

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**DISEÑO DE FILTROS PARA  
COMPENSACION DE ARMONICOS EN  
SISTEMAS DE POTENCIA**

TESIS DE GRADO

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

INGENIERO EN ELECTRICIDAD  
**Especialización Potencia**

Presentada por: **JOSE S. CORTEZ M.**

**Guayaquil - Ecuador**

**1.988**

## AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi profundo agradecimiento a quienes en la ESPOL impartieron en mi sus conocimientos para formarme profesionalmente . En especial a cada una de las personas que hicieron posible este trabajo , de quienes recibí su ejemplo , su comprensión y muchas veces su paciencia , y en particular a los INGS. ALBERTO GIL TAMA , y LEO SALOMON FASH .

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES Y

A MIS HERMANOS

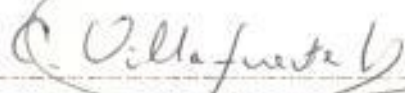
DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos , ideas y doctrinas expuestos en esta tesis , me corresponden exclusivamente ; y , el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL " .

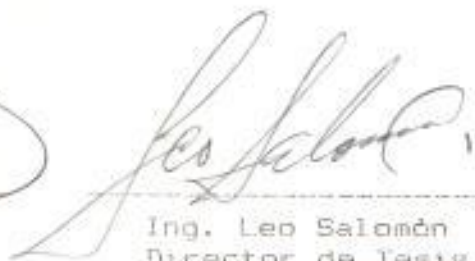
(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL) .

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Cortez Mariffo', is written over a horizontal dashed line.

José Cortez Mariffo.



Ing. Carlos Villafuerte  
Presidente del Tribunal



Ing. Leo Salomón  
Director de Tesis



Ing. Jorge Flores  
Miembro del Tribunal



Ing. Alberto Hanze  
Miembro del Tribunal

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo el diseño detallado , tanto en el fundamento teórico como en las características de costo y construcción de los componentes de los filtros de armónicas .

En su primera parte se hace un análisis de los efectos que producen los armónicos en los diferentes componentes de un sistema de Potencia .

En el Capítulo # 2 se realiza un análisis de las condiciones que debe cumplir el filtro propuesto , tanto en lo que respecta a las frecuencias de trabajo del filtrado , su velocidad de respuesta en realizar el filtraje , la cantidad de filtros que sean necesarios , y un análisis en lo que respecta al factor de Calidad (Q) .

En el capítulo # 3 , se realiza el análisis de la selección de los diferentes elementos que constituyen el filtro desde el punto de vista de como estan contruidos .

En el capítulo # 4 analizamos ciertas definiciones de cálculo que permitan el diseño de los elementos que

constituyen el filtro . Paralelamente a esto consta un análisis de la potencia y el rendimiento . Finalmente hacemos un análisis de sobrevoltajes producto de la resonancia .

En el capítulo # 5 se realiza un estudio económico de los diferentes componentes del filtro .

# INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL .....	VIII
INDICE DE FIGURAS .....	XII
INDICE DE TABLAS .....	XV
INTRODUCCION .....	XVI
CAPITULO I	
EFECTO DE LOS ARMONICOS EN VARIOS COMPONENTES	
DE UN SISTEMA DE POTENCIA .....	18
1.1 INTRODUCCION .....	18
1.2 TRANSFORMADORES Y REACTORES .....	19
1.3 CAPACITORES .....	22
1.4 CABLES .....	27
1.5 APARATOS ELECTRONICOS .....	28
1.6 RELES .....	30
1.7 MAQUINARIA ROTATIVA .....	32
CAPITULO II	
CONDICIONES QUE DEBE CUMPLIR EL FILTRO	
PROPUESTO .....	35
2.1 GENERALIDADES .....	35
2.2 DEFINICIONES .....	36
2.2.1 FACTOR DE CALIDAD .....	36
2.2.2 FACTOR DE DESINTONIZACION .....	38
2.3 ANALISIS DE IMPEDANCIA .....	40



2.3.1	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS .....	40
2.3.2	IMPEDANCIA ARMONICA DEL SISTEMA .....	44
2.3.3	IMPEDANCIA ARMONICA DEL FILTRO .....	46
2.3.4	COMBINACION DE LAS ADMITANCIAS DEL FILTRO Y DEL SISTEMA .....	48
2.3.5	FILTROS SINTONIZADOS .....	52
2.3.6	GRAFICOS APROXIMADOS .....	60
2.4	TIPOS DE FILTROS .....	65
2.4.1	FILTROS SINTONIZADOS .....	66
2.4.2	FILTROS PASA ALTO AMORTIGUADOS ....	67
2.4.3	CONFIGURACIONES TIPICAS DE FILTROS .....	68
2.4.4	TIPOS DE CONEXION .....	71
2.5	FRECUENCIA DE SINTONIA .....	72
2.5.1	RESPUESTA TIPICA DE UN SISTEMA DE FILTROS .....	75

### CAPITULO III

	SELECCION DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL FILTRO .....	77
3.1	INTRODUCCION .....	77
3.2	REACTORES PARA FILTROS DE ARMONICAS .....	78
3.2.1	CLASIFICACION .....	78
3.2.2	COMPONENTES ELECTRICOS .....	79
3.3	CAPACITORES .....	82

3.4	EQUIPO DE CONTROL .....	86
3.4.1	PRINCIPIO DE CONTROL DE UN CIRCUITO DE FILTROS EN UN HORNO DE ARCO .....	89
3.4.2	PROTECCION DEL CIRCUITO DE FILTRADO .....	92
3.4.2.1	PROTECCION DEL INDUCTOR .....	93
3.4.2.2	PROTECCION DEL CAPACITOR .....	96
3.4.2.3	PROTECCION DE LAS RESISTENCIAS .....	97

#### CAPITULO VI

	CALCULO DE LOS COMPONENTES DEL FILTRO .....	99
4.1	CALCULO DEL REACTOR .....	99
4.1.1	DEFINICIONES Y FORMULAS BASICAS ...	99
4.2	CALCULO DEL CAPACITOR .....	101
4.3	CALCULO DE LA RESISTENCIA .....	105
4.4	CALCULO DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO ...	105
4.4.1	POTENCIA DE LOS FILTROS .....	105
4.4.2	RENDIMIENTO DE LOS FILTROS .....	107
4.5	ANALISIS DE SOBREVOLTAJES DEBIDO A RESONANCIAS .....	107
4.5.1	SOBREVOLTAJES DEBIDO A RESONANCIAS SERIE .....	108
4.5.2	SOBREVOLTAJES DEBIDO A RESONANCIAS PARALELO .....	110

CAPITULO V

ANALISIS DE COSTOS .....	113
5.1 ESTUDIO ECONOMICO DEL FILTRO .....	113
5.1.1 SIMPLE FILTRO SINTONIZADO .....	115
5.2 COSTO DEL REACTOR .....	117
5.3 COSTO DEL CAPACITOR .....	119
5.3.1 APLICACION PRACTICA .....	121
5.4 OTROS COSTOS .....	126
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	129
ANEXOS .....	132
BIBLIOGRAFIA .....	197

## INTRODUCCION

Hoy en día en el siglo XX , como en todos los tiempos , se afirma que todos los conocimientos profundamente científicos se traducen en transformaciones también profundas , por lo que retrospectivamente se diría entonces que la mayoría de transformaciones profundas en la sociedad es producto de un somero y conciensudo conocimiento científico . Todo esto genera una expectativa de todo el mundo hacia lo que constituye la capacidad de invención del hombre , invención que puede ser beneficiosa o no para el normal desarrollo del conglomerado humano .

El pensamiento del hombre ha desarrollado sus propias teorías para describir los innumerables fenómenos que suceden en la naturaleza , y con ayuda de herramientas , muchas veces abstractas , trata de describir y visualizar el comportamiento de lo que nos rodea y de lo que el hombre ha podido descubrir , tratando siempre de acercarse a una realidad muy compleja y que son menos asequibles para la mayoría de las personas .

El presente trabajo pretende entregarle al Ingeniero una herramienta que le sirva para el diseño de Sistemas de Filtros de doble proposito , El disminuir a niveles aceptables los armónicos y el de compensar parte o

totalmente la Potencia Reactiva que generan ciertos aparatos como Convertidores , Cicloconvertidores , Hornos de arco , etc ., que hoy en día tienen un uso creciente .

## CAPITULO # 1

### EFFECTO DE LOS ARMONICOS EN VARIOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE POTENCIA

#### 1.1 INTRODUCCION

La presencia de armónicos en el sistema de potencia puede causar daño o mal desempeño de equipos tanto de las Empresas Eléctricas que suministran la Energía Eléctrica como de sus consumidores , como por ejemplo :

- Sobrecalentamiento , daño y eventual explosión de Capacitores .
- Mal funcionamiento y quema de transformadores de medición .
- Mal funcionamiento del equipo de protección .
- Mal funcionamiento de equipos de Telecomando y de Telecomunicaciones .
- Calentamiento , pérdidas excesivas y eventual daño en motores , generadores y transformadores
- Interferencia en sistemas de comunicación .
- Interferencia en equipos sensibles como computadoras , controladores programables , sensores electrónicos , etc .



Estos efectos pueden ocurrir local , remotamente o donde estese localizado la fuente de armónicos dependiendo de la configuración y parámetros del circuito .

Generalmente estos efectos son esencialmente el resultado de la distorsión de la onda de voltaje que es función de la potencia de la fuente de armónicos , la capacidad de cortocircuito en el punto de conexión y de la inyección de corrientes armónicas al sistema .

En el resto de este capítulo se realiza un análisis de algunos de los efectos que causan los armónicos en los diferentes componentes de un Sistema de Potencia .

La interferencia Telefónica tiene aspectos bien documentados por lo que un análisis parcial está cubierto en el anexo A .

## 1.2 TRANSFORMADORES Y REACTORES

El siguiente análisis es específicamente dirigido a transformadores , pero la misma evaluación puede ser aplicada por igual a reactores .

El efecto de armónicos en transformadores es doble:

Las corrientes armónicas causan un incremento en las pérdidas en el cobre de los devanados y pérdidas en el flujo de dispersión, fatiga en el aislamiento y posibles resonancias (a la frecuencia del armónico) entre los devanados del transformador y las capacitancias de las líneas. El efecto total de las pérdidas es un incremento en el calentamiento del transformador.

Las pérdidas totales por corrientes de Eddy en los conductores, que son proporcionales al cuadrado de las frecuencias armónicas pueden ser obtenidas con la siguiente fórmula:

$$W_e = W \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{n \cdot I_n}{I} \right)^2 \quad (1.1)$$

Donde:

$W_e$  = Pérdidas totales por corrientes de Eddy.

$W$  = Pérdidas por corrientes de eddy a corriente fundamental.

$I_n$  = Corriente armónica.

$I$  = Corriente fundamental.

$n$  = Orden del armónico.

Los componentes de las pérdidas por los armónicos



pueden ser establecidas por la evaluación del reporte de prueba del transformador , y la fórmula anteriormente descrita puede también ser usada para establecer un factor de corrección de corriente para una alimentación con un armónico constante dado .

Las pérdidas en el núcleo de un transformador alimentado con un voltaje sinusoidal puede ser escrito como :

$$P_{\text{núcleo}} = (K_1 \cdot f + K_2 \cdot f^2) \cdot V_s^2 \quad (1.2)$$

Donde : El primer término es debido a las pérdidas por Histéresis y el segundo término es debido a las pérdidas por corrientes de eddy en el núcleo .

Cómo el núcleo es no lineal , el efecto del voltaje armónico en las pérdidas no es aparente , aunque puede ser aproximadamente importante seguir la forma de la ecuación 1.1 .

Las normas Standard de la IEEE (c57.12.00-1980) proponen un límite sobre los armónicos en la corriente de carga que circula por el transformador . Este límite es establecido en 0.05 p.u. del factor armónico por la corriente .

Las normas también dan el máximo sobrevoltaje RMS que el transformador es capaz de soportar en estado estable, este máximo es de 105% con carga y el 110% sin carga. Los componentes armónicos en el voltaje aplicado no deben dar como resultado un voltaje RMS en exceso. No hay límites establecidos específicamente en el nivel de armónicos individuales o voltajes armónicos.

Es conocido que las pérdidas en los transformadores causadas por voltajes y corrientes armónicas son dependientes de la frecuencia. Estas pérdidas aumentan cuando crece la frecuencia y, por tanto, los componentes armónicos a grandes frecuencias pueden ser más importantes que los componentes a bajas frecuencias en causar calentamiento en el transformador.

### 1.3 CAPACITORES

El efecto de los componentes armónicos sobre un Banco de Capacitores es la causa adicional de calentamiento y pérdidas. El incremento de pérdidas en los capacitores debido a los armónicos puede ser determinado por la siguiente ecuación.

$$L_p = \sum_{n=2}^{\infty} C_n (\tan \delta)_n (2\pi f n) V_n^2 \quad (1.3)$$

Donde :

$L_p$ =Incremento de pérdidas .

$n$ =Orden del armónico .

$C$ =Capacitancia .

$(\text{tg}\delta)_n$ =Factor de pérdidas .

$f_n$ =Frecuencia al armónico dado .

$V_n$ =Voltaje RMS al armónico dado .

Las normas # 18 de la IEEE (C55.1-1980) especifica el límite de armónicos a que pueden ser sometidos los capacitores en operaciones normales . En condiciones normales , el capacitor puede estar continuamente operando con armónicos en el voltaje aplicado , con tal de que :

- 1.- La potencia reactiva total de operación no exeda el 135% del valor considerado .
- 2.- La corriente debida a los componentes de la frecuencia fundamental y armónica no exedan el 180% del valor RMS nominal .
- 3.- El voltaje aplicado sea el 110% del voltaje terminal , y el voltaje pico aplicado no se exeda del 120% . Sin embargo , los límites de la corriente deben ser especificados por los fabricantes para capacitores de menos de 2400

voltios . Las normas no especifican un límite de los armónicos individuales .

Si el nivel de voltaje armónico es conocido en la barra donde esta localizado el banco de capacitores , los niveles de corriente y pérdidas pueden facilmente ser determinados . Ya que los capacitores tiene una fuerte influencia sobre los voltajes armónicos de barra , particularmente cuando existe resonancia o cerca de que la condición de resonancia ocurra .

Los efectos capacitivos a las frecuencias armónicas del sistema generalmente pueden ser divididos en tres modos distintos :

A.- Se trata sobre la localización de capacitores proximo a equipos con voltajes y corrientes significativamente distorsionados . La frecuencia de resonancia paralelo de un banco de capacitores conectado a los terminales de un sistema de potencia predominantemente inductivo es :

$$n_p = (Q_s / Q_c)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

Donde :

$n_p$ =Orden del armónico en que puede ocurrir la resonancia paralelo .  
 $Q_s$ =Potencia de cortocircuito del sistema de potencia en el punto donde esta ubicado el banco de capacitores.  
 $Q_c$ =Potencia del banco de capacitores .

Como la Capacitancia está siempre presente en el sistema , un análisis más amplio debe ser realizado para determinar las frecuencias de resonancia .

El diseño de la instalación de bancos de capacitores comprende un sobredimensionamiento de capacitores y anulación de las condiciones de resonancia . Por lo general esto es realizado con el uso de reactores de sintonía.

B.- Trata la operación de capacitores en posiciones remotas para cualquier fuente específica de armónicos , o influenciado por varias fuentes . Los efectos de los armónicos en este caso pueden ser considerados al nivel del sistema , con representaciones detalladas de un gran número de componentes del sistema . En el presente tiempo , técnicas analíticas para estudiar efectos en los capacitores en



esta rama están desarrollándose y el rango total de efectos es desconocido .

C.- Esta operación ocurre cuando cargas perturbadoras vecinas producen corrientes alternas mucho mayores que la corriente alterna tomada por la carga no perturbadora . Por ello la distorsión de voltaje en la alimentadora es en gran parte independiente de esta carga y la fuente armónica en la derivación de la alimentadora puede ser representada por una fuente de voltaje con una pequeña impedancia desvaneciente .

Por lo que , en este caso , la barra de carga puede sufrir más distorsión que la que está presente en la derivación de la alimentadora . Cualquier límite en los niveles de distorsión primarios deben por lo tanto incluir una tolerancia para la distorsión potencialmente alta en los terminales de carga . Además en este caso , un límite superior útil en la corriente del capacitor puede ser derivado , dando un nivel de distorsión primario .

#### 1.4 CABLES

Inv. No. \_\_\_\_\_

El flujo de corriente no sinusoidal en un conductor puede causar un calentamiento adicional que varía de acuerdo al valor RMS de la forma de onda . Esto es ocasionado por dos fenómenos conocidos como " Efecto Pelicular o Efecto Piel " y " Efecto Proximidad " , que varían en función de la frecuencia , del tamaño del conductor y del espaciamiento entre conductores .

Como resultado de estos dos efectos a 60 Hz , la resistencia efectiva en corriente alterna (Rac) resalta sobre la resistencia efectiva de corriente directa (Rdc) , especialmente en conductores largos . Cuando una forma de onda de corriente cargada armónicamente esta fluyendo por un cable , el equivalente de Rac del conductor es mayor , y por ende , aumentan las pérdidas por  $I^2 \cdot Rac$  . La relación de la resistencia AC a la resistencia DC es definida como :

$$\frac{Rac}{Rdc} = 1 + Ycs + Ycp \quad (1.5)$$

Donde :

Ycs=Componente de la resistencia debido al efecto piel o pelicular .

Ycp=Componente de la resistencia debido al

efecto proximidad .

El efecto pelicular es un fenómeno de la corriente alterna que tiende a fluir en el conductor de una forma más densa cerca del exterior de la superficie que en su centro . Esto se debe al hecho de que el acoplamiento inductivo no tiene una densidad constante por todo el conductor , decreciendo cerca del exterior de la superficie , disminuyendo la inductancia e incrementando el flujo de corriente . Dando un resultado desigual en la distribución de corriente para formas de onda AC , por lo cual la  $R_{ac}$  es mayor que la  $R_{dc}$ .

El efecto proximidad es causado por el flujo magnético de enlace del conductor , debido a las corrientes entre cables no muy espaciados , o por corrientes inducidas en cerramientos magnéticos como conductos de acero , cubas , etc .

## 1.5 APARATOS ELECTRONICOS

La proliferación en plantas industriales de computadoras , control de procesos y aparatos de medición basados en la electrónica digital , que requieren ser alimentados por una buena calidad de energía . Estos aparatos operan a bajo voltaje y



por lo tanto bajos requerimientos de potencia , por lo que una solución efectiva y económica para eliminar las perturbaciones producidas por los armónicos es el uso de equipos de potencia condicionada , tales como : Transformadores que utilizan un campo electrostático a tierra entre los devanados de alto y bajo voltaje para interceptar señales de ruido de alta frecuencia . Estabilizadores de voltaje que tienen la función de mantener un voltaje de salida uniforme para fluctuaciones de voltaje en la entrada , por lo que son excelentes filtradores de armónicas . Líneas condicionadas provistas de reguladores de voltaje , filtros de armónicas y aparatos que eliminen el ruido de alta frecuencia .

Los fabricantes de computadoras y equipos periféricos imponen un límite en la distorsión de voltaje armónico , como la HONETWELL , DEC de que sea menor que el 3% , e IBM que sea menor del 5% , debido al hecho de que las computadoras tienen partes que son sensibles a los armónicos .

Aparatos electrónicos como rectificadores , inversores y cicloconvertidores son sensitivos en el punto de cruce del eje cero de la onda de voltaje que obviamente es afectada por la

distorsión de armónicos . El efecto en convertidores es el desplazamiento del punto de conmutación natural . Los siguientes valores son una guía para niveles de armónicos permitidos en los equipos electrónicos :

- EL factor de distorsión de voltaje armónico no puede exeder del 10% .
- Cada voltaje armónico individual no debe exeder del 5% hasta el 13avo armónico y que disminuya hasta el 1% para valores de 4000 Hz .

## 1.6 RELES

Los armónicos en el sistema de potencia afectan a los relés en varios parámetros de la operación misma del relé . Los relés que dependen de la cresta de voltaje y/o corriente ó voltaje cero para su operación son obviamente afectados por la distorsión armónica en la onda . La presencia de corrientes de tercera armónica de secuencia cero puede causar falsos disparos de relés de protección de puesta a tierra .

La imposibilidad de definir claramente la respuesta de los relés debido a la gran variedad

de estos en uso y la posibilidad de que ocurra una distorsión en la onda sinusoidal con contenido de armónicas es elocuente . En resumen los efectos de los armónicos en la operación de los relés son:

- Relés estáticos son susceptibles a cambios substanciales en las características de operación .
- En muchos casos , los cambios en las características de operación son relativamente pequeños o de rango moderado con respecto a la distorsión esperada durante la operación normal .
- Los relés exhiben una tendencia a operar con valores de puesta en trabajo bajos y/o altos que el operar establemente con valores bajos de puesta en trabajo .
- Dependiendo del fabricante , los relés de sobrevoltaje y sobrecorriente exhiben varios cambios en sus características de operación .
- Dependiendo del contenido de armónicos , los torques de operación de los relés pueden ser invertidos .

- Los tiempos de operación pueden ser ampliamente variados como una función de la mezcla de frecuencias dentro de las cantidades medidas .
- La impedancia balanceada del relé puede exhibir sobre alcances y disminuciones , es decir una cierta variación .
- Los relés diferenciales pueden operar a alta velocidad con armónicos impares . Varias pruebas indican que los relés pueden exhibir restricción completa .

En general , los niveles de armónicos requeridos para causar mal funcionamiento de los relés son considerados mayores que los límites máximos aceptables para otros equipos . Niveles de armónicos del 10-20% son generalmente requeridos para causar problemas con la operación de los relés.

## 1.7 MAQUINARIA ROTATIVA

Los motores de inducción son mucho más afectados por los armónicos , ya que corrientes armónicas excesivas pueden recalentarlos , especialmente cuando son conectados en barras donde se produce



resonancia entre el sistema y los capacitores .

La gran variedad de motores monofásicos hacen que cualquier análisis general sea dificultoso . Recientes estudios en varias máquinas , sugieren que los efectos de calentamiento en máquinas monofásicas son de una magnitud similar a los efectos de calentamiento en máquinas trifásicas .

El voltaje armónico también produce un aumento en las pérdidas por dispersión en el cobre . Esto es especialmente importante en máquinas con rotor de ranuras profundas , en donde que , la impedancia del rotor aumenta con la frecuencia . Un significativo calentamiento local (punto caliente) puede resultar por las pérdidas del cobre . El calentamiento suplementario solamente justifica la limitación del factor de distorsión armónico al 10% . También se debe considerar las pérdidas debido a la asimetría del sistema trifásico . Ciertas publicaciones recomiendan que la suma de los valores efectivos de todos los voltajes armónicos no excedan el 5% del valor efectivo de la frecuencia fundamental .

Los efectos de los voltajes armónicos en la puesta en marcha y en torques de operación en estado

Inv. No. \_\_\_\_\_

estable no son significantes bajo los niveles de 10-20% . Sin embargo torques oscilantes debido a la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético a la frecuencia fundamental puede posiblemente resultar en oscilaciones mecánicas . Pudiendo afectar la combinación Turbina-Generador.

Los efectos de los armónicos en máquinas sincrónicas son similares a los efectos en motores de inducción , principalmente en el aumento de pérdidas en el cobre . Límites aplicables a motores de inducción pueden también ser aplicables a máquinas sincrónicas , con la restricción suplementaria que la componente de secuencia negativa del voltaje fundamental no se exeda del 2% .

## CAPITULO # 2

## CONDICIONES QUE DEBE CUMPLIR EL FILTRO PROPUESTO

## 2.1 GENERALIDADES

Los efectos de los armónicos en los equipos de un Sistema de Potencia son descritos en el capítulo anterior . Esto puede ser usado para establecer niveles de armónicos permitibles para un sistema particular basado en el tipo de cargas , exposición a los circuitos de comunicación y lo concerniente a los equipos de potencia en el sistema . Límites de Distorsión de voltaje máximos recomendados para sistemas de diferentes niveles de voltaje estan dados en la tabla # 2.1

TABLA # 2.1

## LIMITES DE DISTORSION DE VOLTAJE (RMS)

Nivel de voltaje Del sistema de Potencia	Sistema con Convertidor Solamente	Sistema de Potencia en general
Medio Voltaje 13.8 69 Kv	8%	5%
Alto Voltaje Sobre los 138 Kv	1.5%	1.5%

En orden para tener niveles aceptables de armónicos en el sistema, técnicas de control de armónicos puede ser requerido para una fuente particular de armónicos en el sistema en general. Uno de los principales métodos para el control de armónicos es el tema principal de esta tesis, que trata sobre el diseño de filtros para suprimir a niveles aceptables los armónicos, y compensar en parte o totalmente los requerimientos de Potencia Reactiva. El presente capítulo trata algunas consideraciones que el filtro debe cumplir.

## 2.2 DEFINICIONES

El filtro que va en paralelo con el sistema de potencia es hecho de tal manera que se sintonice a una frecuencia en la cual las reactancias inductivas y capacitivas sean iguales.

### 2.2.1 Factor de Calidad.

Se puede asignar a un componente o a un circuito un factor de calidad. En el caso de un filtro que consta de inductancias, capacitancias y resistencias, el factor de calidad  $Q$  determina el grado de sintonización.  $Q$  es definido como:



$$Q = \frac{\omega n \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega n \cdot C \cdot R} = \frac{X_L}{R} \quad (2.1)$$

Donde :

$$\omega n = 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

$f_n$  = Frecuencia al armónico  $n$  (de sintonía)

$L$  = Inductancia

$C$  = Capacitancia

$R$  = Resistencia

$X_L$  = Reactancia inductiva ó capacitiva al armónico  $n$ .

El valor de  $Q$  normalmente es de 30 a 60 para filtros simples sintonizados. Los filtros contruidos con un  $Q$  menor que 30 tienen ciertas restricciones con el fin de minimizar las pérdidas que repercuten en un buen rendimiento, un valor en este rango puede ser escogido en el diseño inicial, pero puede ser incrementado o disminuido en el diseño final dependiendo de las simulaciones de funcionamiento del filtro. Un filtro que tenga un valor grande de  $Q$  requiere de una sintonización más perfecta, porque disminuye la variación de sus parámetros, y es menos efectivo para frecuencias armónicas adyacentes.

induciendo a que se produzcan grandes sobrevoltajes en el punto de resonancia que obliga a reducir el valor de  $Q$ , ya sea incluyendo bancos de resistencias amortiguadoras en paralelo o serie con el filtro o con uno de sus componentes. El factor de calidad de un filtro pasa banda es el recíproco de un filtro sintonizado simple.

$$Q = \frac{R}{X_0} \quad (2.2)$$

Su valor típico está entre 0.5 y 5. Este filtro tiene una impedancia baja para un amplio rango de frecuencias.

### 2.2.2 Factor de Desintonización.

En la práctica un filtro no siempre se sintoniza exactamente a la frecuencia del armónico que se trata de suprimir. El grado de desintonización del filtro para una frecuencia nominal de sintonización es representada por un factor  $\delta$ . En este factor se incluyen varios efectos como:

- La frecuencia del sistema puede variar, por lo que proporcionalmente también

variará la frecuencia armónica .

- La inductancia y la capacitancia pueden variar , teniendo que la capacitancia varía en mayor proporción a causa del envejecimiento y cambio de temperatura debido a la temperatura ambiente y al autocalentamiento .
- La sintonización inicial puede ser pésima debido a cambios finitos en los pasos de sintonización y a las tolerancias en la construcción de los componentes . La desintonización total en p.u. de la frecuencia de sintonización nominal es :

$$\delta = (w_n - w) / w \quad (2.3)$$

Donde :

$\delta$  = Factor de Desintonización .

$w_n = 2. \pi. f_n$

$w = 2. \pi. f$

$f_n$  = Frecuencia de sintonización

$f$  = Frecuencia fundamental

Sin embargo , una variación de la inductancia o capacitancia en un 2% causa la misma desintonización que un cambio del 1%

de la frecuencia del sistema . Por lo tanto  $\delta$  es siempre expresado como :

$$\delta = \frac{\Delta f}{fn} + 0.5 \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

$\Delta f$ =Variación de la frecuencia fundamental .

$f$ =Frecuencia fundamental

$\Delta L$ =Variación de la Inductancia

$\Delta C$ =Variación de la Capacitancia

$L$ =Inductancia

$C$ =Capacitancia

## 2.3. ANALISIS DE IMPEDANCIA

### 2.3.1 Criterios Para el Diseño de Filtros.

El tamaño de un filtro es definido como la Potencia Reactiva que el filtro suministra a la frecuencia fundamental . Esto es substancialmente igual a la potencia reactiva fundamental suplida por los capacitores . El tamaño total de todos los ramales de un filtro es determinado por los requerimientos de potencia reactiva de la fuente armónica y por como muchos de estos

requerimientos pueden ser suministrados por la red A.C..

El criterio ideal del diseño de filtros es la eliminación de todos los efectos perjudiciales causados por la distorsión de la forma de onda, incluyendo la interferencia telefónica, que es el defecto más dificultoso en ser eliminado completamente. Sin embargo este criterio es irrealizable tanto por razones técnicas como económicas.

Desde el punto de vista técnico es muy dificultoso estimar el avance de la distribución de armónicos a través de la red A.C., la reducción de la interferencia telefónica puede normalmente ser realizado más económicamente, pero tomando algunas medidas preventivas en el sistema telefónico y otras en el sistema de potencia.

Un criterio más práctico sugiere reducir el problema a niveles aceptables en el punto de acople con otros consumidores, expresando el problema existente en términos de corriente armónica, voltaje armónico, o ambos. Un criterio basado en voltajes armónicos es más conveniente para el diseño de filtros,



ya que esto fácilmente garantiza tener límites de voltaje razonables que limiten el nivel de corriente como los cambios de impedancia de la red A.C. . En orden para completar con los requerimientos de limitaciones de armónicas , el diseño de filtros implica los siguientes pasos :

A.-El espectro de corrientes armónicas producido por la carga no lineal es inyectada dentro del circuito consistente de filtros en paralelo con el sistema A.C. , (Figura # 2.1) a las frecuencias pertinentes , con lo que los voltajes armónicos pueden ser calculados .

B.-Los resultados de A son usados para determinar los parámetros específicos .

C.-Los esfuerzos en los componentes del filtro: capacitores , inductores y resistencias deben ser calculados y con ello sus relaciones y pérdidas .

Tres componentes requieren consideraciones de detalle en el calculo de filtros , la fuente de corriente , Admitancia del filtro

, y la admitancia del sistema .

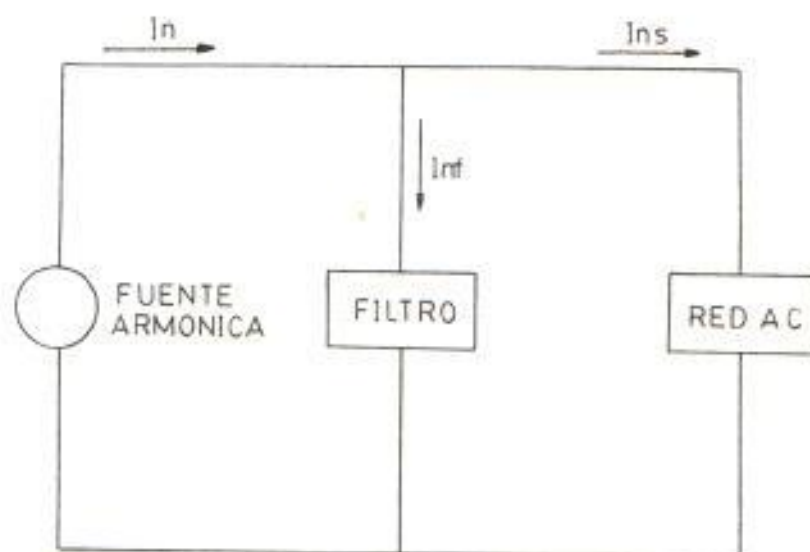


Figura # 2.1

Circuito para el análisis de la distorsión de Voltaje Armónico .

El contenido de la fuente de corriente puede ser variado por medio del rango de carga (en el caso de convertidores estáticos) y por las condiciones del ángulo de disparo . Por lo que las admitancias del filtro y sistema son de interés es esencial el calcular la admitancia equivalente total mínima para cada frecuencia armónica que de como resultado una máxima distorsión de voltaje .

El lugar geométrico de la impedancia ó admi-

tancia es fácil de obtener para una configuración particular del filtro previamente mencionado. El lugar geométrico de la impedancia de la fuente es más difícil de determinar para cualquier grado de exactitud.

El diseño más obvio de un filtro es la simple configuración de paso de banda ancha capaz de atenuar todo el espectro de armónicas inyectadas. Sin embargo la capacidad requerida para efectuar tal requerimiento es demasiado grande, por lo que es usualmente más económico el atenuar armónicas bajas por medio de simples ramales de filtros sintonizados.

### 2.3.2 Impedancia Armónica del Sistema.

Los filtros de armónicas son generalmente requeridos para limitar la inyección de corrientes armónicas al sistema que alimenta a grandes instalaciones convertidoras, Hornos de arco, etc. En la actualidad es cada vez más utilizable los filtros en plantas industriales, a menudo para reducir una o dos corrientes armónicas particulares que exceden los valores máximos recomendados por



las normas o que pueden interferir con los propios equipos de la planta.

Para grandes esquemas la estimación de la impedancia armónica del sistema que permita el diseño de filtros más económicos es un proceso tedioso y extenso, haciendo posible esto realizando ciertas simplificaciones y asunciones para estimar la peor condición simple refiriendonos a la familia de curvas más halla de llevar estudios analíticos detallados. No es posible realizar un diseño apropiado del filtro sin tener conocimientos previos de la impedancia de la red para la frecuencia armónica en estudio. Las impedancias armónicas con un ángulo de fase constante de un cierto sistema, no crecen directamente en función de la frecuencia, pero sigue un lugar geométrico que describe un número de circunvalaciones, que tiende a cruzar el eje de la resistencia en un punto menor con el aumento de la frecuencia.

Diferentes lugares geométricos pueden ser simulados para varias condiciones del sistema, asegurando que las peores condiciones

posibles son simuladas en un lugar geométrico circular artificial que puede ser dibujado simétricamente sobre el eje de las resistencias . Este lugar geométrico puede incluir la división del área total para diferentes condiciones del sistema . Un lugar geométrico circular artificial es mostrado en la figura # 2.2 que consta de dos partes : Un lugar circular de radio  $r$  determinado por un rango de estudios analíticos de acuerdo a la magnitud del sistema de potencia , y de dos líneas de puntos que dan el ángulo máximo de la impedancia del sistema , el cual es raramente menor que  $75^\circ$  y probablemente de  $85^\circ$  para sistemas ligeramente sobrecargados .

Transformando los lugares geométricos de las impedancias en admitancias , Figura # 2.3 , concluimos que para un rango de valores considerados , la característica dominante es el ángulo de la admitancia del sistema .

### 2.3.3 Impedancia Armónica del Filtro.

El lugar geométrico de la impedancia armónica de un simple filtro sintonizado es

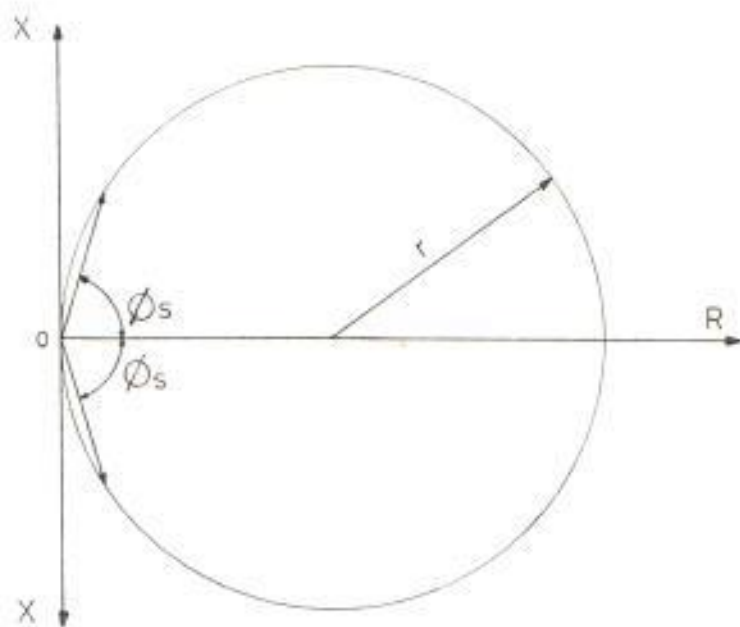


Figura # 2.2

Lugar geométrico de la impedancia  
Armónica del Sistema .

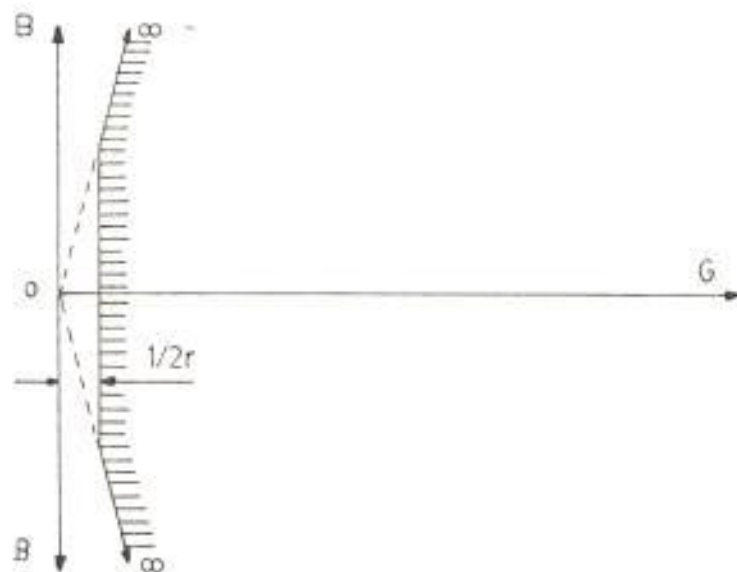


Figura # 2.3

Lugar Geométrico de la Admitancia  
Armónica del Sistema .

Inv. No. \_\_\_\_\_

mostrado en la figura # 2.4 . La componente resistiva comprende la serie de resistencias efectivas del banco de capacitores y del inductor , junto con la resistencia adicionada para disminuir el factor de calidad del valor de diseño . La variación en el valor de los componentes y el cambio en la frecuencia del sistema , puede expresarse como un cambio de frecuencia equivalente , causando la desintonización del filtro para un ángulo  $\theta f$  . La impedancia del filtro puede situarse entre los puntos A y B .

La figura # 2.5 es la correspondiente transformación a la Admitancia Armónica del Filtro Sintonizado .

#### 2.3.4 Combinación de las Admitancias del Filtro y del sistema.

Las fuentes de armónicas inyectan corrientes armónicas en las admitancias paralelas del sistema y del filtro . De manera general no puede afectar grandemente el lugar geométrico de admitancias del sistema con la

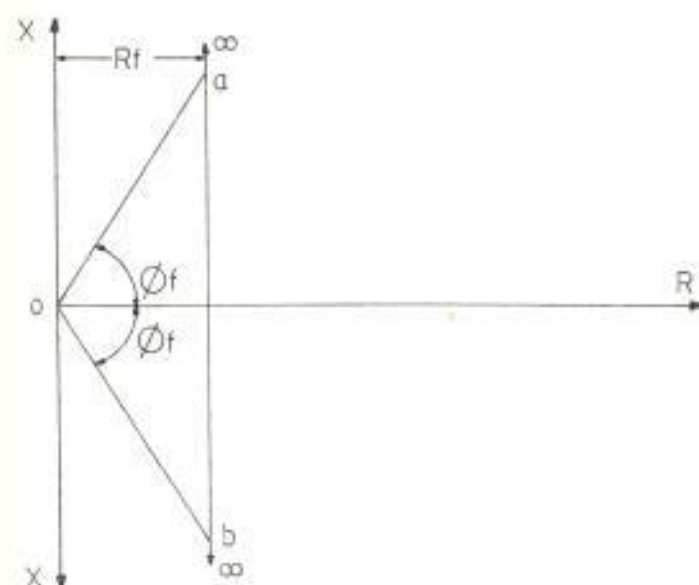


Figura # 2.4

Lugar Geométrico de la Impedancia Armónica  
del Filtro Sintonizado .

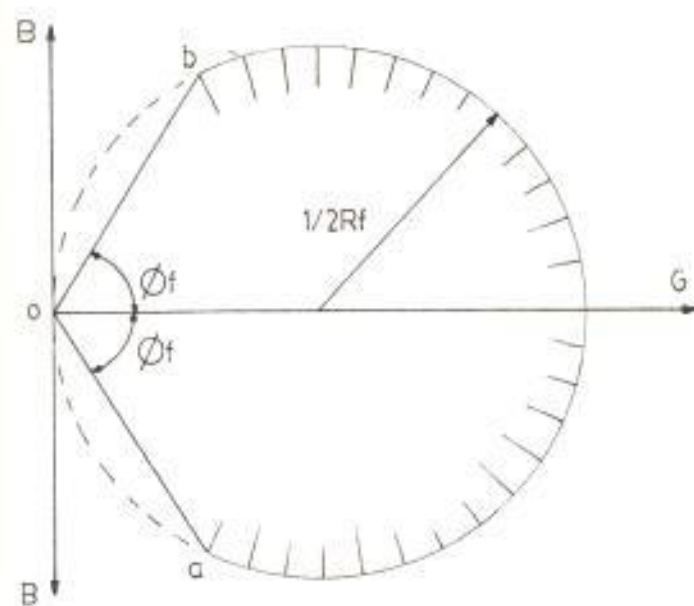


Figura # 2.5

Lugar Geométrico de la Admitancia Armónica  
del Filtro Sintonizado .



sintonización del filtro . La máxima distorsión de voltaje armónico en el filtro y en los terminales del sistema ocurre cuando la admitancia combinada es un mínimo , asumiendo que la fuente de armónicos es esencialmente a corriente constante . La Figura # 2.6 muestra la admitancia total mínima obtenida para máxima desintonización del ramal sintonizado del filtro . En esta condición es determinada la admitancia del filtro , y la admitancia total mínima esta dada por  $Y_t$

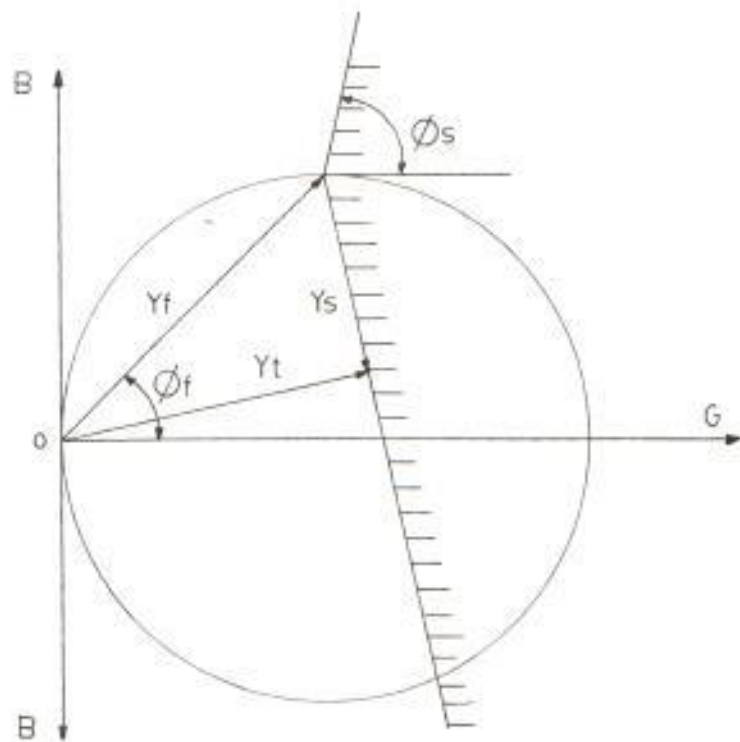


Figura # 2.6

Lugar Geométrico de la Admitancia Combinada del Filtro y del Sistema .

Si  $I_n$  es la corriente armónica generada al  $n$  armónico, el voltaje armónico correspondiente es :

$$V_n = \frac{I_n}{Y_t} \quad (2.5)$$

Donde :

$V_n$  = Voltaje armónico

$I_n$  = Corriente armónica

$Y_t$  = Admitancia total mínima

La corriente que circula por el filtro es :

$$I_{nf} = V_n \cdot Y_f = I_n \cdot \left( \frac{Y_f}{Y_t} \right) \quad (2.6)$$

Donde :

$I_{nf}$  = Corriente armónica en el filtro

$Y_f$  = Admitancia del filtro

$Y_t$  = Admitancia total

La corriente que fluye en el resto del sistema incluyendo los otros ramales del filtro es :

$$I_{ns} = V_n \cdot Y_s - I_n \left( \frac{Y_f}{Y_t} \right) \quad (2.7)$$

Donde :

$I_{ns}$  = Corriente armónica que fluye en el resto del sistema .

$Y_s$  = Admitancia del resto del sistema

Es importante notar que la relación  $\frac{Y_f}{Y_t}$  es mayor que la unidad y por lo tanto la corriente armónica en el filtro es mayor que la producida por la corriente armónica generada debido a la resonancia parcial . Por esta razón los filtros son calculados para peores condiciones del ángulo de la impedancia del sistema (generalmente alrededor de  $90^\circ$ ) con el fin de asegurar un cálculo adecuado para una desintonización máxima .

### 2.3.5 Filtros Sintonizados.

Por lo general un filtro sintonizado es un circuito serie de Capacitores , Inductores , Resistencias , es decir un circuito RLC Serie , Figura # 2.7 .

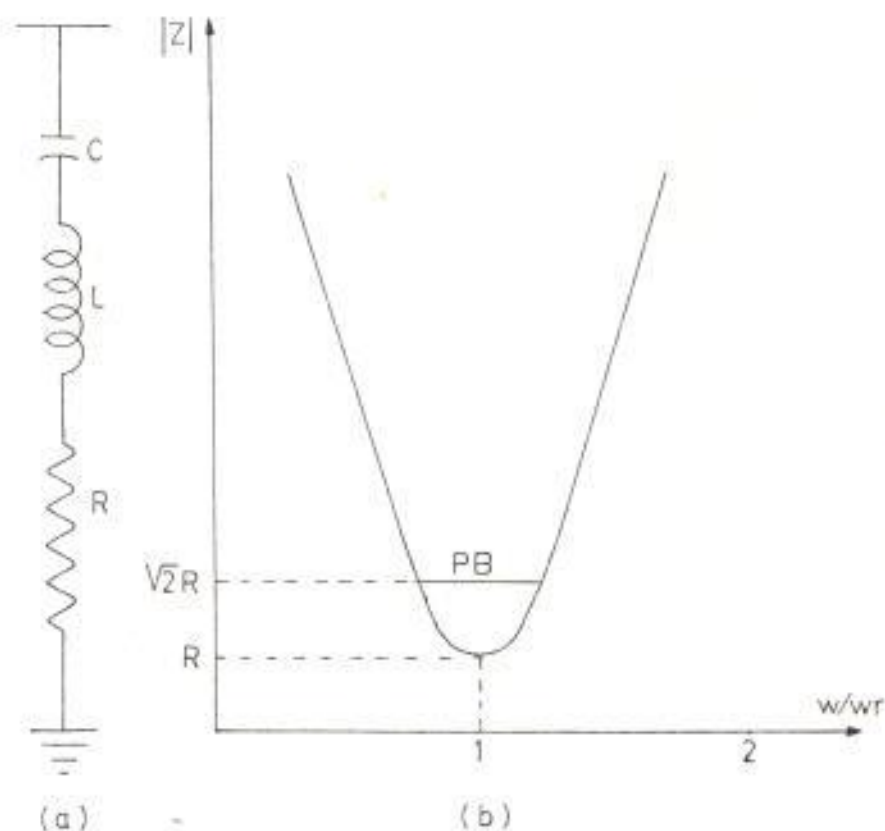


Figura # 2.7

a. Circuito del Filtro Simple sintonizado

b. Impedancia vs frecuencia del filtro simple

Este se sintoniza a una cierta frecuencia ,  
su impedancia es:

$$Z_f = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.8)$$

Que a la frecuencia de resonancia  $f_n$  se

reduce a R .

El factor de calidad Q y la desviación relativa de frecuencia  $\delta$  son parámetros básicos para la selección de R , L y C . En orden para expresar la impedancia del filtro en términos de Q y  $\delta$  las siguientes relaciones son aplicables :

$$\omega_n = \omega \cdot (1 + \delta) \quad (2.9)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.10)$$

La reactancia del inductor o capacitor en a la frecuencia de sintonización es :

$$X_0 = \omega_n \cdot L = \frac{1}{\omega_n \cdot C} = \sqrt{L/C} \quad (2.11)$$

Donde :

$$C = \frac{1}{\omega_n \cdot X_0} = \frac{1}{\omega_n \cdot R \cdot Q} \quad (2.12)$$

$$L = \frac{X_0 \cdot R \cdot Q}{\omega_n} \quad (2.13)$$

Con lo que obtenemos :



$$Z_f = R \left( 1 + jQ \cdot \delta \left( \frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right) \quad (2.14)$$

Donde :

$Z_f$  = Impedancia del filtro .

$Q$  = Factor de calidad del filtro .

$\delta$  = Factor de desintonización del filtro .

Si consideramos que  $\delta$  es relativamente pequeño comparado con la unidad , tenemos :

$$Z_f = R \cdot (1 + j2 \cdot \delta \cdot Q) = X_o \cdot (Q + j2 \cdot \delta)^{-1} \quad (2.15)$$

$$|Z_f| \approx R (1 + 4\delta^2 Q^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

Donde: -

$|Z_f|$  = Magnitud de la impedancia del filtro .

$R$  = Resistencia del filtro .

$X_o$  = Reactancia al  $n$  armónico de sintonización .

$Q$  = Factor de calidad del filtro .

$\delta$  = Factor de desintonización del filtro .

Generalmente es más conveniente tratar con admitancias que con impedancias en el diseño de filtros .

$$Y_f = \frac{1}{R \cdot (1 + j2 \cdot \delta \cdot Q)} = G_f + jB_f \quad (2.17)$$

Donde :

$$G_f = \frac{Q}{X_o \cdot (1 + 4 \cdot \delta^2 \cdot Q^2)} \quad (2.18)$$

$$B_f = - \frac{2 \cdot \delta \cdot Q^2}{X_o \cdot (1 + 4 \cdot \delta^2 \cdot Q^2)} \quad (2.19)$$

El voltaje armónico en la barra del filtro es:

$$V_n = \frac{I_n}{Y_f + Y_s} = \frac{I_n}{Y_n} \quad (2.20)$$

Donde :

$V_n$  = Voltaje armónico .

$I_n$  = Corriente armónica .

$Y_f$  = Admitancia del filtro .

$Y_s$  = Admitancia del sistema .

$Y_n$  = Admitancia total al n armónico .

Para minimizar la distorsión de voltaje es necesario incrementar la admitancia total del filtro en paralelo con el sistema A.C. . En orden para predecir un  $V_n$  grande , las variables que no están adecuadamente conocidas tienen que ser escogidas con pesimismo ; las que son : la desviación de frecuencia  $\delta$  y la admitancia del sistema  $Y_s$  . Ya que el

voltaje armónico crece con la  $\delta$  , la mayor desviación esperada  $\delta_m$  , puede ser usada en el análisis . Además la menor condición realística del sistema puede ser representada (mínima admitancia) .

Con ciertos límites el diseño puede ser realizado con valores de  $Q$  y del tamaño del filtro . En términos de  $Q$  y  $\delta$  la ecuación 2.19 puede escribirse así :

$$V_n = I_n \cdot \left\{ \left[ G_{sn} + \frac{1}{R \cdot (1 + 4 \cdot Q^2 \cdot \delta^2)} \right]^2 + \left[ B_{sn} - \frac{2 \cdot Q \cdot \delta}{R \cdot (1 + 4 \cdot Q^2 \cdot \delta^2)} \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (2.21)$$

Donde :

$V_n$  =Magnitud del voltaje armónico .

$G_{sn}$ =Conductancia armónica del sistema

$B_{sn}$ =Suceptancia armónica del sistema

El caso de una admitancia de red A.C. puramente inductiva , a menudo usada en el diseño de filtros , es indudablemente pesimista. El lugar geométrico de la impedancia indica que generalmente las impedancias armónicas pueden ser circunscritas en una parte del plano  $R$  ,  $jX$  determinados por dos líneas rectas y un círculo que pasa por el origen . El ángulo máximo de la impedancia de red

puede ser limitado a valores menores que  $90^\circ$  y generalmente se tiene que decrece con el aumento de la frecuencia (excepto en redes para armónicos altos). El alto voltaje armónico es obtenido usando  $\theta_{sn}$  con un signo opuesto a de  $\delta$ .

Tomando  $\theta_{sn}$  positivo y  $\delta$  negativo, la ecuación 2.20 se la puede escribir así:

$$V_n = I_n \sqrt{\left( |Y_{sn}| \cdot \cos\theta_{sn} + G_f \right)^2 + \left( |Y_{sn}| \cdot \sin\theta_{sn} + B_f \right)^2} \quad (2.22)$$

Donde:

$|Y_{sn}|$  = Magnitud de la admitancia armónica del sistema.

$G_f$  = Conductancia del filtro.

$B_f$  = Suceptancia del filtro.

$\theta_{sn}$  = Angulo de la impedancia armónica del sistema.

Ya que  $|Y_{sn}|$  es libre, la admitancia dando un máximo  $|V_n|$  es:

$$|Y_{sn}| = \frac{\cos\theta_{sn} \cdot (2 \cdot D \cdot \delta \cdot \text{tg}\theta_{sn} - 1)}{R \cdot (1 + 4 \cdot Q^2 \cdot \delta^2)} \quad (2.23)$$

Dando:

$$|V_n| = I_n \cdot \omega n \cdot L \cdot \left[ \frac{1 + 4 \cdot Q^2 \cdot \delta^2}{Q (\sin \theta_{sn} + 2 \cdot Q \cdot \delta \cdot \cos \theta_{sn})} \right] \quad (2.24)$$

Con un óptimo  $Q$  :

$$Q = \frac{1 + \cos \theta_{sn}}{2 \cdot \delta \cdot \sin \theta_{sn}} \quad (2.25)$$

Tendremos un bajo voltaje armónico :

$$|V_n| = I_n \cdot \delta \cdot \omega n \cdot L \cdot \left[ \frac{4}{1 + \cos \theta_{sn}} \right] = \frac{2 \cdot I_n \cdot R}{\sin \theta_{sn}} \quad (2.26)$$

No obstante , puede ser notado que los filtros no son usualmente diseñados para dar un voltaje armónico mínimo bajo estas condiciones . Normalmente un alto  $Q$  es seleccionado con el fin de reducir las pérdidas .

Una condición que siempre debe ser considerado en el diseño de filtros , y que puede restringir la operación de los convertidores , hornos de arco , es la salida de uno ó más brazos del filtro , con lo que los restantes brazos del filtro pueden sobrecargarse , ya que tienen que soportar la corriente armónica total generada .



### 2.3.6 Graficos Aproximados.

La siguiente aplicación gráfica ayuda a entender la selección óptima de  $Q$ , por ejemplo para maximisar la impedancia de red. Varios casos pueden ser examinados, ya sea con la impedancia del sistema infinita, impedancia del sistema puramente inductiva, que son casos pesimistas e irrealistas, y la impedancia del sistema con el ángulo limitado.

Para un valor máximo del factor de desviación de frecuencia  $\delta_m$ , usando una reactancia fija  $X_o$  y una resistencia variable  $R$ , el lugar geométrico de la admitancia del filtro es un semicírculo de diámetro  $1/(2.\delta_m.X_o)$ , tangente al eje  $G$  en el origen, como el mostrado por la línea a trazos de la figura # 2.8.

$$Y_f = \frac{1}{R.(1 + j.2.\delta.Q)} \quad (2.27)$$

La misma figura despliega (área rayada) el dominio de la admitancia del sistema, obtenida por la inversión de la impedancia, se ve que la mínima admitancia para cada

Inv. No. \_\_\_\_\_

frecuencia tiende a terminarse en el límite del área rayada .

Para un  $Y_{fn}$  dado , el correspondiente vector  $Y_n$  es perpendicular y termina en el límite . El vector de la figura 2.8 deducido para un  $\delta_m$  positivo y un  $\theta = \theta_m$  negativo , produce mayores voltajes armónicos . Sin embargo , el valor óptimo de  $Y_{fn}$  es el que termina en el punto del semicírculo donde el límite del ángulo  $+\theta_m$  es tangente al semicírculo . En el punto D , se observa que  $Y_{fn}$  aumenta al máximo a  $V_n$  y disminuye a  $Y_{sn}$  . Como condición la admitancia del filtro puede ser mostrada así :

$$|Y_{fn}| = \frac{\cos(\theta_m/2)}{2. \delta_m. X_o} \quad (2.28)$$

y

$$|Y_n| = |Y_{fn}| \cdot \cos(\theta_m/2) = \frac{1 + \cos\theta_m}{4. \delta_m. X_o} \quad (2.29)$$

El factor de calidad escogido para un  $Y_{fn}$  es

$$Q = \frac{X_o}{R} = \frac{X_o}{X_f / (\text{tg}\theta_f)} \quad (2.30)$$

Donde :

$X_f$  = Reactancia del filtro .

$\theta_f$  = Ángulo de la impedancia del filtro .

Por la ecuación 2.14 , tenemos :

$$X_f = 2. \delta m . X_o \quad (2.31)$$

Y por la figura 2.8 , tenemos :

$$\text{tg} \theta_f = \cot(\theta_m/2) \quad (2.32)$$

Por lo tanto :

$$Q = \frac{\cot(\theta_m/2)}{2. \delta m} = \frac{\cos \theta_m + 1}{2. \delta m . \text{sen} \theta_m} \quad (2.33)$$

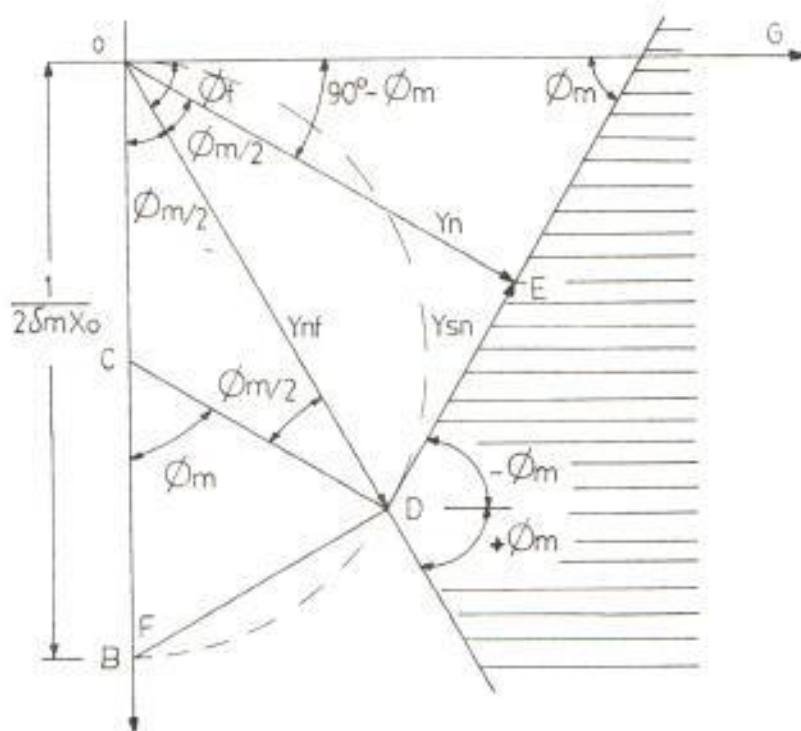


Figura # 2.8

Gráfico para obtener un óptimo  $Q$  y la menor Admitancia del sistema  $Y_{sn}$  dado un ángulo  $\theta_m = 60^\circ$  .

Después de que los valores de  $Q$  estén bien determinados para el filtro sintonizado individual, la configuración completa del filtro puede ser usada para determinar la admitancia de red  $Y_n$  que produce la admitancia total mínima  $Y$  para cada frecuencia armónica.

En la práctica, la mínima posibilidad de admitancias del sistema son limitados por una conductancia mínima, resultando en una frecuencia dominante mostrada en la parte rayada de la figura 3.9. Para cualquier frecuencia armónica la admitancia equivalente de la configuración del filtro consiste de un vector que termina en el punto  $D$  y principia en una de las tres regiones del plano de la admitancia.

A frecuencias para las que los filtros están dados, el origen de la admitancia del filtro es probable que este en la region 3, por ejemplo, la admitancia total del filtro es relativamente grande. Sin embargo a otras frecuencias la admitancia del filtro original puede estar en la region 1 ó 2.

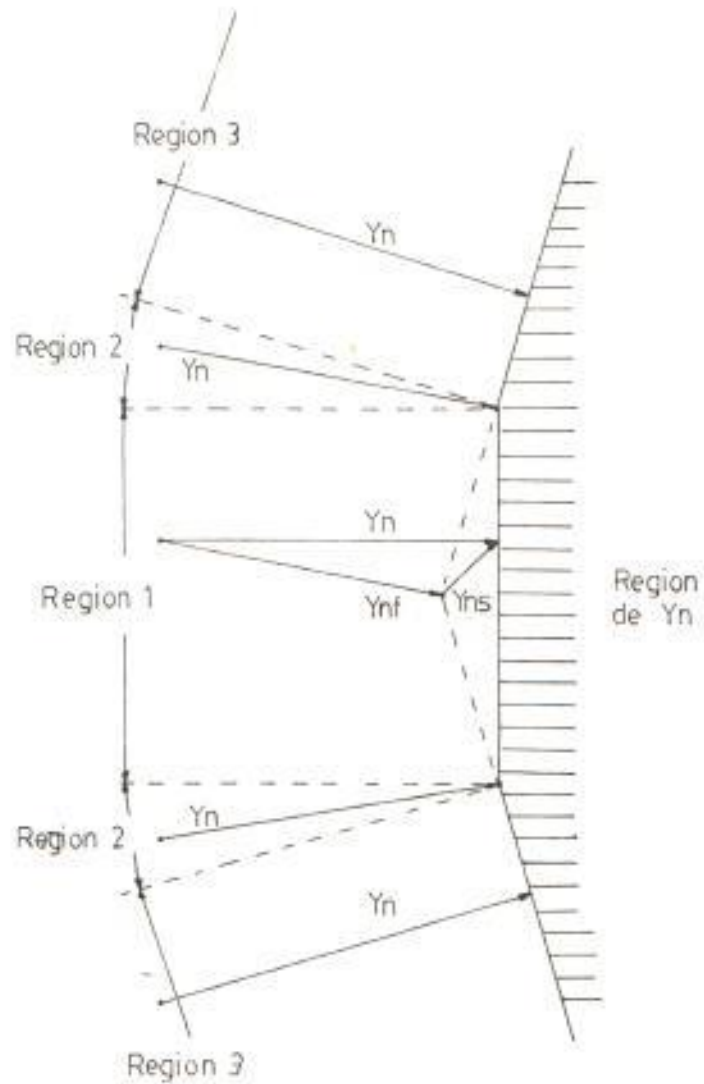


Figura # 2.9

Determinación de la Admitancia de red  $Y_n$  para una Admitancia resultante mínima  $Y_n$  correspondiente a una Admitancia del Filtro  $Y_{fn}$  dada en diferentes regiones .

Los valores más pesimistas de la admitancia de red es la que resulta en una menor admittancia total ; estas son claramente definidas en el gráfico : (a) en la región 1 , el



vector de la admitancia resultante  $Y_n$  termina en la parte vertical (mínima conductancia) de la frontera ; (b) en la región 2 ,  $Y_n$  termina en el corner del límite ; (c) en la región 3  $Y_n$  es perpendicular a la proximidad del límite angular .

#### 2.4 TIPOS DE FILTROS

Los filtros pueden ser clasificados por su localización , por su manera de conexión en el circuito principal , por su agudeza en la sintonización y de las frecuencias de resonancia .

Los filtros consisten de reactores , capacitores , resistores o una combinación de estos en unidades que pueden o no pueden ser sintonizadas . Los armónicos de bajo orden poseen en general mayores amplitudes y exigen por tanto filtros de baja impedancia para frecuencias en el entorno de estas frecuencias armónicas . En general es más barato utilizar un filtro para cada una de las armónicas en lugar de utilizar solamente un filtro de banda larga para la filtración de las armónicas . Las armónicas superiores poseen en general amplitud menores y en este caso la solución más económica es utilizar solamente un filtro del tipo pasa alto



para la filtración de todas las armónicas .

#### 2.4.1 Filtros Sintonizados.

Una ramificación del filtro sintonizado puede ser empleado para el control de armónicos a una frecuencia específica . La forma esquemática de un ramal sintonizado simple es dado en la figura 2.7 con su característica típica impedancia vs frecuencia de sintonización . Un filtro sintonizado doble es sustancialmente equivalente , proximo a las frecuencias de resonancia que dos filtros sintonizados simples en paralelo . Este tipo de filtro es mostrado en la figura # 2.10 .

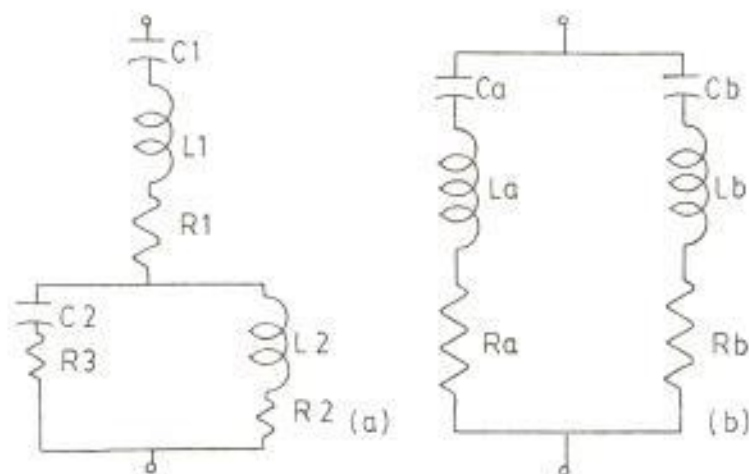


Figura # 2.10

a . Filtro Doble Sintonizado .

b . Dos Filtros simples Sintonizados .

### 2.4.2 Filtros Pasa Alto Amortiguados.

El circuito esquemático de un filtro pasa alto amortiguado de segundo y tercer orden esta dado en las figuras # 2.11 y 2.12 con su respectivas características de impedancia

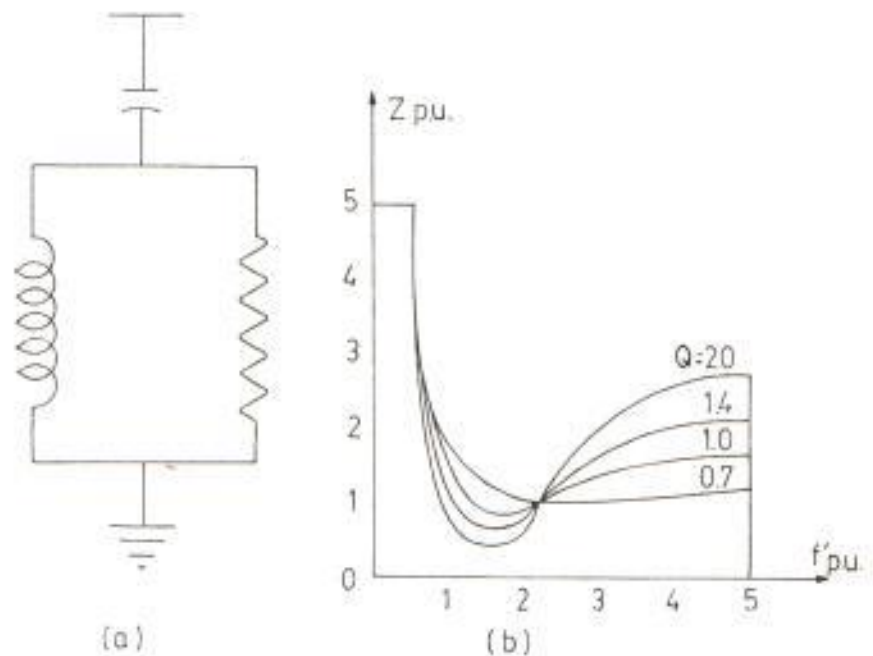


Figura # 2.11

- a . Filtro Pasa Alto de segundo orden .  
 b . Característica Impedancia vs Frecuencia

La frecuencia de resonancia para el filtro pasa alto es seleccionada proxima a una menor frecuencia armónica generada que para un filtro sintonizado .

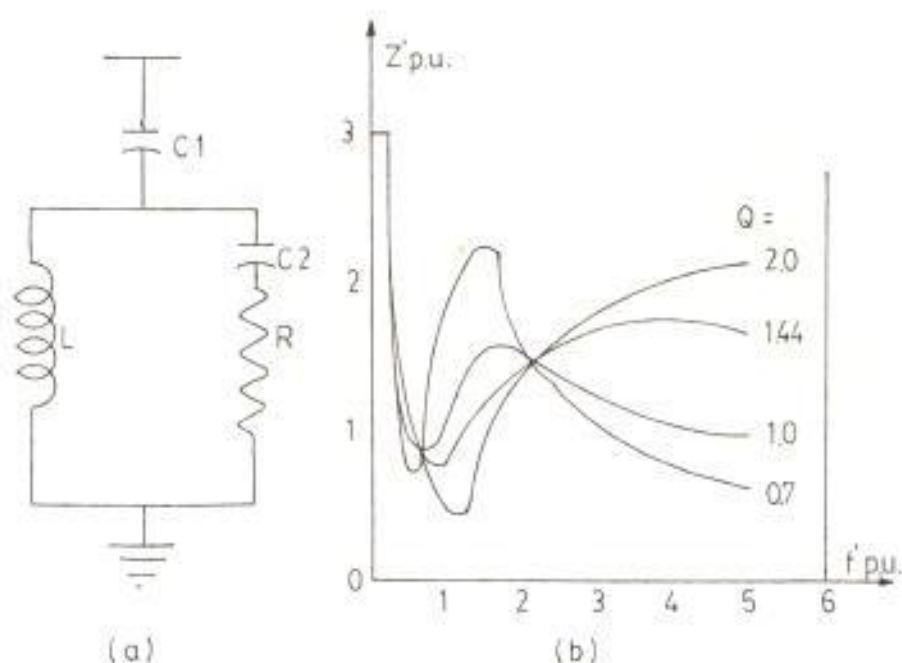


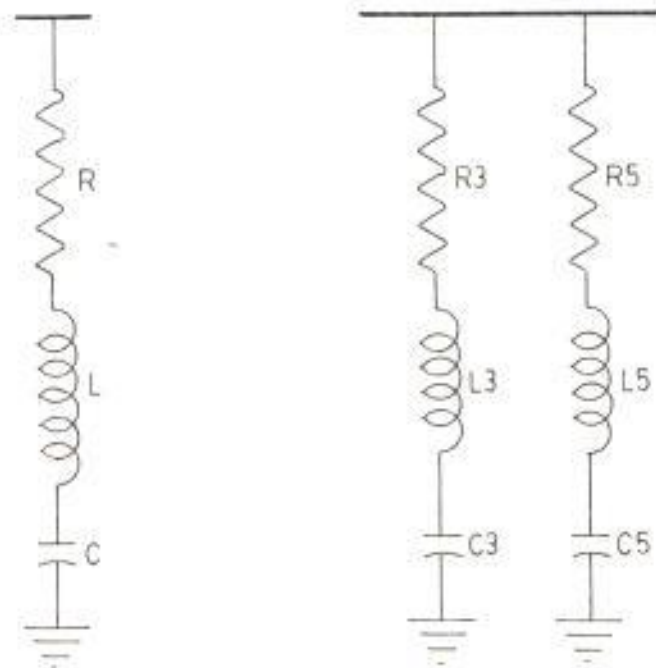
Figura # 2.12

- a. Filtro pasa alto de tercer orden  
 b. Característica Impedancia vs Frecuencia

### 2.4.3 Configuraciones Típicas de Filtros.

De acuerdo a la necesidad de suprimir armónicos y del ingeniero diseñador se tendrán diferentes configuraciones de filtros. Generalmente se tienen filtros sintonizados para la 5ta, 7ma, 11va, 13va armónicas más un filtro pasa alto. La mayor parte de convertidores para HVDC están conectados en serie por unidades de 12 pulsos que generan

pequeñas armónicas de 5ta y 7ma . Sin embargo estos pueden operar como de 6 pulsos por lo que requieren filtros de 5ta y 7ma . Para convertidores menores de 30 Mw conectados a barras de mediano voltaje , es recomendado el diseño de un filtro mínimo para la 5ta y 7ma armónicas . Los siguientes esquemas ilustran las diferentes configuraciones de Filtros .




Conexión Y 

Figura # 2.13

Dos configuraciones simples de Filtros

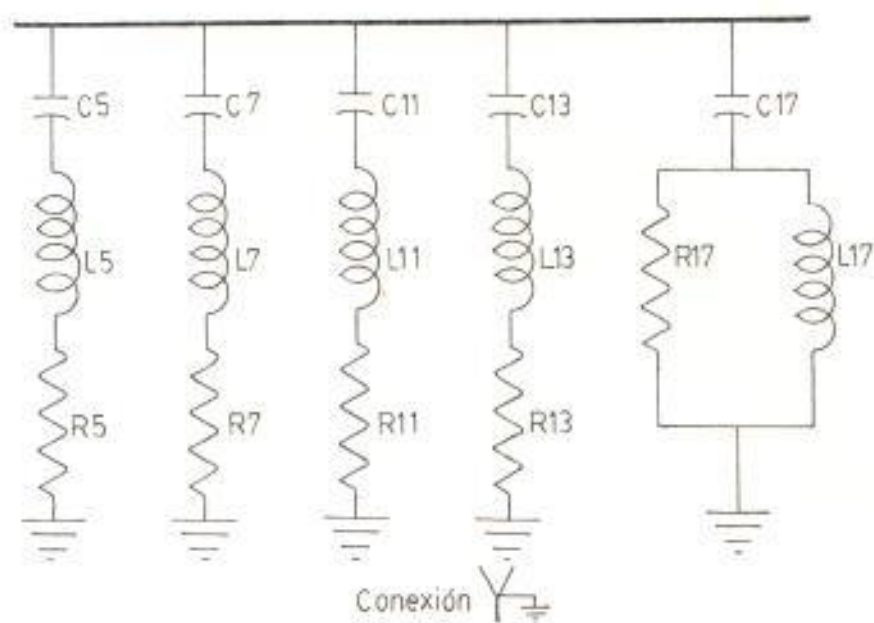


Figura # 2.14

Configuración típica de un circuito de filtrado para un convertidor de 6 pulsos .

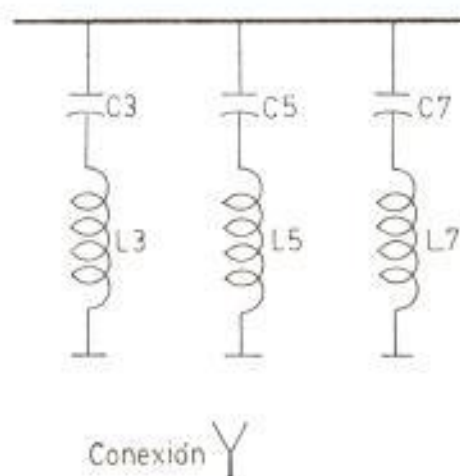


Figura # 2.15

Configuración típica de un sistema de filtrado en Hornos de Arco .

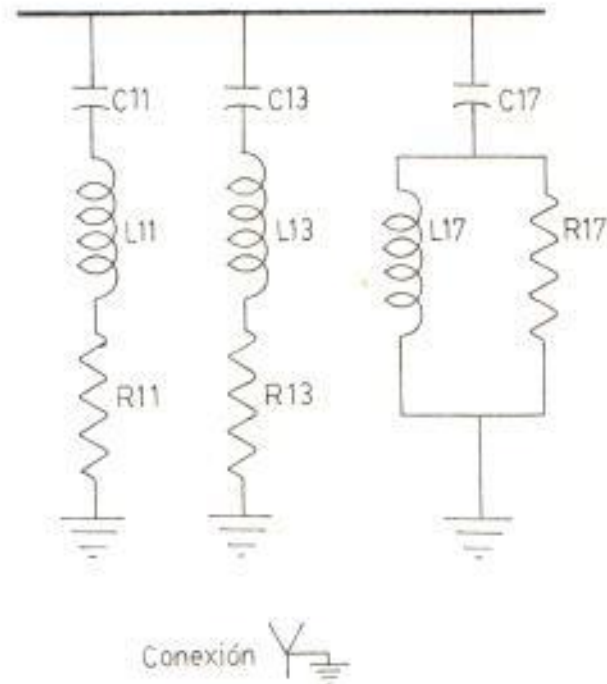


Figura # 2.16

Configuración típica de un circuito de filtrado para convertidores de 12 pulsos .

#### 2.4.4 Tipos de Conexión.

Los filtros A.C. de armónicos son conectados en paralelo con el sistema , e internamente de manera general en Y ó estrella con neutro flotante y en Y ó estrella aterrizado . Generalmente los filtros utilizados en convertidores están conectados en estrella aterrizado , mientras que en industrias con hornos de arco , los filtros están conectados en estrella con neutro flotante . Tam-



bién pueden estar conectados en Delta .  
Siendo las dos primeras conexiones las más utilizadas .

## 2.5 FRECUENCIA DE SINTONIA

Para tener una mejor limitación de las armónicas en la red se elige una frecuencia de sintonía en las proximidades de las frecuencias armónicas por eliminarse (por ejemplo 300 Hz , 420 Hz , etc) . Así la mayor parte de la quinta y séptima armónica pasa a través del filtro , con lo que la red de alimentación deja de estar cargada con esta corriente .

Al calcular las armónicas de la corriente en la red después del filtrado hay que tener en cuenta que debido a los errores de sintonización puede ocurrir que los filtros tengan una frecuencia de sintonía que difiera ligeramente de la deseada . Si los filtros tiene potencias nominales demasiado pequeñas , sus curvas de paso de banda estarán tan próximas que este error de sintonía hará que empeore considerablemente el filtrado . La Figura # 2.17 se refiere a una instalación con un filtro para la quinta y otro para la séptima armónicas , y en ella se ve la amplitud de la corriente en función de su frecuencia expresada en porcentaje de

la corriente armónica generada por un convertidor .

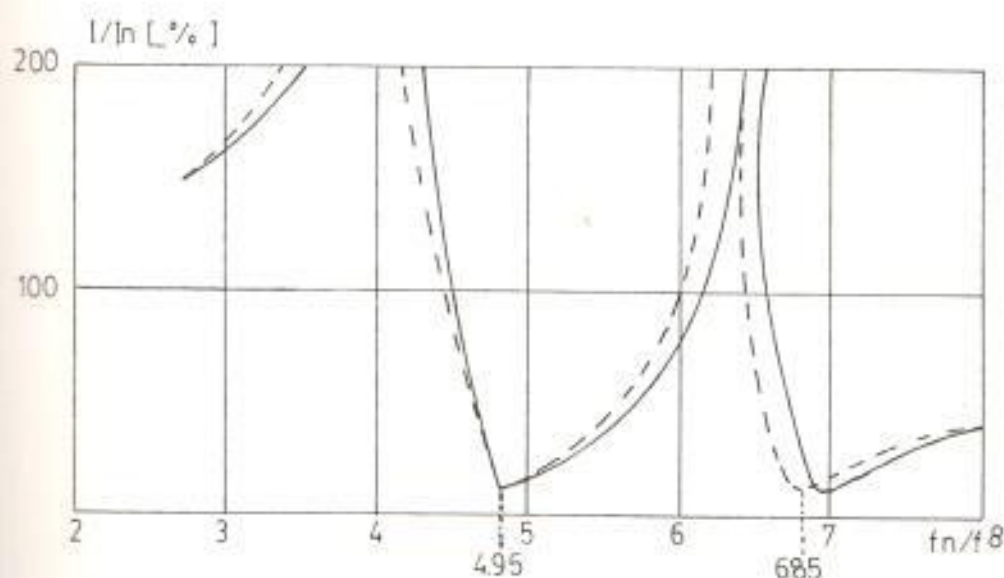


Figura # 2.17

Amplitud de la Corriente vs Frecuencia en %.

Puede verse que la corriente de la red aumenta con mayor rapidez cuando disminuye la frecuencia que cuando se produce un aumento igual de la frecuencia. Por esta razón se hace que la frecuencia ideal de sintonía de los filtros sea normalmente un poco menor que la frecuencia de la correspondiente armónica, lo cual está representado por la línea de trazos de la figura. La figura # 2.18 muestra tres curvas de la impedancia de un filtro  $|Z_f|$  vs la desviación de frecuencia  $\delta$ . Las curvas A y B son para un mismo valor de  $R$ . Las curvas B y C tienen un mismo valor de  $X_0$ ; ambas tienen la misma asíntota D (correspondiente a  $R=0$ ). Las curvas A y C

tienen la misma  $Q$  e igual pasabanda  $PB$ , los picos de la pasabanda son  $f=\pm 1/2.Q$  y el ancho de banda es  $1/Q$ .

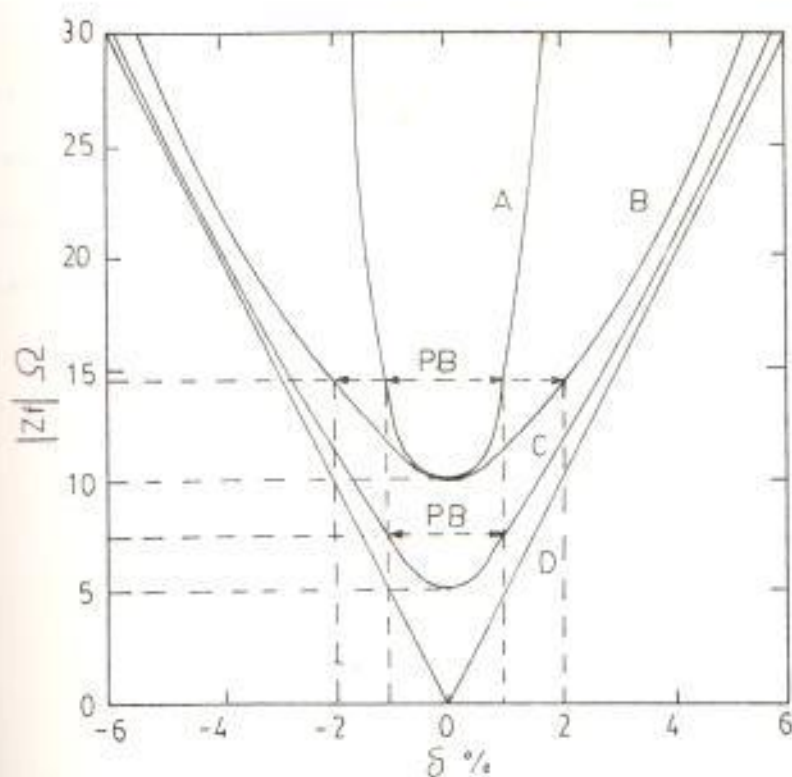


Figura # 2.18

Impedancia vs Desviación de Frecuencia

La ecuación de las asíntotas es :  $|X_f| = \pm 2.X_0.|\delta|$ .

Por lo tanto tenemos :

Curva	$R[\Omega]$	$X_0[\Omega]$	$Q$	(PB)
A	10	500	50	2%
B	10	250	25	4%
C	5	250	50	2%

Para estas curvas es aparente que la impedancia del filtro a una frecuencia resonante pueda ser disminuida, reduciendo  $R$ . En orden para tener la impedancia sobre una banda de frecuencias limitada por los puntos de máxima desviación de frecuencia esperada, sin embargo, también puede ser necesario reducir  $X_0$  para de este modo disminuir  $Q$ . De esto vemos que del grado de sintonización dependerá en parte el rendimiento del filtro.

#### 2.5.1 Respuesta típica de un Sistema de Filtros.

La figura # 2.19 indica la respuesta de una combinación paralela de dos filtros sintonizados a la quinta y séptima armónicas. El lugar geométrico de la impedancia compleja pasa esencialmente a través de cero en las frecuencias sintonizadas de 300 y 420 Hz, el pequeño balanceo puede ser principalmente debido a la resistencia de los reactores sintonizados.

La respuesta del filtro puede ser expresada en otros términos tales como: la magnitud y fase de la admitancia ó impedancia delineadas o tabuladas en función de la frecuencia. Los factores de distribución  $\{f$

y [5] mencionados en [13] también pueden ser usados . Programas de computación de flujo de carga armónico son usados para modelar la respuesta de la red entera incluyendo los filtros y las fuentes armónicas . Estos calculos toman en cuenta la variación de las impedancias en el sistema con la frecuencia .

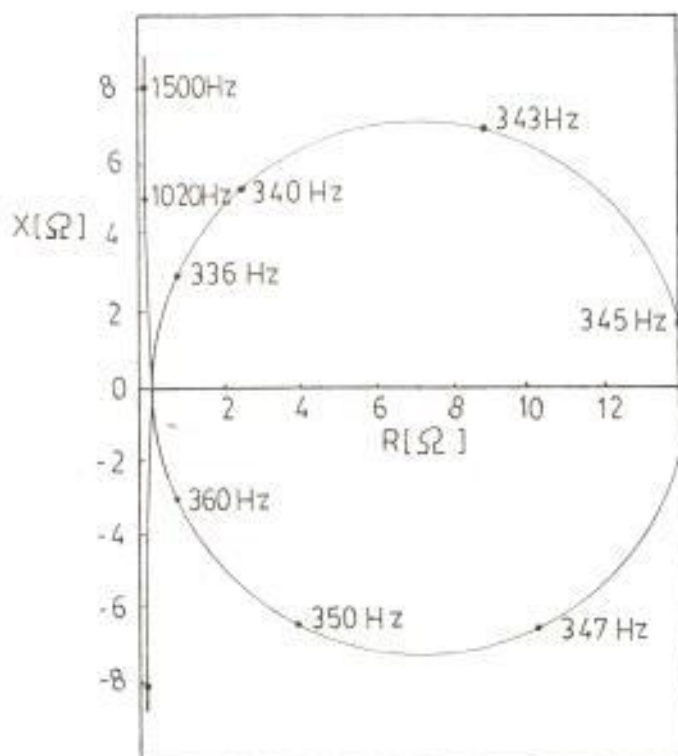


Figura # 2.19

Impedancia como Función de la Frecuencia .



## CAPITULO # 3

SELECCION DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL  
FILTRO

## 3.1 INTRODUCCION

Una vez analizado las condiciones que debe cumplir el filtro y teniendo un conocimiento determinado de los voltajes fundamental y armonico en la barra común pertinente , las corrientes y voltajes nominales de los capacitores , inductores y resistores pueden ser calculados , y con estos las potencias activa y reactiva y las pérdidas .

Para prevenir daño en estos componentes , sus valores nominales deben estar basados en las más severas condiciones supuestas , como un alto voltaje fundamental , grandes desviaciones de la frecuencia efectiva , corrientes armónicas provenientes desde otras fuentes y posibles resonancias entre el filtro y el Sistema de Potencia A.C..

El presente capítulo trata sobre las especificaciones básicas en la construcción de Capacitores , Inductores y Resistores utilizados en el diseño de filtros para suprimir a niveles



aceptables los armónicos ; y , un análisis elemental referente al equipo de control y protección.

### 3.2 REACTORES PARA FILTROS DE ARMONICAS

Los inductores usados en Circuitos Filtros necesitan ser diseñados considerando las altas frecuencias , el efecto piel y las pérdidas por Histéresis , que influyen en las pérdidas de Potencia y principalmente en el nivel de aislamiento.

#### 3.2.1 Clasificación.

Existen varias maneras de clasificar a los reactores , y en especial para filtros de armónicas es la siguiente :

- Por el número de fases : monofásico ó trifásico .
- Por el aislamiento : de aire o tipo seco , donde el núcleo y las bobinas no están sumergidas ni impregnadas de algún fluido aislante.
- Por su instalación y construcción : de instalación interna , que por su construcción

deben ser resguardados de la intemperie.

-Por el enfriamiento : refrigerados por circulación natural o forzada de aire.

### 3.2.2 Componentes Eléctricos

Los componentes básicos del reactor son :

- A.-Núcleo.-Está constituido por un núcleo no magnético , que por lo general es de aire.
- B.-Arrollamientos.-Constan de un material de alta conductividad , como cintas de cobre electrolítico , aluminio perfilado , etc. Tienen forma cilíndrica o rectangular y son concéntricos a las columnas magnéticas de núcleo , y que están convenientemente aisladas.
- C.-Armadura.-Los arrollamientos están reunidos por robustas armaduras y tirantes.
- D.-Aislamiento.-El inductor depende en gran parte de la corriente máxima RMS y del nivel de aislamiento requerido para resistir los sobrevoltajes por resonancia y switcheo . El aislamiento puede

ser de :

- Cilindros de papel
- Cartón de celulosa pura
- Tela barnizada
- Cintas de algodón
- Papel impregnado en aceite
- Papel bien seco
- Esmalte especial

La aislación entre los arrollamientos y la armadura pueden ser de cilindros de papel , cartón de celulosa pura , etc .

Hacia las extremidades , en los yugos , el aislamiento consiste de anillos de cartón , papel bien seco .

E.-Accesorios.- A más de lo anteriormente descrito consta también de :

- Aisladores pasa manos
- Ruedas de deslizamiento
- Ganchos de levantamiento
- Aisladores de fijación

La siguiente figura # 3.1 ilustra un Reactor 3Ø típico , en el que constan las distancias mínimas entre reactores , y las distancias magnéticas mínimas a las partes metálicas .

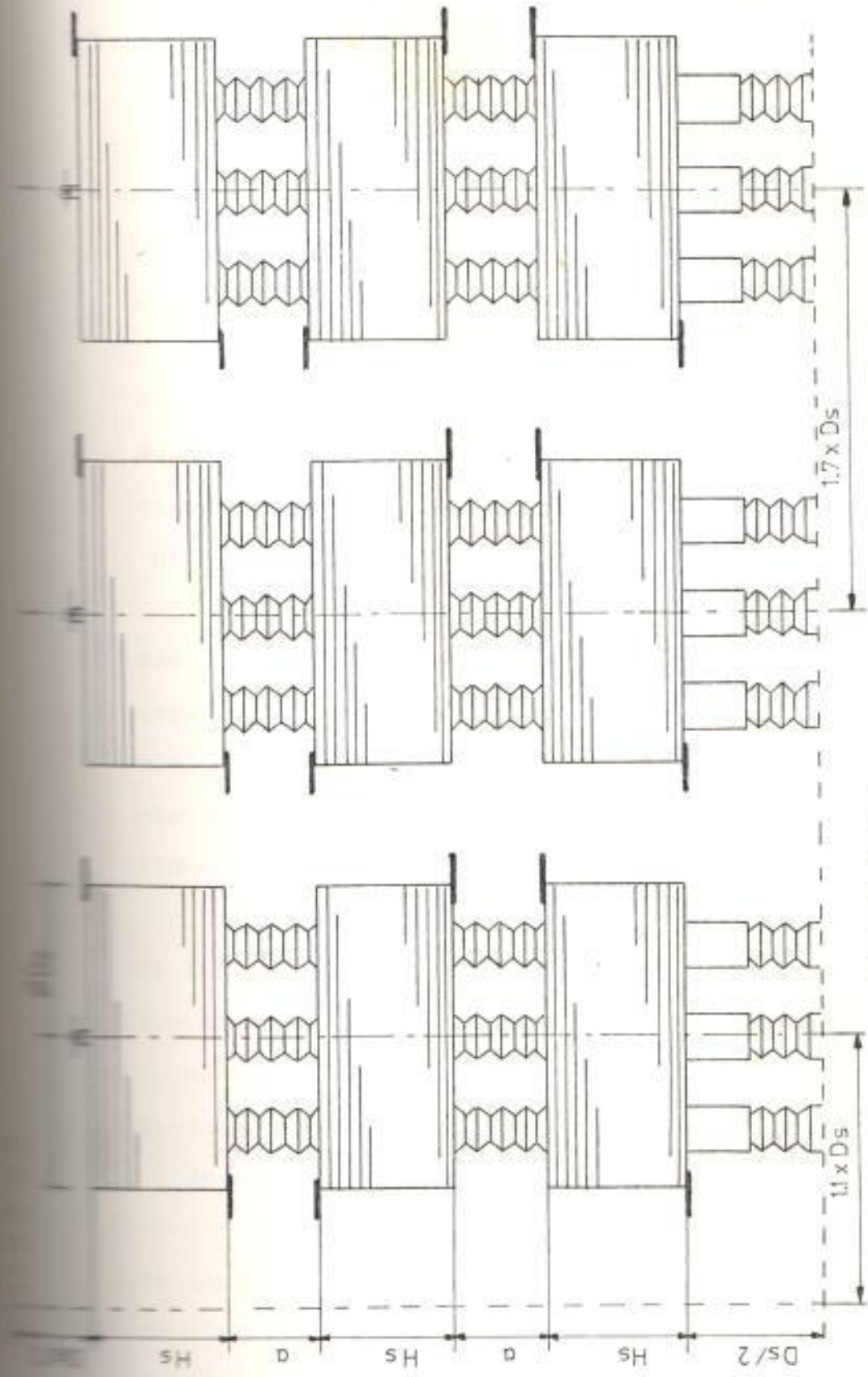


Figura # 3.1

Configuración Típica de un Reactor 30

### 3.3 CAPACITORES

La construcción básica de un capacitor para filtros de armónicas es la misma que la de un capacitor de potencia, teniendo ciertas modificaciones, especialmente en lo referente al dieléctrico.

El banco de capacitores para filtros de armónicas está compuesto de unidades Standard que están conectadas en serie y en paralelo para obtener el voltaje y los KVA nominales deseados.

Cada unidad consiste de varios rollos hechos de capas metálicas de aluminio alternadas con capas aislantes, este conjunto se encuentra hermeticamente cerrado en un tanque de acero relleno con un líquido aislante.

El aislamiento sólido consiste de:

- 1.- Varias hojas de papel especial impregnado con un líquido aislante b,
- 2.- Intercalando una hoja de papel entre dos hojas de material termoplástico.

Es inevitable que también exista una fina película de líquido entre el aislamiento sólido y la capa metálica, la cual tendrá un espesor que dependerá



de la presión conque los rollos sean formados .

Por lo general son tres líquidos impregnantes que están en uso :

- 1.- Aceite Mineral
- 2.- Triclorodifenilo
- 3.- Pentaclorodifenilo

De esta manera las propiedades dieléctricas dependen del papel , impregnante y el plástico (si es usado) en las cantidades usadas de cada uno .

La densidad del papel puede variar desde 0.8 a 1.2  $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$  y que puede ser impregnado con cualquiera de los tres líquidos . De estos el triclorodifenilo es el más usado en la presente , siguiendolo en uso el pentaclorodifenilo que es altamente refrigerante y de baja intensidad dieléctrica y constante dieléctrica .

Las propiedades más importantes de los capacitores son :

- Coeficiente de temperatura
- Potencia Reactiva por unidad
- Confiabilidad y vida útil
- Su costo

Valores aproximados de algunas de estas propiedades están indicados en la tabla # 3.1 .



TABLA # 3.1

## CARACTERIZTICAS DE LOS CAPACITORES

Dielectrico Solido	Densidad Del papel [gr/cm <sup>3</sup> ]	Impregnante	Coefficiente de Temperatura de la Capacitancia [10 <sup>-6</sup> x°C]	Constante Dielectrica total a 20°C	Factor de Disipacion (%)	Factor Relativo/unidad de Volumen
Papel	1.0	Aceite Mineral	+ 250	3.6	0.17	41
Papel	1.2	Aceite Mineral	+ 400	4.2	0.19	39
Papel	0.8	Pentaclorodifenilo	.....	...	0.20	87
Papel	1.0	Pentaclorodifenilo	- 400	5.2	0.28	59
Papel	1.2	Pentaclorodifenilo	- 50	5.4	....	..
Papel	0.8	Triclorodifenilo	- 750	5.5	0.20	100
Papel	1.0	Triclorodifenilo	- 500	5.5	0.28	66
Papel	1.2	Trocloreodifenilo	- 100	5.5	....	..
Plastico y papel	...	Triclorodifenilo	- 710	3.1	0.10	150-200

Para filtros sintonizados es deseable un capacitor con un coeficiente de temperatura muy bajo para evitar la desintonización provocada por cambios de la capacitancia debido a temperatura ambiente y por el propio calentamiento de los capacitores . Esta propiedad carece de importancia en filtros amortiguados o en capacitores utilizados para mejorar el factor de potencia .

Un coeficiente de temperatura bajo es obtenible con el uso de papel de alta densidad impregnado con pentaclorodifenilo , pero tiene la desventaja de que aumentan de tamaño y por ende aumenta su costo que uno igual que tenga plástico y papel impregnado con triclorodifenilo , siendo este último el más utilizado en capacitores para mejorar el factor de potencia , en filtros pasa alto y en filtros sintonizados automáticamente .

Es importante evitar la operación prolongada con sobrevoltajes con el fin de evitar la destrucción térmica y prevenir la ionización destructiva del dieléctrico .

Las siguientes normas son algunas de las que se siguen en la construcción de capacitores :

Inv. No. \_\_\_\_\_

- El máximo voltaje de trabajo que no perjudique la vida del capacitor es del 110% del valor nominal.
- Los KVAR de operación máxima permitible es del 135% de los KVAR nominales.
- Las pérdidas por conducción no excederan los 3.3 wattios por KVAR a 25°C de temperatura ambiente.
- La resistencia de descarga debe asegurar la reducción de voltaje a 50 voltios o menos luego de 5 minutos de desconexión .

Adicionalmente cada unidad esta equipada con un Bushing para la conexión de alto voltaje , y con una conexión a tierra que esta junto a la caja al mismo potencial .

Las unidades debidamente conectadas van montadas en estructuras , tal como indica la figura # 3.2 .

#### 3.4 EQUIPO DE CONTROL

Para un mejor funcionamiento del circuito de filtros dentro de la estación convertidora en un sistema de potencia y de acuerdo con los requerimientos de reactivos y el de suprimir a niveles acepta-

bles los armónicos , es necesario disponer de apro-

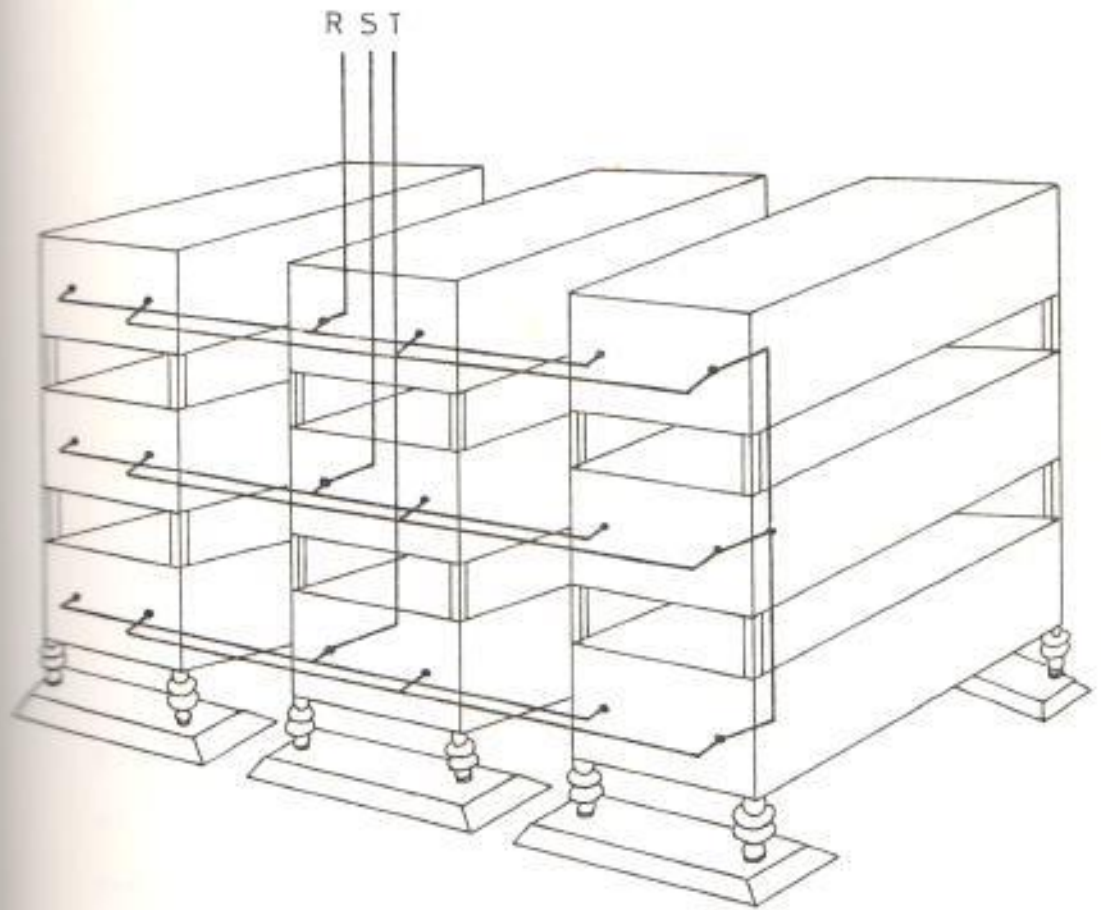


Figura # 3.2

Disposición Típica de un Banco de Capacitores

piados esquemas de control que permitan determinar el momento en que los filtros entren o salgan de operación .

En general los circuitos correspondientes a los



diferentes esquemas de control automático presentan fundamentalmente el mismo funcionamiento, es decir, la secuencia de operación para cualquier control es:

-Detección de la señal de operación.

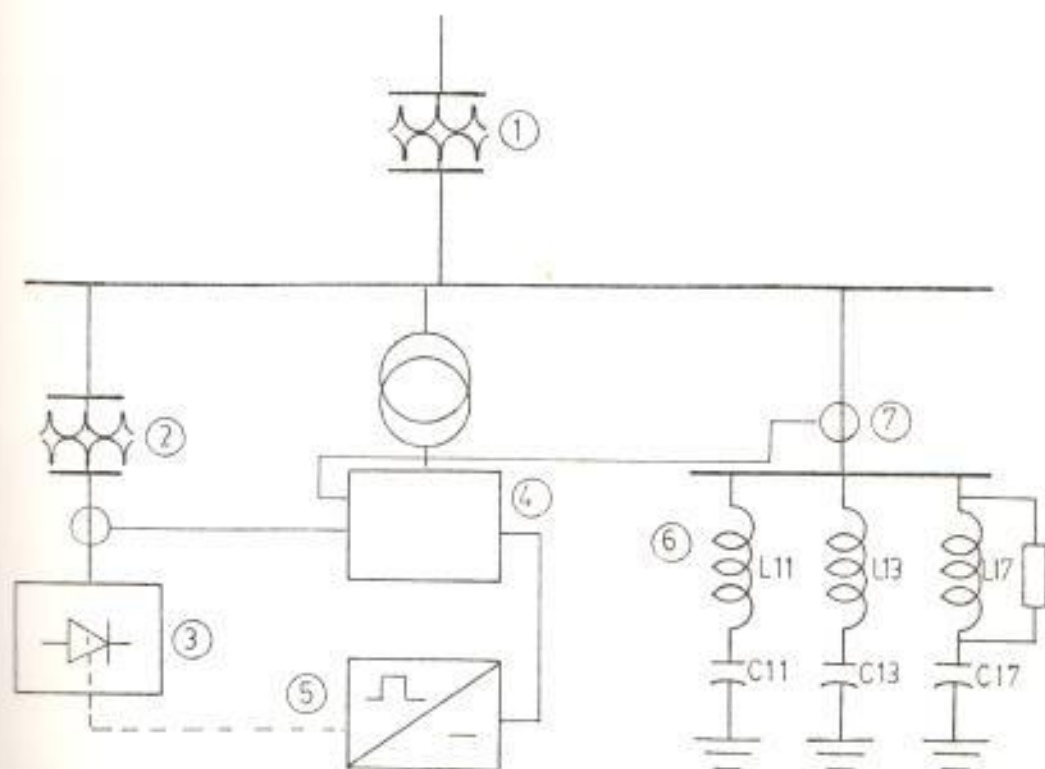
-Retardo de tiempo entre la detección de la señal y la orden de operación, con la finalidad de que el control no actúe indebidamente excitado por algún fenómeno transitorio.

-Apertura ó cierre del mecanismo de maniobra.

El esquema simplificado de la figura # 3.3 muestra el principio de controlar el circuito de filtros con los puntos de medición, regulación y la unidad de control del sistema.

- 1.- Transformador Principal
- 2.- Transformador del Convertidor
- 3.- Convertidor Estático
- 4.- Unidad de Control y Medida
- 5.- Control Digital
- 6.- Circuito de Filtrado
- 7.- Toma de Señales





- Figura # 3.3

Principio de Control de un Circuito de Filtros en una Estación Convertidora .

#### 3.4.1 Principio de Control de un Circuito de Filtros en un Horno de Arco.

La operación de hornos de arco puede aumentar las reacciones indeseables hacia la red que lo supe . En particular en redes de baja potencia , el cambio rapido de carga reactiva trae consigo una fluctuación inaceptable de alto voltaje , fluctuaciones que causan un

desagradable parpadeo . Estas fluctuaciones y reacciones debido a desbalanceamiento de cargas y armónicos son reducidas por un compensador estático (circuito de Filtros) , .

La descripción de compensador estático envuelve reactancias variables y bancos fijos de capacitores , formando circuitos de filtros sintonizados .

La operación de hornos de arco en redes de baja potencia , trae consigo problemas efectivos , es indeseable la corriente que llega a los consumidores privados por esta misma red de transmisión . La absorción de potencia activa y reactiva en el horno de arco es sujeto periodicamente a fluctuaciones fortuitas . El objeto del circuito de filtros (compensador estático) es el de obtener efectos resultantes tales como :

- Mejorar el Factor de Potencia .
- Reducir las fluctuaciones de voltaje (Flicker)
- Reducir los armónicos a niveles aceptables .
- Balancear las cargas desbalanceadas .

El sistema de compensación puede suplir fase

a fase , corrigiendo y balanceando las partes capacitivas e inductivas de la potencia reactiva , el circuito básico es mostrado en la figura # 3.4

La Figura # 3.5 muestra el principio de controlar la potencia reactiva inductiva con los puntos de medición , la regulación y el sistema de control de la unidad , logrando con esto mejorar el factor de potencia , eliminar el flicker , reducir a niveles aceptables los armónicos , etc .

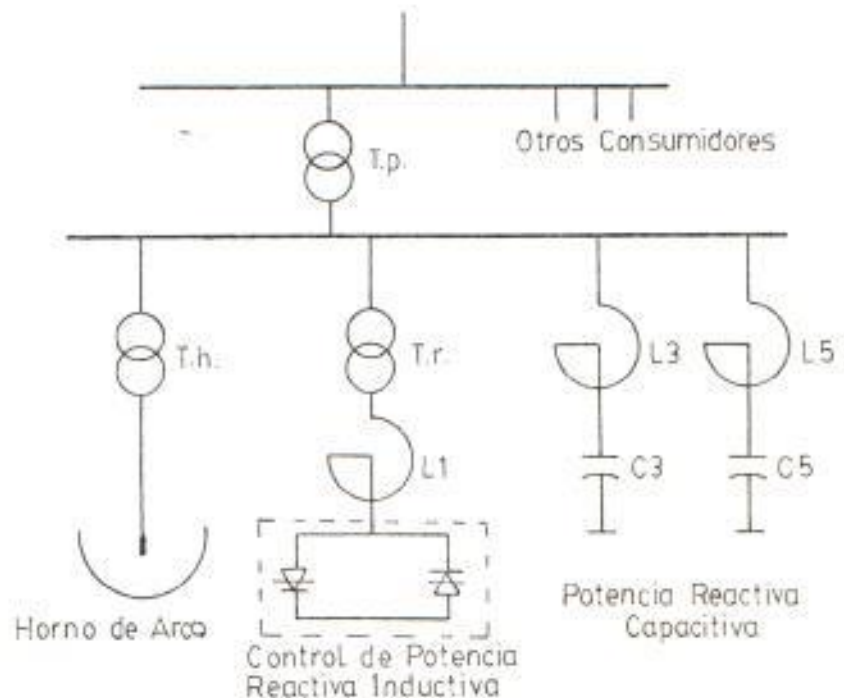


Figura # 3.4

Compensador Estático con control de Reactancias por Tiristores .

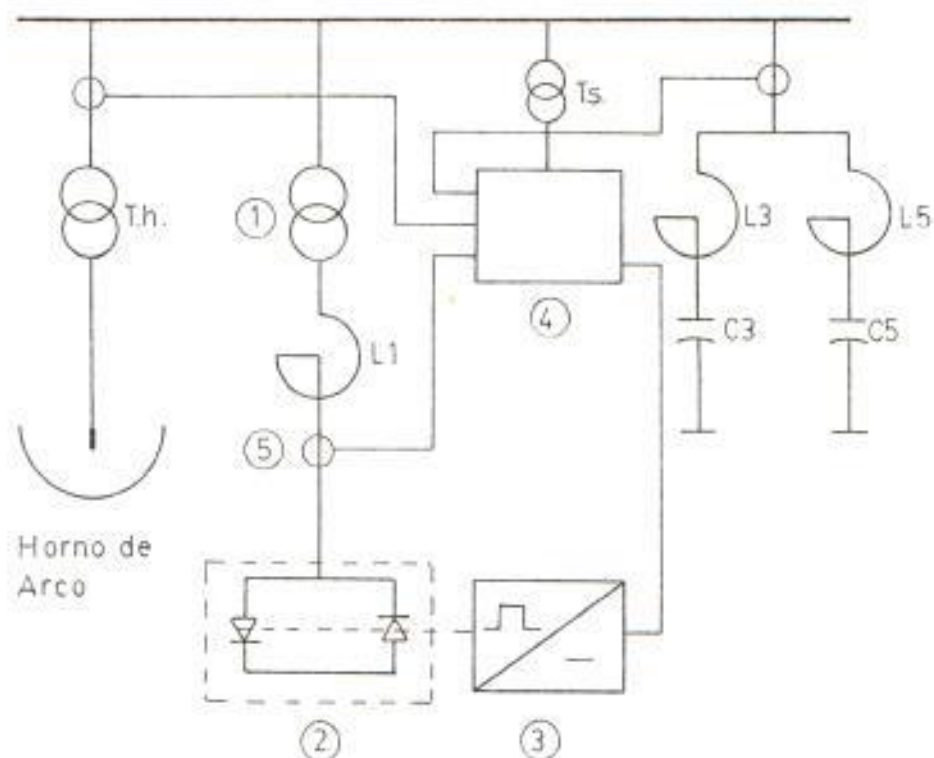


Figura # 3.5

Principio de Control de la Potencia Reactiva Inductiva .

En donde :

- 1.- Transformador de alta impedancia .
- 2.- Convertidor estático .
- 3.- Control digital .
- 4.- Unidad de control y medida .
- 5.- Toma de señales .

### 3.4.2 Protección del Circuito de Filtrado.

En ciertas estaciones convertidoras el circuito de filtrado es conectado como un todo a la barra 3 $\phi$  a travez de u disyuntor , tal como se ilustra en la figura # 3.5 ; mientras que en otras estaciones cada brazo del filtro es conectado a la barra por un disyuntor con un interruptor para aterrizamiento , figura # 3.6 .

Generalmente en estaciones convertidoras de gran tamaño utilizan resistencias de paso en los disyuntores con el fin de reducir los sobrevoltajes transientes durante la energización del circuito de filtros .

#### 3.4.2.1 Protección del Inductor.

Con el proposito de reducir el nivel de aislamiento y por ende el costo , se conecta en paralelo con el inductor un pararrayos . El pararrayos puede ser capaz de no conducir para un voltaje de estado estable , que puede ser la suma aritmética de los valores pico del voltaje a frecuencia nominal y del voltaje armónico .



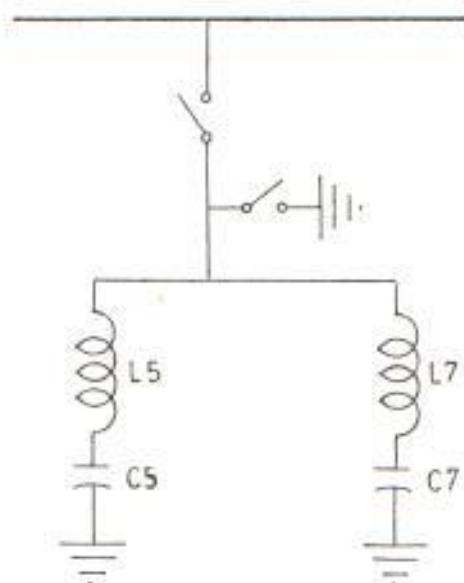


Figura # 3.6

Conexión del filtro a la barra principal

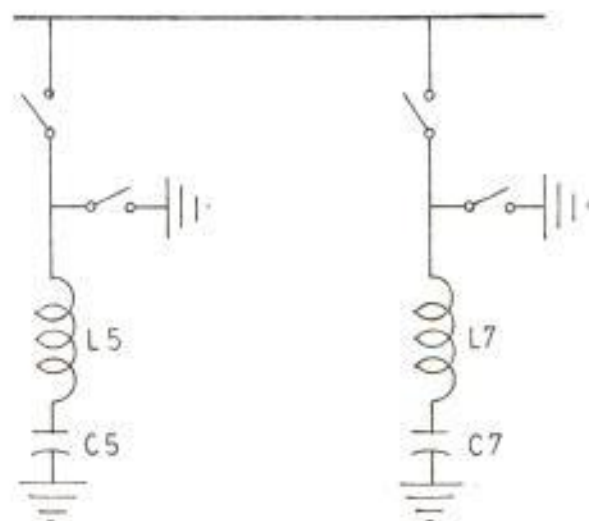


Figura # 3.7

Conexión individual de cada brazo del filtro

Lee. No. \_\_\_\_\_

Este voltaje es mucho menor que el pico de sobrevoltaje determinado por el pararrayos en el circuito principal de Potencia .

Consideraciones similares son tomadas en la protección de inductores en los filtros pasa alto . La Figura # 3.8 ilustra esta protección .

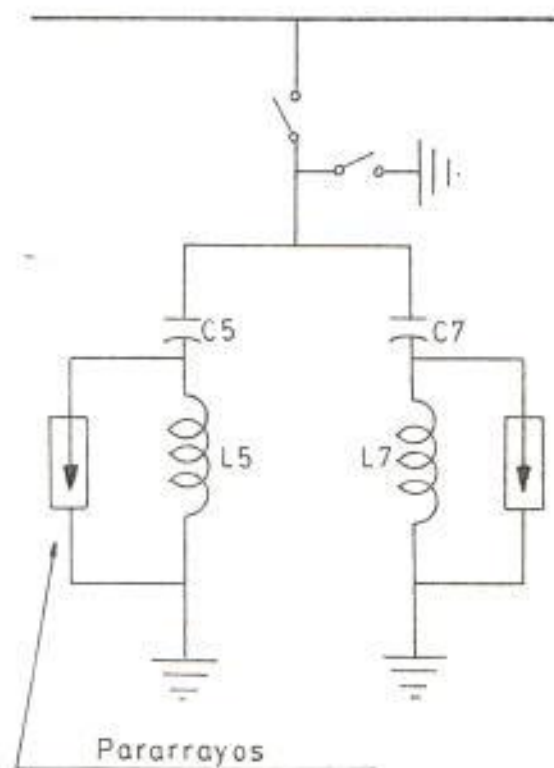


Figura # 3.8

Protección de los Inductores con Pararrayos .

#### 3.4.2.2 Protección del Capacitor.

Los capacitores no necesitan protección de sobrevoltaje a más de la prevista por el circuito principal al cual están conectados . Protección para posibles cortocircuitos en unidades individuales es proporcionado por sus propios fusibles internos .

En las estaciones convertidoras , las fallas en los capacitores del filtro son detectados por Relés en el que las corrientes fundamentales son comparadas en dos brazos del filtro conectados a la misma fase .

Los disyuntores , dispositivos de desconexión y otros dispositivos en serie con los capacitores deberán ser diseñados para soportar por lo menos el 135% de la corriente nominal , y el desfaseamiento de  $90^\circ$  entre la corriente y el voltaje.

En ciertos esquemas es utilizada la

protección por desbalanceamiento entre bancos de capacitores, tal como ilustra la Figura # 3.9.

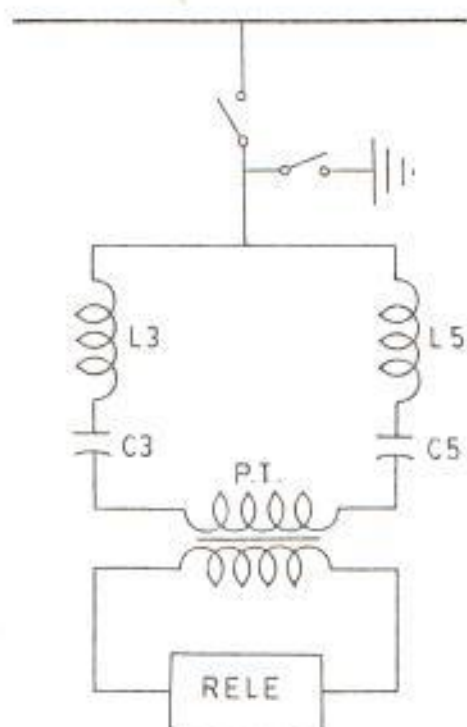


Figura # 3.9

Protección de Desbalanceamiento de Bancos de Capacitores de los filtros

#### 3.4.2.3 Protección de las Resistencias.

En filtros sintonizados, el pararrayos puede ser conectado en paralelo con las combinaciones serie de resistencias e inductores, como el

esquema de la figura # 3.10 . En filtros pasa alto , el resistor puede soportar el mismo sobrevoltaje del inductor y puede ser protegido por el mismo pararrayo .

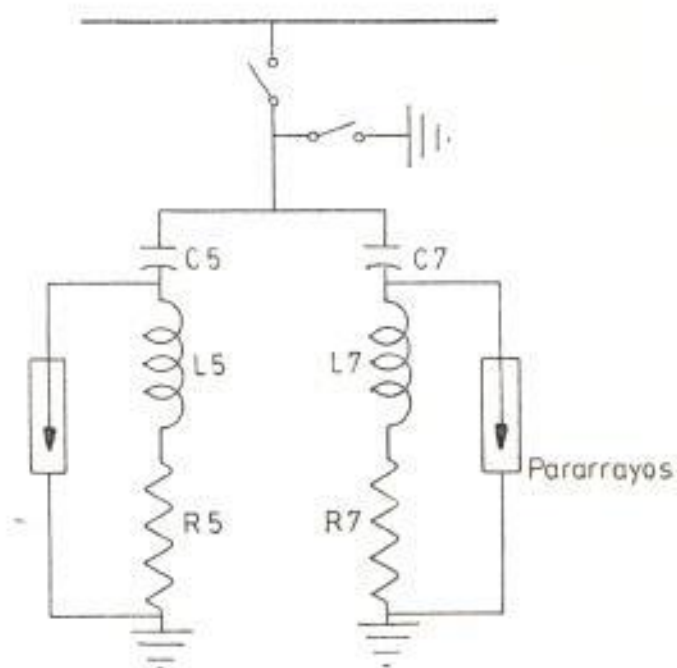


Figura # 3.10

Protección por pararrayos a resistencias e inductores .



## CAPITULO # 4

## CALCULO DE LOS COMPONENTES DEL FILTRO

## 4.1 CALCULO DEL REACTOR

Entre las principales características del reactor se tienen :

La impedancia interna que consta de dos componentes , la reactancia derivada del efecto del flujo de dispersión en los devanados y la resistencia representando las pérdidas correspondientes al flujo de corriente como : pérdidas del conductor  $I^2.R$  , pérdidas parásitas por corrientes de Eddy . El valor de la resistencia dependerá del material , longitud y sección de los conductores en los arrollamientos .

La magnitud de la impedancia es la suma vectorial de la resistencia y reactancia expresada en ohmios por fase . Normalmente la impedancia del reactor es aproximadamente igual al valor de la reactancia debido a que la componente resistiva es pequeña.

## 4.1.1 Definiciones y Fórmulas Básicas.

Todos los cálculos del reactor son efectuados

por fase .

-Tensión nominal del sistema  $V$  (KV).-La tensión nominal del sistema es el valor fase a fase .

-Corriente nominal del reactor  $I$  (A).-La corriente nominal es la corriente máxima continua para la cual el reactor es proyectado .

-Inductancia nominal  $L$  (H).-Es la inductancia nominal del reactor .

-Reactancia nominal  $X_l$  ( $\Omega$ ).-Es la reactancia inductiva nominal del reactor en una frecuencia  $f$  especificada .

$$X_l = 2.\pi.f.L \quad (4.1)$$

-Tensión nominal del reactor  $V_r$  (V).-Es la caída de tensión nominal con corriente nominal y reactancia nominal .

$$V_r = I.X_l \quad (4.2)$$

$$V_l (\%) = \frac{I.X_l.\sqrt{3}.100}{V} \quad (4.3)$$

$V_l$ .-Es la caída de tensión nominal como porcentaje de la tensión del sistema .

-Corriente de cortocircuito del reactor  $I_c$  (KA.RMS).-Corriente de cortocircuito máxima que puede fluir por el reactor , con impe-

dancia de la red igual a cero .

En caso que la caída de tensión nominal sea menor que 5% de la tensión , la corriente de cortocircuito máxima es definida generalmente como 20 veces la corriente nominal .

$$I_c = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot X_1} \cdot \frac{I \cdot 100}{V_r} \quad (4.4)$$

-Pico asimétrico de la corriente de cortocircuito  $I_p$  (A).-Es dependiente de la relación entre la reactancia total del sistema y la resistencia total del sistema . Generalmente se define :

$$I_p = 2.55 \cdot I_c \quad (4.5)$$

-Potencia nominal del reactor  $Q_1$  (VA).-

$$Q_1 = I^2 \cdot X_1 \quad (4.6)$$

-Pérdidas  $P(w)$ .-Las pérdidas totales del reactor es la suma de las pérdidas en el conductor , en el circuito magnético , pérdidas parásitas (dispersión). Las pérdidas son determinadas a voltaje y frecuencia nominal .

$$P_t = P_{f1} + P_{f2} + \dots \quad (4.7)$$

## 4.2 CALCULO DEL CAPACITOR

→ continuación se definen algunos conceptos y fór-

mulas básicas relacionadas con los capacitores.

-Capacitancia nominal  $C$ .-Es lo que define al condensador .

-Coeficiente de temperatura de la capacitancia  $\alpha$

-Es la variación media de la capacidad dentro de un cierto margen de temperatura .

$$\alpha = \frac{2(C_2 - C_1)}{(C_2 + C_1)(T_2 - T_1)} \quad (4.8)$$

-Tensión nominal  $V_n$ .-Es el valor eficaz de una tensión sinusoidal a la frecuencia fundamental  $f$  . A partir de este valor se calcula el aislamiento entre las armaduras , y partiendo de la tensión nominal  $V$  el aislamiento de la armadura respecto a la carcasa . Estos valores deben elegirse según la operación más desfavorable que puede presentarse en los bornes durante un lapso de tiempo muy largo .

-Tensión de cresta  $V_s$ .-Es el máximo valor de cresta que se puede presentar en un condensador

-Tensión límite máxima  $V_g$ .-Es la tensión máxima de servicio permanente .

-Reactancia nominal  $X_c$  ( $\Omega$ ).-Es la reactancia capacitiva a una frecuencia  $f$  especificada

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (4.9)$$

-Potencia nominal  $\Phi$  (VA).-Es llamada también

potencia reactiva y es igual a :

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (4.10)$$

$$Q = \frac{V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot (10^{-6})^{-\delta}}{1000} \quad [\text{KVAR}] \quad (4.11)$$

-Potencia límite permanente  $Q_g$ . -Es la máxima potencia admisible en servicio permanente .

-Energía nominal  $W$ . -Es la cantidad de energía correspondiente a la tensión y capacitancia nominales .

$$W = 0.5 \cdot C \cdot V \quad (4.12)$$

-Potencia de pérdidas  $P_v$ . -Es la potencia activa que absorbe un condensador de corriente alterna

-Factor de pérdidas  $\text{tg} \delta$  . -Es la relación entre la Potencia activa y la Potencia reactiva .

$$\text{tg} \delta = \frac{P_v}{Q} \quad (4.13)$$

$$\text{tg} \delta = R_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (4.14)$$

-Resistencia de aislamiento  $R_i$  ( $\Omega$ ). -Es la relación entre la tensión de corriente continua aplicada y la corriente que circula después de cierto tiempo (60 seg.). Depende de la temperatura , tensión y del tiempo .

El producto de la resistencia de aislamiento con



la capacitancia sirve como medida de la calidad del aislamiento ó dieléctrico .

$$R_i = \rho \cdot \frac{a}{s} \cdot 10^6 = \frac{\rho}{\epsilon \cdot s} \cdot 10^6 \text{ [M}\Omega\text{]} \quad (4.15)$$

Donde :

$$\rho = \text{Resistividad en } \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$\epsilon = \text{Conductividad en } \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{m}^2}$$

$$s = \text{Superficie en } \text{m}^2$$

-Constante de tiempo t (seg).-Es el tiempo que se demora el condensador en cargarse o descargarse

$$t = C \cdot R_i \text{ [Segundos]} \quad (4.16)$$

-Fórmula general del condensador de placas paralelas .

$$C = n \cdot \epsilon \cdot \frac{s}{a} \cdot 10^{-6} \text{ [uF]} \quad (4.17)$$

-Fórmula general del condensador bobinado :

$$C = 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot \epsilon \cdot l \cdot b}{a} \text{ [uF]} \quad (4.18)$$

Donde :

n=Número de capas del dieléctrico

s=Superficie total de las capas activas en  $\text{m}^2$  .

a=Distancia entre las armaduras en m

$\epsilon$ =Constante dieléctrica

l=Longitud capacitivamente activa del

bobinado .

b=Anchura capacitivamente activa del bobinado .

#### 4.3 CALCULO DE LA RESISTENCIA

De acuerdo a las características del diseño se tendrá una cierta resistencia . Esta resistencia generalmente consta de dos componentes : Una que es debida a la construcción misma del reactor y el capacitor , de la cual dependerá el factor de calidad , y la otra resistencia es la que se le agrega en serie o en paralelo con el inductor y el capacitor para que actúe amortiguando en parte los sobrevoltajes que se producen debido a resonancia. En muchos esquemas , el factor de calidad dependerá del valor de las dos resistencias .

$$R = \frac{X_L}{Q} \quad (4.19)$$

En el ANEXO C se da una lista de las especificaciones técnicas que los filtros deben tener .

#### 4.4 CALCULO DE LA POTENCIA Y EL RENDIMIENTO

##### 4.4.1 Potencia de los Filtros.

La potencia de un filtro es definida como la

potencia reactiva que el filtro suministra a la frecuencia fundamental, cuyo valor es prácticamente igual a la potencia del banco de capacitores, teniendo en cuenta que la potencia reactiva inductiva del reactor a la frecuencia fundamental es significativamente menor que la potencia reactiva capacitiva del banco de capacitores. El dimensionamiento de los elementos del filtro tiene que considerar las potencias reactivas a la frecuencia fundamental y a la frecuencia armónica para la cual fue proyectado el filtro.

$$Q_f = Q_n \quad (4.20)$$

La potencia reactiva total del circuito de filtrado es igual a la suma de las potencias reactivas de cada brazo del filtro.

$$Q_f = Q_3 + Q_5 + \dots \quad (4.21)$$

La potencia indicará el tamaño del filtro; y corresponderá al ingeniero diseñador seleccionar la capacidad de cada brazo del filtro, completando así la potencia reactiva que se quiera compensar.

Fabricantes como ASEA, BROWN BOVERI, ER-EQUIPEMENT, no tienen una forma definida para seleccionar el tamaño de los ramales del

filtro , que dependerán de las condiciones de diseño.

#### 4.4.2 Rendimiento de los Filtros.

El rendimiento del filtro depende del grado de sintonización , del factor de calidad y de las pérdidas eléctricas .

Las pérdidas eléctricas son principalmente por disipación de calor (Efecto Joule), considerando que las pérdidas por corrientes de Eddy , Efecto pelicular , efecto proximidad , son despreciables . Considerando esto , el rendimiento es :

$$\eta = \frac{P - P_p}{P} \cdot 100 \quad (4.22)$$

Donde :

$\eta$ =Rendimiento

P=Potencia del filtro

$P_p$ =Potencia disipada por el filtro

#### 4.5 ANALISIS DE SOBREVOLTAJES DEBIDO A RESONANCIAS

Para diseñar con ciertos índices de confiabilidad se deben tomar en consideración varios factores , uno de estos es un aislamiento adecuado , el nivel

básico de aislamiento del circuito de filtrado debe ser suficientemente alto como para soportar las sobretensiones que se presentan durante su operación sin que ocurran flameos y por supuesto que los materiales usados como aisladores en su concepción, no deben estar afectados hasta donde sea posible por el calentamiento y la contaminación.

#### 4.5.1 Sobrevoltajes debido a Resonancias Serie.

Debido al hecho de que el circuito de filtrado es un equipo de alto costo es necesario protegerlo de las condiciones ambientales, por lo que generalmente están ubicados en lugares cubiertos, razón por la cual solo pueden existir problemas de sobrevoltajes internos, salvo un sobrevoltaje externo cercano al sistema de filtros, que puede ser provocado por un rayo o fallas del sistema.

Los sobrevoltajes internos aparecen al producirse la condición de resonancia serie, la cual es una función propia de los circuitos serie RLC, que constituyen los circuitos simples de filtrado (filtro simple sintonizado). La condición de resonancia serie se da cuando la reactancia inductiva es igual a la



reactancia capacitiva ,por lo que la impedancia del filtro es igual a la resistencia

$$Z_f = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \approx R \quad (4.23)$$

La resistencia  $R$  del filtro influirá directamente en el nivel de sobrevoltaje , ya que esta resistencia actúa amortiguando los picos de sobrevoltaje . De ahí que el factor de calidad del filtro requiere de un análisis especial . Si el factor  $Q$  es reducido , aumentará el valor de  $R$  , por lo que el sobrevoltaje en estado estable también se reducirá , sin embargo el tiempo que toma en formarse el sobrevoltaje también es reducido . Por lo general cuando se tiene un valor de  $Q$  de 20 , el sobrevoltaje se forma en alrededor de 6 ciclos , mientras que para un valor de  $Q$  de 40 , toma un tiempo de formación de alrededor de 11 ciclos .

Al analizar la característica impedancia vs frecuencia del filtro , se ve que esta tiene un pico que depende exclusivamente del valor de la resistencia del reactor sintonizado a la frecuencia a la que se produce la condición resonante . El ancho de esta curva o la pendiente de sus lados depende también de los

valores de los otros elementos . El ancho de esta curva es llamada como ancho de banda , que también es expresada como función del factor de calidad  $Q$  .

Es necesario hacer notar de que la agudeza de la curva caracteriztica de un circuito resonante , está determinada por la máxima cantidad de energía que puede almacenarse en el circuito , en comparación de la energía que se pierde durante un periodo completo de la respuesta . Así pues  $Q$  se puede definir como

$$Q = 2\pi \frac{\text{Máxima energía almacenada}}{\text{Energía total perdida por periodo}} \quad (4.24)$$

#### 4.5.2 Sobrevoltajes debido a Resonancias Paralelo.

La resonancia paralelo se da entre la combinación Filtros / Sistema A.C. .

Al existir esta condición puede producirse la oscilación de elevadas corrientes que son excitadas por la corriente de frecuencia resonante . Estas corrientes fluyendo a travez de las impedancias del sistema de potencia , producen elevados voltajes armónicos , los

cuales sumados al voltaje de frecuencia fundamental producen formas de onda de voltaje distorsionadas. Esta distorsión produce que las corrientes armónicas fluyan al resto del sistema. Es muy dificultoso en estudios de sobrevoltaje debido a resonancias paralelo el indicar los efectos para cualquier parámetro dado del sistema, como para varios parámetros que son interdependientes.

Por ejemplo la variación de la frecuencia de resonancia de la combinación Filtro / Sistema A.C., que cambia el nivel de cortocircuito en la barra del filtro, puede tener una fuerte influencia en los sobrevoltajes. Cualquier cambio que sea propuesto debe ser cuidadosamente estudiado con todos los parámetros debidamente representados, con el fin de evitar de que ocurran grandes sobrevoltajes que conlleven a producir daño o mal funcionamiento de los equipos de un sistema de potencia.

Los mejores procedimientos para reducir la probabilidad y/o la magnitud de que ocurran sobrevoltajes son los siguientes:

-El incrementar el tamaño de los filtros

para evitar la resonancia entre filtros y el sistema de potencia .

-El incluir filtros de 5ta y 7ma armónicas en todos los esquemas , sean estos para convertidores de 6 y 12 pulsos .

-Reduciendo la impedancia del sistema A.C. (con lo que se incrementa el nivel de cortocircuito) .

-Y evitar grandes pasos de regulación .

## CAPITULO # 5

## ANALISIS DE COSTOS

## 5.1 ESTUDIO ECONOMICO DEL FILTRO

Un filtro efectivo con una supresión adecuada de armónicos y con un buen suministro de Potencia reactiva al menor costo es deseable , pero teniendo en cuenta que tal vez no todo esto sea requerido . El costo de las pérdidas incurrido en los filtros puede ser cargado a la potencia reactiva que este suministra , con una buena filtración . Las siguientes asunciones son usualmente hechas en el análisis de costos de los componentes del filtro .

1.-En una instalación típica , un banco de capacitores consiste de varias unidades de capacitores convenientemente conectadas de acuerdo a las condiciones del sistema , teniendo una relación nominal a un voltaje de operación prescrito y convenientemente protegido por un fusible externo .

Por algunas razones , una o más unidades son



Inv. No. \_\_\_\_\_

adicionadas a cada grupo serie , con lo que se llega a un razonable costo exacto por MVAR ó TAMANO . Muchas veces la situación se complica por la disponibilidad de unidades standard con diferentes relaciones nominales , como por ejemplo de 50,100,150 KVAR , etc. Y el incremento de costos varia para diferentes tamaños de bancos de capacitores . Aunque ciertos factores tienen que ser incluidos en el desarrollo de una adecuada ecuación de costo , aquí se asume que el costo de los capacitores es proporcional a su potencia .

2.-Aunque el costo de los inductores del filtro dependen grandemente en el método de construcción (unidades refrigeradas o aisladas con aceite , reactores refrigerados con aire natural de construcción abierta).Estos costos no varían significativamente para unidades de diferentes capacidades . El costo aproximado usado en este análisis es de la forma :

$$\text{COSTO DEL INDUCTOR} = UK + UL(\text{MVART})$$

Donde :

UK=Componente de costo constante

UL=Incremento del costo del inductor por

MVAR .

3.-La razón de potencia del resistor , necesario para ajustar el Q en cada ramal del filtro puede afectar el costo en cierta magnitud . En un análisis general es dificultoso el predecir la resistencia nominal , por esto es obviamente dependiente de la naturaleza del factor de calidad Q del inductor . Por esta razón , y por que el costo de un resistor enfriado por aire es menor comparado con otro tipo de enfriamiento , un costo constante del resistor es tomado en cuenta en el análisis .

4.-Se asume que la resistencia del inductor para los propositos de estimación de pérdidas de potencia es constante para todas las frecuencias .

#### 5.1.1 Simple Filtro Sintonizado.

En un circuito de un factor de calidad Q grande , se puede asumir que :

$$V_c = V_l + V_s \quad (5.1)$$

Donde :

$V_c$ =Voltaje del Capacitor

$V_l$ =Voltaje del Inductor

$V_s$ =Voltaje del sistema

El tamaño del filtro es expresado como :

$$S = \frac{V_s}{X_c - X_l} \quad (5.2)$$

Donde :

$X_c$  y  $X_l$  son las reactancias del capacitor y del inductor a la frecuencia fundamental .

Para un filtro sintonizado al armónico  $n$  se tiene : -

$$X_o = n \cdot X_l = X_c / n \quad (5.3)$$

$$X_l = X_c / n \quad \text{y} \quad V_l = V_c / n \quad (5.4)$$

Por lo tanto :

$$S = V_s^2 / [X_c (1 - 1/n^2)] = (V_s^2 / X_c) [n^2 / (n^2 - 1)] \quad \text{[MVAR]} \quad (5.5)$$

También :

$$V_c - V_l = V_c (1 - 1/n^2) = V_s \quad \text{[Kv]} \quad (5.6)$$

$$V_c = V_s [n^2 / (n^2 - 1)] \quad \text{[Kv]} \quad (5.7)$$

Donde :

S=Tamaño del filtro en MVAR

n=Orden del armónico

Xo=Reactancia inductiva o capacitiva al  
n armónico .

Xl=Reactancia inductiva a la frecuencia  
fundamental

Xc=Reactancia capacitiva a la frecuencia  
fundamental .

Vc=Voltaje del capacitor

Vl=Voltaje del inductor

Vs=Voltaje del Sistema

Las cargas para cada componente del filtro  
son determinadas para la evaluación de cos-  
tos en los párrafos siguientes :

## 5.2 COSTO DEL REACTOR

Carga Fundamental

$$Vl^2 / Xl = (Vc / n^2)^2 \cdot (n^2 / Xc) = Vc^2 / n^2 \cdot Xc \quad (5.8)$$

$$Vl^2 / Xl = (S / n^2) [n^2 / (n^2 - 1)] \quad \text{[MVAR]} \quad (5.9)$$

Carga Armónica

$$In^2 (Xl / n) = [(In^2 \cdot Vs^2) / (S \cdot n)] [n^2 / (n^2 - 1)] \quad \text{[MVAR]} \quad (5.10)$$

Para propósitos de costo , es conveniente el consi-

derar las pérdidas en la resistencia efectiva total  $R$ , Donde :

$$R = \frac{X_0}{Q} = X_c/n.Q \quad (5.11)$$

La corriente fundamental es :

$$I_1 = S/V_s \quad [\text{KA}] \quad (5.12)$$

Y las pérdidas de potencia totales son :

$$(I_1^2 + I_n^2).R = (S^2/V_s^2).X_c/n.Q + I_n^2.X_c/n.Q \quad (5.13)$$

$$= [S^2/n.Q] \{ (1/S) [n^2 / (n^2 - 1)] \} \\ + [I_n^2.V_s^2/n.S.Q] [n^2 / (n^2 - 1)]$$

$$(I_1^2 + I_n^2).R = [S/n.Q + I_n^2.V_s^2/nSQ] [n^2 / (n^2 - 1)] \times 10^3 \quad [\text{KWa}]$$

Para propósitos de comparación, el costo de pérdidas de energía es expresado en términos del costo del capital equivalente, por el uso de un factor de valor presente.

$$PV = \left[ \frac{1 - (1 + i)^{-N}}{i} \right] \quad (5.14)$$

Donde :

PV=Factor de valor presente

i=Interes

N=Promedio de vida del filtro

Así el costo a valor presente de las pérdidas de energía es :



$$PV.UU.FU \times 365 \times 24 \times (\text{pérdidas de potencia total})$$

$$= 8760.PV.UU.FU. (\text{Pérdidas de potencia total}) \quad (5.15)$$

Donde :

PV=Factor de valor presente

UU=Costo de las pérdidas de energía por  
KWh

FU=Factor de Utilización del filtro .

### 5.3 COSTO DEL CAPACITOR

Carga fundamental

$$V_c^2 / X_c = (V_s^2 / X_c) [n^2 / (n^2 - 1)]$$

$$V_c^2 / X_c = S. [n^2 / (n^2 - 1)] \quad [\text{MVAR}] \quad (5.16)$$

Carga armónica

$$I_n^2. (X_c/n) = [(I_n^2. V_s^2) / (S.n)] [n^2 / (n^2 - 1)] \quad [\text{MVAR}] \quad (5.17)$$

Pérdidas de potencia

$$KCL (\text{carga total}) = KCL. [S + (I_n^2. V_s^2) / (S.n)] [n^2 / (n^2 - 1)] \quad (5.18)$$

Donde :

V<sub>c</sub>=Voltaje del capacitor

X<sub>c</sub>=Reactancia del capacitor

V<sub>s</sub>=Voltaje del sistema

S=Tamaño del capacitor en MVAR

n=Orden del armónico

$I_n$ =Corriente armónica

$KCL$ =Factor de pérdidas en los capacitores  
en  $KW/MVAR$

Considerando estas expresiones y las del párrafo anterior obtenemos la fórmula completa para el costo total .

$$TCOST=UT + [n^2 / (n^2 - 1)] \{ UC \cdot (S + \frac{Vs^2 \cdot In^2}{n \cdot S}) + UL \cdot (S/n^2 + \frac{Vs^2 \cdot In^2}{n \cdot S}) + 8760 \times PV \cdot UU \cdot FU \cdot [KCL \cdot (S + \frac{Vs^2 \cdot In^2}{n \cdot S}) + \frac{3}{10} \cdot (\frac{S}{n \cdot Q} + \frac{Vs^2 \cdot In^2}{n \cdot S \cdot Q})] \} \quad (5.19)$$

Reduciendola a :

$$TCOST= UT + A \cdot S + B/S \quad (5.20)$$

Donde :

$UT$ =Costo total constante del ramal del filtro .

$UC$ =Incremento del costo del capacitor por  $MVAR$  .

$UL$ =Incremento del costo del inductor por  $MVAR$  .

$$A=[n^2 / (n^2 - 1)] \{ UC + UL/n^2 + 8760 \times PV \cdot UU \cdot FU \cdot (KCL + \frac{3}{10} \cdot \frac{1}{n \cdot Q}) \} \quad (5.21)$$

$$B=[n^2 / (n^2 - 1)] \{ Vs^2 \cdot In^2 / n \cdot UC + UL + 8760 \times PV \cdot UU \cdot FU \cdot (KCL + \frac{3}{10} \cdot \frac{1}{n \cdot Q}) \} \quad (5.22)$$

Como el tamaño  $S$  es variable, el costo total mínimo se tendrá cuando :

$$d(\text{TCOST})/dS = 0 \quad (5.23)$$

Por lo que el tamaño mínimo será:

$$S_{\text{MIN}} = \sqrt{B^2/A} \quad [\text{MVAR}] \quad (5.24)$$

Y el costo total mínimo del brazo del filtro será:

$$\text{TCOST}_{\text{MIN}} = UT + 2\sqrt{A \cdot B} \quad (5.25)$$

### 5.3.1 Aplicación Práctica.

Con la finalidad de realizar una aplicación práctica que este de acuerdo con nuestro medio, y partiendo del hecho de que no existen en nuestro país instalaciones de convertidores de gran tamaño que requieran circuitos de filtrado de armónicas, he creído conveniente realizar el diseño de filtros aplicable a filtrar y compensar reactivos en una planta fundidora de metal, cuyos principales componentes son el HORNO DE ARCO Y EL SISTEMA DE COMPENSACION.

Los datos del Sistema de Potencia cuyo diagrama unifilar se representa en la figura #

5.1 , son los siguientes :

DATOS DE LINEAS

BARRAS	IMPEDANCIAS	SUCEPTANCIAS
1 2	$0.012+j0.0159$	$0.0-j0.0000813$
2 3	$0.00148+j0.02087$	$0.0-j0.0000351$

DATOS DE GENERACION , CARGAS Y VOLTAJES

BARRA	VOLTAJES (p.u.)	GENERACION		CARGAS	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	$1.00+j0.0$			0.0	0.0
2	$1.00+j0.0$			0.0	0.0
3	$1.00+j0.0$			2.25	3.9

A la barra 3 está conectado un horno de arco , el cual se comporta como una verdadera fuente generadora de armónicos y el sistema de compensación .

Con la finalidad de obtener resultados optimistas se ha realizado el estudio con valores constantes para ciertos estados de fundición acorde con la siguiente tabla # 5.1 que contiene un resumen de los resultados de un análisis de Fourier Digital

de corrientes del horno de arco , usado en la determinación de los valores del filtro .

TABLA # 5.1

ILUSTRACION DEL CONTENIDO DE CORRIENTES ARMONICAS DEL HORNO DE ARCO PARA DOS ESTADOS DE CICLOS DE FUNDICION

Condición del Horno	Orden del Armónico	Corriente armónica en % de la fundamental				
		2	3	4	5	7
Fundición Inicial (Arco Activo)		7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinamiento * (Arco estable)			3.0		2.1	

Para tal efecto se ha elaborado un programa cuyo diagrama de flujo es el representado en la figura # 5.2 .

En el que :

- 1.-Se realiza la lectura de toda la información necesaria del sistema de potencia , es decir datos sobre las impedancias de las líneas , reactores , capacitores , admitancias en derivación , etc .



- 2.-Entrada de datos de las barras que tienen instalación de filtros de armónicas , excepto la barra a analizar su espectro de armónicas .
  
- 3.-Datos sobre los factores de calidad deseados en los diseños de los filtros de armónicas a instalarse en la barra problema.
  
- 4.-Entrada de la barra problema y los HVAR del equipo compensador de reactivos instalado en dicha barra .
  
- 5.-Se ingresa los datos de un máximo de dos filtros del tipo sintonizado de resonancia paralelo .
  
- 6.-El espectro de las señales armónicas será estudiado en la gama de frecuencias desde 60 Hz hasta 1200 Hz con incremento de 10 Hz , y en un incremento de 20 Hz en los gráficos respectivos .
  
- 7.-Se define una variable S , la cual sirve para dimensionar la magnitud de la impedancia derivada desde la barra B por el

horno , además se tiene la asignación de la frecuencia en por unidad de la fundamental a la variable  $KK$  , es decir  $F/60$  .

8.-A continuación se inicia el proceso iterativo de la formación de la matriz  $YBARRA(KK)$  desde 0 hasta 3 . En este mismo subprograma se tiene la modificación de la  $YBARRA$  por la presencia de filtros , con excepción de la barra B , pues en esta es donde se van a instalar recién los filtros

9.-Aquí se tiene un subprograma que decide los valores de los elementos que constituirán los filtros a instalarse en la barra B dependiendo de los factores de Calidad .

10.-Después se tiene un subprograma que invierte la matriz  $YBARRA$  , dando como resultado la matriz  $ZBARRA$  . Esta matriz  $ZBARRA$  es obtenida para cada una de las Cuatro alternativas un número de 114 veces

11.-Se tiene un subprograma que permite la obtención de la impedancia  $ZMAG$  vista desde la barra B , tanto su magnitud como su ángulo de fase . Este subprograma

también permite la obtención gráfica de la característica IMPEDANCIA VS FRECUENCIA , visualizando así como es el comportamiento del sistema de potencia frente al flujo de armónicas .

12.-Finalmente se tiene un subprograma que calcula el mínimo tamaño y el mínimo costo del filtro .

El listado de las instrucciones se lo adjunta en el ANEXO D .

Las diferentes alternativas de instalación de sistemas de filtros y del flujo de potencia se encuentran en el ANEXO E . En este anexo se incluyen las observaciones , recomendaciones y conclusiones referentes a la presente aplicación .

#### 5.4 OTROS COSTOS

Es conveniente recalcar que en el análisis anterior no se ha tomado en cuenta ciertos costos que de una u otra forma son importantes al realizar el diseño final de un Sistema de Filtros de Armónicas en un Sistema de Potencia , como :

- Flete Marítimo .
- Nacionalización y transporte interno .
- Equipo Auxiliar .
- Supervisión y montaje .
- Ingeniería y Administración .
- Impuestos y Seguros .
- Operación y Mantenimiento .

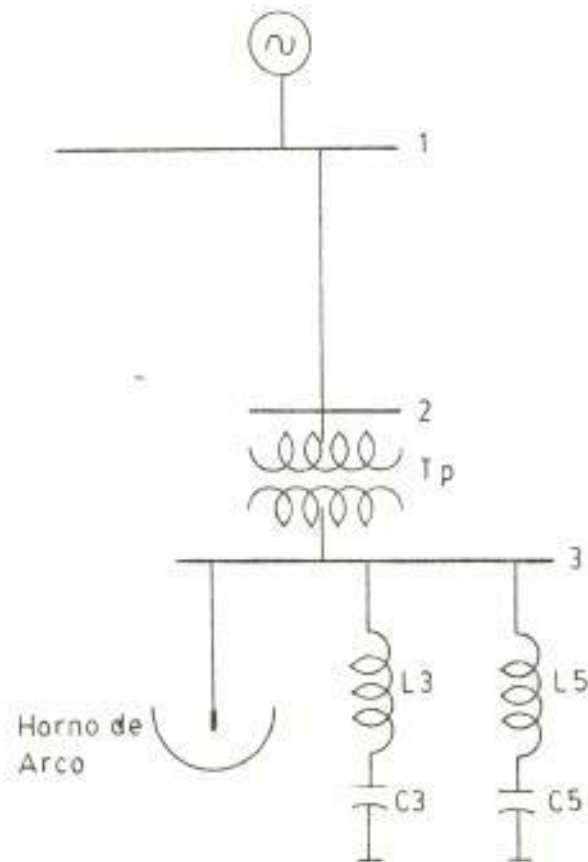


Figura # 5.1

Diagrama Unifilar del Sistema de Potencia

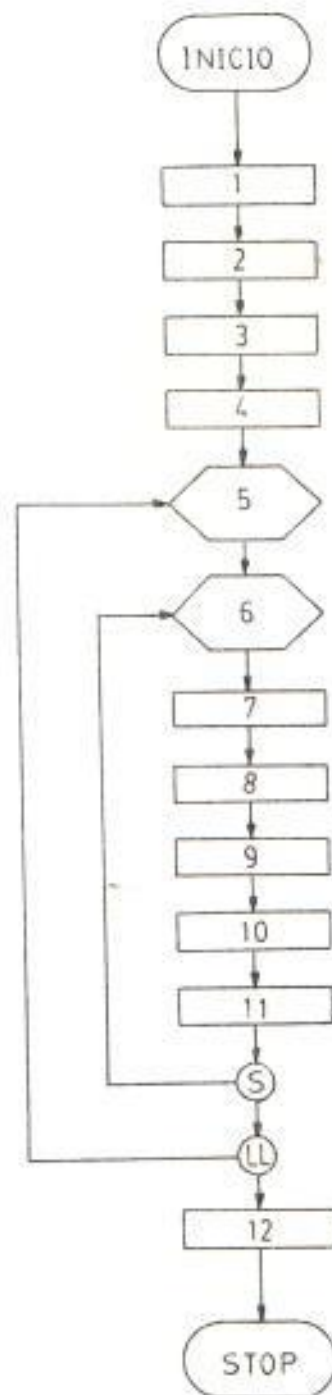


Figura # 5.2

Diagrama de Bloques



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

- Uno de los principales métodos para el control de armónicos es la utilización de filtros de armónicas que suprimen a niveles aceptables los armónicos y compensan parte o totalmente los requerimientos de Potencia Reactiva que necesita el Sistema de Potencia .
- Tres componentes requieren consideraciones de detalle en el cálculo de Filtros : La fuente de corriente , La admitancia del filtro y la admitancia del sistema de Potencia .
- No es posible realizar un diseño apropiado del filtro sin tener conocimientos previos de la impedancia de la red para la frecuencia armónica en estudio .
- Los filtros consisten de Reactores , Capacitores , Resistores o una combinación de estos en unidades que pueden o no pueden ser sintonizados .
- El dimensionamiento de los elementos del filtro tiene que considerar las Potencias Reactivas a la Frecuencia Fundamental y a la frecuencia armónica para la cual es proyectado el filtro .

-Los filtros de armónicas por su tamaño, peso y costo son una parte importante del conjunto del equipo de un Sistema de Potencia.

#### RECOMENDACIONES

-El diseño de de la instalación de Bancos de Capacitores comprende un sobredimensionamiento de Capacitores, y anulación de las condiciones de Resonancia. Por lo general esto es realizado con el uso de Reactores de Sintonía.

-Al realizar el diseño de Filtros de Armónicas, paralelamente se debe hacer un análisis especial del Sistema de Potencia, en lo referente a su impedancia con la finalidad de analizar posibles resonancias.

-Con las especificaciones dadas en el Anexo C, se puede solicitar Cotizaciones de los filtros, Fiscalizar su instalación, etc.

-En los Sistemas de Potencia es necesario realizar el análisis de la característica Impedancia vs Frecuencia para todas las combinaciones de Filtros a instalarse en la barra problema.

-El criterio del Ingeniero diseñador es muy importante.

en la selección de la mejor alternativa, cabe recordar que no por el hecho de existir mayor cantidad de filtros significa una mayor respuesta de parte del sistema de Potencia a la propagación de las señales armónicas.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL  
Depa. de Ingeniería Eléctrica  
BIBLIOTECA

Inv. No. \_\_\_\_\_

## B I B L I O G R A F I A

- 1.-DAVID E. RICE , "Adjustable speed drive and Power Rectifier Armonics - Their effect on Power Systems Components" , IEEE Transactions on Industry Applications , Vol. IA-22 , No.1 , January/February 1986 , Pâg. 161-177 .
- 2.-B. SZABADOS , "On the interaction between Power System configuration and Industrial Rectifier Harmonic Interference" , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems . Vol.PAS-101 , No B , August 1982 , Pâg. 2762-2769 .
- 3.-R. YACAMINI , and J.C. de OLIVEIRA , "Instability in h.v.d.c. schemes at low-order integer harmonics" IEE PROC Vol.127 , Pt. C, No 3 , May 1980 , Pâg. 179-186
- 4.-W.M. GRADY , B.T. HEYDT , "Determination of Harmonic in an AC Power System caused by HVDC Converters" , IEEE Power Engineering Society 1984 Summer Meeting , Seattle Washington .
- 5.-R. YACAMANI , N. HATZIAKGYRIOU , "Overvoltages caused by blocking twelve pulse h.v.d.c. schemes" , IEE PROC., Vol. 127 , pt. c, No. 3 , May 1980 , Pâg.189-198 .

- 6.-GEORG WILL , "Supresión de Armónicos" , Traducción de artículos publicados en Elektrodienst , Cuaderno 5,6 y 7 , 1978 .
- 7.-Z.S. BIALKIEWICZ , "Reducing of Harmonics in MV Networks with LC-Filters" , Institute of Power , Holand , Pág. 151-155 .
- 8.-D.B. CORBYN , "Abnormal Harmonic Disturbances : Assessment and mitigation" International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances , Pág. 235-240 .
- 9.-E. CLEGG , A.J. HEATH , D.J. YOUNG , "The Static Compensator for the BSC anchor project" , International Conference on Source and Effects of Power System Disturbances . Pág. 110-116 .
- 10.-H.H. JAHN & J. KAUFERIE , "Measuring and Evaluating current fluctuations of arc furnaces" , International conference on Source and Effects of Power System Disturbances , Pág. 105-110 .
- 11.-C.F. RIBIERD , "Static RECTifiers and Disturb System" , Electrical World , April 1, 1974 , Pág 80-81 .



- 12.-DAVID E. JOHNSON , "Introduction to Filter Theory" ,  
Capitulos 1,2,3,4 .
- 13.-E.W.KIMBARK , "Electrical Transmission of Power and  
Signals". Capitulo 14 .
- 14.-E.W.KIMBARK , "Direct Current Transmission" .  
Capitulo 7,8 y 9 .
- 15.-ER , "Reacores" . ERE.009.ES , Pág. 1-5 .
- 16.-ER , "Reactores para filtros de Armónicas" ,  
ERE.005.ES , Pág. 1-7 .
- 17.-HENRY WILLIAM , W. HAYNES , "Economía de la Empresa"  
Cuarta edición , Agosto de 1982 , Pág. 45-52 .
- 18.-GIL ALBERTO TAMA FRANCO , TESIS : "Análisis de la  
Generación y propagación de las señales armónicas  
originadas por los Convertidores Estáticos de  
Potencia". 1986-1987 .
- 19.-WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION , "Electrical  
Transmission and Distribution Reference Book".  
Capitulos 8 y 23 .