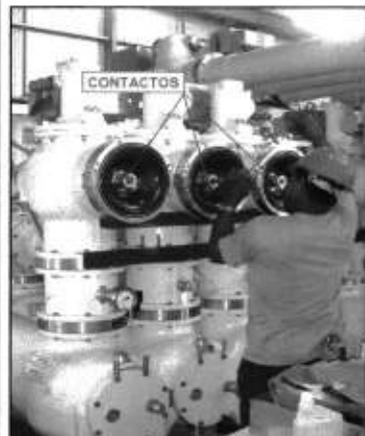
A



B



C



D



E



### DESCRIPCIÓN:

- A) Instalación de contactos para acoplamiento interno de barras colectoras de la sección de una de las bahías del equipo encapsulado.
- B) Instalación de bushing's tipo huecos aislados internamente con gas SF6.
- C) Instalación de contactos en aisladores soporte para acoplamiento de barras de otro compartimento.
- D) Aspiración de la superficie de un aislador soporte de barra con el fin de retirar partículas extrañas.
- E) Instalación de bolsas de tamiz molecular para preservar de la humedad posiblemente a presentarse en uno de los compartimentos.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

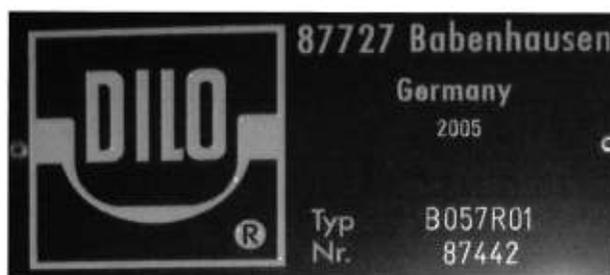
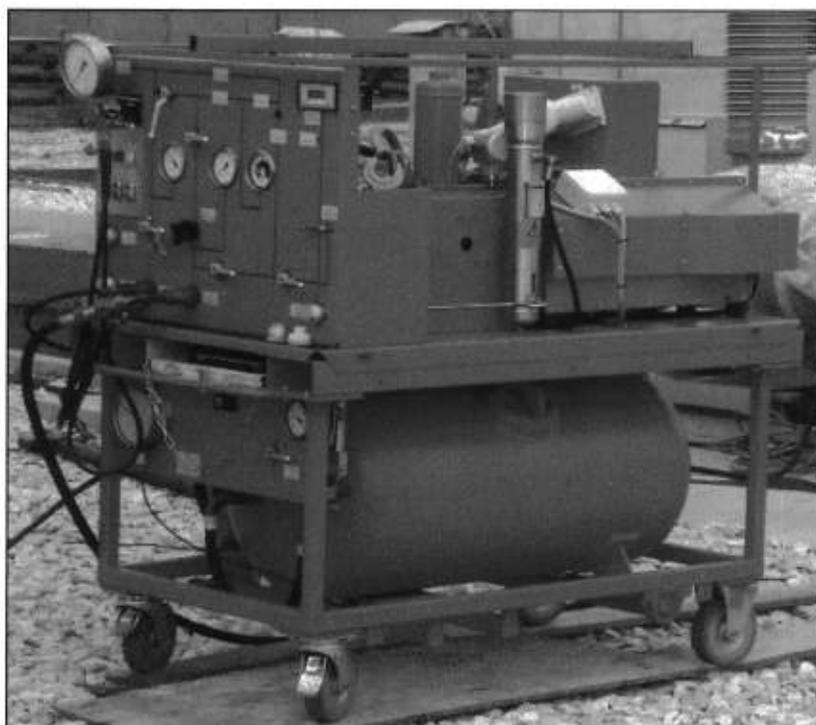
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



## FIGURA ANEXA 6.32

### TÍTULO:

MAQUINA DE TRATAMIENTO DE GAS SF6  
(APLICADA EN EL CASO I.B)



### DESCRIPCIÓN:

Máquina para tratamiento de gas SF6. Marca DILO, de procedencia Alemana, modelo B057R01, fuente de alimentación requerida 208Vac / 3Φ / 32Amp., posee los siguientes accesorios: una bomba de vacío para evacuar los compartimentos de gas (vacío final <1mbar), un depósito para almacenamiento a presión del gas (a 50 bar), un evaporador para cambio de estado de gaseoso a líquido del gas a ser almacenado en el depósito, un compresor de émbolo seco para aspiración normal de gas SF6 de un compartimnto (presión final 50bar), un compresor de vacío para aspiración mayor de gas SF6 de un compartimento (presión final <50mbar) y un conjunto de filtros tanto para secado como para retención de partículas extrañas presentes en el gas SF6.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**Tesis:** Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

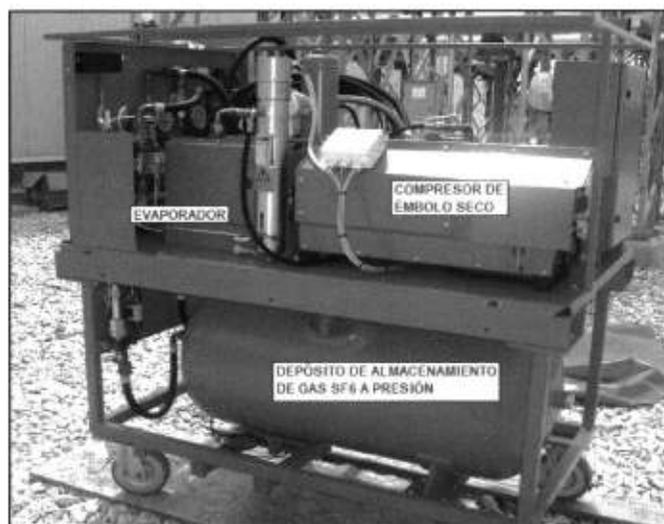


## FIGURAS ANEXAS 6.33.A,B

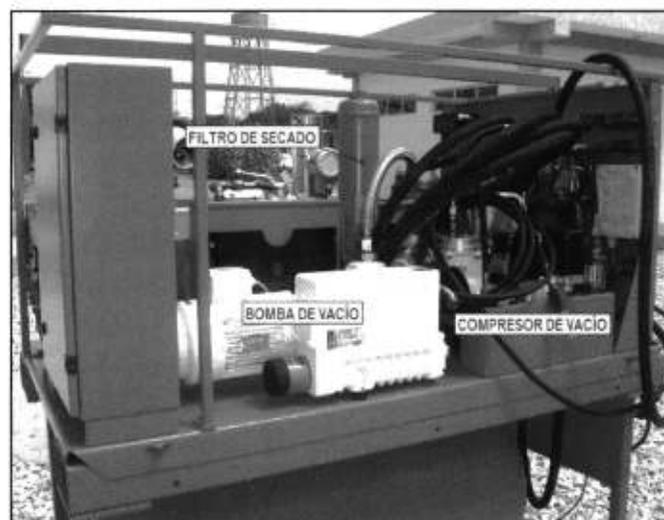
### TÍTULO:

PRINCIPALES COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE TRATAMIENTO DE GAS SF6  
(APLICADA EN EL CASO I.B)

A



B



### DESCRIPCIÓN:

Disposición de los principales componentes de la máquina de tratamiento de gas SF6 (DILO):

A) Evaporador, Compresor de émbolo seco y tanque de almacenamiento de gas SF6 a presión.

B) Filtro de secado, compresor de vacío y bomba de vacío.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

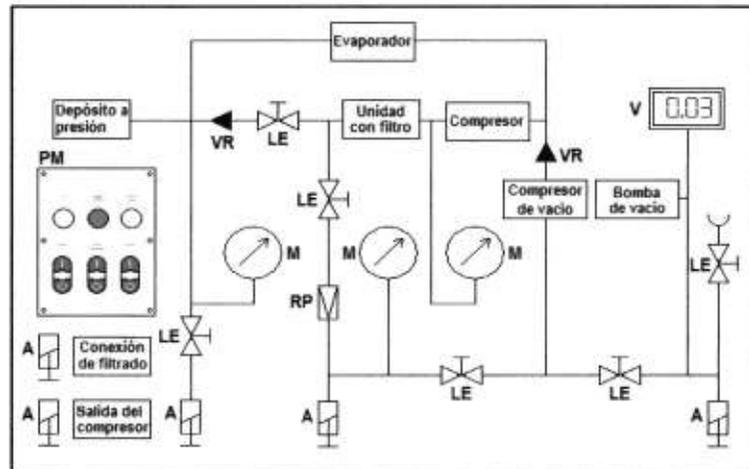
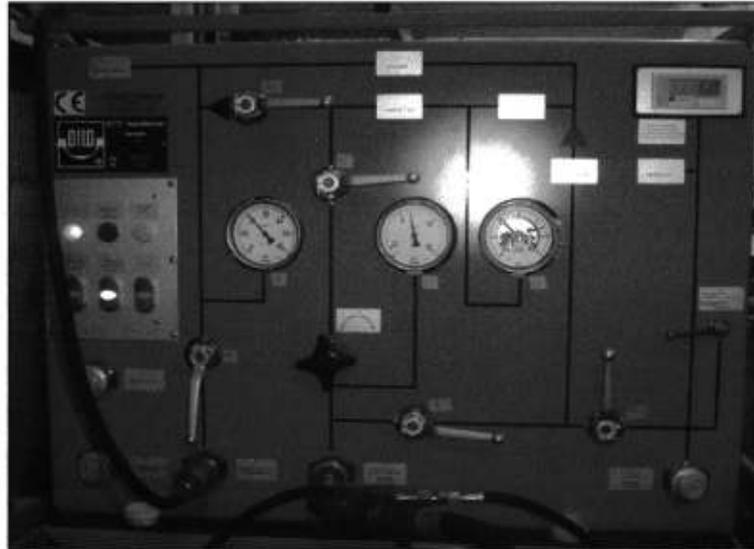
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.33.C

**TÍTULO:**

DIAGRAMA DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA DE TRATAMIENTO DE GAS SF6  
(APLICADA EN EL CASO I.B)



**DESCRIPCIÓN:**

Diagrama general de operación de la máquina de tratamiento de gas SF6. Este permite establecer los siguientes servicios:

- 1) Extracción del gas SF6 (con filtrado) contenido en un compartimento para ser almacenado a presión dentro de su propio depósito de almacenamiento y/o en alguna botella acoplada exteriormente.
- 2) Evacuación (aplicación de vacío) de un compartimento con el fin de extraer la humedad presente.
- 3) Llenado de un compartimento con gas SF6 (mediante filtrado). Desde su propio depósito de almacenamiento y/o alguna botella acoplada exteriormente.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

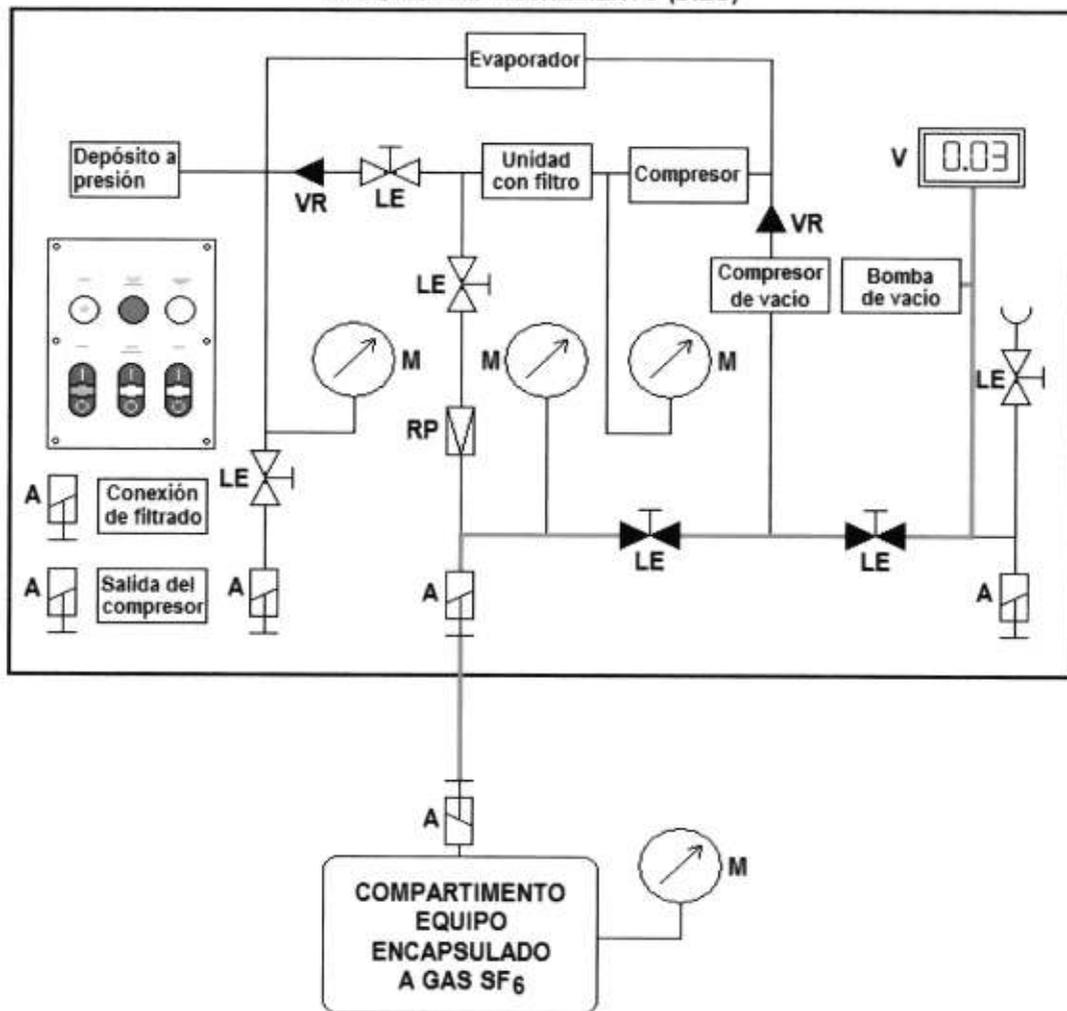


FIGURA ANEXA 6.34

**TÍTULO:**

CIRCUITO DE APLICACIÓN DE VACÍO AL EQUIPO ENCAPSULADO DEL CASO I.B  
(APLICADO CON LA MÁQUINA DE TRATAMIENTO DILO)

**MAQUINA DE TRATAMIENTO (DILO)**



**DESCRIPCIÓN:**

Circuito operacional establecido en la máquina de tratamiento DILO, para la evacuación (aplicación de vacío) de los compartimentos del equipo encapsulado de referencia en el Caso IB:

El respectivo compartimento ya ensamblado es conectado desde su respectiva válvula de acople a la máquina de tratamiento a través de una manguera de 1½" de alta presión. Las llaves esféricas LE rellenas indican la conexión directa hacia la bomba de vacío, esta permitió alcanzar niveles de vacío menores a 1mbar (absolutos), suficiente para asumir un eficiente secado interno. El vacuómetro V permitió monitorear la presión de vacío establecida durante el proceso.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión

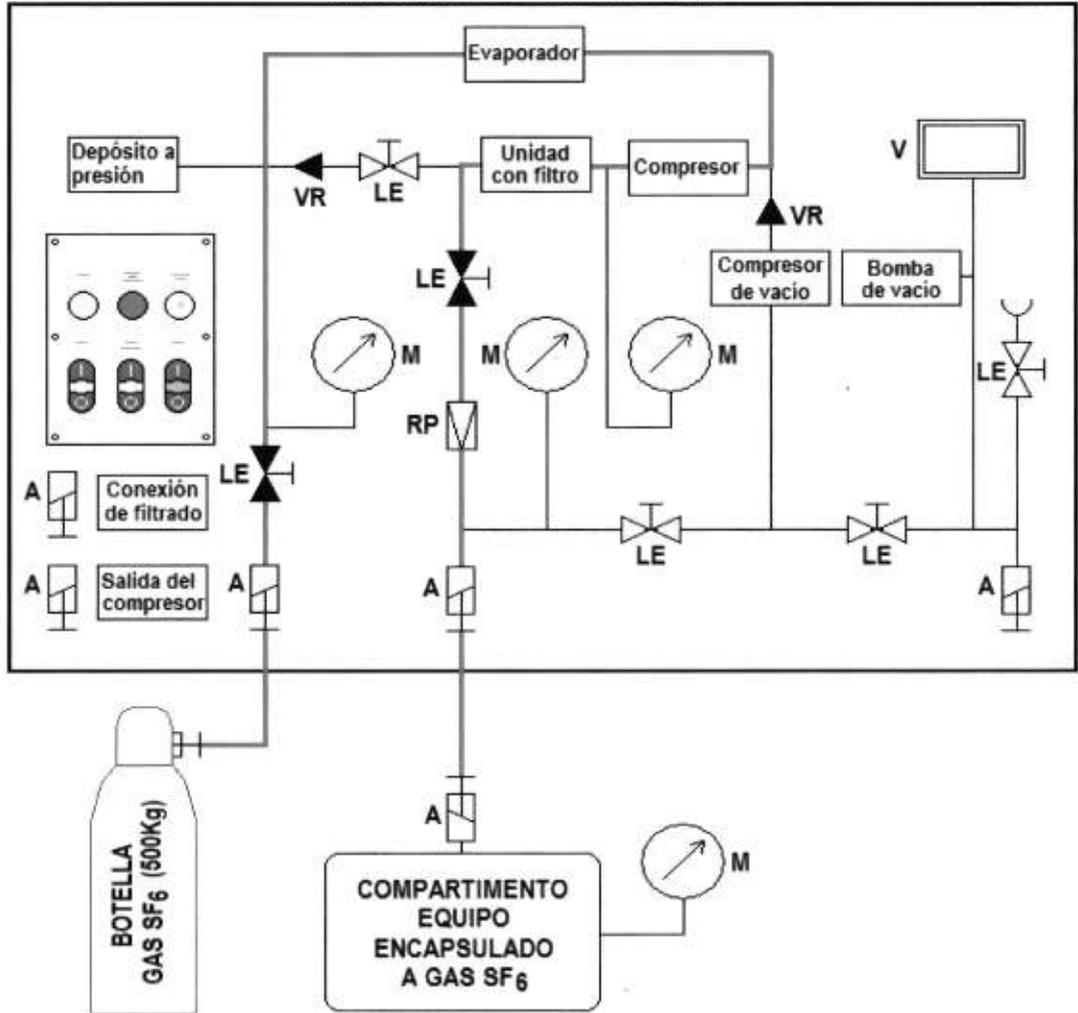


FIGURA ANEXA 6.35

**TÍTULO:**

CIRCUITO DE TRATAMIENTO DEL GAS SF<sub>6</sub> DEL EQUIPO ENCAPSULADO DEL CASO I.B  
(APLICADO CON LA MÁQUINA DE TRATAMIENTO DILO)

**MAQUINA DE TRATAMIENTO (DILO)**



**DESCRIPCIÓN:**

Circuito operacional establecido en la máquina de tratamiento DILO, para el llenado con filtrado del gas SF<sub>6</sub> (tratamiento) de los compartimentos del equipo encapsulado de referencia en el Caso IB:

El respectivo compartimento con última presión de vacío establecida en el proceso de secado anteriormente aplicado, es superado mediante la inyección de gas SF<sub>6</sub> desde una botella. Las llaves esféricas LE fueron dispuestas conforme el circuito delimitado con rojo, sin necesidad de encender algún compresor, solo con la propia presión de la botella regulada a través del regulador RP se realizó el llenado, previo paso obligatorio por el conjunto de filtros para su tratamiento.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURAS ANEXAS 6.36.A,B,C

**TÍTULO:**

APLICACIÓN EN CAMPO DEL TRATAMIENTO DE GAS SF6 Y SECADO INTERNO DEL EQUIPO ENCAPSULADO (CASO I.B)

A



B



C



**DESCRIPCIÓN:**

A) Máquina de tratamiento de gas SF6 utilizada para la evacuación y llenado de los compartimentos del equipo encapsulado SIEMENS tipo 8DN9 recientemente instalado en la Subestación "Salitral" de TRANSELECTRIC S.A

B) Botella de gas SF6 de capacidad 600Kg. Total se utilizaron 2 botellas para la instalación del equipo en referencia.

C) Muestra de la conexión realizada entre la máquina de tratamiento y uno de los compartimentos del equipo encapsulado de referencia en este caso.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

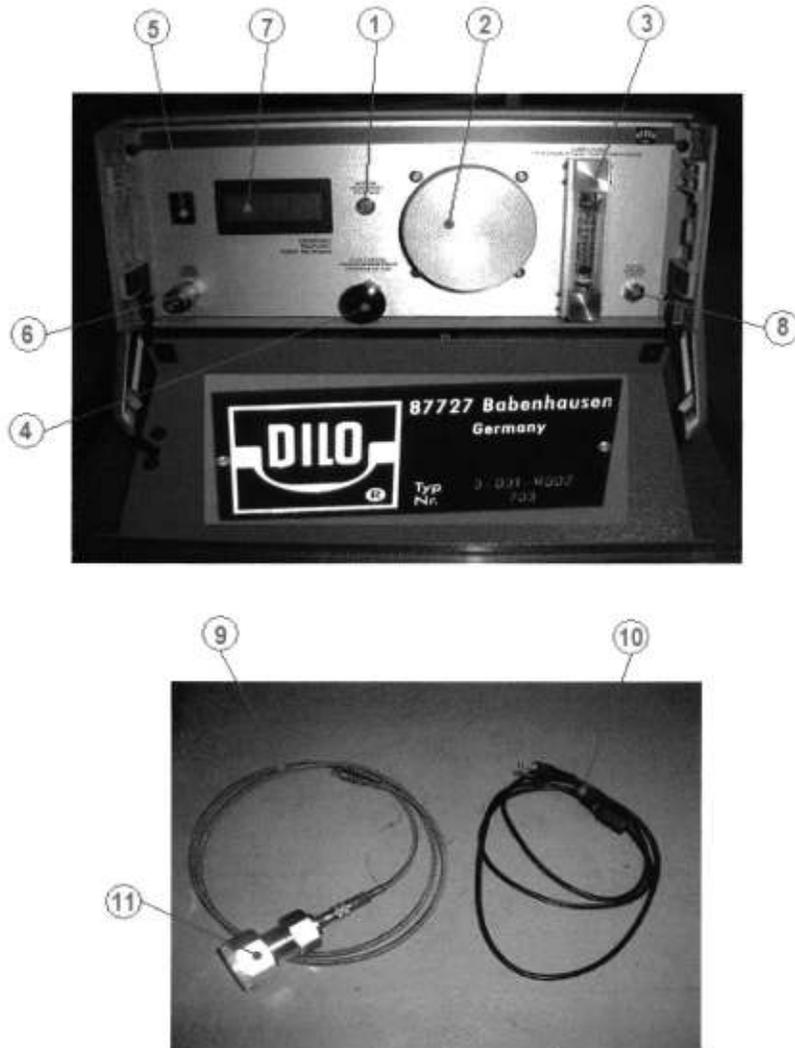
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.37

**TÍTULO:**

INSTRUMENTO DE MEDIDA ELECTRÓNICO DE HUMEDAD EN EL GAS SF6  
(UTILIZADO EN EL CASO I.B)



**DESCRIPCIÓN:**

Instrumento de medida electrónico de humedad en el gas SF6, marca DILO, modelo 3-031-R002. Compuesto por los siguientes elementos: 1) Potenciómetro para calibración, 2) Cilindro de medición (extraíble), 3) Medidor de flujo, 4) Válvula de aguja para ajustar el flujo, 5) Conmutador de alimentación, 6) Acoplamiento de conexión a gas, 7) Indicador digital para punto de rocío (en °C), 8) Orificio de salida de gas SF6, 9) Tubo flexible metálico de interconexión, 10) Cable de conexión a red (120Vac), 11) Acoplamiento DILO DN20 para equipo encapsulado.

Margen de indicación de -80°C a -20°C, Precisión de medida  $\pm 3^\circ\text{C}$  temperatura de punto de rocío, Flujo de 0,1 a 1 litro de SF6/min, Presión máxima de entrada de 10bar, Tensión de servicio de 110Vac (60Hz).

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

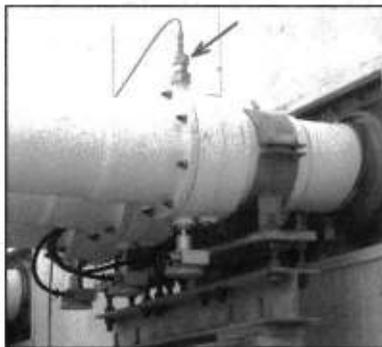
Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



FIGURA ANEXA 6.38

**TÍTULO:**

MEDIDA EN CAMPO DE LA HUMEDAD EN EL GAS SF6 DEL EQUIPO ENCAPSULADO  
(CASO I.B)



**DESCRIPCIÓN:**

Medición de humedad presente en el gas SF6 posterior al llenado de un compartimento de salida de línea monofásica de la bahía "ELECTROGUAYAS 2" del equipo encapsulado recientemente instalado en la Subestación "Salitral" de TRANSELECTRIC S.A.

SIEMENS establece un valor de punto de rocío MENOR a  $-40^{\circ}\text{C}$  como ACEPTABLE para la recepción de dicho gas como nuevo.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Tesis: Análisis y aplicación de los materiales aislantes líquidos, gaseosos y sólidos en equipos eléctricos de alta tensión



# TABLAS ANEXAS



**TABLA # 1.A1**

**VALORES DE LA CONSTANTE DIELECTRICA "K" PARA VARIOS MATERIALES AISLANTES**

<b><i>MATERIAL AISLANTE</i></b>	<b><i>CONSTANTE "K"</i></b>
<i>Baquelita</i>	<i>4,5 – 7,5</i>
<i>Ambar</i>	<i>2,2 – 2,9</i>
<i>Vidrio</i>	<i>3,5 – 16,0</i>
<i>Mica</i>	<i>5,0 – 7,0</i>
<i>Madera</i>	<i>3,0 – 6,5</i>
<i>Aire</i>	<i>1,0</i>
<i>Macanita</i>	<i>4,5 – 5,5</i>
<i>Papel</i>	<i>1,8 – 2,6</i>
<i>Parafina</i>	<i>2,1 – 2,3</i>
<i>Porcelana</i>	<i>4,5 – 6,0</i>
<i>Presspan</i>	<i>2,5</i>
<i>Aceite mineral</i>	<i>2,2 – 2,5</i>

**TABLA # 2.A1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE “LA MICARTA”**

<i>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</i>	<i>VALOR REFERENCIAL</i>
<i>Peso específico, en gr/cm<sup>3</sup></i>	<i>1,9.....2</i>
<i>Resistencia a la flexión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>630</i>
<i>Temperatura máxima de funcionamiento, en °C</i>	<i>130</i>
<i>Absorción de agua en 24 horas, en %</i>	<i>0,05</i>
<i>Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 20°C</i>	<i>12</i>
<i>Constante dieléctrica <math>\epsilon</math></i>	<i>4,2</i>
<i>Factor de Pérdidas (tg <math>\delta</math>), hasta 1 MHz</i>	<i>0,013</i>

**TABLA #2.B1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA “MADERA IMPREGNADA CON ACEITE MINERAL”**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>VALOR REFERENCIAL</b>
<i>Peso específico, en gr/cm<sup>3</sup> (a 20°C)</i>	0,62...0.96
<i>Resistencia a la tracción en dirección de las fibras, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	450....700
<i>Resistencia a la compresión, en Kg/cm<sup>2</sup>:</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Paralela a las fibras</i></li><li>• <i>Perpendicular a las fibras</i></li></ul>	800 620
<i>Resistencia a la flexión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	1000....1200
<i>Temperatura máxima de funcionamiento, en °C</i>	115
<i>Rigidez dieléctrica en corto tiempo (incremento de 100kV/mín) entre esferas 25mm de diámetro, medida bajo el aceite y perpendicular a las fibras, en kV/mm, Distancia entre electrodos.....0,4 cm 1,5 cm 10,0 cm</i>	140 90 25
<i>Constante dieléctrica ε a 20°C a 60°C</i>	3,3 4,1
<i>Cifra de pérdidas ε·tanδ (a 60°C)</i>	0,29

**TABLA #2.C1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL “PAPEL KRAFT”**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>VALOR REFERENCIAL</b>
<i>Peso específico, en gr/cm<sup>3</sup></i>	<i>&lt; 1,42</i>
<i>Resistencia a la tracción, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>700...1200</i>
<i>Resistencia a la compresión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>1000...1500</i>
<i>Resistencia a la flexión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>800...1500</i>
<i>Temperatura máxima de funcionamiento, en °C</i>	<i>105</i>
<i>Absorción de agua en 24 horas, en %</i>	<i>8...11</i>
<i>Resistividad, en ohmios.cm<sup>2</sup>/cm</i>	<i>10<sup>10</sup></i>
<i>Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 20°C</i>	<i>30</i>
<i>Constante dieléctrica ε</i>	<i>5,4</i>
<i>Factor de pérdidas (tg δ) a 50Hz</i>	<i>0,015</i>
<i>Factor de pérdidas (tg δ) a 1MHz</i>	<i>0,03</i>

**TABLA #2.D1****CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL “PRESBAN IMPREGNADO CON ACEITE MINERAL”**

<i>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</i>	<i>VALOR REFERENCIAL</i>
<i>Peso específico del material sin impregnar, en gr/cm<sup>3</sup></i>	<i>1,25....1,3</i>
<i>Peso específico del material impregnado, en gr/cm<sup>3</sup></i>	<i>1,45</i>
<i>Resistencia a la tracción, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>400....800</i>
<i>Resistencia a la compresión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>500....800</i>
<i>Temperatura máxima de funcionamiento, en °C</i>	<i>90</i>
<i>Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 20°C (1min)</i> <i>a 90°C (1min)</i>	<i>30....100</i> <i>26....88</i>
<i>Constante dieléctrica ε a 20°C</i> <i>a 90°C</i>	<i>3,9....4,3</i> <i>+(3....4%)</i>
<i>Factor de pérdidas (tg δ) a 20°C</i>	<i>0,01....0,02</i>
<i>Cifra de pérdidas ε·tanδ (a 20°C)</i>	<i>0,04....0,08</i>

**TABLA #2.E1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACEITE MINERAL AISLANTE, SEGÚN LA  
NORMA "ASTM D-3487"**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>ACEITE TIPO "A"</b>	<b>ACEITE TIPO "B"</b>
<b>FÍSICAS:</b>		
<i>Punto de anilina, °C</i>	63-84	63-84
<i>Color,</i>	0,5	0,5
<i>Punto de Inflamación, mín., °C</i>	145	145
<i>Tensión Interfacial a 25°C, mín., dinas/cm</i>	40	40
<i>Punto de Fluidiez, máx., °C</i>	-40	-40
<i>Gravedad específica, 15°C/15°C, máx.</i>	0,91	0,91
<i>Viscosidad, máx., est a:</i>		
100°C	3,0	3,0
40°C	12,0	12,0
0°C	76,0	76,0
<i>Examen Visual</i>	Claro y brillante	
<b>ELÉCTRICAS:</b>		
<i>Rigidez dieléctrica a 60Hz:</i>		
• <i>Electrodos de disco, mín., kV</i>	30	30
• <i>Electrodos VDE, mín., kV, galga:</i>		
0,040" (1,02 mm)	28	28
0,080" (2,03 mm)	56	56
<i>Rigidez dieléctrica, condiciones de impulso 25°C, mín., kV, aguja negativa a esfera aterrizada. galga de 1" (25,4 mm)</i>	145	145
<i>Factor de disipación (o factor de potencia) a 60Hz, máx., %</i>		
25°C	0,05	0,05
100°C	0,30	0,30
<b>QUÍMICAS:</b>		
<i>Estabilidad a la oxidación</i>		
• <i>72h:</i>		
% de lodo, máx. por masa	0,15	0,1
Número total ácido, mgKOH/g	0,5	0,3
• <i>164h:</i>		
% de lodo, máx. por masa	0,3	0,2
Número total ácido, mgKOH/g	0,6	0,4
<i>Contenido de inhibidor, % máx. por masa</i>	0,08	0,30
<i>Azufre corrosivo</i>	No Corrosivo	
<i>Contenido de agua, máx., ppm</i>	35	35
<i>Número de Neutralización, número total ácido, máx., mgKOH/g</i>	0,03	0,03
<i>Contenido de PCB</i>	No Detectable	

**TABLA # 2.F1****CARCATERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACEITE MINERAL AISLANTE, SEGÚN LA NORMA "NBR 7036"**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>ACEITE TIPO "A"</b>	<b>ACEITE TIPO "B"</b>
<b>FÍSICAS:</b>		
<i>Punto de anilina, °C</i>	83-94	83-94
<i>Color,</i>	1,0	1,0
<i>Densidad, a 20/4°C, máx.</i>	0,9	0,86
<i>Tensión Interfacial a 25°C, mín., dinas/cm</i>	40	40
<i>Punto de fulgor, mín., °C</i>	140	140
<i>Punto de Fluidez, máx., °C</i>	-15	-9
<i>Viscosidad, máx., cst a:</i>		
20°C	25	25
37.8°C	11	12
<b>ELÉCTRICAS:</b>		
<i>Rigidez dieléctrica kV/2.5mm.:</i>		
• <i>Electrodos de disco, mín., kV</i>	30	30
• <i>Electrodos VDE, mín., kV</i>		42
<i>Factor de potencia a 100°C, máx., %</i>	0,5	0,5
<b>QUÍMICAS:</b>		
<i>Estabilidad a la oxidación, a 100°C, 164h</i>		
<i>% de lodo, máx. por masa</i>	0,15	0,15
<i>Número total ácido, mgKOH/g</i>	0,5	0,5
<i>Azufre corrosivo</i>	<i>No Corrosivo</i>	
<i>Contenido de agua, máx., ppm</i>	35	50
<i>Índice de Neutralización, máx., mgKOH/g</i>		
• <i>Colorimétrico</i>	0,04	0,04
• <i>potenciométrico</i>	0,05	--
<i>Contenido de PCB</i>	<i>No Detectable</i>	

**TABLA # 2.G1**

**CARCATERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACEITE SINTÉTICO “ASKAREL”**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>ACEITE TIPO “A”</b>
<i>Peso específico a 20°C, en g/cm<sup>3</sup></i>	1,5
<i>Constante dieléctrica (20.....100°C, 50Hz)</i>	4,5....7
<i>Conductividad térmica, en 10<sup>3</sup>W/cm°C</i>	0,9
<i>Resistividad Ω.cm (20.....100°C)</i>	10 <sup>10</sup> .....10 <sup>15</sup>
<i>Factor de pérdidas, tgδ (20.....100°C, 50Hz)</i>	0,05
<i>Viscosidad a 20°C, cst</i>	30
<i>Punto de solidificación, en °C</i>	-30
<i>Coefficiente de dilatación (0.....100°C) 10<sup>-4</sup>/°C</i>	7
<i>Conductividad térmica, 10<sup>3</sup>W/cm°C</i>	1
<i>Calor específico (0.....100°C), J/g°C</i>	1,2

**TABLA # 2.H1****CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE “LA PORCELANA”**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN (VALORES REFERENCIALES)</b>		
	<b>POR VÍA SECA</b>	<b>POR VÍA HÚMEDA</b>	<b>POR COLADA</b>
<i>Estructura</i>	<i>Compacta</i>	<i>Compacta</i>	<i>Compacta</i>
<i>Porosidad</i>	---	0	0
<i>Absorción de agua en 24 horas, en %</i>	0....0,5	0	0
<i>Peso específico en gr/cm<sup>3</sup></i>	2,3....2,5	2,3.....2,5	2,3.....2,5
<i>Resistencia a la tracción, en kg/cm<sup>2</sup> (con esmaltado)</i>	100....140	300....500	---
<i>Resistencia a la tracción, en kg/cm<sup>2</sup> (sin esmaltado)</i>	70....140	240....300	---
<i>Resistencia a la compresión, en kg/cm<sup>2</sup> (con esmaltado)</i>	3 000....4 000	4 000....5 500	4 000....5 500
<i>Resistencia a la compresión, en kg/cm<sup>2</sup> (sin esmaltado)</i>	3 000....3 500	4 000....4 500	4 000....4 500
<i>Resistencia a la flexión, en kg/cm<sup>2</sup> (con esmaltado)</i>	600....700	900....1 000	900....1 000
<i>Resistencia a la flexión, en kg/cm<sup>2</sup> (sin esmaltado)</i>	300....600	400....800	400....800
<i>Temperatura de reblandecimiento, en °C</i>	~1 500	~1 500	~1 500
<i>Temperatura máxima de servicio, en °C</i>	1 000	1 000	1 000
<i>Resistencia a la llama</i>	<i>Infusible</i>	<i>Infusible</i>	<i>Infusible</i>
<i>Resistividad a 20°C, en Ω.cm<sup>2</sup>/cm</i>	<i>Superior a 10<sup>14</sup></i>	<i>Superior a 10<sup>14</sup></i>	<i>Superior a 10<sup>14</sup></i>
<i>Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 50Hz</i>	34....38	34....38	34....38
<i>Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 1MHz</i>	34....38	34....38	34....38
<i>Constante dieléctrica ε, a 50 Hz</i>	5....6,5	5....6,5	5....6,5
<i>Constante dieléctrica ε, a 1MHz</i>	5....6,5	5....6,5	5....6,5
<i>Factor de pérdidas (tg δ), a 50Hz</i>	0,017....0,025	0,017....0,025	0,017....0,025
<i>Factor de pérdidas (tg δ), a 1MHz</i>	0,007....0,012	0,007....0,012	0,007....0,012
<i>Resistencia a los agentes químicos</i>	<i>Excepcional</i>	<i>Excepcional</i>	<i>excepcional</i>

**TABLA # 2.II**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE “LA PORCELANA DE ALÚMINA”**

<i>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</i>	<i>VALOR REFERENCIAL</i>
<i>Absorción de agua, %</i>	<i>0.0</i>
<i>Temperatura segura de operación, en °C</i>	<i>1350-1500</i>
<i>Resistencia a la tensión, en kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>8000 – 30000</i>
<i>Resistencia a la compresión, en kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>80000 – 250000</i>
<i>Resistencia a la flexión, en kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>20000 – 45000</i>
<i>Rigidez Dieléctrica (v/mm; ¼” de espesor del espécimen)</i>	<i>250 – 400</i>
<i>Resistividad (ohm/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>10<sup>14</sup> – 10<sup>15</sup></i>
<i>Constante Dieléctrica</i>	<i>8 - 9</i>

**TABLA # 2.J1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL “PAPEL Y MADERA LAMINADOS CON RESINA FENÓLICA”**

<i>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</i>	<i>VALORES REFERENCIALES</i>	
	<i>PAPEL</i>	<i>MADERA</i>
<i>Rigidez Dieléctrica,</i>	<i>12....32</i>	<i>3....15</i>
<i>Resistividad, en <math>\Omega\cdot\text{cm}</math></i>	<i><math>10^9 \dots 10^{13}</math></i>	<i><math>10^7 \dots 10^9</math></i>
<i>Factor de Pérdidas (<math>\text{tg}\delta</math>) a <math>50 \dots 10^6</math> Hz</i>	<i>0,02....0,1</i>	<i>0,05....0,3</i>
<i>Resistencia a la Tracción, en <math>\text{Kg}/\text{mm}^2</math></i>	<i>3....12</i>	<i>7....15</i>
<i>Resistencia a la Flexión, en <math>\text{Kg}/\text{mm}^2</math></i>	<i>5....12</i>	<i>14....28</i>
<i>Temperatura permanente admisible, en <math>^{\circ}\text{C}</math></i>	<i>105....120</i>	<i>90....120</i>



**C.I.B.**

**TABLA # 2.K1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE “LA FIBRA PROCESADA”**

<i>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</i>	<i>VALOR REFERENCIAL</i>
<i>Peso específico a 20°C, en gr/cm<sup>3</sup></i>	<i>1....1,5</i>
<i>Rigidez dieléctrica</i>	<i>6....12</i>
<i>Resistividad <math>\Omega.cm</math></i>	<i>10<sup>12</sup>....10<sup>15</sup></i>
<i>Factor de pérdidas (tg <math>\delta</math>) a 50Hz y 20°C</i>	<i>0,0006....0,002</i>
<i>Resistencia a la tracción, en Kg/mm<sup>2</sup></i>	<i>4....12</i>
<i>Resistencia a la flexión, en Kg/mm<sup>2</sup></i>	<i>5....6</i>
<i>Temperatura permanente admisible, en °C</i>	<i>180....300</i>

**TABLA # 2.L1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL "GAS SF<sub>6</sub>"**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>VALORES REFERENCIALES</b>	
	<b>IEC 376</b>	<b>ASTM D-2472</b>
<i>Contenido de agua, en ppm (máx.)</i>	10	8,9
<i>Aire, % peso (máx.)</i>	0,05	0,05
<i>CF<sub>4</sub>, % en peso (máx.)</i>	0,05	0,05
<i>Acidez, % en peso (máx.)</i>	0,3	--
<i>Contenido de aceite, en ppm (máx.)</i>	10	--
<i>Peso molecular</i>	--	146±2%
<i>Tóxico</i>	<i>No tóxico</i>	<i>No tóxico</i>
<i>Pureza, % en peso (mín.)</i>	--	99,8

**TABLA # 2.M1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL “TEFLÓN”**

<b>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</b>	<b>VALOR REFERENCIAL</b>
<i>Peso específico a 20°C, en gr/cm<sup>3</sup></i>	2,2
<i>Carga de rotura, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	150
<i>Alargamiento a la rotura, en %</i>	200
<i>Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C</i>	300
<i>Temperatura de fragilidad, en °C</i>	-50
<i>Resistencia a la llama</i>	<i>Incombustible</i>
<i>Resistividad a 20°C, en Ω.cm<sup>2</sup>/cm</i>	10 <sup>15</sup>
<i>Rigidez dieléctrica a 20°C, en kV/mm<sup>2</sup></i>	30
<i>Constante dieléctrica ε a 50Hz</i>	2
<i>Factor de Pérdidas (tg δ) a 50Hz y 20°C</i>	2x10 <sup>-4</sup>
<i>Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico</i>	<i>Excepcional</i>
<i>Resistencia a la humedad</i>	<i>Excepcional</i>
<i>Resistencia a los aceites y grasas minerales</i>	<i>excepcional</i>

**TABLA # 2.N1**

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE “LA RESINA EPOXÍDICA SÓLIDA”**

<i>CARACTERÍSTICA TÉCNICA</i>	<i>VALOR REFERENCIAL</i>
<i>Resistencia a la flexión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>900 a 1200</i>
<i>Resistencia a la tracción, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	<i>550 a 850</i>
<i>Temperatura de deformación, en °C</i>	<i>95</i>
<i>Constante dieléctrica <math>\epsilon</math> a 20°C y 50Hz</i>	<i>3,7 a 3,9</i>
<i>Factor de Pérdidas (tg <math>\delta</math>) a 50Hz y 20°C</i>	<i>0,4 a 0,7</i>
<i>Resistencia a la corriente de fuga</i>	<i>Muy buena</i>
<i>Resistencia a los arcos eléctricos</i>	<i>Moderada</i>

**TABLA # 2.01****CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE “LA RESINA EPOXÍDICA CARGADA”**

<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>	<b>VALORES REFERENCIALES DE RESINA EPOXÍDICA CARGADA CON</b>				
	<b>HARINA DE CUARZO</b>	<b>POLVO DE CUARZO</b>	<b>HARINA DE ESTEATITA</b>	<b>CALCITA</b>	<b>ÓXIDO DE CALCIO</b>
<i>Resistencia a la flexión, en Kg/cm<sup>2</sup></i>	900	970	1050	640	800
<i>Temperatura máxima de endurecimiento, en °C</i>	143	144	156	158	152
<i>Temperatura de deformación, en °C</i>	83	88	83	80	86
<i>Constante dieléctrica <math>\epsilon</math> a 20°C y 50Hz</i>	3,1	4,1	4	4,7	3,5
<i>Factor de Pérdidas (tg <math>\delta</math>) a 50Hz y 20°C</i>	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04
<i>Resistencia a la corriente de fuga</i>	<i>Excepcional</i>	<i>Buena</i>	<i>Buena</i>	<i>Mediana</i>	<i>Buena</i>

**TABLA # 3.A1**

**CLASIFICACIÓN DEL ACEITE SEGÚN SUS CONDICIONES Y LOS EFECTOS EN EL TRANSFORMADOR**

<b>CLASIFICACIÓN DEL ACEITE DEL TRANSFORMADOR</b>				
<b>CONDICIONES DEL ACEITE</b>	<b>NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN (mg KOH/g)</b>	<b>TENSIÓN INTERFACIAL (dina/cm)</b>	<b>COLOR</b>	<b>EFECTO DEL ACEITE EN EL TRANSFORMADOR</b>
<i>Excelente</i>	<i>0,03 a 0,10</i>	<i>30 a 35</i>	<i>Claro</i>	<i>Enfriamiento eficaz y preservación del aislamiento</i>
<i>Bueno</i>	<i>0,05 a 0,10</i>	<i>27 a 29</i>	<i>Amarillo</i>	<i>Componentes polares (borra) en solución (productos de la oxidación del aceite) causan la caída de la Tensión Interfacial</i>
<i>Regular</i>	<i>0,11 a 0,15</i>	<i>24 a 27</i>	<i>Amarillo brillante</i>	<i>Ácidos grasos cubren los enrollamientos. Ocurrencia inicial de borra en solución. Gran probabilidad de borra en los vacíos del aislamiento.</i>
<i>Mala</i>	<i>0,16 a 0,40</i>	<i>18 a 24</i>	<i>Ámbar</i>	<i>En casi 100% de los transformadores en esta escala, la borra está depositada en el núcleo y en las bobinas. La borra se deposita inicialmente en las áreas de los radiadores.</i>
<i>Muy mala</i>	<i>0,41 a 0,65</i>	<i>14 a 18</i>	<i>Marrón</i>	<i>La borra depositada continúa a oxidar y endurecer. Se produce la retracción del aislamiento. Existe una gran posibilidad de falla.</i>
<i>Extremadamente mala</i>	<i>0,66 a 1,50</i>	<i>9 a 14</i>	<i>Marrón oscuro</i>	<i>La borra aísla los radiadores de refrigeración de las bobinas, bloquea las aberturas provocando elevación de la temperatura.</i>
<i>???</i>	<i>mayor a 1.50</i>	<i>6 a 9</i>	<i>Negro</i>	<i>Grandes cantidades de borra que exigirán drásticos procesos de limpieza.</i>

**TABLA # 4.A1**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSION DE VALORES DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C (TRANSFORMADOR INMERSO EN ACEITE AISLANTE)**

<b>TEMPERTURA</b>		<b>Transformador de aceite</b>
<b>°C</b>	<b>°F</b>	
0	32	0.25
5	41	0.36
10	50	0.50
15.6	60	0.74
20	68	1.00
25	77	1.40
30	86	1.98
35	95	2.80
40	104	3.95
45	113	5.60
50	122	7.85
55	131	11.20
60	140	15.85
65	149	22.40
70	158	31.75
75	167	44.70

***Ejemplo de aplicación:***

*Supongamos que tenemos un transformador y de el obtenemos una lectura de 2.0 megohms de resistencia de aislamiento, a una temperatura (en los embobinados) de 104°F (40°C). De la Tabla se lee a través de 104°F a la columna siguiente y se obtiene el factor 3,95. Por lo tanto, el valor corregido de resistencia es:*

$$2.0 \text{ M}\Omega \text{ (lectura a } 104^\circ\text{F)} \times 3,95 \text{ (Factor de corrección)} = 7,90 \text{ M}\Omega \text{ (lectura corregida)}$$

**TABLA # 4.B1**

**CONDICIONES DE AISLAMIENTO INDICADAS POR LAS RELACIONES DE  
ABSORCIÓN DIELECTRICA**

<b>CONDICIÓN DEL AISLAMIENTO</b>	<b>INDICE DE ABSORCIÓN</b>	<b>INDICE DE POLARIZACIÓN</b>
<b>PELIGROSO</b>	----	<i>menor que 1.0</i>
<b>POBRE</b>	<i>menor que 1.1</i>	<i>1 a 1.5</i>
<b>CUASTIONABLE</b>	<i>1.1 a 1.25</i>	<i>1.5 a 2.0</i>
<b>SATISFACTORIO</b>	<i>1.25 a 1.4</i>	<i>2.0 a 3.0</i>
<b>BUENO</b>	<i>1.4 a 1.6</i>	<i>3.0 a 4.0</i>
<b>EXCELENTE</b>	<i>sobre 1.6</i>	<i>sobre 4.0</i>

- *Estos valores se deben considerar tentativos y relativos, sujetos a la experiencia con el método tiempo – resistencia en un periodo de tiempo*

**TABLA # 4.C1**

**VOLTAJES RECOMENDADOS POR LAS NORMAS PARA ENSAYOS  
DIELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN**

<i>Clase de Tensión de aislamiento nominal (KV)</i>	<i>Nivel de Impulso (NI) KV (cresta)</i>	<i>Ensayos con Frecuencia Industrial durante Imin. (valor eficaz, en KV)</i>	<i>Ensayos de Impulso (valor de cresta)</i>		
			<i>Con Onda Cortada</i>		<i>Con Onda Plena</i>
			<i>KV</i>	<i>Tiempo Mínimo de corte (μs)</i>	<i>KV</i>
<i>(1)</i>	<i>(2)</i>	<i>(3)</i>	<i>(4)</i>	<i>(5)</i>	<i>(6)</i>
0,6	-	4	-	-	-
1,2	30	10	36	1,0	30
5	60	19	69	1,5	60
8,7	75	26	88	1,6	75
15-B	95	34	110	1,8	95
15	110	34	130	2,0	110
25	150	50	175	3,0	150
34,5	200	70	230	3,0	200
46	250	95	200	3,0	250
69	350	140	400	3,0	350
92	450	185	520	3,0	450
138-B	550	230	630	3,0	550
138	650	275	750	3,0	650
161-B	650	275	750	3,0	650
161	750	325	865	3,0	750
230-B2	825	360	950	3,0	825
230-B1	900	395	1035	3,0	900
230	1050	460	1210	3,0	1050
345-B2	1175	510	1350	3,0	1175
345-B1	1300	570	1500	3,0	1300
345	1425	630	1640	3,0	1425
440-B2	1425	630	1640	3,0	1425
440-B1	1550	680	1785	3,0	1550
440	1675	740	1925	3,0	1675

**TABLA # 4.D1**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR DE POTENCIA A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C (TRANSFORMADORES, REACTORES SHUNT Y REGULADORES DE VOLTAJE)**

**TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C**

**LIQUID-FILLED TRANSFORMERS, SHUNT REACTORS, AND VOLTAGE REGULATORS**



POWER TRANSFORMERS (Above 500 kVA)		DISTRIBUTION TRANSFORMERS (500 kVA and Below)				TEST TEMPERATURES		PTs, VTs, CTs, and MOs						
Askairel-Filled Trans.	Oil-Filled Transformers	Free Breathing and Pre-1955 Conservator Types	Sealed, Gas-blanketed, and Modern Conservator Types	Oil-Filled		Silicone	Silicone	°C	°F	HV/EHV Shunt Reactors (Oil-Filled)	Voltage Regulators (Oil-Filled)	Askairel	Oil-Filled	
				Prior to 1950	Modern								Modern, 220 kV and Above	All Others
1.56	1.56	.95	—	1.56	1.57	—	0	32.0	.95	1.56	—	—	1.57	1.67
1.52	1.48	.96	—	1.52	1.50	—	2	35.6	.96	1.52	—	—	1.50	1.61
1.48	1.45	.98	—	1.48	1.44	—	4	39.2	.98	1.48	—	—	1.44	1.55
1.45	1.43	.98	—	1.45	1.37	—	6	42.8	.98	1.45	—	—	1.37	1.49
1.43	1.38	.99	—	1.43	1.31	—	8	46.4	.99	1.43	—	—	1.31	1.43
1.38	1.31	.99	—	1.38	1.25	—	10	50.0	.99	1.38	—	—	1.25	1.36
1.31	1.24	1.00	—	1.31	1.19	—	12	53.6	1.00	1.31	—	—	1.19	1.30
1.24	1.16	1.01	—	1.24	1.14	—	14	57.2	1.01	1.24	—	—	1.14	1.23
1.16	1.08	1.01	—	1.16	1.09	—	16	60.8	1.01	1.16	—	—	1.09	1.16
1.08	1.00	1.00	—	1.08	1.05	—	18	64.4	1.00	1.08	—	—	1.05	1.08
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
.99	.91	.99	.96	.90	.96	.96	22	71.6	.99	.91	.90	.90	.96	.93
.81	.76	.98	.92	.81	.83	.92	24	75.2	.98	.83	.81	.81	.92	.86
.76	.70	.97	.88	.72	.76	.88	26	78.8	.97	.76	.72	.72	.88	.80
.64	.63	.96	.84	.64	.70	.84	28	82.4	.96	.70	.64	.64	.84	.74
.56	.51	.95	.80	.56	.63	.80	30	86.0	.95	.63	.56	.56	.80	.69
.51	.46	.94	.76	.51	.58	.76	32	89.6	.94	.58	.51	.51	.76	.65
.46	.42	.93	.73	.46	.53	.73	34	93.2	.93	.53	.46	.46	.73	.60
.42	.39	.91	.70	.42	.49	.70	36	96.8	.91	.49	.42	.42	.70	.56
.39	.35	.90	.67	.39	.45	.67	38	100.4	.90	.45	.39	.39	.67	.52
.35	.33	.89	.65	.35	.42	.65	40	104.0	.89	.42	.35	.35	.65	.48
.33	.30	.87	.62	.33	.38	.62	42	107.6	.87	.38	.33	.33	.62	.45
.30	.28	.86	.59	.30	.36	.59	44	111.2	.86	.36	.30	.30	.59	.42
.28	.26	.84	.56	.28	.33	.56	46	114.8	.84	.33	.28	.28	.56	.42
.26	.24	.83	.54	.26	.30	.54	48	118.4	.83	.30	.26	.26	.54	.42
.24	.22	.81	.51	.24	.28	.51	50	122.0	.81	.28	.24	.24	.51	.42
.22	.21	.79	.49	.22	.26	.49	52	125.6	.79	.26	.22	.22	.49	.42
.21	.20	.77	.47	.21	.23	.47	54	129.2	.77	.23	.21	.21	.47	.42
.19	.19	.75	.45	.19	.21	.45	56	132.8	.75	.21	.19	.19	.45	.42
.18	.17	.72	.43	.18	.19	.43	58	136.4	.72	.19	.18	.18	.43	.42
.16	.16	.70	.41	.16	.17	.41	60	140.0	.70	.17	.16	.16	.41	.42

TMCF 2090 REV A

©1993 Doble Engineering Company  
All rights reserved

**TABLA # 4.D2**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR  
DE POTENCIA A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C  
(LÍQUIDOS AISLANTES)**



**TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS  
AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C**

TEST TEMPERATURES		INSULATING FLUIDS			
		ASKAREL	CONVENTIONAL INSULATING OIL	SILICONE OILS	
°C	°F			New	Service Aged
0	32.0	—	1.56	—	—
2	35.6	—	1.52	—	—
4	39.2	—	1.48	—	—
6	42.8	—	1.45	—	—
8	46.4	—	1.43	—	—
10	50.0	—	1.38	—	—
12	53.6	—	1.31	—	—
14	57.2	—	1.24	—	—
16	60.8	—	1.16	—	—
18	64.4	—	1.08	—	—
20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00
22	71.6	.90	.91	0.81	0.76
24	75.2	.81	.83	0.68	0.57
26	78.8	.72	.76	0.65	0.50
28	82.4	.64	.70	0.62	0.45
30	86.0	.56	.63	0.54	0.40
32	89.6	.51	.58	0.52	0.37
34	93.2	.46	.53	0.45	0.34
36	96.8	.42	.49	0.42	0.31
38	100.4	.39	.45	0.36	0.29
40	104.0	.35	.42	0.30	0.26
42	107.6	.33	.38	0.26	0.25
44	111.2	.30	.36	0.24	0.23
46	114.8	.28	.33	0.18	0.21
48	118.4	.26	.30	0.16	0.19
50	122.0	.24	.28	0.13	0.18
52	125.6	.22	.26	0.11	0.16
54	129.2	.21	.23	—	—
56	132.8	.19	.21	—	—
58	136.4	.18	.19	—	—
60	140.0	.16	.17	—	—

**TABLA # 4.D3**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR DE POTENCIA A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C (BUSHING'S DE VARIOS FABRICANTES – PARTE I)**

**TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C**



ABB		ASEA		BROWN BOVERI		BUSHINGS				GENERAL ELECTRIC					HAEFELY	
Type	Type O + C	All GO Types 25-765 kV	Types CTF, CTKF 20-60 kV	Types CTF, CTKF 85-330 kV	TEST TEMPERATURES °C	TEST TEMPERATURES °F	Type B	Type F	Types L, LC, LI, LM	Types OF, OFI, OFM	Types S, Si, SIM (Cpd.-Filled)	Types TendU	Types COS, SOT			
1.02	.87	.79	1.24	1.00	0	32.0	1.09	.93	1.00	1.18	1.26	1.02	-			
1.02	.89	.81	1.22	1.00	2	35.6	1.09	.95	1.00	1.16	1.24	1.02	-			
1.02	.91	.83	1.20	1.00	4	39.2	1.09	.97	1.00	1.15	1.21	1.02	-			
1.01	.92	.85	1.17	1.00	6	42.8	1.08	.98	1.00	1.13	1.19	1.01	-			
1.01	.93	.87	1.15	1.00	8	46.4	1.08	.99	1.00	1.11	1.16	1.01	-			
1.01	.94	.89	1.12	1.00	10	50.0	1.07	.99	1.00	1.10	1.14	1.01	0.88			
1.01	.95	.92	1.10	1.00	12	53.6	1.06	.99	1.00	1.08	1.11	1.01	0.90			
1.01	.96	.94	1.06	1.00	14	57.2	1.05	1.00	1.00	1.06	1.08	1.01	0.93			
1.00	.96	.95	1.05	1.00	16	60.8	1.04	1.00	1.00	1.04	1.06	1.00	0.95			
1.00	.99	.98	1.03	1.00	18	64.4	1.02	1.00	1.00	1.02	1.03	1.00	0.98			
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			
1.00	1.03	1.03	.98	1.00	22	71.6	.97	.99	.99	.97	.97	1.00	1.02			
1.00	1.02	1.05	.96	1.00	24	75.2	.93	.97	.99	.94	.93	1.00	1.04			
.99	1.03	1.07	.94	1.00	26	78.8	.90	.96	.98	.91	.90	.99	1.07			
.99	1.04	1.09	.91	1.00	28	82.4	.85	.94	.97	.88	.87	.99	1.09			
.98	1.05	1.12	.88	1.00	30	86.0	.81	.92	.96	.86	.84	.98	1.11			
.97	1.06	1.14	.86	1.00	32	89.6	.77	.89	.95	.83	.81	.97	1.13			
.97	1.07	1.17	.84	1.00	34	93.2	.73	.87	.94	.80	.77	.97	1.15			
.96	1.07	1.19	.82	1.00	36	96.8	.69	.84	.93	.77	.74	.96	1.17			
.95	1.06	1.21	.80	1.00	38	100.4	.65	.81	.91	.74	.70	.95	1.19			
.94	1.08	1.23	.78	1.00	40	104.0	.61	.78	.89	.70	.67	.94	1.21			
.93	1.09	1.26	.76	1.00	42	107.6	-	.74	.87	.67	.63	.93	1.22			
.91	1.10	1.28	.74	1.00	44	111.2	-	.70	.85	.63	.60	.91	1.24			
.89	1.10	1.30	.72	1.00	46	114.8	-	.64	.83	.61	.56	.89	1.25			
.87	1.11	1.31	.70	1.00	48	118.4	-	.58	.82	.58	.53	.87	1.26			
.86	1.11	1.33	.68	1.00	50	122.0	-	.52	.80	.56	.50	.86	1.27			
.84	1.11	1.34	.66	1.00	52	125.6	-	-	.79	.53	.47	.84	1.28			
.82	1.11	1.36	.64	1.00	54	129.2	-	-	.78	.51	.44	.82	1.29			
.79	1.11	1.37	.62	1.00	56	132.8	-	-	.77	.49	.41	.79	1.30			
.77	1.12	1.37	.60	1.00	58	136.4	-	-	.76	.46	.38	.77	1.29			
.75	1.12	1.38	.58	1.00	60	140.0	-	-	.74	.44	.36	.75	1.27			

©1993 Doble Engineering Company  
All rights reserved

TMCF-4950

**TABLA # 4.D4**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR DE POTENCIA A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C (BUSHING'S DE VARIOS FABRICANTES – PARTE II)**

**TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C (BUSHINGS – continued)**

Class <sup>1</sup> ERC 15-23 kV	LAPP		McGraw-Edison		Micanite and Insulators Co.		Test Temperatures		Ohio Brass				Passoni Villa		Westinghouse	
	Class PRC 15-69 kV	Class POC 15-765 kV	Types P, PA, PB	Types WT, F	Types 25-69 kV 89 kV	Above 89 kV	°C	°F	Class G or L 46- 138 kV	Class L 7.5- 34.5 kV	Class GK 15- 500 kV	Class LK 15- 69 kV	Types PTAO, 3 PVF 25-230 kV	Con- denser, except Type O	Types O O-AI and O + C	
.90	.81	1.00	.68	-	1.55	1.13	0	32.0	1.29	.90	.85	.65	1.61	.88	.87	
.91	.83	1.00	.70	-	1.49	1.11	2	35.6	1.26	.91	.86	.69	1.52	.89	.89	
.92	.86	1.00	.72	-	1.43	1.10	4	39.2	1.24	.91	.87	.74	1.44	.90	.91	
.93	.88	1.00	.76	-	1.37	1.08	6	42.8	1.21	.92	.89	.78	1.36	.91	.92	
.94	.89	1.00	.79	-	1.31	1.07	8	46.4	1.20	.92	.90	.82	1.30	.93	.93	
.95	.92	1.00	.82	-	1.25	1.06	10	50.0	1.18	.93	.92	.86	1.23	.94	.94	
.96	.94	1.00	.85	-	1.20	1.05	12	53.6	1.18	.94	.93	.89	1.18	.95	.95	
.97	.95	1.00	.87	1.00	1.15	1.04	14	57.2	1.14	.95	.95	.92	1.13	.96	.96	
.98	.97	1.00	.93	1.00	1.10	1.02	16	60.8	1.09	.97	.96	.95	1.09	.98	.98	
.99	.98	1.00	.96	1.00	1.05	1.01	18	64.4	1.03	.98	.98	.97	1.04	.99	.99	
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
1.01	1.00	1.00	1.02	-	.96	.99	22	71.6	.95	.97	1.02	1.02	.96	1.01	1.01	
1.02	1.03	1.00	1.10	-	.91	.98	24	75.2	.91	1.04	1.04	1.05	.92	1.02	1.02	
1.03	1.05	1.00	1.14	-	.87	.96	26	78.8	.88	.91	1.06	1.07	.88	1.04	1.03	
1.04	1.07	1.00	1.18	-	.84	.95	28	82.4	.84	.88	1.09	1.08	.84	1.05	1.04	
1.05	1.10	1.00	1.24	-	.80	.94	30	86.0	.80	.86	1.11	1.10	.81	1.06	1.05	
1.06	1.11	1.00	1.29	-	.77	.93	32	89.6	.77	.83	1.13	1.12	.77	1.07	1.06	
1.07	1.12	1.00	1.32	1.00	.74	.92	34	93.2	.74	.80	1.15	1.14	.74	1.08	1.07	
1.08	1.13	1.00	1.36	1.00	.70	.90	36	96.8	.71	.78	1.17	1.15	.70	1.08	1.07	
1.09	1.14	1.00	1.41	-	.67	.89	38	100.4	.68	.75	1.19	1.17	.67	1.09	1.08	
1.10	1.15	1.00	1.45	-	.64	.88	40	104.0	.65	.72	1.21	1.18	.64	1.09	1.08	
1.11	1.15	1.00	1.50	-	.61	.87	42	107.6	-	-	1.22	1.19	.62	1.10	1.09	
1.12	1.15	1.00	1.55	-	.58	.86	44	111.2	-	-	1.24	1.20	.59	1.11	1.10	
1.13	1.15	1.00	1.58	-	.55	.85	46	114.8	-	-	1.26	1.21	.56	1.11	1.10	
1.14	1.14	1.00	1.61	-	.52	.84	48	118.4	-	-	1.27	1.21	.53	1.10	1.11	
1.15	1.13	1.00	1.65	-	.50	.83	50	122.0	-	-	1.29	1.22	.51	1.10	1.11	
1.16	1.11	1.00	1.67	-	-	-	52	125.6	-	-	1.30	1.22	.50	1.10	1.11	
1.17	1.09	1.00	1.67	-	-	-	54	129.2	-	-	1.31	1.22	.48	1.09	1.11	
1.18	1.07	1.00	1.67	-	-	-	56	132.8	-	-	1.33	1.22	.47	1.08	1.11	
1.19	1.06	1.00	1.68	-	-	-	58	136.4	-	-	1.34	1.21	.46	1.07	1.12	
1.20	1.05	1.00	1.68	-	-	-	60	140.0	-	-	1.35	1.21	.45	1.06	1.12	

<sup>1</sup>This curve is applicable to those ERC bushings which were manufactured after March 1987 (S/N 3530 or higher).

TMCF-4950

©1993 Deble Engineering Company  
All rights reserved

**TABLA # 4.E1**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR  
DE DISIPACIÓN A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C  
(TRANSFORMADORES Y REGULADORES)**

TEST TEMPERATURE		OIL-FILLED POWER TRANSFORMERS			
°C	°F	ASKAREL FILLED XFMR'S	FREE- BREATHING & CONSERVATOR TYPE	SEALED & GASKET BLANKETED TYPE	OIL-FILLED INSTRUMENT XFMR'S
0	32.0		1.56	1.57	1.67
1	33.8		1.54	1.54	1.64
2	35.6		1.52	1.50	1.61
3	37.4		1.50	1.47	1.58
4	39.2		1.48	1.44	1.55
5	41.0		1.46	1.41	1.52
6	42.8		1.45	1.37	1.49
7	44.6		1.44	1.34	1.46
8	46.4		1.43	1.31	1.43
9	48.2		1.41	1.28	1.40
10	50.0		1.38	1.25	1.36
11	51.8		1.35	1.22	1.33
12	53.6		1.31	1.19	1.30
13	55.4		1.27	1.16	1.27
14	57.2		1.24	1.14	1.23
15	59.0		1.20	1.11	1.19
16	60.8		1.16	1.09	1.16
17	62.6		1.12	1.07	1.12
18	64.4		1.08	1.05	1.08
19	66.2		1.04	1.02	1.04
20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00
21	69.8	0.95	0.96	0.98	0.97
22	71.6	0.90	0.91	0.96	0.93
23	73.4	0.85	0.87	0.94	0.90
24	75.2	0.81	0.83	0.92	0.86
25	77.0	0.76	0.79	0.90	0.83
26	78.8	0.72	0.76	0.88	0.80
27	80.6	0.68	0.73	0.86	0.77
28	82.4	0.64	0.70	0.84	0.74
29	84.2	0.60	0.67	0.82	0.71
30	86.0	0.56	0.63	0.80	0.69
31	87.8	0.53	0.60	0.78	0.67
32	89.6	0.51	0.58	0.76	0.65
33	91.4	0.48	0.56	0.75	0.62
34	93.2	0.46	0.53	0.73	0.60
35	95.0	0.44	0.51	0.71	0.58
36	96.8	0.42	0.49	0.70	0.56
37	98.6	0.40	0.47	0.69	0.54
38	100.4	0.39	0.45	0.67	0.52
39	102.2	0.37	0.44	0.66	0.50
40	104.0	0.35	0.42	0.65	0.48
42	107.6	0.33	0.38	0.62	0.45
44	111.2	0.30	0.36	0.59	0.42
46	114.8	0.28	0.33	0.56	
48	118.4	0.26	0.30	0.54	
50	122.0	0.24	0.28	0.51	
52	125.6	0.22	0.25	0.49	
54	129.2	0.21	0.23	0.47	
56	132.8	0.19	0.21	0.45	
58	136.4	0.18	0.19	0.43	
60	140.0	0.16	0.17	0.41	
62	143.6	0.15	0.16	0.40	
66	150.8	0.14	0.14	0.36	
70	158.0	0.12	0.12	0.33	

**TABLA # 4.E2**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR  
DE DISIPACIÓN A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C  
(BUSHING'S DE VARIOS FABRICANTES – PARTE I)**

TEST TEMPERATURE		GENERAL ELECTRIC					
°C	°F	TYPE B	TYPE F	TYPES L-LC U-LM	TYPES OF-OFI OFM	TYPES S-SI-SM	TYPE U
0	32.0	1.09	0.93	1.00	1.18	1.26	1.02
1	33.8	1.09	0.94	1.00	1.17	1.25	1.02
2	35.6	1.09	0.95	1.00	1.16	1.24	1.02
3	37.4	1.09	0.96	1.00	1.15	1.22	1.02
4	39.2	1.09	0.97	1.00	1.15	1.21	1.02
5	41.0	1.09	0.98	1.00	1.14	1.20	1.02
6	42.8	1.08	0.98	1.00	1.13	1.19	1.01
7	44.6	1.08	0.98	1.00	1.12	1.17	1.01
8	46.4	1.08	0.99	1.00	1.11	1.16	1.01
9	48.2	1.07	0.99	1.00	1.11	1.15	1.01
10	50.0	1.07	0.99	1.00	1.10	1.14	1.01
11	51.8	1.07	0.99	1.00	1.09	1.12	1.01
12	53.6	1.06	0.99	1.00	1.08	1.11	1.01
13	55.4	1.06	0.99	1.00	1.07	1.10	1.01
14	57.2	1.05	1.00	1.00	1.06	1.08	1.01
15	59.0	1.05	1.00	1.00	1.05	1.07	1.01
16	60.8	1.04	1.00	1.00	1.04	1.06	1.00
17	62.6	1.03	1.00	1.00	1.03	1.04	1.00
18	64.4	1.02	1.00	1.00	1.02	1.03	1.00
19	66.2	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00
20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
21	69.8	0.98	0.99	1.00	0.99	0.98	1.00
22	71.6	0.97	0.99	0.99	0.97	0.97	1.00
23	73.4	0.95	0.98	0.99	0.96	0.95	1.00
24	75.2	0.93	0.97	0.99	0.94	0.93	1.00
25	77.0	0.92	0.97	0.99	0.93	0.92	1.00
26	78.8	0.90	0.96	0.98	0.91	0.90	0.99
27	80.6	0.88	0.95	0.98	0.90	0.89	0.99
28	82.4	0.85	0.94	0.97	0.88	0.87	0.99
29	84.2	0.83	0.93	0.96	0.87	0.86	0.99
30	86.0	0.81	0.92	0.96	0.86	0.84	0.99
31	87.8	0.80	0.91	0.95	0.84	0.83	0.99
32	89.6	0.77	0.89	0.95	0.83	0.81	0.99
33	91.4	0.75	0.88	0.95	0.81	0.79	0.99
34	93.2	0.73	0.87	0.94	0.80	0.77	0.99
35	95.0	0.71	0.85	0.94	0.78	0.76	0.98
36	96.8	0.69	0.84	0.93	0.77	0.74	0.98
37	98.6	0.67	0.83	0.92	0.75	0.72	0.98
38	100.4	0.65	0.81	0.91	0.74	0.70	0.98
39	102.2	0.63	0.80	0.90	0.72	0.68	0.98
40	104.0	0.61	0.78	0.89	0.70	0.67	0.98
42	107.6		0.74	0.87	0.67	0.63	0.98
44	111.2		0.70	0.85	0.63	0.60	0.98
46	114.8		0.64	0.83	0.61	0.56	0.97
48	118.4		0.58	0.82	0.58	0.53	0.97
50	122.0		0.52	0.80	0.56	0.50	0.97
52	125.6			0.79	0.53	0.47	0.97
54	129.2			0.78	0.51	0.44	0.97
56	132.8			0.77	0.49	0.41	0.96
58	136.4			0.76	0.46	0.38	0.96
60	140.0			0.74	0.44	0.36	0.96
62	143.6			0.73	0.40	0.33	
66	150.8			0.70	0.39	0.28	
70	158.0			0.66	0.36	0.23	

**TABLA # 4.E3**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR  
DE DISIPACIÓN A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C  
(BUSHING'S DE VARIOS FABRICANTES – PARTE II)**

TEST TEMPERATURE		LAPP INSULATOR COMPANY		MICANITE AND INSULATORS COMPANY	
°C	°F	CLASS P O C 15 TO 69 KV	P R C	25 TO 69 KV	ABOVE 69 KV
0	32.0	1.00	0.80	1.55	1.13
1	33.8	1.00			
2	35.6	1.00			
3	37.4	1.00			
4	39.2	1.00			
5	41.0	1.00	0.86	1.40	1.09
6	42.8	1.00			
7	44.6	1.00			
8	46.4	1.00			
9	48.2	1.00			
10	50.0	1.00	0.91	1.25	1.08
11	51.8	1.00			
12	53.6	1.00			
13	55.4	1.00			
14	57.2	1.00			
15	59.0	1.00	0.95	1.12	1.03
16	60.8	1.00			
17	62.6	1.00			
18	64.4	1.00			
19	66.2	1.00			
20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00
21	69.8	1.00			
22	71.6	1.00			
23	73.4	1.00			
24	75.2	1.00			
25	77.0	1.00	1.04	0.89	0.97
26	78.8	1.00			
27	80.6	1.00			
28	82.4	1.00			
29	84.2	1.00			
30	86.0	1.00	1.08	0.80	0.94
31	87.8	1.00			
32	89.6	1.00			
33	91.4	1.00			
34	93.2	1.00			
35	95.0	1.00	1.11	0.72	0.91
36	96.8	1.00			
37	98.6	1.00			
38	100.4	1.00			
39	102.2	1.00			
40	104.0	1.00	1.13	0.64	0.88
41	105.8	1.00			
42	107.6	1.00			
43	109.4	1.00			
44	111.2	1.00			
45	113.0	1.00	1.13	0.56	0.86
46	114.8	1.00			
47	116.6	1.00			
48	118.4	1.00			
49	120.2	1.00			
50	122.0	1.00	1.11	0.50	0.83
52	125.6	1.00			
54	129.2	1.00			
56	132.8	1.00			
58	136.4	1.00			
60	140.0	1.00	1.01		

**TABLA # 4.E4**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSIÓN DE VALORES DE FACTOR DE DISIPACIÓN A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 20°C (BUSHING'S DE VARIOS FABRICANTES – PARTE III)**

Table 4: Bushing Temperature Correction Factors

TEST TEMPERATURE		OHIO BRASS				WESTINGHOUSE		
°C	°F	CLASS G & I 46 TO 138 KV	CLASS L 7.5 TO 34.5 KV	CLASS GK 99 TO 196 KV	CLASS LK 23 TO 69 KV	TYPE D	CONDE N-SER TYPE O	TYPE O
0	32.0	1.54	1.29	0.90	0.85	1.26	1.61	1.11
1	33.8	1.50	1.27	0.90	0.86	1.24	1.56	1.10
2	35.6	1.47	1.26	0.91	0.86	1.23	1.52	1.10
3	37.4	1.43	1.25	0.91	0.86	1.22	1.48	1.09
4	39.2	1.40	1.24	0.91	0.87	1.20	1.44	1.09
5	41.0	1.37	1.023	0.91	0.88	1.19	1.40	1.08
6	42.8	1.34	1.21	0.92	0.89	1.18	1.36	1.08
7	44.6	1.32	1.20	0.92	0.89	1.16	1.33	1.07
8	46.4	1.29	1.19	0.92	0.90	1.15	1.30	1.07
9	48.2	1.26	1.17	0.93	0.91	1.14	1.26	1.06
10	50.0	1.24	1.16	0.93	0.92	1.12	1.23	1.05
11	51.8	1.21	1.14	0.94	0.92	1.10	1.21	1.05
12	53.6	1.18	1.12	0.94	0.93	1.09	1.18	1.04
13	55.4	1.16	1.11	0.95	0.94	1.07	1.16	1.04
14	57.2	1.14	1.09	0.95	0.95	1.06	1.13	1.03
15	59.0	1.11	1.07	0.96	0.95	1.05	1.11	1.03
16	60.8	1.09	1.06	0.97	0.96	1.04	1.09	1.02
17	62.6	1.07	1.04	0.97	0.97	1.03	1.06	1.02
18	64.4	1.04	1.03	0.98	0.98	1.02	1.04	1.01
19	66.2	1.02	1.02	0.99	0.99	1.01	1.02	1.01
20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
21	69.8	0.98	0.99	1.01	1.01	0.99	0.98	0.99
22	71.6	0.96	0.97	1.02	1.02	0.97	0.96	0.99
23	73.4	0.93	0.96	1.03	1.03	0.96	0.94	0.98
24	75.2	0.91	0.94	1.04	1.04	0.95	0.92	0.98
25	77.0	0.89	0.93	1.05	1.05	0.94	0.90	0.97
26	78.8	0.88	0.91	1.06	1.06	0.92	0.88	0.96
27	80.6	0.86	0.90	1.08	1.07	0.91	0.86	0.96
28	82.4	0.84	0.88	1.09	1.08	0.90	0.84	0.95
29	84.2	0.82	0.87	1.10	1.09	0.89	0.83	0.94
30	86.0	0.80	0.86	1.11	1.10	0.87	0.81	0.94
31	87.8	0.79	0.84	1.12	1.11	0.86	0.79	0.93
32	89.6	0.77	0.83	1.13	1.12	0.85	0.77	0.93
33	91.4	0.75	0.82	1.14	1.13	0.83	0.75	0.92
34	93.2	0.74	0.80	1.15	1.14	0.82	0.74	0.92
35	95.0	0.72	0.79	1.16	1.15	0.81	0.72	0.91
36	96.8	0.71	0.78	1.17	1.15	0.79	0.70	0.91
37	98.6	0.69	0.76	1.18	1.16	0.78	0.69	0.90
38	100.4	0.68	0.75	1.19	1.17	0.77	0.67	0.89
39	102.2	0.66	0.74	1.20	1.18	0.75	0.66	0.88
40	104.0	0.65	0.72	1.21	1.18	0.74	0.64	0.88
42	107.6			1.22	1.19	0.71	0.62	0.87
44	111.2			1.24	1.20	0.69	0.59	0.86
46	114.8			1.26	1.21	0.65	0.56	0.85
48	118.4			1.27	1.21	0.62	0.53	0.83
50	122.0			1.29	1.22	0.59	0.51	0.82
52	125.6			1.30	1.22	0.58	0.50	0.81
54	129.2			1.31	1.22	0.57	0.48	0.80
50	132.8			1.33	1.22	0.56	0.47	0.79
58	136.4			1.34	1.21	0.55	0.46	0.78
60	140.0			1.35	1.21	0.54	0.45	0.77
62	143.6					0.53	0.44	0.76
66	150.8					0.51	0.42	0.74
70	158.0					0.49	0.40	0.73

**TABLA # 4.F1**

**FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CONVERSION DE VALORES DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A UNA TEMPERATURA ESTANDAR DE 75°C**

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Factor de corrección</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Factor de corrección</i>
0	181	41	10,6
1	169	42	9,9
2	158	43	9,2
3	147	44	8,6
4	137	45	8,0
5	128	46	7,5
6	119	47	7,0
7	111	48	6,5
8	104	49	6,1
9	97	50	5,7
10	91	51	5,3
11	84	52	4,92
12	79	53	4,59
13	74	54	4,29
14	69	55	4,00
15	64	56	3,73
16	60	57	3,48
17	56	58	3,25
18	52	59	3,03
19	48,5	60	2,83
20	45,3	61	2,64
21	42,2	62	2,46
22	39,4	63	2,30
23	36,8	64	2,14
24	34,3	65	2,00
25	32,0	66	1,87
26	29,9	67	1,74
27	27,9	68	1,62
28	26,0	69	1,52
29	24,3	70	1,41
30	22,6	71	1,32
31	21,1	72	1,23
32	19,7	73	1,15
33	18,4	74	1,07
34	17,2	75	1,00
35	16,0	76	0,93
36	14,9	77	0,87
37	13,9	78	0,81
38	13,0	79	0,76
39	12,1	80	0,71
40	11,3		

**TABLA # 4.G1**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
POSTERIOR A SU TRANSPORTE DESDE FÁBRICA  
(IEEE STANDARDS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 1 – Test limits for shipments of new mineral  
insulating oil as received from the supplier**

Test and method	Limit value
Dielectric strength <sup>a</sup> , ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm gap <sup>b</sup> ; 2 mm gap <sup>b</sup> :	20 35
Dissipation factor (power factor), ASTM D924-99c1 25 °C, % maximum: 100 °C, % maximum:	0.05 0.30
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum:	40
Color, ASTM D1500-98, ASTM units maximum:	0.5
Visual examination, ASTM D1524-94 (1999):	Bright and clear
Neutralization number (acidity), ASTM D974-02 mg KOH/g maximum:	0.015 <sup>c</sup>
Water content, ASTM D1533-00 mg/kg maximum <sup>d</sup> :	25 <sup>e</sup>
Oxidation inhibitor content when specified, ASTM D2668-96 Type I oil, % maximum: Type I oil, % minimum: Type II oil, % maximum: Type II oil, % minimum:	0.08 0.0 0.3 >0.08
Corrosive sulfur, ASTM D1275-96a	Not corrosive
Relative density (specific gravity), ASTM D1298-99 15 °C/15 °C maximum:	0.91

<sup>a</sup>Oil dielectric testing in accordance with ASTM D877-00 has been replaced by ASTM D1816-97 in Table 1. See 5.2.1.

<sup>b</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.

<sup>c</sup>This value is more stringent than the ASTM D3487-00 requirement.

<sup>d</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.H1**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN UN TRANSFORMADOR NUEVO, DE VOLTAJE NOMINAL  
MENOR A 230KV, PREVIO A LA ENERGIZACIÓN  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 2 – Test limits for new mineral insulating oil received  
in new equipment, below 230 kV, prior to energization**

Test and method	Value for voltage class	
	≤ 69kV	> 69 – <230 kV
Dielectric strength <sup>a</sup> , ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm gap <sup>b</sup> , 2 mm gap <sup>b</sup> :	25 45	30 52
Dissipation factor (power factor), ASTM D924-99e1, 25 °C, % maximum: 100 °C, % maximum:	0.05 0.40	0.05 0.40
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum:	38	38
Color, ASTM D1500-98, ASTM units maximum:	1.0	1.0
Visual examination, ASTM D1524-94 (1999):	Bright and clear	Bright and clear
Neutralization number (acidity), ASTM D974-02, mg KOH/g maximum:	0.015 <sup>c</sup>	0.015 <sup>c</sup>
Water Content, ASTM D1533-00, mg/kg maximum <sup>d</sup> :	20	10
Oxidation inhibitor content when specified, ASTM D2668-96, Type I oil, % maximum: Type I oil, % minimum: Type II oil, % maximum: Type II oil, % minimum:	- - 0.3 >0.08	0.08 0.0 0.3 >0.08

<sup>a</sup>Old dielectric testing in accordance with ASTM D877-00 has been replaced by ASTM D1816-97 in Table 2. See 5.2.1.

<sup>b</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.

<sup>c</sup>This value is more stringent than the ASTM D3487-00 requirement.

<sup>d</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.H2**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN UN TRANSFORMADOR NUEVO, DE VOLTAJE NOMINAL IGUAL  
O MAYOR A 230KV, PREVIO A LA ENERGIZACIÓN  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 3—Test limits for new mineral insulating oil processed for equipment,  
230 kV class and above, prior to energization**

Test and method	Value for voltage class	
	≥ 230 kV – < 345 kV	345 kV and above
Dielectric strength, ASTM D1 816-97, kV minimum, 1 mm gap <sup>a</sup> , 2 mm gap <sup>a</sup> :	32 55	35 60
Dissipation factor (power factor), ASTM D924-99e1, 25 °C, % maximum 100 °C, % maximum:	0.05 0.30	0.05 0.30
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum:	38	38
Color, ASTM D1 500-98, ASTM units maximum:	1.0	0.5
Visual examination, ASTM D1 524-94 (1999):	Bright and clear	Bright and clear
Neutralization number (acidity), ASTM D974-02, mg KOH/g maximum:	0.015 <sup>b</sup>	0.015 <sup>b</sup>
Water content, ASTM D1 533-00, mg/kg maximum <sup>d</sup> :	10	10
Total dissolved gas, ASTM D2945-90 (1998):	0.5% or per manufacturer's requirements <sup>c</sup> .	0.5% or per manufacturer's requirements <sup>c</sup> .

<sup>a</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.

<sup>b</sup>This value is more stringent than the ASTM D3487-00 requirement.

<sup>c</sup>This value should be obtained from a sample collected 24 to 48 h after the transformer is filled, and applies only to transformers with diaphragm conservator systems.

<sup>d</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.II**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN UN TRANSFORMADOR EN SERVICIO  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 7 – Suggested limits for continued use of service-aged insulating oil  
(grouped by voltage class) (See also IEEE Std 62-1995.)**

Test and method	Value for voltage class		
	≤69 kV	>69 – <230 kV	230 kV and above
Dielectric strength <sup>a</sup> , ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm gap <sup>b</sup> , 2 mm gap <sup>b</sup> :	23 40	28 47	30 50
Dissipation factor (power factor) <sup>a</sup> , ASTM D924-99e1, 25 °C, % maximum 100 °C, % maximum	0.5 5.0	0.5 5.0	0.5 5.0
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum	25	30	32
Neutralization number (acidity), ASTM D974-02, mg KOH/g maximum	0.20	0.15	0.10
Water content	Refer to Table 5		
Oxidation Inhibitor Content, ASTM D2668-96, Type II oil	0.09% minimum, if in original oil.		

<sup>a</sup>Older transformers with inadequate oil preservation systems or maintenance, may have lower values.

<sup>b</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.

**TABLA # 4.J1**

**VALORES LÍMITES MÁXIMOS DE CONTENIDO DE AGUA EN EL ACEITE  
AISLANTE DE TRANSFORMADORES  
(IEEE STANDARDS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 5 – Recommended maximum limit of water content in mineral insulating oil of operating gas blanketed, sealed, or diaphragm conservator transformers<sup>a</sup>**

Average oil temperature	Suggested maximum water contents in mg/kg and percent saturation <sup>b</sup>					
	50 °C		60 °C		70 °C	
	mg/kg <sup>c</sup>	% saturation	mg/kg <sup>c</sup>	% saturation	mg/kg <sup>c</sup>	% saturation
≤ 69kV	27	15	35	15	55	15
>69 – <230 kV	12	8	20	8	30	8
230 kV and greater	10	5	12	5	15	5

**NOTES**

1—These values are by necessity approximate, but are adequate for maximum water in oil guides.

2—The oil sample should, if practical, be taken when the load and oil temperatures have been relatively constant for 48 hours. The intent is to obtain a sample when the moisture content in the transformer is close to equilibrium. If the load and/or ambient are variable, the oil temperature can be maintained relatively constant by controlling the amount of cooling in operation. If you are confident that the temperature gauges are in calibration then record the top oil temperature at the time that the sample is taken. For Oil Natural Air Natural (ONAN) and Oil Natural Air Forced (ONAF) ratings, subtract 10 °C from the top oil to obtain the average oil temperature. If you are unsure of the gauge accuracy, record the actual sample temperature and add 5 °C to approximate the average oil temperature.

3—The above values are based on the following approximate percent by weight of water in insulation values (see IEEE Std 62-1995):

≤ 69kV                    3% maximum

>69 - < 230 kV        2% maximum

230 kV and greater    1.25% maximum

4—Saturation values (mg/kg) at 100% saturation:

50 °C            175

60 °C            245

70 °C            335

<sup>a</sup>The data in Table 5 is from sealed transformers and may also apply to free breathing type transformers.

<sup>b</sup>Calculated from formulas 1 and 2 in Clause 4.4 from Bruce, C. M., Christie, J. D., and Griffen, Paul [B1].

<sup>c</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.K1**

**CUESTIONAMIENTO DE LAS CONDICIONES DEL AISLAMIENTO  
CELULÓSICO DE UN TRANSFORMADOR EN BASE AL PORCENTAJE DE  
SATURACIÓN DE AGUA EN EL ACEITE  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 4— General guidelines for interpreting data expressed in percent saturation<sup>a</sup>**

<b>Percent saturation water-in-oil</b>	<b>Condition of cellulosic insulation</b>
0–5	Dry insulation
6–20	Moderate—wet, low numbers indicate fairly dry to moderate levels of water in the insulation. Values toward the upper limit indicate moderately wet insulation.
21–30	Wet insulation
>30	Extremely wet insulation

<sup>a</sup>Table 4 of this standard is Table 7 of IEEE Std 62-1995.

**TABLA # 4.L1**

**EL ÍNDICE DE CALIDAD Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES DEL  
ACEITE AISLANTE EN SERVICIO**

<b>CONDICIÓN DEL ACEITE</b>	<b>NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN</b>	<b>TENSIÓN INTERFACIAL</b>	<b>COLOR</b>	<b>ÍNDICE DE CALIDAD</b>
<i>ACEITE BUENO</i>	<i>0,00 a 0,10</i>	<i>30,0 a 45,0</i>	<i>Amarillo claro</i>	<i>300 a 1500 o más</i>
<i>ACEITE EN OBSERVACIÓN</i>	<i>0,05 a 0,10</i>	<i>27,1 a 29,9</i>	<i>Amarillo</i>	<i>271 a 600</i>
<i>ACEITE MARGINAL</i>	<i>0,11 a 0,15</i>	<i>24,0 a 27,0</i>	<i>Amarillo oscuro</i>	<i>160 a 318</i>
<i>ACEITE MALO</i>	<i>0,16 a 0,40</i>	<i>18,0 a 23,90</i>	<i>Ambar</i>	<i>45 a 159</i>
<i>ACEITE MUY MALO</i>	<i>0,41 a 0,65</i>	<i>14,0 a 17,9</i>	<i>Café</i>	<i>22 a 44</i>
<i>ACEITE EXTREMADAMENTE MALO</i>	<i>0,66 a 1,50</i>	<i>9,0 a 13,9</i>	<i>Café oscuro</i>	<i>6 a 21</i>
<i>ACEITE EN CONDICIÓN PÉSIMA</i>	<i>1,51 o más</i>	<i>--</i>	<i>Negro</i>	<i>--</i>

**TABLA # 4.M1**

**RELACIÓN DEL CONTENIDO DE FURANOS CON EL GRADO DE  
POLIMERIZACIÓN Y PORCENTAJE REMANENTE DE VIDA ÚTIL DEL  
TRANSFORMADOR**

<i>Papel no mejorado térmicamente 2-FAL (ppb)</i>	<i>Papel mejorado térmicamente Total de furanos (ppb)</i>	<i>Grado de Polimerización (GP) calculado</i>	<i>Por ciento de vida promedio ya usada (%)</i>
58	51	800	0
130	100	700	10
292	195	600	21
654	381	500	34
1464	745	400	50
1720	852	380	54
2021	974	360	58
2374	1113	340	62
2789	1273	32	66
3277	1455	300	71
3851	1664	280	76
4524	1902	260	81

**TABLA # 4.N1**

**INTERPRETACIÓN DE LOS NIVELES DE EMPAÑADURA MOSTRADOS EN LA  
PLANTILLA DE CUESTIONAMIENTO DE UN ACEITE AISLANTE COMO  
CORROSIVO O NO, SEGÚN MÉTODO NORMALIZADO ASTM D.130**

 <b>D 1275 – 06</b>		
<b>TABLE 2 Copper Strip Tarnish Level Classifications</b>		
Classi- fication	Designation	Description
Freshly ... Polished Strip		Unable to reproduce upon aging so no description is provided
1	Slight tarnish	a. Light orange, almost the same as freshly polished strip b. Dark orange
2	Moderate tarnish	a. Claret red b. Lavender c. Multicolored with lavender blue or silver, or both, overlaid on claret red d. Silvery e. Brassy or gold
3	Dark tarnish	a. Magenta overcast on brassy strip b. Multicolored with red and green showing (peacock), but no gray
4	Corrosion	a. Transparent black, dark gray or brown with peacock green barely showing b. Graphite or lusterless black c. Glossy or jet black

**TABLA # 4.01**

**TABLA DE RELACIONES DE GASES DE ROGERS (DIAGNÓSTICO DE FALLAS  
POR LAS RELACIONES DE ROGERS)**

$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	<b>DIAGNÓSTICO</b>
-	-	-	-	<i>Situación normal. Si la relación <math>CH_4/H_2 &gt; 0,1</math> se debe sospechar de la presencia de descargas parciales</i>
+	-	-	-	<i>Puntos calientes con ligero sobrecalentamiento</i>
+	+	-	-	<i>Puntos calientes con sobrecalentamiento todavía modesto</i>
-	-	+	-	<i>Calentamiento excesivo de los conductores</i>
+	-	+	-	<i>Mal contacto – Circulación de corriente (conexiones sobrecalentadas)</i>
-	-	-	+	<i>Descarga capacitiva con pequeña energía</i>
-	+	-	+	<i>Fallas en el conductor</i>
-	-	+	+	<i>Arco con centellamientos persistentes con posible efecto térmico colateral</i>

*Donde, el signo (-) representa a la relación cuyo valor sea menor que la unidad y el signo (+) representa a la relación cuyo valor sea mayor que la unidad.*

**TABLA # 4.P1**

**TABLA DE DIAGNÓSTICO CONFORME LA "CENTRAL ELECTRICITY  
GENERATION BOARD OF GREAT BRITAIN – CEGB"**

$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	<b>DIAGNÓSTICO</b>
0	0	0	0	<i>Si la relación <math>CH_4/H_2</math>, fuera en lo máximo igual a 0,1, se debe sospechar de la presencia de descargas parciales. De lo contrario la deterioración es normal.</i>
1	0	0	0	<i>Sobrecalentamiento moderado menor de 150°C</i>
1	1	0	0	<i>Sobrecalentamiento moderado entre 150°C y 200°C</i>
0	1	0	0	<i>Sobrecalentamiento moderado entre 200°C y 300°C</i>
0	0	1	0	<i>Sobrecalentamiento general de los conductores</i>
1	0	1	0	<i>Corrientes de circulación y/o uniones sobrecalentadas</i>
0	0	0	1	<i>Corriente de ruptura del selector de derivaciones del conmutador de derivaciones bajo carga</i>
0	0	1	1	<i>Arco con flujo de potencia con o sin centelleamiento.</i>

*Donde, (1) representa a la relación cuyo valor sea mayor que la unidad y (0) representa a la relación cuyo valor sea menor que la unidad.*

**TABLA # 4.Q1**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN LA LLAVE CONMUTADORA DE UN TRANSFORMADOR NUEVO,  
PREVIO A LA ENERGIZACIÓN  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 11 – Test limits of new mineral insulating oil for load tap changers, prior to energizing**

Test and method	Suggested limit
Dielectric strength, ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm. gap <sup>a</sup> 2 mm. gap <sup>a</sup>	35 55
Water content, ASTM D1533-00, mg/kg maximum <sup>b</sup>	10
Corrosive sulfur, ASTM D1275-96a	No corrosive sulfur in oil.

<sup>a</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.

<sup>b</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.R1**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN LA LLAVE CONMUTADORA DE UN TRANSFORMADOR EN  
SERVICIO  
(IEEE STANDARDS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 12—Limits for continued use of service-aged insulating oil for load tap changers**

Test and method	Suggested limit		
	Neutral end	Line end	
		≤ 69 kV	> 69 kV
Dielectric strength, ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm, gap <sup>a</sup> 2 mm, gap <sup>a</sup>	20 27	25 35	28 45
Water content, ASTM D1533-00, mg/kg maximum <sup>b</sup>	40	30	25
Corrosive sulfur, ASTM D1275-96a	No corrosive sulfur in oil.		

<sup>a</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.  
<sup>b</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.S1**

**TABLA DE INTERPRETACIÓN DE LOS VALORES DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS (TLI) SEGÚN EL ANÁLISIS DE FACTOR DE POTENCIA DEL AISLAMIENTO EN LOS INTERRUPTORES A GRAN VOLUMEN DE ACEITE**

<b>INDICE DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE (TLI)</b>				
<b>(Watts)</b>				
<i>Menor a -0.20W</i>	<i>Entre -0.10W y -0.20W</i>	<i>Entre -0.10W y +0.05W</i>	<i>Entre +0.05W y +0.10W</i>	<i>Mayor a +0.10</i>
<i>Investigar inmediatamente</i>	<i>Volver a realizar el ensayo sobre una base más frecuente</i>	<i>Normal para muchos tipos de interruptores.</i>	<i>Volver a realizar el ensayo sobre una base más frecuente</i>	<i>Investigar inmediatamente</i>
<i>El ensamblaje guía de la varilla de operación, el conjunto de contactos y la porción superior de la varilla de operación.</i>			<i>La varilla de operación, el aceite del tanque, el revestimiento del tanque y el aislamiento que soporta los contactos auxiliares.</i>	

**TABLA # 4.T1**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
PARA INTERRUPTORES, POSTERIOR A SU TRANSPORTE DESDE FÁBRICA  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

Test and method	Suggested limit
Dielectric strength, ASTM D1816-97 <sup>a</sup> , kV minimum, 1 mm, gap <sup>b</sup> 2 mm, gap <sup>b</sup>	20 35
Dissipation factor (power factor), ASTM D924-99e1, 25 °C, % maximum 100 °C, % maximum	0.05 0.30
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum	40
Color, ASTM D1500-98, ASTM units maximum	0.5
Visual examination, ASTM D1524-94 (1999)	Bright and clear
Neutralization number (acidity), ASTM D974-02, mg KOH/g maximum	0.015
Water content, ASTM D1533-00, mg/kg maximum <sup>c</sup>	25 <sup>d</sup>

<sup>a</sup>Oil dielectric testing in accordance with ASTM D877-00 has been replaced by ASTM D1816-97 in this table. See 5.2.1.  
<sup>b</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.  
<sup>c</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.  
<sup>d</sup>The value of water content is more stringent than the requirement specified in ASTM D3487-00.

## TABLA # 4.U1

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN UN INTERRUPTOR DE POTENCIA NUEVO, PREVIO A LA  
ENERGIZACIÓN  
(IEEE STANDARS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 9— Test limits — new circuit breaker insulating oil after  
processing and filling, immediately prior to energizing**

Test and method	Suggested limit
Dielectric strength, ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm, gap <sup>a</sup> 2 mm, gap <sup>a</sup>	30 60
Dissipation factor (power factor), ASTM D924-99e1, 25 °C, % maximum	0.10
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum	35
Color, ASTM D1500-98, ASTM units maximum	0.5
Visual Examination, ASTM D1524-94 (1999)	Bright and clear
Neutralization number (acidity), ASTM D974-02, mg KOH/g maximum	0.015
Water content, ASTM D1533-00, mg/kg maximum <sup>b</sup>	20

<sup>a</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.  
<sup>b</sup>Equivalent measurement is parts per million, ppm.

**TABLA # 4.VI**

**VALORES LÍMITES DE ACEPTACIÓN EN CAMPO DE UN ACEITE AISLANTE  
INMERSO EN UN INTERRUPTOR EN SERVICIO  
(IEEE STANDARDS C57.106-2002 - GUIDE FOR ACCEPTANCE AND  
MAINTENANCE OF INSULATING OIL IN EQUIPMENT)**

**Table 10 – Suggested limits for continued use of service-aged circuit breaker insulating oil**

Test and method	Suggested limit
Dielectric strength, ASTM D877-00, kV minimum	25
Dielectric strength, ASTM D1816-97, kV minimum, 1 mm, gap <sup>a</sup> 2 mm, gap <sup>a</sup>	20 27
Dissipation factor (power factor), ASTM D924-99e1, 25 °C, % maximum	1.0
Interfacial tension, ASTM D971-99a, mN/m minimum	25
Color, ASTM D1500-98, ASTM units maximum	2.0
Visual examination, ASTM D1524-94 (1999)	No excessive carbon in oil.

<sup>a</sup>Alternate measurements of 0.04 in and 0.08 in respectively for gaps.

**TABLA # 4.W1**

**NIVELES DE AISLAMIENTO PARA EQUIPOS ENCAPSULADOS EN GAS –  
RANGO I  
(INTERNATIONAL STANDARD 62271-203 – GAS-INSULATED METAL-  
ENCLOSED SWITCHGEAR FOR RATED VOLTAGES ABOVE 52KV)**

**Table 102 – Preferred rated insulation levels for rated voltages  
for equipment of range I**

Rated voltage for equipment $U_r$ kV (r.m.s. value)	Rated short-duration power-frequency withstand voltage $U_d$ kV (r.m.s. value)		Rated lightning impulse withstand voltage $U_p$ kV (peak value)	
	Phase-to-earth, across open switching device and between phases	Across the isolating distance	Phase-to-earth, across open switching device and between phases	Across the isolating distance
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
72,5	140	160	325	375
100	185	210	450	520
123	230	265	550	630
145	275	315	650	750
170	325	375	750	860
245	460	530	1 050	1 200

NOTE Values in column (2) are applicable  
a) for type tests, phase-to-earth and between phases;  
b) for routine tests, phase-to-earth, phase-to-phase, and across the open switching device.  
Values in columns (3), (4) and (5) are applicable for type tests only.

62271-203 © IEC:2003

**TABLA # 4.XI**

**NIVELES DE AISLAMIENTO PARA EQUIPOS ENCAPSULADOS EN GAS –  
RANGO II  
(INTERNATIONAL STANDARD 62271-203 – GAS-INSULATED METAL-  
ENCLOSED SWITCHGEAR FOR RATED VOLTAGES ABOVE 52KV)**

**Table 103 – Preferred rated insulation levels for rated voltages for equipment of range II**

Rated voltage for equipment $U_r$ kV (r.m.s. value)	Rated short-duration power-frequency withstand voltage $U_d$ kV (r.m.s. value)		Rated switching impulse withstand voltage $U_s$ kV (peak value)			Rated lightning impulse withstand voltage $U_p$ kV (peak value)	
	Phase-to-earth and between phases (note 3)	Across open switching device and/or isolating distance (note 3)	Phase-to-earth and across open switching device	Between phases (notes 3 and 4)	Across isolating distance (notes 1, 2 and 3)	Phase-to-earth and between phases	Across open switching device and/or isolating distance (notes 2 and 3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
300	460	595	850	1 275	700 (+245)	1 050	1 050 (+170)
362	520	675	950	1 425	800 (+295)	1 175	1 175 (+205)
420	650	815	1 050	1 575	900 (+345)	1 425	1 425 (+240)
550	710	925	1 175	1 760	900 (+450)	1 550	1 550 (+315)
800	960	1 270	1 425	2 420	1 100 (+650)	2 100	2 100 (+455)

NOTE 1 Column (6) is also applicable to some circuit-breakers, see IEC 62271-100.

NOTE 2 In column (6), values in brackets are the peak values of the power-frequency voltage  $U_r \sqrt{2} / \sqrt{3}$  applied to the opposite terminal (combined voltage).

In column (8), values in brackets are the peak values of the power-frequency voltage  $0,7 U_r \sqrt{2} / \sqrt{3}$  applied to the opposite terminal (combined voltage). See Annex D of IEC 60694.

NOTE 3 Values in column (2) are applicable:

- a) for type tests, phase-to-earth and between phases;
- b) for routine tests, phase-to-earth, phase-to-phase, and across the open switching device.

Values in columns (3), (4), (5), (6), (7) and (8) are applicable for type tests only.

NOTE 4 These values are derived using the multiplying factors stated in Table 3 of IEC 60071-1 (1993).

**TABLA # 5.A1**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y LA CAPACITANCIA DEL AISLAMIENTO TOTAL DEL TRANSFORMADOR  
(CASO D)**

<b>ABB</b>	<b>PROTOCOLO DE ENSAYOS</b>		N° de Protocolo: 2006-011																																																																									
	<b>Capacidad y F.P. del Aislamiento</b>		Pág 19 de 29																																																																									
<b>N° de Serie:</b> 200515-CRS																																																																												
Tensión Aplicada para la Capacidad:		2.5 kV																																																																										
Tensión Aplicada para el Factor de Potencia:		2.5 kV																																																																										
Tipo de Instrumento:		Sin corrección																																																																										
Terminales			Capacidad (pF)	Factor de Potencia (%)	Temp. (°C)	Factor de Potencia a 20°C (%)																																																																						
Ensayados	Puestos a Tierra	Puestos en Guarda																																																																										
A-N	a-n Cuba	3a-3b	7290	0.251	22.0	0.249																																																																						
A-N	Cuba	a-n 3a-3b	2770	0.189	22.0	0.188																																																																						
a-n	3a-3b Cuba	A-N	4730	0.213	22.0	0.211																																																																						
a-n	Cuba	A-N 3a-3b	1200	0.355	22.0	0.352																																																																						
3a-3b	A-N Cuba	a-n	8950	0.229	22.0	0.227																																																																						
3a-3b	Cuba	A-N a-n	8900	0.211	22.0	0.209																																																																						
<p><math>F_p(20) = F_p(T) / K</math>      <math>F_p(20)</math> = Factor de Potencia corregido a 20°C  <math>F_p(T)</math> = Factor de Potencia medido a la temperatura T  K = Factor de Corrección (de la Tabla adjunta)</p> <p>Doble:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>T (°C)</td> <td>10</td><td>15</td><td>20</td><td>25</td><td>30</td><td>35</td><td>40</td><td>45</td><td>50</td><td>55</td><td>60</td><td>65</td><td>70</td> </tr> <tr> <td>K: BIL &lt; 750 kV</td> <td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td><td>1.12</td><td>1.25</td><td>1.4</td><td>1.55</td><td>1.75</td><td>1.95</td><td>2.18</td><td>2.42</td><td>2.7</td><td>3.0</td> </tr> <tr> <td>K: BIL &gt;= 750 kV</td> <td>1.01</td><td>0.99</td><td>1.00</td><td>1.02</td><td>1.05</td><td>1.08</td><td>1.12</td><td>1.17</td><td>1.23</td><td>1.31</td><td>1.41</td><td>-</td><td>-</td> </tr> </table> <p>ANSE:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>T (°C)</td> <td>10</td><td>15</td><td>20</td><td>25</td><td>30</td><td>35</td><td>40</td><td>45</td><td>50</td><td>55</td><td>60</td><td>65</td><td>70</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>0.8</td><td>0.9</td><td>1.0</td><td>1.12</td><td>1.25</td><td>1.4</td><td>1.55</td><td>1.75</td><td>1.95</td><td>2.18</td><td>2.42</td><td>2.7</td><td>3.0</td> </tr> </table>							T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	K: BIL < 750 kV	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0	K: BIL >= 750 kV	1.01	0.99	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.17	1.23	1.31	1.41	-	-	T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	K	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0
T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70																																																															
K: BIL < 750 kV	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0																																																															
K: BIL >= 750 kV	1.01	0.99	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.17	1.23	1.31	1.41	-	-																																																															
T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70																																																															
K	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0																																																															
Fecha: 07-Abr-2006		Ingeniero de Ensayo: Juan Carlos Vélez M.		Departamento de Ensayo: PTQ																																																																								

**TABLA # 5.A2**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y LA CAPACITANCIA DEL AISLAMIENTO DE LOS BUSHING'S (CASO I)**

<b>ABB</b>		<b>PROTOCOLO DE ENSAYOS</b>				N° de Protocolo: 2006-011																																																																							
		<b>Capacidad y F.P. de los Aisladores</b>				Pág 20 de 29																																																																							
<b>N° de Serie:</b> 200515-CRS																																																																													
Tensión Aplicada para la Capacidad:		2.5 / 0.5 kV																																																																											
Tensión Aplicada para el Factor de Potencia:		2.5 / 0.5 kV																																																																											
Temperatura de medición:		22.0 °C																																																																											
Ubicación	No Serie	item medido	V. prueba (kV)	Valores medidos Corregidos a 20 °C		Valores de Placa																																																																							
				PF(%)	Capcit(pF)	PF(%)	Capcit(pF)																																																																						
H1	IZSC311150	C1	2.5	0.427	309	0.42	311																																																																						
		C2	0.5	0.396	466	0.46	427																																																																						
X1	IZSC311120	C1	2.5	0.477	449	0.49	454																																																																						
		C2	0.5	0.260	334	0.46	311																																																																						
<p><math>F_p(20) = F_p(T) / K</math>      <math>F_p(20)</math> = Factor de Potencia corregido a 20 °C  <math>F_p(T)</math> = Factor de Potencia medido a la temperatura T  <math>K</math> = Factor de Corrección (de la Tabla adjunta)</p> <p>Doble:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td>T (°C)</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>50</td> <td>55</td> <td>60</td> <td>65</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>K: BIL &lt; 750 kV</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>1.0</td> <td>1.12</td> <td>1.25</td> <td>1.4</td> <td>1.55</td> <td>1.75</td> <td>1.95</td> <td>2.18</td> <td>2.42</td> <td>2.7</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>K: BIL ≥ 750 kV</td> <td>1.01</td> <td>0.99</td> <td>1.00</td> <td>1.02</td> <td>1.05</td> <td>1.08</td> <td>1.12</td> <td>1.17</td> <td>1.23</td> <td>1.31</td> <td>1.41</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </table> <p>ANSE:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tr> <td>T (°C)</td> <td>10</td> <td>15</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>30</td> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>50</td> <td>55</td> <td>60</td> <td>65</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> <td>1.0</td> <td>1.12</td> <td>1.25</td> <td>1.4</td> <td>1.55</td> <td>1.75</td> <td>1.95</td> <td>2.18</td> <td>2.42</td> <td>2.7</td> <td>3.0</td> </tr> </table>								T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	K: BIL < 750 kV	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0	K: BIL ≥ 750 kV	1.01	0.99	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.17	1.23	1.31	1.41	-	-	T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	K	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0
T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70																																																																
K: BIL < 750 kV	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0																																																																
K: BIL ≥ 750 kV	1.01	0.99	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.17	1.23	1.31	1.41	-	-																																																																
T (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70																																																																
K	0.8	0.9	1.0	1.12	1.25	1.4	1.55	1.75	1.95	2.18	2.42	2.7	3.0																																																																
<u>Fecha:</u> 07-Apr-2006		<u>Ingeniero de Ensayo:</u> Juan Carlos Vélez M.			<u>Departamento de Ensayos:</u> PTQ																																																																								

**TABLA # 5.A3**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS EN FÁBRICA DEL ACEITE AISLANTE  
(CASO I)**



**Naphthenics Product Data Sheet  
Nynas Transformer Oil - Nytro 10GBAP**

2005-08-03

PROPERTY	UNIT	TEST METHOD	GUARANTEED DATA		TYPICAL DATA
			Min	Max	
<b>1. Physical</b>					
Appearance		IEC 60296	Clear, free from sediment		
Density, 20°C	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 12185	0.895		0.887
Viscosity, 40°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	12.0		9.1
Viscosity, -30°C	mm <sup>2</sup> /s	ISO 3104	1800		1200
Pour Point	°C	ISO 3016	-40		-57
<b>2. Chemical</b>					
Acidity	mg KOH/g	IEC 62021	0.01		<0.01
Corrosive sulphur		DIN 51353	non-corrosive		
Aromatic content	%	IEC 60590			14
Antioxidant, phenols	Wt %	IEC 60666	0.08		≤0.08
Water content	mg/kg	IEC 60814	30		<20
Furfural content	mg/kg	IEC 61198	0.1		<0.1
<b>3. Electrical</b>					
Dielectric dissipation factor (DDF) at 90°C		IEC 60247	0.005		<0.001
Interfacial tension	mN/m	ISO 6295	40		49
Breakdown voltage					
- Before treatment	kV	IEC 60156	30		40-60
- After treatment	kV	IEC 60296/60156	70		>70
<b>4. Oxidation Stability</b>					
At 120°C, 332 h		IEC 61125 C			
Total acidity	mg KOH/g		1.2		0.29
Sludge	Wt %		0.8		0.15
DDF-90 °C			0.5		0.12
<b>5. Gassing tendency</b>					
Hydrogen	mm <sup>3</sup> /min	IEC 60628 (A)			<-5
<b>6. Health, safety and environment</b>					
Flash Point, PM	°C	ISO 2719	140		148
DMSO extractable compounds (PCA)	Wt %	IP 346	3		<3
PCB		IEC 61619	not detectable		

Nytro 10GBAP is a traceinhibited passivated transformer oil. The base oil meeting IEC 60296 (03) General specifications and ASTM D3487 type 1.

## TABLA # 5.A4

### REPORTE DE ENSAYOS FÍSICO-QUÍMICOS DEL ACEITE AISLANTE EN LABORATORIO (CASO I)



*SERVICIOS TÉCNICOS Y LABORATORIOS PARA LA INDUSTRIA*

#### IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

<i>Fecha de Recepción:</i>	19-Abril-2007	<i>Fecha de Análisis:</i>	19-Abril-2007
<i>Código de Muestra:</i>	287-07	<i>Tipo de Muestra:</i>	Aceite Aislante
<i>Equipo:</i>	ATK Fase Reserva	<i>Serie:</i>	200515
<i>Ubicación:</i>	Guayas (S/E Dos Cerritos)	<i>% de Carga:</i>	----
<i>Fabricante:</i>	ABB	<i>Año de Fabricación:</i>	2006
<i>Potencia:</i>	55 MVA	<i>Tensión:</i>	230/ 69/13.8 KV

#### INFORME DE RESULTADOS N° 2062-07

ITEM	PRUEBAS REALIZADAS	UNIDADES	NORMA ASTM	PARAMETROS REFERENCIALES	RESULTADOS
1	Contenido de Agua	ppm	D-1533	<i>Acep:</i> < 30 <i>quest:</i> 30 - 34.9 <i>inac:</i> > =35	6.33
2	Gravedad Específica	60/60°F	D-1298	<i>Acep:</i> 0.84 - 0.91 <i>quest:</i> < 0.84 <i>inac:</i> > 0.91	0.8914
2	Color	n°	D-1500	<i>Acep:</i> < 3.5 <i>inac:</i> > 3.5	< 0.5
3	Examen Visual	-	D-1524	--	Claro y Brillante
4	Número de Acidez	mg.KOH/gr.	D-974	<i>Acep:</i> < = 0.05 <i>Quest:</i> 0.06 - 0.1 <i>Inac:</i> > 0.1	0.014
5	Tensión Interfacial	Dinas/cm	D-971	<i>Acep:</i> > = 32 <i>Quest:</i> 28 - 31.9 <i>Inac:</i> < 27.9	40.28
6	Índice de Calidad	--	--	--	2877
7	Rigidez Dieléctrica	KV	D-877	<i>Mín:</i> 30	39

Realizado por:

Ing. Patricia Yépez  
ANALISTA QUÍMICA

Aprobado por:

Ing. Sonia Álvarez  
GERENTE SERTINLAB

**TABLA # 5.A.5**

**CUADRO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO-QUÍMICO DEL ACEITE (CASO D) SEGÚN IEEE**

ITEM	ENSAYOS REALIZADOS	UNIDADES	NORMA ASTM	RESULTADOS	PARAMETROS REFERENCIALES SERTINLAB (Según ASTM)	PARAMETROS REFERENCIALES (IEEE Std.C57.106-2002 - Table 3)
1	Contenido de Agua	ppm	D-1533	6.33	Acep: < 30 Cuest: 30 - 34.9 Inac: > =35	Acep: < = 10
2	Gravedad Específica	60/60°F	D-1298	0.8914	Acep: 0.84 - 0.91 Cuest: < 0.84 Inac: > 0.91	< = 0.91 <sup>a</sup>
3	Color	nº	D-1500	< 0.5	Acep: < 3.5 Inac: > 3.5	Acep: < = 1
4	Examen Visual	-	D-1524	Claro Brillante	--	Claro y Brillante
5	Número de Acidez	mg.KOH/gr.	D - 974	0.014	Acep: < = 0.05 Cuest: 0.06 - 0.1 Inac: > 0.1	Acep: < = 0.015
6	Tensión Interfasial	Dinas/ cm	D-971	40.28	Acep: > = 32 Cuest: 28 - 31.9 Inac: < 27.9	Acep: > = 38
7	Índice de Calidad	--	--	2877	--	b

a: este valor referencial es recomendado por la tabla 1 de la IEEE Std.C57.106-2002, para el caso de recepción de un aceite en campo, luego de su transporte desde fábrica.

b: este criterio de evaluación no consta en la norma IEEE Std.C57.106-2002. No obstante, aplicando la tabla anexa 4.L1, se concluye que el valor de 2877 de Índice de Calidad, revela un aceite en BUENAS condiciones, con Número de Neutralización entre 0 a 10 y Tensión Interfasial entre 30 a 45

## TABLA # 5.A6

### REPORTE DE ENSAYO CROMATOGRÁFICO DE GASES DISUELTOS EN EL ACEITE AISLANTE (CASO I)

**MORGAN  
SCHAFFER**

8300 Saint-Patrick, Suite 150, LaSalle (Québec), Canada H8N 2H1  
Tel: (514) 739-1967 • Fax: (514) 739-0434 • www.morganschaffer.com

James Gonzales  
Sist. digital de control  
Calle el Zurriago 2-06  
Cuenca Ecuador

Analysis Date: May 09, 2007  
Client Number: ZSD01  
MS Reference Number: K970-1  
Analyzed by: *RJP*  
Verified by: *RJP*

#### TRANSFORMER GAS ANALYSIS REPORT Method: ASTM D3612

##### SAMPLE IDENTIFICATION

EQUIP. DESC.:	ATK - Phase R	APP. TYPE:	LOCATION:	S/E Dos Carritos
MANUFACTURER:	ABB	WORK ORDER:	SERIAL NO.:	203515
KV:	230	SYRINGE NO:	DATE (M/D/Y):	04/20/2007
MVA:	55		SAMPLING PORT:	inferior
OIL TEMP (deg. C):	30		SAMPLED BY:	COP.
YOUR REMARKS:	Built in 2000, 25057 Litres. PO: 042007			

COMPONENT	PPM	LEVEL DS BR	NOTES
H2 (Hydrogen)	<10 nd	- -	"PPM" Parts per million by volume of dissolved gas at 273K and 760 torr.
O2/A (Oxygen + Argon)	4990	- -	"nd" Not detectable.
N2 (Nitrogen)	19800	- -	"DS" Dornenburg and Strittmatter.
CO (Carbon Monoxide)	6	- -	"BR" U.S. Bureau of Reclamation.
CH4 (Methane)	< 5 nd	- -	"*" Component is above the warning level.
CO2 (Carbon Dioxide)	74	- -	"*" Component is above the warning level.
C2H4 (Ethylene)	< 2 nd	- -	"*" Component is below the warning level.
C2H6 (Ethane)	< 2 nd	- -	
C2H2 (Acetylene)	< 2 nd	- -	
TOTAL GAS CONTENT	2.48%		

##### RATIO DIAGNOSIS

A ratio is calculated only if at least one component is above a warning level.

C2H2/H2: NOT CALCULATED  
H2/C2H6: NOT CALCULATED  
C2H2/CH4: NOT CALCULATED  
CO2/CO: NOT CALCULATED

C2H6/C2H2: NOT CALCULATED  
CH4/H2: NOT CALCULATED  
C2H4/C2H2: NOT CALCULATED

IMPORTANT: The age and history of the transformer MUST be considered in evaluating dissolved fault gas data. The most important factor is the RATE OF CHANGE of fault gas levels.  
For more information on interpretation see ASTM publication, STP 990 and Morgan-Schaffer Tech. Bull. WS-25.

ppm = parts per million by volume at 273 K and 760 torr n.d. = not detectable

**TABLA # 5.A7**

**PROTOCOLO DE ENSAYO EN FÁBRICA DEL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS  
EN EL ACEITE AISLANTE  
(CASO D)**

<b>ABB</b>		<b>PROTOCOLO DE ENSAYOS Análisis de Gases Disueltos en Aceite</b>			Nº de Protocolo: 2006-011
					Pág 23 de 29
<b>Nº de Serie:</b> 200515-CRS					
Tipo de Aceite:		NYNAS Nytro			
Laboratorio:		Laboratorio de Aceites ABB.			
Nº de Muestra:		(CR0034/06)	(CR0034/06)	( )	( )
Fecha:		05-Abril-2006	10-Abril-2006		
Hora:		00:00:00	00:00:00		
De:		Base de la cuba	Base de la cuba		
Condiciones:		Antes de pruebas	Antes de pruebas		
Gas	¿Comb.?	Resultados (ppm)	Resultados (ppm)	Resultados (ppm)	Resultados (ppm)
H <sub>2</sub> - Hidrógeno	Sí	0.0000	0.0000		
O <sub>2</sub> - Oxígeno	No	8957	9215		
N <sub>2</sub> - Nitrógeno	No	11245	17814		
CO - Monóxido de Carbono	Sí	0.0000	0.0000		
CH <sub>4</sub> - Metano	Sí	0.0000	0.0000		
CO <sub>2</sub> - Dióxido de Carbono	No	88.00	91.00		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Etileno	Sí	0.0000	0.0000		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> - Etano	Sí	0.0000	0.0000		
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> - Acetileno	Sí	0.0000	0.0000		
<b>Total de Gases (ppm)</b>		20290	27120		
<b>Total de Gases Combustibles (ppm)</b>		0.0000	0.0000		
<p>Notas: Los resultados evidencian una condición normal de funcionamiento del equipo.</p>					
Fecha: 10-Apr-2006		Ingeniero de Ensayo: Juan Carlos Vélez M.		Departamento de Ensayo: PTQ	

## TABLA # 5.B1

### PROTOCOLO DE ENSAYOS EN FÁBRICA DE DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DEL AISLAMIENTO TOTAL DEL TRANSFORMADOR (CASO II.B)

Page 5(11)  
725003-50

#### MEASUREMENT OF DIELECTRIC DISSIPATION FACTOR

Temperature: 20 °C

Frequency: 50 Hz

Serial no.	Dissipation factor (tan $\delta$ ) for tested primary voltages	
	50,2 kV [%]	10 kV [%]
8705666	0.24	0.24
8705667	0.24	0.24
8705668	0.25	0.24
8705669	0.25	0.24
8705670	0.25	0.24
8705671	0.24	0.24

**ABB**

**TABLA # 5.B2**

**PROTOCOLO DE ENSAYOS EN FÁBRICA DE DETERMINACIÓN DE LA  
CAPACITANCIA DEL AISLAMIENTO TOTAL DEL TRANSFORMADOR  
(CASO II.B)**

Page 4(11)  
725003-50

**CAPACITANCE MEASUREMENT**

Temperature: 20 °C

Frequency: 50 Hz

Serial no.	Capacitance C1 (Top to earth)
	[pF]
8705666	1286
8705667	1417
8705668	1469
8705669	1417
8705670	1394
8705671	1389

**ABB**

**TABLA # 5.C1**

**PROTOCOLO DE ENSAYO DIELECTRICO DE ALTA TENSION CON CIRCUITO  
DE RESONANCIA AC EN SERIE DE FRECUENCIA VARIABLE  
(SECCION 1 - CASO V)**

**SIEMENS**

Página 1 / 1  
Seite 1 / 1

**Subestación de alta tensión del tipo 8D . . desde 72,5 kV**

**Prueba de alta tensión con tensión alterna**

**Hochspannungsschaltanlagen 8D . . ab 72,5 kV**

**Wechselspannungsprüfung**

Protocolo de prueba / Prüfprotokoll No. / Nr. **2806**-P-005290-66 PTD H 09/2002

Cliente: Kunde:	<b>Transelectric</b>	No. de contrato: Vertragsnummer:	<b>P-004025</b>
Consultor: Berater:	<b>-</b>	No. fábrica: desde Fabrik-Nr. von	<b>05/K31 250 631</b>
Subestación: Anlage:	<b>S/ E Salitral</b>	hasta bis	<b>05/K31 250 640</b>
Tipo de subestación: Schaltanlagentyp:	<b>8DN9-2</b>	Tensión nominal: Bemessungsspannung:	<b>72.5</b> kV
Tensión nominal soportable en corriente alterna Bemessungs-Kurzzeit-Wechselspannung		100% valor 100% Wert:	<b>140</b> kV <sub>RMS</sub> kV <sub>eff</sub>
Transformador de prueba Prüftransformator:	Tipo: Typ: <b>STED 1/680</b>	No de serie: Fabrik-Nr.:	<b>727139</b>
Conexión del transformador de prueba: Anschluß-Prüftransformator:	Acoplado angeflanscht	<input type="checkbox"/>	A terminales aéreas über Freiluftdurchführung <input checked="" type="checkbox"/>

Sección de prueba: Prüfteil:	<b>01</b>	Celdas: Felder:	<b>=F05 + =F01 + =F02</b>	Incluyendo barra mit Sammelschiene	<b>Barra 1</b>		
Tensión de prueba Prüfspannung  (kV)	Frecuencia de prueba Prüffrequenz			Tiempo de prueba Prüfzeit  (min)	Corriente capacitiva Ladestrom		
	Polo A Pol A (Hz)	Polo B Pol B (Hz)	Polo C Pol C (Hz)		Polo A Pol A A	Polo B Pol B A	Polo C Pol C A
<b>50</b>	79,1	80,2	82,1	15	0,1	0,1	0,1
<b>72</b>	79,1	80,2	82,1	3	0,2	0,1	0,1
<b>120</b>	79,1	80,2	82,1	1	0,3	0,3	0,3

Observaciones:  
Bemerkungen: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Probado por: Geprüft von (Auftragnehmer):	Testigos de la prueba (cliente/consultor): Bei Prüfungen anwesend (Kunde / Berater):
Nombre: Name: <b>René Schmid</b>	Nombre: Name: _____
Fecha <sup>1)</sup> : Datum: <b>13/07/2008</b>	Fecha <sup>1)</sup> : Datum: _____
Firma: Unterschrift: _____	Firma: Unterschrift: _____

<sup>1)</sup> Usar el siguiente formato para la fecha: día/mes/año  
\*) Angaben Datumformat verwenden: Tag/Monat/Jahr

**TABLA # 5.C2**

**PROTOCOLO DE ENSAYO DIELÉCTRICO DE ALTA TENSIÓN CON CIRCUITO  
DE RESONANCIA AC EN SERIE DE FRECUENCIA VARIABLE  
(SECCIÓN 2 - CASO V)**

**SIEMENS**

Página 1 / 1  
Serie 1 / 1

**Subestación de alta tensión del tipo 8D . . desde 72,5 kV**

**Prueba de alta tensión con tensión alterna**

**Hochspannungsschaltanlagen 8D . . ab 72,5 kV**

**Wechselspannungsprüfung**

Protocolo de prueba / Prüfprotokoll No. / Nr. **2806**-P-005290-66 PTD H 09/2002

Cliente: Kunde:	<u>Transelectric</u>	No. de contrato: Vertragsnummer:	<u>P-004025</u>
Consultor: Berater:	<u>-</u>	No. fábrica desde: Fabrik-Nr. von:	<u>05/K31 250 631</u>
Subestación: Anlage:	<u>S/E Salitral</u>	hasta: bis:	<u>05/K31 250 640</u>
Tipo de subestación: Schaltanlagentyp:	<u>8DN9-2</u>	Tensión nominal: Bemessungsspannung:	<u>72.5</u> kV
Tensión nominal soportable en corriente alterna: Bemessungs-Kurzzeit-Wechselspannung:		100% valor: 100% Wert:	<u>140</u> kV <sub>RMS</sub> kV <sub>eff</sub>
Transformador de prueba: Prüftransformator:	Tipo: Typ: <u>STED 1/680</u>	No de serie: Fabrik-Nr.:	<u>727139</u>
Conexión del transformador de prueba: Anschluß Prüftransformator:	Acoplado angeflanscht	<input type="checkbox"/>	A terminales aéreos über Freiluftdurchführung <input checked="" type="checkbox"/>

Sección de prueba:	<b>02</b>	Celdas: Felder:	=F05 + =F03 + =F06	Incluyendo barra: mit Sammelschiene:	Barra 1		
Tensión de prueba Prüfspannung (kV)	Frecuencia de prueba Prüffrequenz			Tiempo de prueba Prüfzeit (min)	Corriente capacitiva Ladestrom		
	Polo A Pol A (Hz)	Polo B Pol B (Hz)	Polo C Pol C (Hz)		Polo A Pol A A	Polo B Pol B A	Polo C Pol C A
<b>50</b>	81,0	80,6	80,9	15	0,1	0,1	0,1
<b>72</b>	81,0	80,6	80,9	3	0,1	0,1	0,1
<b>120</b>	81,0	80,6	80,9	1	0,3	0,3	0,3

Observaciones:  
Bemerkungen: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Probado por: Geprüft von (Auftragnehmer):	Testigos de la prueba (cliente/consultor): Bei Prüfungen anwesend (Kunde / Berater):
Nombre: Name: <u>René Schmid</u>	Nombre: Name: _____
Fecha <sup>1)</sup> : Datum <sup>1)</sup> : <u>13/07/2008</u>	Fecha <sup>2)</sup> : Datum <sup>2)</sup> : _____
Firma: Unterschrift: _____	Firma: Unterschrift: _____

<sup>1)</sup> Usar el siguiente formato para la fecha: día/mes/año.  
<sup>2)</sup> Folgerndes Datumformat verwenden: Tag/Monat/Jahr

**TABLA # 5.C3**

**PROTOCOLO DE ENSAYO DIELECTRICO DE ALTA TENSION CON CIRCUITO  
DE RESONANCIA AC EN SERIE DE FRECUENCIA VARIABLE  
(SECCION 3 - CASO V)**

**SIEMENS**

Página 1 / 1  
Seite 1 / 1

**Subestación de alta tensión del tipo 8D . . desde 72,5 kV**

**Prueba de alta tensión con tensión alterna**

**Hochspannungsschaltanlagen 8D . . ab 72,5 kV**

**Wechselspannungsprüfung**

Protocolo de prueba / Prüfprotokoll No. / Nr. **2806**-P-005290-66 PTD H 09/2002

Ciente: Kunde:	<b>Transelectric</b>	No. de contrato: Vertragsnummer:	<b>P-004025</b>
Consultor: Berater:	-	No. fábrica: desde Fabrik-Nr.: von	<b>05/K31 250 631</b>
Subestación: Anlage:	<b>S/E Salitral</b>	hasta bis	<b>05/K31 250 640</b>
Tipo de subestación: Schaltanlagen typ:	<b>8DN9-2</b>	Tensión nominal: Bemessungsspannung:	<b>72,5</b> kV
Tensión nominal soportable en corriente alterna: Bemessungs-Kurzzeit-Wechselspannung		100% valor: 100% Wert:	<b>140</b> kV <sub>RMS</sub> kV <sub>eff</sub>
Transformador de prueba: Prüftransformator	Tipo: Typ: <b>STED 1/680</b>	No de serie: Fabrik-Nr.:	<b>727139</b>
Conexión del transformador de prueba: Anschluß Prüftransformator:	Acoplado angeflanscht	<input type="checkbox"/>	A terminales aéreas über Freilufdurchführung <input checked="" type="checkbox"/>

Sección de prueba: Prüfspannung:	<b>03</b>	Celdas: Felder:	<b>=F07 + =F04 + =F08</b>			Incluyendo barra: Barra:	<b>Barra 1+2</b>	
Tensión de prueba Prüfspannung (kV)	Frecuencia de prueba Prüffrequenz			Tiempo de prueba Prüfzeit (min)	Corriente capacitiva Ladestrom			
	Polo A Pol A (Hz)	Polo B Pol B (Hz)	Polo C Pol C (Hz)		Polo A Pol A A	Polo B Pol B A	Polo C Pol C A	
<b>50</b>	76,3	76,4	77,6	15	0,1	0,1	0,1	
<b>72</b>	76,3	76,4	77,6	3	0,2	0,2	0,2	
<b>120</b>	76,3	76,4	77,6	1	0,3	0,3	0,3	

Observaciones:  
Bemerkungen: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Probado por: Geprüft von (Auftragnehmer):	Testigos de la prueba (cliente/consultor): Bei Prüfungen anwesend (Kunde / Berater):
Nombre: Name: <b>René Schmid</b>	Nombre: Name: _____
Fecha <sup>1)</sup> : Datum: <b>13/07/2008</b>	Fecha <sup>1)</sup> : Datum: _____
Firma: Unterschrift: _____	Firma: Unterschrift: _____

<sup>1)</sup> Usar el siguiente formato para la fecha: día/mes/año.  
<sup>1)</sup> Folgende Datumformat verwenden: Tag/Monat/Jahr

**TABLA # 5.C4**

**PROTOCOLO DE ENSAYO DIELECTRICO DE ALTA TENSION CON CIRCUITO  
DE RESONANCIA AC EN SERIE DE FRECUENCIA VARIABLE  
(SECCION 4 - CASO V)**

**SIEMENS**

Página 1 / 1  
Seite 1 / 1

**Subestación de alta tensión del tipo 8D . . desde 72,5 kV**

**Prueba de alta tensión con tensión alterna**

**Hochspannungsschaltanlagen 8D . . ab 72,5 kV**

**Wechselspannungsprüfung**

Protocolo de prueba / Prüfprotokoll No. / Nr. **2806**-P-005290-66 PTD H 09/2002

Cliente: Kunde:	<b>Transelectric</b>	No. de contrato: Vertragsnummer:	<b>P-004025</b>
Consultor: Berater:	-	No. fábrica: desde Fabrik-Nr.:	<b>05/K31 250 631</b>
Subestación: Anlage:	<b>S/E Salitral</b>	hasta bis:	<b>05/K31 250 640</b>
Tipo de subestación: Schaltanlagen-typ:	<b>8DN9-2</b>	Tensión nominal: Bemessungsspannung:	<b>72.5</b> kV
Tensión nominal soportable en corriente alterna Bemessungs-Kurzzeit-Wechselspannung		100% valor: 100% Wert:	<b>140</b> kV <sub>RMS</sub> kV <sub>eff</sub>
Transformador de prueba Prüftransformator	Tipo: Typ: <b>STED 1/680</b>	No de serie: Fabrik-Nr.:	<b>727139</b>
Conexión del transformador de prueba: Anschluß Prüftransformator:	Acoplado angeflanscht	<input type="checkbox"/>	A terminales aéreos über Freiluftdurchführung <input checked="" type="checkbox"/>

Sección de prueba: Prüfspannung:	<b>04</b>	Celdas: Felder:	<b>=F07 + =F09 + =F10</b>			Incluyendo barra mit Sammelschiene	<b>Barra: 2</b>
Tensión de prueba Prüfspannung (kV)	Frecuencia de prueba Prüffrequenz			Tiempo de prueba Prüfzeit (min)	Corriente capacitiva Ladestrom		
	Polo A Pol A (Hz)	Polo B Pol B (Hz)	Polo C Pol C (Hz)		Polo A Pol A A	Polo B Pol B A	Polo C Pol C A
<b>50</b>	77,7	78,7	80,5	15	0,1	0,1	0,1
<b>72</b>	77,7	78,7	80,5	3	0,2	0,2	0,2
<b>120</b>	77,7	78,7	80,5	1	0,3	0,3	0,3

Observaciones:  
Bemerkungen: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Probado por: Geprüft von (Auftragnehmer):	Testigos de la prueba (cliente/consultor): Bei Prüfungen anwesend (Kunde / Berater):
Nombre: Name: <b>René Schmid</b>	Nombre: Name: _____
Fecha <sup>1)</sup> : Datum: <b>13/07/2008</b>	Fecha <sup>1)</sup> : Datum: _____
Firma: Unterschrift: _____	Firma: Unterschrift: _____

<sup>1)</sup> Usar el siguiente formato para la fecha: día/mes/año.  
<sup>2)</sup> Folgende Datumsformate verwenden: Tag/Monat/Jahr.

**TABLA # 6.A1**

**RELACIÓN ENTRE EL PUNTO DE ROCÍO Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS GASES A PRESIÓN ATMOSFÉRICA 760mmHg**

**4.6 — TABELA DE RELAÇÃO ENTRE O PONTO DE ORVALHO E O TEOR DE UMIDADE DOS GASES NA PRESSÃO DE 101.324,72 PA (760 mmHg)**  
Preparada com dados da tabela publicada por ASTM D 2029 64 T (reapproved 1978)

Ponto de orvalho (°C)	Umidade		Pressão do vapor		Ponto de orvalho (°C)	Umidade		Pressão do vapor		Ponto de orvalho (°C)	Umidade		Pressão do vapor	
	mg por litro	Porcentagem em volume	mmHg	Pa		mg por litro	Porcentagem em volume	mmHg	Pa		mg por litro	Porcentagem em volume	mmHg	Pa
50	82,7	12,2	92,7	13 354,94	17	14,4	1,91	14,51	1 934,50	-16	1,27	0,149	1,132	150,92
49	78,9	11,6	88,16	11 753,66	16	13,7	1,80	13,66	1 821,17	-17	1,16	0,136	1,033	137,72
48	75,1	11,0	83,6	11 145,72	15	12,8	1,68	12,76	1 701,18	-18	1,06	0,123	0,93	123,98
47	71,9	10,5	79,8	10 639,09	14	12,0	1,57	11,93	1 590,53	-19	0,965	0,112	0,851	113,45
46	68,4	9,95	75,6	10 079,14	13	11,3	1,48	11,24	1 498,53	-20	0,882	0,102	0,775	103,32
45	65,00	9,45	71,82	9 675,18	12	10,7	1,39	10,56	1 407,88	-21	0,809	0,093	0,706	94,12
44	62,1	8,99	68,32	9 108,55	11	9,94	1,29	9,80	1 306,55	-22	0,733	0,084	0,638	85,06
43	59,1	8,52	64,75	8 632,59	10	9,37	1,21	9,19	1 225,22	-23	0,666	0,076	0,577	76,92
42	56,4	8,10	61,56	8 207,30	9	8,76	1,13	8,56	1 143,90	-24	0,608	0,069	0,524	69,86
41	53,5	7,67	58,29	7 771,33	8	8,27	1,06	8,05	1 073,24	-25	0,556	0,063	0,478	63,72
40	50,9	7,27	55,25	7 366,04	7	7,73	0,988	7,50	999,91	26	0,506	0,057	0,433	57,73
39	48,4	6,89	52,36	6 980,74	6	7,25	0,924	7,02	935,92	27	0,454	0,051	0,387	51,59
38	46,0	6,54	49,70	6 626,10	5	6,79	0,861	6,54	871,92	-28	0,411	0,046	0,349	46,53
37	43,8	6,20	47,12	6 282,13	4	6,36	0,804	6,11	814,59	-29	0,377	0,042	0,319	42,53
36	41,6	5,87	44,61	5 947,49	3	5,94	0,748	5,68	757,26	-30	0,343	0,038	0,288	38,39
35	39,4	5,55	42,18	5 623,52	2	5,55	0,696	5,29	705,27	-31	0,307	0,034	0,258	34,39
34	37,4	5,25	39,9	5 319,54	1	5,18	0,649	4,93	657,27	-32	0,273	0,030	0,228	30,39
33	35,6	4,96	37,69	5 024,90	0	4,84	0,602	4,57	609,28	-33	0,246	0,027	0,205	27,33
32	33,8	4,70	35,72	4 762,26	-1	4,49	0,556	4,22	562,62	-34	0,229	0,025	0,190	25,33
31	32,0	4,44	33,74	4 498,28	-2	4,14	0,511	3,88	517,29	-35	0,202	0,022	0,167	22,26
30	30,3	4,19	31,84	4 244,97	-3	3,81	0,470	3,57	475,96	-36	0,185	0,020	0,152	20,26
29	29,2	4,01	30,47	4 062,32	-4	3,52	0,431	3,27	435,96	-37	0,167	0,018	0,136	18,13
28	27,1	3,72	28,27	3 789,01	-5	3,24	0,396	3,00	399,96	-38	0,149	0,016	0,121	16,13
27	25,7	3,52	26,75	3 566,36	-6	2,98	0,364	2,76	367,97	-39	0,131	0,014	0,106	14,13
26	24,4	3,33	25,30	3 373,04	-7	2,74	0,333	2,53	337,30	-40	0,119	0,0127	0,096	12,79
25	23,0	3,12	23,71	3 161,06	-8	2,53	0,306	2,32	309,30	-41	0,107	0,0113	0,085	11,33
24	21,7	2,94	22,34	2 978,41	-9	2,32	0,280	2,12	286,64	-42	0,096	0,0102	0,077	10,26
23	20,6	2,78	21,12	2 815,76	-10	2,14	0,257	1,95	259,97	-43	0,086	0,0090	0,0684	9,12
22	19,4	2,61	19,83	2 643,77	-11	1,96	0,235	1,78	237,31	-44	0,076	0,0080	0,0608	8,10
21	18,3	2,46	18,69	2 491,78	-12	1,81	0,215	1,63	217,31	-45	0,068	0,0071	0,0539	7,18
20	17,3	2,31	17,55	2 339,80	-13	1,65	0,196	1,480	198,51	-46	0,061	0,0063	0,0478	6,372
19	16,3	2,17	16,49	2 198,47	-14	1,52	0,179	1,360	181,31	-47	0,054	0,0056	0,0425	5,666
18	15,4	2,04	15,50	2 066,49	-15	1,38	0,163	1,236	165,05	-48	0,049	0,0050	0,0380	5,066

Tomada de el libro "Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante" de Milan Milasch. Preparada con datos de la publicación ASTM D.2029 64T (aprobada en 1978)

# FORMULARIOS ANEXOS





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE  
AISLAMIENTO DE UN  
TRANSFORMADOR DE TRES  
ARROLLAMIENTOS

FORMULARIO

5.A1

hoja 1 de 1

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 34°C  
 TEMP. ACEITE: 33°C  
 TEMP. DEVANADO: 32°C  
 % HUM. RELATIVA: 55%  
 TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #020359  
 SUBESTACIÓN: Dos Cerritos  
 FECHA: 18/04/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
 AÑO DE FAB.: 2006  
 No. SERIE: 200515  
 CLASE: ONAN / ONAF I / ONAF II  
 IDENTIFICACIÓN: ATK-ØR  
 CONEXIÓN: YNyn0d1

TENSIÓN NOM.: 230/√3-69/√3-13,8 kV  
 POTENCIA NOM.: 55 / 55 / 18,3 MVA  
 VOLUMEN ACEITE: 25000 lt.

TIPO:  
 SELLADO   
 CON GAS   
 CON CONSERVADOR

INFORMACIÓN DEL MEGGER



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE PRUEBAS											
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5		ENSAYO No.6	
L (LINE)	AN		AN		AN		an		an		3a3b	
E (EARTH)	tierra		an		3a3b		tierra		3a3b		tierra	
G (GUARD)	an-3a3b		tierra - 3a3b		tierra-an		AN-an		tierra-AN		AN-an	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000		5000		5000	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	3,66	0,16	2,88	0,13	5,30	0,28	4,08	0,21	2,92	0,15	2,00	0,11
0,5	3,96	0,18	3,10	0,14	6,15	0,32	4,62	0,24	3,38	0,18	2,46	0,13
0,75	4,18	0,18	3,56	0,16	6,80	0,36	5,10	0,27	3,76	0,20	2,96	0,16
1	4,48	0,20	3,72	0,16	7,30	0,38	5,50	0,29	4,18	0,22	3,40	0,18
2	5,35	0,24	4,90	0,22	9,10	0,48	7,20	0,38	5,70	0,30	4,88	0,26
3	6,20	0,27	6,00	0,27	9,60	0,50	9,00	0,47	7,00	0,37	6,20	0,33
4	6,15	0,27	7,00	0,31	12,40	0,65	10,60	0,56	8,35	0,44	7,25	0,38
5	7,70	0,34	7,85	0,35	13,20	0,69	11,60	0,61	9,60	0,50	8,20	0,43
6	8,10	0,36	8,80	0,39	14,60	0,77	12,90	0,68	10,80	0,57	9,00	0,47
7	8,65	0,38	9,95	0,44	15,80	0,83	14,20	0,75	12,00	0,63	9,70	0,51
8	9,00	0,40	10,80	0,48	16,40	0,86	14,70	0,77	13,20	0,69	10,40	0,55
9	9,00	0,40	11,70	0,52	17,30	0,91	16,00	0,84	14,80	0,78	11,20	0,59
10	9,70	0,43	12,70	0,56	18,40	0,97	16,00	0,84	15,70	0,83	11,80	0,62
TEMP. INICIAL (°C):	30		30		32		32		32		32	
TEMP. FINAL (°C):	30		30		33		33		33		33	
TEMP. PROM. (°C):	30		30		32,5		32,5		32,5		32,5	
FACTOR DE CORREC. (75°C)	22,63		22,63		19,03		19,03		19,03		19,03	

OBSERVACIONES: 1) Ensayos de recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio. Estos han sido realizados posterior a 48 horas de haber terminado el montaje.

3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DEL AISLAMIENTO  
DE UN TRANSFORMADOR DE TRES ARROLLAMIENTOS

FORMULARIO

5.A2

hoja 1 de 1

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 34°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. DEVANADO: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 55%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #020359  
SUBESTACIÓN: Dos Cerritos  
FECHA: 18/04/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2006  
No. SERIE: 200515  
CLASE: ONAN / ONAF I / ONAF II  
IDENTIFICACIÓN: ATK-ØR  
CONEXIÓN: YNynØd1

TENSIÓN NOM.: 230/√3-69/√3-13,8 KV  
POTENCIA NOM.: 55 / 55 / 18,3 MVA  
VOLUMEN ACEITE: 25000 lt.  
TIPO: SELLADO   
CON GAS   
CON CONSERVADOR

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)	
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL					Watts	mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	AN	an	3a3B	10	GST-guard(1)	CHL+CH	7325,4	0,602	0,2223	0,1289	32	0,58	
2	AN	an	3a3B	10	GST-guard(3)	CH	2790,1	0,282	0,2660	0,1543	32	0,58	
3	AN	an	3a3B	10	UST (1)	CHL	4534,7	0,321	0,1915	0,1111	32	0,58	
ENSAYO No.1 - ENSAYO No.3													
4	an	3a3B	AN	10	GST-guard(1)	CL-CLT	4763,5	0,524	0,2872	0,1666	32	0,58	
5	an	3a3B	AN	10	GST-guard(3)	CL	1219,9	0,259	0,5638	0,3270	32	0,58	
6	an	3a3B	AN	10	UST (1)	CLT	3542,7	0,272	0,2021	0,1172	32	0,58	
ENSAYO No.4 - ENSAYO No.6													
7	3a3B	AN	an	7,5	GST-guard(1)	CHT+CT	8975,6	0,955	0,2766	0,1604	32	0,58	
8	3a3B	AN	an	7,5	GST-guard(3)	CT	8919,7	0,623	0,2766	0,1604	32	0,58	
9	3a3B	AN	an	7,5	UST (1)	CHT	56,36	0,754	0,2345	0,1360	32	0,58	
ENSAYO No.7 - ENSAYO No.9													

OBSERVACIONES: 1) Ensayos de recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio. Estos han sido realizados posterior a 48 horas de haber terminado el montaje.  
2) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DEL AISLAMIENTO DE  
LOS BUSHING'S TIPO CAPACITIVOS

FORMULARIO

5.A3

hoja 1 de 1

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 34°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. DEVANADO: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 55%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #020359  
SUBESTACIÓN: Dos Cerritos  
FECHA: 18/04/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2006  
No. SERIE: 200515  
CLASE: ONAN / ONAF I / ONAF II  
IDENTIFICACIÓN: ATK-ØR  
CONEXIÓN: YNynØd1

TENSIÓN NOM.: 230/√3-69/√3-13,8 kV  
POTENCIA NOM.: 55 / 55 / 18,3 MVA  
VOLUMEN ACEITE: 25000 l.  
TIPO: SELLADO   
CON GAS   
CON CONSERVADOR

INFORMACIÓN DEL EQUIPO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground	Tierra Rojo y Azul					

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	BUSHING		CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)	
	DESIGNACIÓN	No. SERIE	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
				ROJO	AZUL					<input checked="" type="checkbox"/> Watts	<input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	A	1ZSC311150	AN	3a3b-an	TAP de bushing	10	UST (1)	C1	307,57	0,051	0,4386	0,5132	34	1,17	
2	A	1ZSC311150	TAP de bushing	3a3b-an	AN	2,5	GST-guard(1)	C2	472,62	0,095	0,4649	0,5439	34	1,17	
3	a	1ZSC311120	an	3a3b-AN	TAP de bushing	10	UST (1)	C1	452,23	0,08	0,4737	0,5542	34	1,17	
4	a	1ZSC311120	TAP de bushing	3a3b-AN	an	2,5	GST-guard(1)	C2	332,6	0,069	0,4825	0,5645	34	1,17	

OBSERVACIONES: 1) Ensayos de recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio. Estos han sido realizados posterior a 48 horas de haber terminado el montaje.  
2) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 30°C  
 TEMP. ACEITE: 30°C  
 TEMP. DEVANADO: —  
 % HUM. RELATIVA: 58%  
 TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #020359  
 SUBESTACIÓN: Dos Cerritos  
 FECHA: 11/04/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
 AÑO DE FAB.: 2006  
 No. SERIE: 200515  
 CLASE: ONAN / ONAF I / ONAF II  
 IDENTIFICACIÓN: ATK-ØR  
 CONEXIÓN: YNynØd1

TENSIÓN NOM.: 230/√3-69/√3-13,8 kV  
 POTENCIA NOM.: 55 / 55 / 18,3 MVA  
 VOLUMEN ACEITE: 25000 lt.  
 TIPO:   
 SELLADO   
 CON GAS   
 CON CONSERVADOR

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



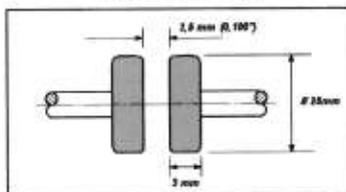
MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE: —  
 MODELO: OTS60SX

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	TENSION DE RUPTURA (KV)										RD	TIPO DE ENSAYO		NORMA		CONSISTENCIA ESTADÍSTICA	TEMPERATURA (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Rutina	Recepción	ASTM D.1816	ASTM D.877		Acote	Ambiente
1	25,5	23,5	21,0	23,0	24,1						23,4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0704	30	30
2	27,1	30,0	28,2	26,0	31,0						28,5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0721	30	30
3	20,0	18,5	22,0	21,0	19,0						20,1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0714	30	30
4	27,1	23,3	21,6	27,9	24,1	28,2	24,3	25,1	24,0	24,2	25,0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,1069	30	30
5	32,6	30,0	33,1	34,0	29,0						31,7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0674	30	30
6	19,8	20,7	18,7	21,3	22,0						20,5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0630	30	30
7	18,5	20,0	23,0	24,0	19,1	20,3	18,9	19,5	21,0	20,5	20,5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,1173	30	30
8	19,8	19,7	20,2	21,0	19,9						20,1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0262	30	30
9	26,8	27,4	28,5	29,2	27,9						28,0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0334	30	30
10	32,0	31,5	31,8	29,9	30,0						31,0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0326	30	30
11	20,1	22,2	21,8	22,3	20,8						21,4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0446	30	30
12	29,6	30,5	32,3	34,0	35,1						32,3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0715	30	30

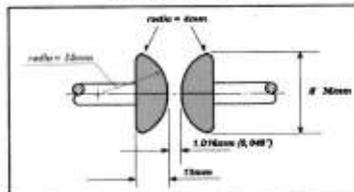
INFORMACIÓN BÁSICA

NORMA ASTM D.877



Tasa de aumento de tensión: 3kV/Seg.

NORMA ASTM D.1816



Tasa de aumento de tensión: 5kV/Seg.

CRITERIO DE CONSISTENCIA ESTADÍSTICA

$$\frac{s}{\bar{X}} \leq 0,1$$

donde: 
$$s = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i$$

OBSERVACIONES: 1) Estos ensayos corresponden a la recepción del aceite contenido en 12 de los 120 tambores de 55 galones recibidos desde fábrica.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL  
ACEITE AISLANTE

FORMULARIO

5.A4

hoja 2 de 2

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 34°C  
 TEMP. ACEITE: 32°C  
 TEMP. DEVANADO: —  
 % HUM. RELATIVA: 55%  
 TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #020359  
 SUBESTACIÓN: Dos Cerritos  
 FECHA: 16-18/04/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
 AÑO DE FAB.: 2006  
 No. SERIE: 200515  
 CLASE: ONAN / ONAF I / ONAF II  
 IDENTIFICACIÓN: ATK-ØR  
 CONEXIÓN: YNyn0d1

TENSIÓN NOM.: 230/√3-69/√3-13,8 kV  
 POTENCIA NOM.: 55 / 55 / 18,3 MVA  
 VOLUMEN ACEITE: 25000 lt.

TIPO: SELLADO   
 CON GAS   
 CON CONSERVADOR

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



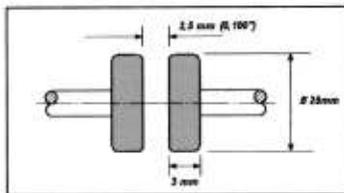
MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE: —  
 MODELO: OTS60SX  
 VOLTAJE: 115 Vac

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	TENSION DE RUPTURA (KV)										RD	TIPO DE ENSAYO		NORMA		CONSISTENCIA ESTADISTICA	TEMPERATURA (°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Rutina	Recepción	ASTM D.1816	ASTM D.877		Acetite	Ambiente
1	24,4	27,2	27,8	26,1	25,8						26,3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0510	30	32
2	40,8	45,5	41,7	41,9	40,9						42,2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0458	31	34
3	53,3	49,6	57,1	54,5	53,3						53,6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0505	28	30
4	43,1	46,9	47,5	47,2	47,0						46,3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,0394	29	31
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
												<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

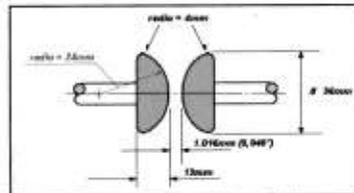
INFORMACIÓN BÁSICA

NORMA ASTM D.877



Tasa de aumento de tensión: 3kV/Seg.

NORMA ASTM D.1816



Tasa de aumento de tensión: 5kV/Seg.

CRITERIO DE CONSISTENCIA ESTADISTICA

$$\frac{s}{\bar{X}} \leq 0,1$$

donde:

$$s = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i$$

OBSERVACIONES: 1) Los ensayos #1, #2, #3, corresponden a la recepción del aceite aislante antes, durante y después del proceso de reacondicionamiento, previo a la inmersión del transformador.  
 2) El ensayo #4, corresponde a la recepción del aceite aislante luego de 48 horas de inmersión en el transformador.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA  
DEL ACEITE AISLANTE**

FORMULARIO

**5.A5**

hoja 1 de 1

**INFORMACIÓN GENERAL**

TEMP. AMBIENTE:	<u>34°C</u>	CÓDIGO O.T.:	<u>#020359</u>
TEMP. ACEITE:	<u>30°C</u>	SUBESTACIÓN:	<u>Dos Cerritos</u>
TEMP. DEVANADO:	<u>30°C</u>	FECHA:	<u>18/04/2007</u>
% HUM. RELATIVA:	<u>55%</u>		
TIEMPO:	<u>Soleado</u>		

**INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR**

FABRICANTE:	<u>ABB</u>	TENSIÓN NOM.:	<u>230/√3-69/√3-13.8 kV</u>
AÑO DE FAB.:	<u>2006</u>	POTENCIA NOM.:	<u>55 / 55 / 18,3 MVA</u>
No. SERIE:	<u>200515</u>	VOLUMEN ACEITE:	<u>25000 lt.</u>
CLASE:	<u>ONAN / ONAF I / ONAF II</u>	TIPO:	SELLADO: <input type="checkbox"/>
IDENTIFICACIÓN:	<u>ATK-ØR</u>		CON GAS: <input type="checkbox"/>
CONEXIÓN:	<u>YNyn0d1</u>		CON CONSERVADOR: <input checked="" type="checkbox"/>

**INFORMACIÓN DEL EQUIPO**



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

**MODOS DE ENSAYO**

Modo	1	2	3
UST	Mide Rojo - Tierra Azul	Mide Azul - Tierra Rojo	Mide Rojo y Azul
GST-guard	Guard Azul - Tierra Rojo	Guard Rojo - Tierra Azul	Guard Rojo y Azul
GST-ground	Tierra Rojo y Azul		

**REGISTROS DE CAMPO**

ENSAYO No.	VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A:		TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)		
				2.5 KV <input type="checkbox"/> 10 KV <input checked="" type="checkbox"/>					
				CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS			FAC. DE POTENCIA (%)	
	<input checked="" type="checkbox"/> Watts <input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO	CORREGIDO						
1	10	UST (1)	aceite		0,004	0,0469	0,0295	30	0,63

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo fue realizado a una muestra del aceite aislante contenido en el transformador, luego de 48 horas de su inmersión.  
2) La muestra del aceite aislante analizado, fue receptada de una válvula inferior del transformador.  
3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE TENSIÓN**  
(con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

**5.B1**

hoja 1 de 3

**INFORMACIÓN GENERAL**

TEMP. AMBIENTE: 24.5°C  
 TEMP. ACEITE: 24.5°C  
 TEMP. DEVANADO: 24.5°C  
 % HUM. RELATIVA: 42%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #022934  
 SUBESTACIÓN: Riobamba  
 FECHA: 11/07/2007

**INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR**

FABRICANTE: PFIFFNER  
 AÑO DE FAB.: 2004  
 No. SERIE: 2004.2716.01/1  
 MODELO: EQF72  
 IDENTIFICACIÓN: PT-ØA  
 NORMA: ANSI/IEEE C57.13 - IEC 60044-2

TENSIÓN NOM.: 69000/√3 : 115 (115/√3) Voltios  
 POT. TÉRMICA (Sth): 1000 VA  
 # DEVANADOS SEC.: 2  
 ACEITE: Nynas Nytro 3000 (22Kg)  
 PESO: 160 Kg.

**INFORMACIÓN DEL MEGGER**



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

**REGISTROS DE CAMPO**

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO									
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5	
	L (LINE)	H1H0	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	X1X2X3	Y1Y2Y3	X1X2X3	Y1Y2Y3	X1X2X3
E (EARTH)	tierra	tierra	X1X2X3Y1Y2Y3	tierra	H1H0-Y1Y2Y3	H1H0-X1X2X3	H1H0-X1X2X3	H1H0-X1X2X3	H1H0-X1X2X3	H1H0-tierra
G (GUARD)	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3	X1X2X3-Y1Y2Y3
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		500		500		500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	11,500	0,336	0,181	0,005	10,400	0,326	9,500	0,307		
0,5	11,800	0,345	0,189	0,006	13,200	0,414	12,100	0,391		
0,75	11,800	0,345	0,198	0,006	15,600	0,489	14,100	0,456		
1	12,000	0,351	0,206	0,006	16,000	0,502	14,200	0,459		
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
TEMP. INICIAL (°C):	23,90		24,40		24,90		25,40			
TEMP. FINAL (°C):	24,20		24,70		25,20		25,60			
TEMP. PROM. (°C):	24,05		24,55		25,05		25,50			
FACTOR DE CORREC. (75°C)	34,18		33,01		31,89		30,91			

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
 2) Este transformador dispone de toma (H0) para aterrizamiento externo del arrollamiento primario.  
 3) H1H0: terminales de arrollamiento primario; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios (total 2)  
 4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE TENSIÓN (con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO  
**5.B1**  
hoja 2 de 3

**INFORMACIÓN GENERAL**

TEMP. AMBIENTE:	23°C	CÓDIGO O.T.:	#022934
TEMP. ACEITE:	23°C	SUBESTACIÓN:	Riobamba
TEMP. DEVANADO:	23°C	FECHA:	11/07/2007
% HUM. RELATIVA:	44%		
TIEMPO:	Nublado		

**INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR**

FABRICANTE:	PIFFNER	TENSIÓN NOM.:	69000/√3 : 115 (115/√3) Voltios
AÑO DE FAB.:	2004	POT. TÉRMICA (Sth):	1000 VA
No. SERIE:	2004.2716.01/1	# DEVANADOS SEC.:	2
MODELO:	EQF72	ACEITE:	Nynas Nytro 3000 (22Kg)
IDENTIFICACIÓN:	PT-ØA	PESO:	160 Kg.
NORMA:	ANSI/IEEE C57.13 - IEC 60044-2		

**INFORMACIÓN DEL MEGGER**



MARCA: MEGGER (AVO)  
No. SERIE: \_\_\_\_\_  
MODELO: S1-5001  
VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

**REGISTROS DE CAMPO**

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO									
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5	
L (LINE)	H1H0		H1H0		X1X2X3		Y1Y2Y3		X1X2X3	
E (EARTH)	tierra		X1X2X3Y1Y2Y3		tierra		tierra		Y1Y2Y3	
G (GUARD)	X1X2X3-Y1Y2Y3		tierra		H1H0-Y1Y2Y3		H1H0-X1X2X3		H1H0-tierra	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		500		500		500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	17,300	0,506	0,302	0,009	8,850	0,278	20,400	0,660		
0,5	17,900	0,524	0,318	0,010	10,800	0,339	28,000	0,906		
0,75	17,900	0,524	0,324	0,010	11,200	0,351	35,000	1,132		
1	18,100	0,530	0,336	0,010	11,600	0,364	35,600	1,152		
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
TEMP. INICIAL (°C):	22,50		22,60		22,90		23,10			
TEMP. FINAL (°C):	22,80		22,80		23,10		23,40			
TEMP. PROM. (°C):	22,65		22,70		23,00		23,25			
FACTOR DE CORREC. (75°C)	37,66		37,53		36,76		36,13			

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) Este transformador dispone de toma (H0) para aterrizamiento externo del arrollamiento primario.  
3) H1H0: terminales de arrollamiento primario; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios (total 2)  
4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACION

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE TENSION (con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO  
**5.B1**  
hoja 3 de 3

**INFORMACIÓN GENERAL**

TEMP. AMBIENTE:	21°C	CÓDIGO O.T.:	#022934
TEMP. ACEITE:	21°C	SUBESTACIÓN:	Riobamba
TEMP. DEVANADO:	21°C	FECHA:	11/07/2007
% HUM. RELATIVA:	47%		
TIEMPO:	Nublado		

**INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR**

FABRICANTE:	PIFFNER	TENSION NOM.:	69000/√3 : 115 (115/√3) Voltios
AÑO DE FAB.:	2004	POT. TÉRMICA (Sth):	1000 VA
No. SERIE:	2004.2716.01/1	# DEVANADOS SEC.:	2
MODELO:	EQF72	ACEITE:	Nynas Nytro 3000 (22Kg)
IDENTIFICACIÓN:	PT-ØA	PESO:	160 Kg.
NORMA:	ANSI/IEEE C57.13 - IEC 60044-2		

**INFORMACIÓN DEL MEGGER**



MARCA: MEGGER (AVO)  
No. SERIE: \_\_\_\_\_  
MODELO: S1-5001  
VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

**REGISTROS DE CAMPO**

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO									
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5	
L (LINE)	H1H0		H1H0		X1X2X3		Y1Y2Y3		X1X2X3	
E (EARTH)	tierra		X1X2X3Y1Y2Y3		tierra		tierra		Y1Y2Y3	
G (GUARD)	X1X2X3-Y1Y2Y3		tierra		H1H0-Y1Y2Y3		H1H0-X1X2X3		H1H0-tierra	
TENSION (Vdc)	5000		5000		500		500		500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	13,600	0,398	0,414	0,013	9,050	0,284	11,900	0,385		
0,5	13,900	0,407	0,426	0,013	12,000	0,376	16,800	0,544		
0,75	14,100	0,413	0,432	0,013	12,500	0,392	19,100	0,618		
1	14,200	0,415	0,442	0,013	13,600	0,426	21,200	0,686		
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
TEMP. INICIAL (°C):	20,90		20,90		21,00		21,10			
TEMP. FINAL (°C):	20,90		21,00		21,10		21,10			
TEMP. PROM. (°C):	20,90		20,95		21,05		21,10			
FACTOR DE CORREC. (75°C)	42,52		42,37		42,08		41,93			

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) Este transformador dispone de toma (H0) para aterrizamiento externo del arrollamiento primario.  
3) H1H0: terminales de arrollamiento primario; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios (total 2)  
4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:  
-

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE TENSIÓN  
(con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.B2

hoja 1 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 26°C  
TEMP. ACEITE: 26°C  
TEMP. DEVANADOS: 26°C  
% HUM. RELATIVA: 36%  
TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #022934  
SUBESTACIÓN: Riobamba  
FECHA: 11/07/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: PFIFFNER  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 2004.2716.01/1  
MODELO: EQF72  
IDENTIFICACIÓN: PT-0A  
NORMA: ANSI/IEEE C57.13 - IEC 60044-2

TENSIÓN NOM.: 69000/√3 : 115 (115/√3) Voltios  
POT. TÉRMICA (Sth): 1000 VA  
# DEVANADOS SEC.: 2  
ACEITE: Nynas Nytro 3000 (22Kg)  
PESO: 160 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER  
No. SERIE:  
MODELO: DELTA 2000  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input checked="" type="checkbox"/> 2.5 KV <input type="checkbox"/> 10 KV			TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (# 20°C)		
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS				FAC. DE POTENCIA (%)	
		ROJO	AZUL					Watts	mWatt			MEDIDO	CORREGIDO
1	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	GST-ground	CHL+CHG	1050,4	0,015	0,6100	0,4880	26	0,8	
1,1	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(3)	CHG	1028,9	0,0147	0,6100	0,4880	26	0,8	
1,2	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	UST(3)	CHL	21,56	0,0009	1,7400	1,3920	26	0,8	
ENSAYO No. 1 - ENSAYO No. 1,2													
2	H1	X1X2X3-Y1Y2Y3	H0	2,5	GST-guard(1)	CHL+(CH1+CH)							
3	H0	X1X2X3-Y1Y2Y4	H1	0,5	GST-guard(1)	CHL+(CH0+CH)							
4	H1H0	Y1Y2Y3	X1X2X3	2,5	UST(2)	CHX							
5	H1H0	Y1Y2Y3	X1X2X3	2,5	UST(1)	CHY							
6	H1	---	H0-X1X2X3-Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(1)	CH1							
7	H0	---	H1-X1X2X3-Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(1)	CH0							

- OBSERVACIONES:
- Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.
  - H1H0: terminales de arrollamiento primario; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios (total 2)
  - CHL hace referencia a la suma total de las componentes CHX+CHY; CHG hace referencia a la suma total de las componentes CH0+CH1+CH
  - Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE TENSIÓN  
(con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.B2

hoja 2 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 30°C  
TEMP. ACEITE: 29°C  
TEMP. DEVANADOS: 29°C  
% HUM. RELATIVA: 31%  
TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #022934  
SUBESTACIÓN: Riobamba  
FECHA: 11/07/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: PFIFFNER  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 2004.2716.01/2  
MODELO: EQF72  
IDENTIFICACIÓN: PT-ØB  
NORMA: ANSIIIEE C57.13 - IEC 60044-2

TENSIÓN NOM.: 69000/√3 : 115 (115/√3) Voltios  
POT. TÉRMICA (8th): 1000 VA  
# DEVANADOS SEC.: 2  
ACEITE: Nynas Nytro 3000 (22Kg)  
PESO: 160 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER  
No. SERIE:  
MODELO: DELTA 2000  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input checked="" type="checkbox"/> 2.5 KV <input type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)	
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL					Watts	mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	GST-ground	CHL+CHG	1063,2	0,016	0,6400	0,4416	29	0,69	
1,1	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(3)	CHG	1046,3	0,0155	0,6300	0,4347	29	0,69	
1,2	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	UST(3)	CHL	16,98	0,0006	1,4100	0,9729	29	0,69	
ENSAYO No.1 - ENSAYO No.1,2													
2	H1	X1X2X3-Y1Y2Y3	H0	2,5	GST-guard(1)	CHL+(CH1+CH)							
3	H0	X1X2X3-Y1Y2Y4	H1	0,5	GST-guard(1)	CHL+(CH0+CH)							
4	H1H0	Y1Y2Y3	X1X2X3	2,5	UST(2)	CHX							
5	H1H0	Y1Y2Y3	X1X2X3	2,5	UST(1)	CHY							
6	H1	---	H0-X1X2X3-Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(1)	CH1'							
7	H0	---	H1-X1X2X3-Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(1)	CH0'							

- OBSERVACIONES:
- 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.
  - 2) H1H0: terminales de arrollamiento primario; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios (total 2)
  - 3) CHL hace referencia a la suma total de las componentes CHX+CHY; CHG hace referencia a la suma total de las componentes CH0+CH1+CH
  - 4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE TENSIÓN  
(con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.B2

hoja 3 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 27°C  
TEMP. ACEITE: 27°C  
TEMP. DEVANADOS: 27°C  
% HUM. RELATIVA: 33%  
TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #022934  
SUBESTACIÓN: Riobamba  
FECHA: 11/07/2007

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: PFIFFNER  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 2004.2716.01/2  
MODELO: EGF72  
IDENTIFICACIÓN: PT-ØC  
NORMA: ANSIMEEE C57.13 - IEC 60044-2

TENSIÓN NOM.: 69000√3 : 115 (115√3) Voltios  
POT. TÉRMICA (Sbh): 1000 VA  
# DEVANADOS SEC.: 2  
ACEITE: Nynas Nytro 3000 (22Kg)  
PESO: 160 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER  
No. SERIE:  
MODELO: DELTA 2000  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input checked="" type="checkbox"/> 2.5 KV <input type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)	
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL					<input checked="" type="checkbox"/> Watta	<input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	GST-ground	CHL+CHG	1059,7	0,0152	0,6100	0,4514	27	0,74	
1,1	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(3)	CHG	1037,6	0,0148	0,6100	0,4514	27	0,74	
1,2	H1H0	X1X2X3	Y1Y2Y3	2,5	UST(3)	CHL	21,98	0,0006	1,1700	0,8658	27	0,74	
ENSAYO No.1 - ENSAYO No.1,2													
2	H1	X1X2X3-Y1Y2Y3	H0	2,5	GST-guard(1)	CHL+(CH1+CH)							
3	H0	X1X2X3-Y1Y2Y4	H1	0,5	GST-guard(1)	CHL+(CH0+CH)							
4	H1H0	Y1Y2Y3	X1X2X3	2,5	UST(2)	CHX							
5	H1H0	Y1Y2Y3	X1X2X3	2,5	UST(1)	CHY							
6	H1	----	H0-X1X2X3-Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(1)	CH1'							
7	H0	----	H1-X1X2X3-Y1Y2Y3	2,5	GST-guard(1)	CH0'							

- OBSERVACIONES:
- Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.
  - H1H0: terminales de arrollamiento primario; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios (total 2)
  - CHL hace referencia a la suma total de las componentes CHX+CHY; CHG hace referencia a la suma total de las componentes CH0+CH1+CH
  - Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(con tres arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.C1

hoja 1 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 36,8°C  
TEMP. ACEITE: 36,8°C  
TEMP. DEVANADO: 36,8°C  
% HUM. RELATIVA: 38%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Santa Elena  
FECHA: 19/10/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 8674 518  
MODELO/TIPO: IMB 72  
IDENTIFICACIÓN: TC-ØA  
NORMA: IEC 60044-2

CORRIENTE NOM.: 600 / 5 Amp.  
CTE. TÉRMICA (Rn): 20kA / 1Seq.  
CTE. DINÁMICA (Dym): 50 kA  
# DEVANADOS SEC.: 3  
ACEITE:  
PESO: 385 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
No. SERIE:  
MODELO: S1-5001  
VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO															
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5		ENSAYO No.6		ENSAYO No.7		ENSAYO No.8	
L (LINE)	P1P2		P1P2		1S11S2S2S12S5S3S13S5		1S11S5		2S12S5		3S13S5		1S11S5		2S12S5	
E (EARTH)	tierra		1S11S52S12S53S13S5		P1P2		tierra		tierra		tierra		P1P2-3S13S5-tierra		P1P2-1S11S5-tierra	
G (GUARD)	1S11S52S12S53S13S5		tierra		TIERRA		P1P2-2S12S53S13S5		P1P2-1S11S53S13S5		P1P2-1S11S52S12S5		2S12S5		3S13S5	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		500		500		500		500		500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	92,50	6,50	56,00	3,98	1,64	0,118										
0,5	106,00	7,45	107,00	7,60	1,96	0,141										
0,75	112,00	7,88	137,00	9,73	2,12	0,153										
1	125,00	8,79	189,00	13,43	2,24	0,161										
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
TEMP. INICIAL (°C):	36,70		36,80		37,00											
TEMP. FINAL (°C):	36,70		36,90		37,10											
TEMP. PROM. (°C):	36,70		36,85		37,05											
FACTOR DE CORREC. (75°C)	14,22		14,07		13,88											

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) P1P2: terminales de arrollamiento primario; 1S11S21S31S41S5, 2S12S22S32S42S5 y 3S13S23S33S43S5: terminales de arrollamientos secundarios (total 3)  
3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN  
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(con tres arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.C1

haja 2 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 37,1°C  
TEMP. ACEITE: 37,1°C  
TEMP. DEVANADO: 37,1°C  
% HUM. RELATIVA: 37%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Santa Elena  
FECHA: 19/10/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 8674 518  
MODELO/TIPO: IMB 72  
IDENTIFICACIÓN: TC-ØB  
NORMA: IEC 60044-2

CORRIENTE NOM.: 600 / 5 Amp.  
CTE. TÉRMICA (th): 20kA / 1Seg.  
CTE. DINÁMICA (Dym): 50 kA  
# DEVANADOS SEC.: 3  
ACEITE:  
PESO: 385 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
No. SERIE:  
MODELO: S1-5001  
VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO															
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5		ENSAYO No.6		ENSAYO No.7		ENSAYO No.8	
L (LINE)	P1P2		P1P2		1S115S2S12S53S13S5		1S115S		2S12S5		3S13S5		1S11S5		2S12S5	
E (EARTH)	tierra		1S115S2S12S53S13S5		P1P2		tierra		tierra		tierra		P1P2-tierra		tierra	
G (GUARD)	1S115S2S12S53S13S5		tierra		TIERRA		P1P2-2S12S53S13S5		P1P2-1S115S3S13S5		P1P2-1S115S2S12S5		2S12S5		3S13S5	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		500		500		500		500		500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	129,00	9,07	52,20	3,71	2,72	0,196										
0,5	131,00	9,21	105,00	7,46	3,24	0,233										
0,75	167,00	11,74	147,00	10,44	3,46	0,251										
1	193,00	13,57	166,00	11,79	3,62	0,261										
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
TEMP. INICIAL (°C):	37,10		37,10		37,10											
TEMP. FINAL (°C):	37,10		37,20		37,20											
TEMP. PROM. (°C):	37,10		37,15		37,15											
FACTOR DE CORREC. (θ°C):	13,83		13,78		13,78											

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) P1P2: terminales de arrollamiento primario; 1S11S21S31S41S5, 2S12S22S32S42S5 y 3S13S23S33S43S5: terminales de arrollamientos secundarios (total 3)  
3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACION

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(con tres arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.C1

hoja 3 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 37,1°C  
TEMP. ACEITE: 37,1°C  
TEMP. DEVANADO: 37,1°C  
% HUM. RELATIVA: 37%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Santa Elena  
FECHA: 19/10/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 8674 518  
MODELO/TIPO: IMB 72  
IDENTIFICACIÓN: TC-ØC  
NORMA: IEC 60044-2

CORRIENTE NOM.: 600 / 5 Amp.  
CTE. TÉRMICA (ØN): 20kA / 1Seq.  
CTE. DINÁMICA (DYN): 50 kA  
# DEVANADOS SEC.: 3  
ACEITE:  
PESO: 385 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
No. SERIE:  
MODELO: S1-5001  
VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO															
	ENSAYO No. 1		ENSAYO No. 2		ENSAYO No. 3		ENSAYO No. 4		ENSAYO No. 5		ENSAYO No. 6		ENSAYO No. 7		ENSAYO No. 8	
L (LINE)	P1P2		P1P2		1S11S21S31S41S5		1S11S5		2S12S5		3S13S5		1S11S5		2S12S5	
E (EARTH)	tierra		1S11S21S31S41S5		tierra		tierra		tierra		tierra		P1P2-tierra		tierra	
G (GUARD)	1S11S21S31S41S5		tierra		P1P2		P1P2-2S12S53S13S5		P1P2-1S11S21S31S5		P1P2-1S11S21S21S5		2S12S5		3S13S5	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		500		500		500		500		500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	90,50	6,36	44,50	3,16	2,38	0,171										
0,5	106,00	7,45	81,00	5,76	2,82	0,203										
0,75	111,00	7,81	95,50	6,79	3,04	0,219										
1	114,00	8,02	100,00	7,11	3,20	0,231										
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
TEMP. INICIAL (°C)	37,20		37,10		37,20											
TEMP. FINAL (°C)	37,30		37,10		37,20											
TEMP. PROM. (°C)	37,25		37,10		37,20											
FACTOR DE CORREC. (75°C)	13,69		13,83		13,74											

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) P1P2: terminales de arrollamiento primario; 1S11S21S31S41S5, 2S12S22S32S42S5 y 3S13S23S33S43S5: terminales de arrollamientos secundarios (total 3)  
3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(con tres arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.C2

hoja 1 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 33°C  
TEMP. ACEITE: 33°C  
TEMP. DEVANADOS: 33°C  
% HUM. RELATIVA: 48%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Santa Elena  
FECHA: 19/10/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 8705671  
MODELO/TIPO: IMB 72  
IDENTIFICACIÓN: TC-092-0A  
NORMA: IEC 60044-2

CORRIENTE NOM.: 600 / 5 Amp.  
CTE. TÉRMICA (th): 20kA / 1Seg.  
CTE. DINÁMICA (Dyn): 50 kA  
# DEVANADOS SEC.: 3  
ACEITE:  
PESO: 385 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV		TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)		
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS			FAC. DE POTENCIA (%)	
		ROJO	AZUL				<input checked="" type="checkbox"/> Watts <input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO	CORREGIDO			
1	P1P2	-----	1S2S3S	10	GST-ground	CP+CPS	1406.8	0,264	0,5200	0,3172	33	0,61
2	P1P2	-----	1S2S3S	2,5	GST-guard(3)	CP						
3	P1P2	-----	1S2S3S	2,5	UST(3)	CPS						
ENSAYO No.1 - ENSAYO No.3												
4	P1P2	1S	2S3S	0,5	UST (1)	CP1S						
5	P1P2	2S	1S3S	0,5	UST (1)	CP2S						
6	P1P2	3S	1S2S	0,5	UST (1)	CP3S						

- OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) P1P2: terminales de arrollamiento primario; 1S1-1S2-1S3-1S4-1S5, 2S1-2S2-2S3-2S4-2S5 y 3S1-3S2-3S3-3S4-3S5: terminales de arrollamientos secundarios (total 3)  
3) CPS hace referencia a la suma total de las componentes CP1S+CP2S+CP3S  
4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACION

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(con tres arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.C2

hoja 2 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 33°C  
TEMP. ACEITE: 33°C  
TEMP. DEVANADOS: 33°C  
% HUM. RELATIVA: 47%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Santa Elena  
FECHA: 19/10/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 8705669  
MODELO/TIPO: IMB 72  
IDENTIFICACIÓN: TC-092-0B  
NORMA: IEC 60044-2

CORRIENTE NOM.: 600 / 5 Amp.  
CTE. TÉRMICA (th): 20kA / 1Seg.  
CTE. DINÁMICA (Dym): 50 kA  
# DEVANADOS SEC.: 3  
ACEITE:  
PESO: 385 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV		TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)		
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS			FAC. DE POTENCIA (%)	
		ROJO	AZUL				<input checked="" type="checkbox"/> Watts <input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO	CORREGIDO			
1	P1P2	-----	1S2S3S	10	GST-ground	CP+CPS	1434.6	0.204	0.3900	0.2379	33	0.61
2	P1P2	-----	1S2S3S	2.5	GST-guard(3)	CP						
3	P1P2	-----	1S2S3S	2.5	UST(3)	CPS						
ENSAYO No.1 - ENSAYO No.3												
4	P1P2	1S	2S3S	0.5	UST (1)	CP1S						
5	P1P2	2S	1S3S	0.5	UST (1)	CP2S						
6	P1P2	3S	1S2S	0.5	UST (1)	CP3S						

- OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) P1P2: terminales de arrollamiento primario; 1S1-1S2-1S3-1S4-1S5, 2S1-2S2-2S3-2S4-2S5 y 3S1-3S2-3S3-3S4-3S5: terminales de arrollamientos secundarios (total 3)  
3) CPS hace referencia a la suma total de las componentes CP1S+CP2S+CP3S  
4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACION

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE  
(con tres arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.C2

hoja 3 de 3

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 33°C  
TEMP. ACEITE: 33°C  
TEMP. DEVANADOS: 33°C  
% HUM. RELATIVA: 47%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Santa Elena  
FECHA: 19/10/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: ABB  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 8705667  
MODELO/TIPO: IMB 72  
IDENTIFICACIÓN: TC-092-ØC  
NORMA: IEC 60044-2

CORRIENTE NOM.: 600 / 5 Amp.  
CTE. TÉRMICA (Ith): 20kA / 1Seg.  
CTE. DINÁMICA (Dyn): 50 kA  
# DEVANADOS SEC.: 3  
ACEITE:  
PESO: 385 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground	Tierra Rojo y Azul					

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)	
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL					<input checked="" type="checkbox"/> Watts	<input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	P1P2	-----	1S2S3S	10	GST-ground	CP+CPS	1435.3		0,198	0,3770	0,2300	33	0,61
2	P1P2	-----	1S2S3S	2,5	GST-guard(3)	CP							
3	P1P2	-----	1S2S3S	2,5	UST(3)	CPS							
ENSAYO No.1 - ENSAYO No.3													
4	P1P2	1S	2S3S	0,5	UST (1)	CP1S							
5	P1P2	2S	1S3S	0,5	UST (1)	CP2S							
6	P1P2	3S	1S2S	0,5	UST (1)	CP3S							

- OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) P1P2: terminales de arrollamiento primario; 1S1-1S2-1S3-1S4-1S5, 2S1-2S2-2S3-2S4-2S5 y 3S1-3S2-3S3-3S4-3S5: terminales de arrollamientos secundarios (total 3)  
3) CPS hace referencia a la suma total de las componentes CP1S+CP2S+CP3S  
4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 27,7°C  
 TEMP. ACEITE: 27,7°C  
 TEMP. DEVANADO: 27,7°C  
 % HUM. RELATIVA: 68%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #023952  
 SUBESTACIÓN: Posorja  
 FECHA: 23/01/2008

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: HAEFLY TRENCH  
 AÑO DE FAB.: 1998  
 No. SERIE: 987655603  
 MODELO/TIPO: TEIMF 138  
 IDENTIFICACIÓN: DCP-ØB  
 NORMA: ANSIMEEE C57.13 - IEC 60044-2

TENSIÓN NOM.: 138000/√3 : 115 (115/√3) Voltios  
 BURDEN MÁXIMO: 2000 VA  
 # DEVANADOS SEC.: 2  
 ACEITE:  
 PESO: 465 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO											
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5		ENSAYO No.6	
L (LINE)	P2		P2		X1X2X3		Y1Y2Y3		H1		CAR	
E (EARTH)	tierra		X-Y		tierra		tierra		tierra		tierra	
G (GUARD)	H1-X-Y-CAR		CAR-H1-tierra		Y1Y2Y3-P2		X1X2X3-P2		CAR		H1	
TENSIÓN (Vdc)	2500		2500		2500		2500		5000		2500	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25	0,525	0,019	13,40	0,505	1,58	0,061						
0,5	0,545	0,020	13,56	0,511	1,74	0,068						
0,75	0,570	0,021	13,71	0,517	1,79	0,070						
1	0,593	0,022	13,85	0,522	1,86	0,072						
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
TEMP. INICIAL (°C):	27,20		27,60		28,10							
TEMP. FINAL (°C)	27,20		27,80		28,20							
TEMP. PROM. (°C):	27,20		27,70		28,15							
FACTOR DE CORREC. (75°C)	27,47		26,54		25,72							

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
 2) H1: terminal primario; P2: terminal de puesta a tierra del arrollamiento primario del transformador intermediario, CAR: terminal de portadora, X1,X2,X3 y Y1,Y2,Y3: terminales de arrollamientos secundarios de transformador intermediario (total 2)  
 3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

EJECUTADO POR:



**C.I.B.**



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
TRANSFORMADOR DE TENSIÓN CAPACITIVO  
(con dos arrollamientos secundarios)

FORMULARIO

5.D2

hoja 1 de 1

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 28°C  
TEMP. ACEITE: 28°C  
TEMP. DEVANADOS: 28°C  
% HUM. RELATIVA: 66%  
TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #023952  
SUBESTACIÓN: Posorja  
FECHA: 23/01/2008

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: HAEFELY TRENCH  
AÑO DE FAB.: 1998  
No. SERIE: 987655603  
MODELO: TEIMF 138  
IDENTIFICACIÓN: DCP-ØB  
NORMA: ANS/IEEE C57.13 - IEC 60044-2

TENSIÓN NOM.: 138000/√3 : 115 (115/√3) Voltios  
BURDEN MÁXIMO: 2000 VA  
# DEVANADOS SEC.: 2  
ACEITE:  
PESO: 465 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER  
No. SERIE:  
MODELO: DELTA 2000  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input checked="" type="checkbox"/> 2.5 KV <input type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)		
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)					CAPACITANCIA (pF)		PÉRDIDAS				FAC. DE POTENCIA (%)	
		ROJO	AZUL				DE PLACA	MEDIDA	Watts	mWatt			MEDIDO	CORREGIDO
1	H1	----	CAR	10	GST-guard(3)	C1	19122	19239	0,957	0,1300	0,0962	28	0,74	
2	CAR	----	H1	4	GST-guard(3)	C2	117576	118010	3,02	0,0700	0,0518	28	0,74	

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) H1: terminal primario; CAR: terminal de portadora; X1X2X3 y Y1Y2Y3: terminales de arrollamientos secundarios de transformador intermedio (total 2); C1 y C2: módulos de capacitancia del equipo  
4) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para los ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO  
DE UN SECCIONADOR DE POTENCIA  
(de un solo punto de corte)

FORMULARIO

5.E1

hoja 1 de 1

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 31.8°C  
TEMP. AISLADOR: 31.8°C  
% HUM. RELATIVA: 48%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #016060  
SUBESTACIÓN: Milagro  
FECHA: 01/11/2006

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: LAGO ELECTROMECÁNICA  
AÑO DE FAB.: 2005  
No. SERIE: 2448  
MODELO/TIPO: SLA-2C  
IDENTIFICACIÓN: 89-241  
NORMA: IEC 62271-102

CORRIENTE NOM.: 1200 Amp.  
VOLTAJE NOM.: 230 KV  
CTE. CRESTA: 100 kAmp.  
CTE. BREVE DURACIÓN: 1 kA / 40 Seg.  
BIL: 950 KV  
PESO: 4

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
No. SERIE:  
MODELO: S1-5001  
VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO								
	ENSAYO No.1	ENSAYO No.2	ENSAYO No.3	ENSAYO No.4	ENSAYO No.5	ENSAYO No.6	ENSAYO No.7	ENSAYO No.8	ENSAYO No.9
L (LINE)	A1A2	B1B2	C1C2	A1	A2	B1	B2	C1	C2
E (EARTH)	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra
G (GUARD)	---	---	---	---	---	---	---	---	---
TENSION (Vdc)	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
TIEMPO (min)	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS	GIGAOHMS
	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO	MEDIDO
0,25	96,00	124,00	157,00						
0,5	106,00	149,00	180,00						
0,75	109,00	155,00	187,00						
1	109,00	160,00	198,00						
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
TEMP. INICIAL (°C):	31,80	31,85	31,89						
TEMP. FINAL (°C)	31,80	31,86	31,90						
TEMP. PROM. (°C):	31,80	31,86	31,90						

OBSERVACIONES: 1) Este ensayo corresponde a la recepción del equipo en campo, previo a su primera puesta en servicio.  
2) A1A2: Terminales de polo "A" del seccionador, B1B2: Terminales de polo "B" del seccionador y C1C2: Terminales de polo "C" del seccionador.  
3) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 1 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 30°C  
 TEMP. ACEITE: 30°C  
 TEMP. TANQUE: 30°C  
 % HUM. RELATIVA: 54%  
 TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: 81433  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "A")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		----	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPTOR	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							7,910	0,350
0,5							8,500	0,376
0,75							8,930	0,395
1							9,600	0,424
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							30,00	
TEMP. FINAL (°C):							30,00	
TEMP. PROM. (°C):							30,00	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							22,63	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en servicio el equipo.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 2 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 31,5°C  
 TEMP. ACEITE: 31,5°C  
 TEMP. TANQUE: 31,5°C  
 % HUM. RELATIVA: 54%  
 TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
 SUBESTACIÓN: Miagro  
 FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: 81433  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "B")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPT.	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							10,100	0,495
0,5							10,900	0,534
0,75							11,300	0,554
1							11,700	0,574
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							31,50	
TEMP. FINAL (°C):							31,50	
TEMP. PROM. (°C):							31,50	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							20,39	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en servicio el equipo.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 3 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 31,8°C  
 TEMP. ACEITE: 31,8°C  
 TEMP. TANQUE: 31,8°C  
 % HUM. RELATIVA: 53%  
 TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: 81433  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO °C°)  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPT.	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							9,640	0,483
0,5							10,600	0,531
0,75							11,100	0,556
1							11,300	0,566
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							31,80	
TEMP. FINAL (°C):							31,80	
TEMP. PROM. (°C):							31,80	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							19,97	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en servicio el equipo.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 4 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 29,1°C  
 TEMP. ACEITE: 29,1°C  
 TEMP. TANQUE: 29,1°C  
 % HUM. RELATIVA: 56%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: A00429  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-002 (POLO "A")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPT.	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							20,000	0,830
0,5							23,200	0,963
0,75							23,800	0,988
1							24,200	1,005
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							29,00	
TEMP. FINAL (°C):							29,20	
TEMP. PROM. (°C):							29,10	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							24,08	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 5 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 29,4°C  
 TEMP. ACEITE: 29,4°C  
 TEMP. TANQUE: 29,4°C  
 % HUM. RELATIVA: 55%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: A00429  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-002 (POLO "B")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPTOR	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							20,300	0,861
0,5							23,000	0,975
0,75							23,500	0,996
1							23,900	1,013
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							29,40	
TEMP. FINAL (°C):							29,40	
TEMP. PROM. (°C):							29,40	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							23,59	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 6 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 29,6°C  
 TEMP. ACEITE: 29,6°C  
 TEMP. TANQUE: 29,6°C  
 % HUM. RELATIVA: 55%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: A00429  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-002 (POLO °C°)  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPT.	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							19,500	0,841
0,5							23,700	1,022
0,75							24,200	1,044
1							24,500	1,057
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							29,50	
TEMP. FINAL (°C):							29,80	
TEMP. PROM. (°C):							29,65	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							23,18	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 7 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 29,9°C  
 TEMP. ACEITE: 29,9°C  
 TEMP. TANQUE: 29,9°C  
 % HUM. RELATIVA: 56%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 14/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: 81433  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "A")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPT.	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							22,900	1,005
0,5							25,600	1,124
0,75							26,000	1,141
1							26,400	1,159
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							29,80	
TEMP. FINAL (°C):							30,00	
TEMP. PROM. (°C):							29,90	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							22,78	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a trabajos de mantenimiento.  
 2) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 8 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 30,2°C  
 TEMP. ACEITE: 30,2°C  
 TEMP. TANQUE: 30,2°C  
 % HUM. RELATIVA: 50%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 14/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: 81433  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "B")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.3		ENSAYO No.4	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPTOR	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							32,400	1,457
0,5							36,600	1,646
0,75							36,700	1,650
1							37,000	1,664
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							30,00	
TEMP. FINAL (°C):							30,50	
TEMP. PROM. (°C):							30,25	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							22,24	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a trabajos de mantenimiento.  
 2) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F1

hoja 9 de 9

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 30,7°C  
 TEMP. ACEITE: 30,7°C  
 TEMP. TANQUE: 30,7°C  
 % HUM. RELATIVA: 50%  
 TIEMPO: Nublado

CÓDIGO O.T.: #015971  
 SUBESTACIÓN: Milagro  
 FECHA: 14/09/2004

INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
 AÑO DE FAB.: 1980  
 No. SERIE: 81433  
 MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
 IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "C")  
 NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
 CORRIENTE NOM.: 800 A.  
 CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
 FACTOR 1ER POLO: 1,21  
 ACEITE: 1000 lt  
 PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: MEGGER (AVO)  
 No. SERIE:  
 MODELO: S1-5001  
 VOLTAJE: 120 Vac / 0-5000 Vdc

REGISTROS DE CAMPO

MEGGER	CONEXIONES DE ENSAYO							
	ENSAYO No.1		ENSAYO No.2		ENSAYO No.4		ENSAYO No.5	
L (LINE)	Bushing 1		Bushing 2		Bushing 1		Bushing 1 / Bushing 2	
E (EARTH)	tierra		tierra		Bushing 2		tierra	
G (GUARD)	Bushing 2		Bushing 1		tierra		---	
TENSIÓN (Vdc)	5000		5000		5000		5000	
POS. INTERRUPTOR	ABIERTO		ABIERTO		ABIERTO		CERRADO	
TIEMPO (min)	GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS		GIGAOHMS	
	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.	MEDIDO	CORREG.
0,25							31,600	1,471
0,5							35,600	1,657
0,75							36,500	1,699
1							37,200	1,732
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
TEMP. INICIAL (°C):							30,70	
TEMP. FINAL (°C):							30,80	
TEMP. PROM. (°C):							30,75	
FACTOR DE CORREC. (75°C)							21,48	

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a trabajos de mantenimiento.  
 2) Los presentes registros deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 32°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. TANQUE: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 54%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Milagro  
FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL INTERRUPTOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 81433  
MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "A")  
NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
CORRIENTE NOM.: 800 A.  
CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
FACTOR 1ER POLO: 1,21  
ACEITE: 1000 lt  
PESO TOTAL: 3800 Kg

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	POSICIÓN DEL INTERRUPTOR	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (# 20°C)	
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)						I (ma)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL						<input checked="" type="checkbox"/> Watts	<input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	Bushing 1	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP+CPS	1205,12	0,091	1,496	0,8677	32	0,58	
2	Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP	1206,23	0,091	1,496	0,8677	32	0,58	
3	Bushing 1 / Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	CERRADO	CPS	2410,31	0,132	1,324	0,7679	32	0,58	

CALCULO DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE (TANK-LOSS INDEX "TLI")

TLI= (Pérdidas obtenidas con el Interruptor CERRADO) - (Suma de las pérdidas obtenidas con el Interruptor ABIERTO)

TLI=  Watts

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

2) Los presentes registros deben ser comparados con ensayos anteriores y deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 32°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. TANQUE: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 54%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Milagro  
FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL INTERRUPTOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 81433  
MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO \*A\*)  
NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
CORRIENTE NOM.: 800 A.  
CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
FACTOR 1ER POLO: 1,21  
ACEITE: 1000 lt  
PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground		Tierra Rojo y Azul				

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	POSICIÓN DEL INTERRUPTOR	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)	
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)						I (ma)	PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL						<input checked="" type="checkbox"/> Watts	<input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO			CORREGIDO
1	Bushing 1	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP+CPS	1205,12	0,0910	1,4960	0,8677	32	0,58	
2	Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP	1255,46	0,2578	4,4581	2,5857	32	0,58	
3	Bushing 1 / Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	CERRADO	CPS	2410,31	0,1632	1,4960	0,8677	32	0,58	

CÁLCULO DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE (TANK-LOSS INDEX "TLI")

TLI= (Pérdidas obtenidas con el interruptor CERRADO) - (Suma de las pérdidas obtenidas con el interruptor ABIERTO)

TLI=  Watts

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

2) Los presentes registros deben ser comparados con ensayos anteriores y deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
INTERRUPTOR TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F2

hoja 3 de 5

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 32°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. TANQUE: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 54%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Milagro  
FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL INTERRUPTOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 81433  
MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "A")  
NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
CORRIENTE NOM.: 800 A.  
CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
FACTOR 1ER POLO: 1,21  
ACEITE: 1000 l  
PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground	Tierra Rojo y Azul					

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO				VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	POSICIÓN DEL INTERRUPTOR	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)		I (ma)					PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL						Watts	mWatt	MEDIDO	CORREGIDO		
1	Bushing 1	---	---	10	GST-ground	ABIERTO	CP+CPS	1255,46	0,1621	2,6042	1,5104	32	0,58	
2	Bushing 2	---	---	10	GST-ground	ABIERTO	CP	1255,46	0,1621	2,6042	1,5104	32	0,58	
3	Bushing 1 / Bushing 2	---	---	10	GST-ground	CERRADO	CPS	2410,31	0,1320	1,3240	0,7679	32	0,58	

CÁLCULO DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE (TANK-LOSS INDEX "TLI")

TLI= (Pérdidas obtenidas con el interruptor CERRADO) - (Suma de las pérdidas obtenidas con el interruptor ABIERTO)

TLI= -0,1922 Watts

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

2) Los presentes registros deben ser comparados con ensayos anteriores y deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
INTERRUPTOR TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F2

hoja 4 de 5

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 32°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. TANQUE: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 54%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Milagro  
FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL INTERRUPTOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 81433  
MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "A")  
NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
CORRIENTE NOM.: 800 A.  
CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
FACTOR 1ER POLO: 1.21  
ACEITE: 1000 lt  
PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground	Tierra Rojo y Azul					

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO				VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	POSICIÓN DEL INTERRUPTOR	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)		I (ma)					PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL						<input checked="" type="checkbox"/> Watts	<input type="checkbox"/> mWatt	MEDIDO	CORREGIDO		
1	Bushing 1	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP+CPS	1206,12	0,0910	1,4960	0,8677	32	0,58	
2	Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP	1206,23	0,0910	1,4960	0,8677	32	0,58	
3	Bushing 1 / Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	CERRADO	CPS	2510,31	0,3024	2,3456	1,3604	32	0,58	

CÁLCULO DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE (TANK-LOSS INDEX "TLI")

TLI= (Pérdidas obtenidas con el interruptor CERRADO) - (Suma de las pérdidas obtenidas con el interruptor ABIERTO)

TLI= 0,1204 Watts

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

2) Los presentes registros deben ser comparados con ensayos anteriores y deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA DE UN  
INTERRUPTOR TIPO G.V.O

FORMULARIO

5.F2

hoja 5 de 5

INFORMACIÓN GENERAL

TEMP. AMBIENTE: 32°C  
TEMP. ACEITE: 32°C  
TEMP. TANQUE: 32°C  
% HUM. RELATIVA: 54%  
TIEMPO: Soleado

CÓDIGO O.T.: #015971  
SUBESTACIÓN: Milagro  
FECHA: 13/09/2004

INFORMACIÓN DEL INTERRUPTOR

FABRICANTE: MITSUBISHI  
AÑO DE FAB.: 2004  
No. SERIE: 81433  
MODELO/TIPO: 70-GTE-20A  
IDENTIFICACIÓN: 52-032 (POLO "C")  
NORMA:

VOLTAJE NOM.: 72.5 KV  
CORRIENTE NOM.: 800 A.  
CTE. CORTOCIRCUITO: 19 KA  
FACTOR 1ER POLO: 1,21  
ACEITE: 1000 lt.  
PESO TOTAL: 3800 Kg.

INFORMACIÓN DEL INSTRUMENTO DE ENSAYO



MARCA: DOBLE  
No. SERIE: 070401898  
MODELO: M4100  
VOLTAJE: 115 / 0-10000 Vac

MODOS DE ENSAYO

UST	1	Mide Rojo - Tierra Azul	2	Mide Azul - Tierra Rojo	3	Mide Rojo y Azul
GST-guard	1	Guard Azul - Tierra Rojo	2	Guard Rojo - Tierra Azul	3	Guard Rojo y Azul
GST-ground	Tierra Rojo y Azul					

REGISTROS DE CAMPO

ENSAYO No.	CONEXIONES DE ENSAYO			VOLTAJE DE ENSAYO (KV)	MODOS DE ENSAYO	POSICIÓN DEL INTERRUPTOR	AISLAMIENTO MEDIDO	LECTURAS EQUIVALENTES A: <input type="checkbox"/> 2.5 KV <input checked="" type="checkbox"/> 10 KV				TEMPERATURA DE ENSAYO (°C)	FACTOR DE CORRECCIÓN (a 20°C)
	CABLE DE ALTO VOLTAGE (HV)	CABLES DE BAJO VOLTAJE (LV)						PÉRDIDAS		FAC. DE POTENCIA (%)			
		ROJO	AZUL					Watts	mWatt	MEDIDO	CORREGIDO		
1	Bushing 1	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP+CPS	1255,46	0,2240	3,6512	2,1177	32	0,58
2	Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	ABIERTO	CP	1255,46	0,2240	3,6512	2,1177	32	0,58
3	Bushing 1 / Bushing 2	-----	-----	10	GST-ground	CERRADO	CPS	2510,31	0,5012	3,9240	2,2759	32	0,58

CÁLCULO DE ÍNDICE DE PÉRDIDAS EN EL TANQUE (TANK-LOSS INDEX "TLI")

TLI= (Pérdidas obtenidas con el interruptor CERRADO) - (Suma de las pérdidas obtenidas con el interruptor ABIERTO)

TLI= 0,0532 Watts

OBSERVACIONES: 1) Ensayo de investigación, posterior a 20 años de estar en operación el equipo.

2) Los presentes registros deben ser comparados con ensayos anteriores y deben ser considerados como referenciales para ensayos posteriores.

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

**PROCESO DE SECADO INTERNO DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA**

FORMULARIO

**6.A1**

hoja 1 de 1

**INFORMACIÓN GENERAL**

FECHA DE INICIO: 21/10/2007 CÓDIGO O.T.: #022951  
 FECHA DE TERMINO: 22/10/2007 SUBESTACIÓN: Machala  
 TOTAL HORAS: 24  
 PTO. ROCÍO INICIAL (°C): ---  
 PTO. ROCÍO FINAL (°C): ---

**INFORMACIÓN DEL TRANSFORMADOR**

FABRICANTE: ABB TENSIÓN NOMINAL: 138/√3-69/√3-13,8 kV  
 AÑO DE FABRICACIÓN: 2006 POTENCIA NOMINAL: 33 / 33 / 10 MVA  
 No. SERIE: 200513 VOLUMEN ACEITE: 17413 lt.  
 CLASE: ONAN / ONAF I / ONAF II TIPO: SELLADO   
 IDENTIFICACIÓN: ATQ-ØR CON GAS   
 CONEXIÓN: YNyn0d1 CON CONSERVADOR

**INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE VACÍO**

BOMBA TIPO: Rotatoria BOOSTER: SI  NO   
 FABRICANTE: BOC EDWARDS FABRICANTE: BOC EDWARDS  
 No. SERIE: WDA132SJ-D No. SERIE: ---  
 POTENCIA NOMINAL: 6.5KW POTENCIA NOMINAL: 2.2KW  
 TENSIÓN NOMINAL: 208 Vac 3Φ TENSIÓN NOMINAL: 208 Vac 3Φ  
 DESPLAZAMIENTO: 214m³/h PRES. DIFERENCIAL: 0 a 9x10³Pa  
 PRESIÓN ÚLTIMO VACÍO: 0.05mbar (5Pa)

**REGISTROS DE CAMPO**

FECHA	HORA	PRESION DE VACÍO (Torr)	HR%	Temp. Ambiente (°C)	OBSERVACIONES
21/10/2007	11h00	1,3	69%	22,5	Inicio del proceso de secado
21/10/2007	12h00	0,73	69%	22,4	Inicio de las 24 horas del vacio
21/10/2007	13h00	0,72	68%	22,5	
21/10/2007	14h00	0,71	70%	22,3	
21/10/2007	15h00	0,61	72%	21,9	
21/10/2007	16h00	0,55	75%	21,9	
21/10/2007	17h00	0,5	81%	21	
21/10/2007	18h00	0,46	85%	20,6	
21/10/2007	19h00	0,46	86%	20,3	
21/10/2007	20h00	0,44	87%	20,2	
21/10/2007	21h00	0,42	89%	20,1	
21/10/2007	22h00	0,41	87%	20,2	
21/10/2007	23h00	0,39	87%	20,2	
22/10/2007	00h00	0,36	88%	20,5	
22/10/2007	01h00	0,35	88%	20,6	
22/10/2007	02h00	0,33	89%	20,2	
22/10/2007	03h00	0,32	89%	19,4	
22/10/2007	04h00	0,3	90%	19,6	

EJECUTADO POR:

Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR:





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE INGENIERIA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

PROCESO DE SECADO INTERNO DE UN  
EQUIPO ENCAPSULADO

FORMULARIO

6.B1

hoja 1 de 1

INFORMACIÓN GENERAL

FECHA: 30/07/2008  
PTO. ROCÍO INICIAL (°C): —  
PTO. ROCÍO FINAL (°C): <40°C

CÓDIGO O.T.: #024503  
SUBESTACIÓN: Saltral

INFORMACIÓN DEL EQUIPO ENCAPSULADO

FABRICANTE: SIEMENS  
AÑO DE FABRICACIÓN: 2007  
BAHÍA O CELDA: ELECTROGUAYAS 2  
TENSIÓN NOMINAL: 69000 VoltiosAC  
CORRIENTE NOMINAL: 3000 Amp.

COMPARTIMENTO: SECCIONADOR 89-027  
DIMENSIONES: Pequeño  
PRESIÓN NOMINAL: 0.61 Bar

INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE VACÍO

BOMBA TIPO: Rotatoria  
FABRICANTE: DILO  
No. SERIE: R50040E  
POTENCIA NOMINAL: 1.5KW  
TENSIÓN NOMINAL: 208 Vac 3Φ  
DESPLAZAMIENTO: 40m³/h  
PRESIÓN ÚLTIMO VACÍO: < 1mbar

BOOSTER: SI  NO   
FABRICANTE: \_\_\_\_\_  
No. SERIE: \_\_\_\_\_  
POTENCIA NOM: \_\_\_\_\_  
TENSIÓN NOM: \_\_\_\_\_  
PRES. DIFERENCIAL: \_\_\_\_\_

REGISTROS DE CAMPO

FECHA	HORA	PRESIÓN DE VACÍO (Torr)	HR%	Temp. Ambiente (°C)	OBSERVACIONES
30/07/2008	09h45	—	68%	23	Inicio del proceso de secado
30/07/2008	09h50	10	68%	23,1	
30/07/2008	10h00	0,5	67%	23,2	
30/07/2008	10h10	0,2	67%	23,2	
30/07/2008	10h20	0,1	67%	23,1	
30/07/2008	10h25	0,1	68%	23,1	fin del proceso de secado

OBSERVACIONES: Se verificó por un periodo de 10 minutos, la estabilidad de la última presión de vacío alcanzada. Esto, con el fin de verificar su estanqueidad y descartar la existencia de posibles puntos de fuga.  
Se realizó únicamente la medición de punto de rocío posterior a la aplicación de este proceso.

EJECUTADO POR:  
Carlos Villegas

REVISADO POR:

APROBADO POR: