



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica



**"ANALISIS Y CARACTERISTICAS DE LA PROTECCION
CATODICA Y SU APLICACION A UNA
CENTRAL TERMICA A VAPOR"**

TESIS DE GRADO

**Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización: POTENCIA

**Presentada por:
JORGE BAQUE MALDONADO**

Guayaquil - Ecuador

1.988

AGRADECIMIENTO

Al ING. JORGE FLORES M.
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para la
realización de este trabajo.

A los INGS. PERFECTO CHACÓN
Y HUGO FRANCO, del
departamento de
mantenimiento de la Central
Térmica Ing. Gonzalo
Cevallos, por su aporte al
desarrollo de esta tesis.

DEDICATORIA

A LA MEMORIA DE
MI PADRE.

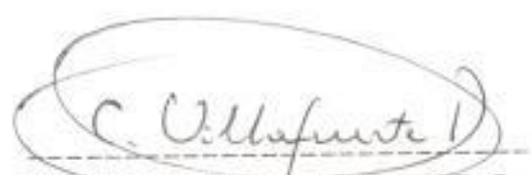
A MI MADRE.

A MIS HERMANOS.

A MI ESPOSA.

A MELANIE.

A MIS SOBRINOS.



ING. CARLOS VILLAFUERTE F.
SUB - DECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA ELECTRICA



ING. JORGE FLORES M.
DIRECTOR DE TESIS



ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
MIEMBRO PRINCIPAL DEL
TRIBUNAL



ING. ADOLFO SALCEDO G.
MIEMBRO PRINCIPAL DEL
TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas 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)


.....
JORGE BAQUE MALDONADO

RESUMEN

En el presente trabajo, se dirige la aplicación de la protección catódica a la central de generación a vapor, en la cual existen componentes como las bombas de circulación y lavado, rejillas giratorias y fijas, el condensador, y tuberías que se encuentran expuestos a la acción de la corrosión como consecuencia del medio en que se encuentran o como es el caso del condensador el medio de enfriamiento que maneja.

En el capítulo I se estudiará los conceptos básicos del fenómeno de la corrosión con lo cual se podrá tener un conocimiento de la corrosión galvánica en la magnitud que nos interesa.

En el capítulo II se hará un estudio de la teoría de la protección catódica en sus dos tipos, es decir: Por corriente impresa y Por ánodos de sacrificio.

En el capítulo III se dará una descripción de cada uno de los elementos de la central a vapor que requieren de la protección catódica, tanto de su funcionamiento como de su estructura. También se hará un estudio de las condiciones del medio en que se encuentran ubicadas, o del medio de enfriamiento como es el caso del condensador, para por

Último en este mismo capítulo describir los sistemas de protección catódica existentes.

En los capítulos IV y V se realizará ejemplos de diseño aplicados al condensador y a la tubería del agua en circulación respectivamente, siendo el primero mediante corriente impresa y el segundo por ánodos de sacrificio.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	VII
INDICE GENERAL	IX
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XVI
INDICE DE CUADROS.....	XVII
INTRODUCCION	18
1. ANALISIS DEL FENOMENO DE LA CORROSION	
1.1. Concepto de la corrosión y su descripción cuantitativa	19
1.2. Factores ambientales que afectan el fenómeno de la corrosión	22
1.2.1. La velocidad	22
1.2.2. La temperatura	23
1.2.3. La presencia de oxígeno y oxidantes	23
1.2.4. La concentración de agentes corrosivos	24
1.3. Clasificación de la corrosión	24
1.4. Corrosión galvánica	28
1.4.1. Corrosión galvánica producida por el uso de metales diferentes	37
1.4.2. Corrosión galvánica producida por suelos diferentes	43
1.4.3. Corrosión galvánica producida por el uso de metales no homogéneos	44

1.4.4. Efecto de la corriente y el potencial en la corrosión galvánica	47
1.4.5. Efecto del área relativa de los electrodos	51
1.4.6. Efecto de la distancia entre los electrodos	53
1.5. Formas y medios para prevenir y eliminar la corrosión de estructuras metálicas en general	53
II. PROTECCION CATODICA: CONCEPTO Y TIPOS DE PROTECCION CATODICA	
2.1. Teoría básica de la protección catódica...	58
2.2. Tipos de protección catódica	63
2.2.1. Protección catódica utilizando ánodos de sacrificio	65
2.2.1.1. Tipos de ánodos galvánicos	67
2.2.2. Protección catódica con corriente impresa	72
2.2.2.1. Materiales para ánodos auxiliares	75
2.3. Selección del tipo de ánodo y espaciamiento	81
2.4. Instrumentos y mediciones en la protección catódica	82
2.4.1. Mediciones de voltaje	84
2.4.2. Mediciones de corriente	90
2.4.3. Medición de la resistencia del suelo	94

2.4.4. Medición del pH	98
III. IMPORTANCIA DE LA PROTECCION CATODICA DE UNA CENTRAL A VAPOR Y DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS A SER PROTEGIDOS	
3.1. Descripción general	100
3.2. Elementos que requieren de la protección catódica	111
3.2.1. Bombas de circulación y lavado ...	111
3.2.2. Condensador	117
3.2.3. Rejilla giratoria	123
IV. DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA MEDIANTE ANODOS DE SACRIFICIO APLICADO A TUBERIAS.	
4.1. Datos preliminares	129
4.2. Mediciones	129
4.3. Cálculos y diseño	131
V. DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA MEDIANTE CORRIENTE IMPRESA APLICADO AL CONDENSADOR	
5.1. Datos preliminares	142
5.2. Mediciones	143
5.3. Cálculos y diseño	145
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	155
BIBLIOGRAFIA	158

I N T R O D U C C I O N

Existen muchas causas de la corrosión de metales, pero la mas importante es el uso indiscriminado de metales diferentes en la construcción de estructuras metálicas que estarán enterradas o sumergidas. Así por ejemplo se puede observar, que la corrosión es muy común en sistemas electricos subterráneos, en centrales eléctricas, en estructuras de líneas de transmisión, en sistemas de tuberías de agua potable, etc.

En el caso de la central a vapor, las rejillas giratorias y estacionarias están expuestas al fenómeno de la corrosión especialmente cuando estas manejan agua salada: para solucionar este problema lo primero que se ocurriría sería establecer un plan muy frecuente de limpieza y pintada de las rejillas o, un frecuente reemplazo de las mismas. Sin embargo, tales soluciones a mas de resultar antitécnicas también resultarían antieconómicas. En dichos casos, la protección catódica ha resultado una solución satisfactoria para el control de la corrosión: además tal método de protección puede ser extendido para proteger bombas de circulación y lavado, tuberías y condensadores.

CAPITULO I

ANALISIS DEL FENOMENO DE LA CORROSION

1.1. EL CONCEPTO DE LA CORROSION Y SU DESCRIPCION CUANTITATIVA

Es común definir a la corrosión como la destrucción del metal por causa del medio que lo rodea, sin embargo a la corrosión se le ha dado una variedad de definiciones, entre ellas encontramos a la que señala: La corrosión es la forma como la naturaleza regresa al metal a su estado natural, tal definición es fácilmente ilustrada con el siguiente ejemplo: Cuando el hierro se corroe en la superficie de este se produce óxido de hierro (Fe_2O_3) que al compararlo con el compuesto que se extrae de la naturaleza para la obtención del hierro se llega a la conclusión que ambos constituyen los mismos compuestos.

De lo anterior se puede afirmar que la corrosión de un metal es la consecuencia natural de su existencia temporal en la forma metálica. Para alcanzar dicho estado metálico desde su aparición en forma de compuestos químicos llamados óxidos, es necesario que ellos absorban y almacenen una cierta cantidad de energía necesaria para llevar un óxido a su

respectivo estado metálico, dicha energía será reabsorbida a la naturaleza al producirse la corrosión. La cantidad de energía es diferente para cada metal, esta resulta ser elevada para metales como el Magnesio, Aluminio y el Hierro, y relativamente baja para metales como el Cobre y la Plata. La tabla #1 muestra una lista de algunos metales en orden descendente a la cantidad de energía requerida.

TABLA #1.- POSICION DE LOS METALES EN ORDEN A LA ENERGIA REQUERIDA PARA CONVERTIR SUS OXIDOS EN METAL.

MAYOR ENERGIA REQUERIDA	POTASIO
	MAGNESIO
	BERILIO
	ALUMINIO
	ZINC
	CROMO
	HIERRO
	NIQUEL
	ESTANO
	COBRE
	PLATA
	PLATINO
MENOR ENERGIA REQUERIDA	ORO

La diferencia de energía requerida para llevar un óxido a su respectivo metal y energía requerida para realizar el proceso inverso, puede ser expresado en términos de potencial eléctrico y la relativa dificultad en obtener un metal a partir de su óxido desde el punto de vista energético y la consecuente tendencia de regresar la energía por medio de la corrosión, determina la posición de dichos metales puros en una tabla denominada serie electromotiva que será motivo de discusión posterior.

Cuando la corrosión toma lugar se produce una pérdida en el peso del metal. Esta pérdida de metal es comúnmente utilizada como una medida del avance de la corrosión, tomando en cuenta por supuesto el tiempo en que toma lugar dicho cambio de peso. Las unidades más comúnmente utilizadas son:

a) DE ACUERDO AL CAMBIO DE PESO

Constituye la pérdida de peso por unidad ^{de área} diaria y por unidad de tiempo, y una medida común es el miligramo por decímetro cuadrado por día (mdd).

b) DE ACUERDO AL CAMBIO DIMENSIONAL

Se define por la pérdida de espesor del metal por unidad de tiempo. una unidad de este tipo muy común es el mil por año (mpa), siendo el mil un milésimo de pulgada.

1.2. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL FENOMENO DE LA CORROSION

Es necesario el conocimiento de los factores ambientales que alteran de una u otra forma el proceso de la corrosión para así de ser posible alterar dichos factores y poder de esta manera disminuir o eliminar la destrucción de los metales. Los factores son los siguientes:

1.2.1. LA VELOCIDAD

El movimiento de un fluido respecto a un metal puede originar una celda de corrosión. Esto puede tomar lugar ya sea que el fluido o el metal se desplacen. Así se tiene por ejemplo la corrosión que sufre una embarcación marina a causa del movimiento de esta con respecto al agua.

1.2.2. LA TEMPERATURA

Puesto que la corrosión constituye un fenómeno químico o electroquímico, este al igual que todo fenómeno de igual naturaleza aumenta su rapidez al aumentar la temperatura.

Las reacciones de la corrosión a elevadas temperaturas pueden ser extremadamente rápidas. La reacción de los metales a alta temperatura generalmente produce la formación de capas gruesas de productos de la corrosión.

1.2.3. LA PRESENCIA DE OXIGENO Y OXIDANTES

Los metales ante la presencia moderada de oxígeno y oxidantes muestran una buena resistencia a la corrosión. Bajo condiciones extremadamente fuertes estos metales pierden sus propiedades de resistencia a la corrosión.

Si se conocen las características básicas de un metal y el medio al que está expuesto, es

posible predecir en muchos casos el efecto de la adición de oxidantes. La cantidad de oxígeno presente en el electrolito es importante puesto que este disuelve la capa de polarización (Hidrógeno) de la superficie del metal.

1.2.4. LA CONCENTRACION DE AGENTES CORROSIVOS

Existen materiales en los cuales las características de resistencia a la corrosión son afectadas en lo mínimo durante amplios cambios de la concentración de corrosivos. Otros materiales en cambio presentan comportamiento similar excepto a muy altas concentraciones, y es cuando la velocidad de la corrosión es incrementada.

1.3. CLASIFICACION DE LA CORROSION

Al igual que la diversidad de definiciones de la corrosión también existen varias formas de clasificarla. pero para nuestro estudio resulta conveniente clasificar la corrosión según el medio en que se desarrolla y según su morfología. En continuación presentamos dicha clasificación en el cuadro #1.

CUADRO #1.- CLASIFICACION DE LA CORROSION

:-	:- Corrosión Química
:	:
: SEGUN EL MEDIO <	:
:	:- Corrosión Galvánica
:-	:- Corrosión Uniforme
:	:
: SEGUN LA FORMA <	:
:	:- Corrosión localizada
:-	

Antes de comenzar con la definición de cada uno de los tipos de corrosión que existen, es necesario indicar que debido a que la protección catódica realiza exclusivamente la protección de las estructuras metálicas contra la corrosión galvánica, se realizará el estudio de cada uno de los tipos de corrosión en forma no muy extensa para luego en el siguiente numeral tratar exclusivamente la corrosión galvánica.

a) CORROSION QUIMICA

La corrosión química constituye todos los casos en que el metal reacciona con un medio no iónico como es el caso de la oxidación en el aire a alta temperatura. este tipo de corrosión se caracteriza por ser una destrucción uniforme lo cual tiene como consecuencia que la profundidad de material.

destruido sea menor.

El espesor del óxido que se forma sería una consecuencia de la temperatura y la concentración, así pues al aumentar la temperatura y la concentración del oxidante se forma una película de óxido cuyo espesor varía de acuerdo a como varía las condiciones.

b) CORROSION GALVANICA

Cuando existen dos metales diferentes sumergidos o enterrados en una substancia eléctricamente conductora, o también llamado electrolito, se presenta entre ellos una diferencia de potencial eléctrico, lo cual causaría que al entrar en contacto se establezca un flujo de corriente eléctrica que será desde el metal de menor potencial o ánodo hacia el metal de mayor potencial o cátodo, dicha corriente transportará pequeñas partículas de metal anódico hacia el electrolito o hacia el cátodo, produciéndose de esta manera la corrosión del metal anódico. Cabe señalar que esta forma de corrosión tiene su aplicación benéfica, pues este es el principio que ha hecho posible la pila o batería eléctrica; otra

aplicación que se puede señalar es aquella que es utilizada para pulir la plata en un recipiente de aluminio que contenga agua y bicarbonato de sodio. La corriente generada por el contacto entre la plata y el aluminio produce que el sulfeto de plata se convierta nuevamente en plata pura.

c) CORROSION UNIFORME

Esta es la forma más común de la corrosión el ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y toda la perforación media igual en todos los puntos, esto nos facilita la predicción de la vida útil del material. La corrosión uniforme se caracteriza fundamentalmente por ser causada por reacciones químicas o electroquímicas. El metal durante el proceso de destrucción se presenta más fino cada vez hasta que por último se tiene su inutilización.

d) CORROSION LOCALIZADA

Esta constituye la forma de corrosión más severa debido a que este tipo de corrosión está asociada con huecos de pequeño diámetro y de profundidad

considerable. Muchas veces dichos huecos se encuentran muy cercanos que dan la apariencia de una superficie rugosa.

1.4. CORROSION GALVANICA

La corrosión de los metales es un resultado de la corriente eléctrica que fluye desde el metal hacia el suelo que lo rodea. Cuando la corriente fluye desde el metal hacia el suelo, esta transporta diminutas partículas de metal, y es esto que se conoce comúnmente como corrosión. Dicha corriente eléctrica es del tipo DC.

La corriente puede ser producida en la superficie del metal como resultado de la interacción química entre el metal y la sustancia química contenida en el suelo y que están en contacto con el metal, en este caso el fenómeno se lo conoce como corrosión galvánica, en la figura #1.1 se puede apreciar este fenómeno.

Otras veces la corriente que interviene en la corrosión puede ser producida por un fuente externa, como lo pueden ser las corrientes parásitas causadas

por un sistema de transporte eléctrico. este caso se conoce como electrólisis. esto último se ilustra en la figura # 1.2.

En la figura #1.1 la corrosión ocurre donde la corriente fluye desde la superficie del metal al suelo. sin embargo, no se produce corrosión en áreas donde la corriente fluye hacia el interior del metal. Un ejemplo de corrosión galvánica constituye el siguiente: Si dos metales diferentes, por ejemplo una tubería galvanizada y otra de hierro, enterradas en un suelo lodoso y además están conectadas mecánicamente, entre ellos se establecerá una corriente eléctrica. la misma que fluirá tal como se indica en la figura 1.1.

En la figura mencionada anteriormente se tiene que las flechas indican la dirección del flujo de corriente eléctrica, que es desde la tubería galvanizada hacia el suelo, a través del suelo hacia la tubería de hierro y a través de la conexión mecánica desde la tubería de hierro hacia la tubería galvanizada, cerrándose de esta manera el circuito.

El flujo de corriente disuelve el zinc que constituye el galvanizado de la tubería el cual se mezcla con

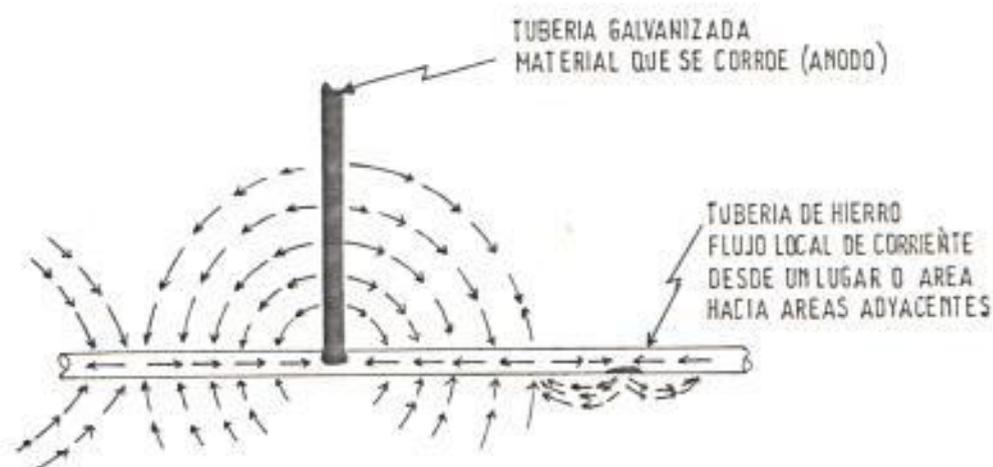


FIG. 1.1 - CORROSION GALVANICA (LAS FLECHAS INDICAN LA DIRECCION DE LA CORRIENTE)

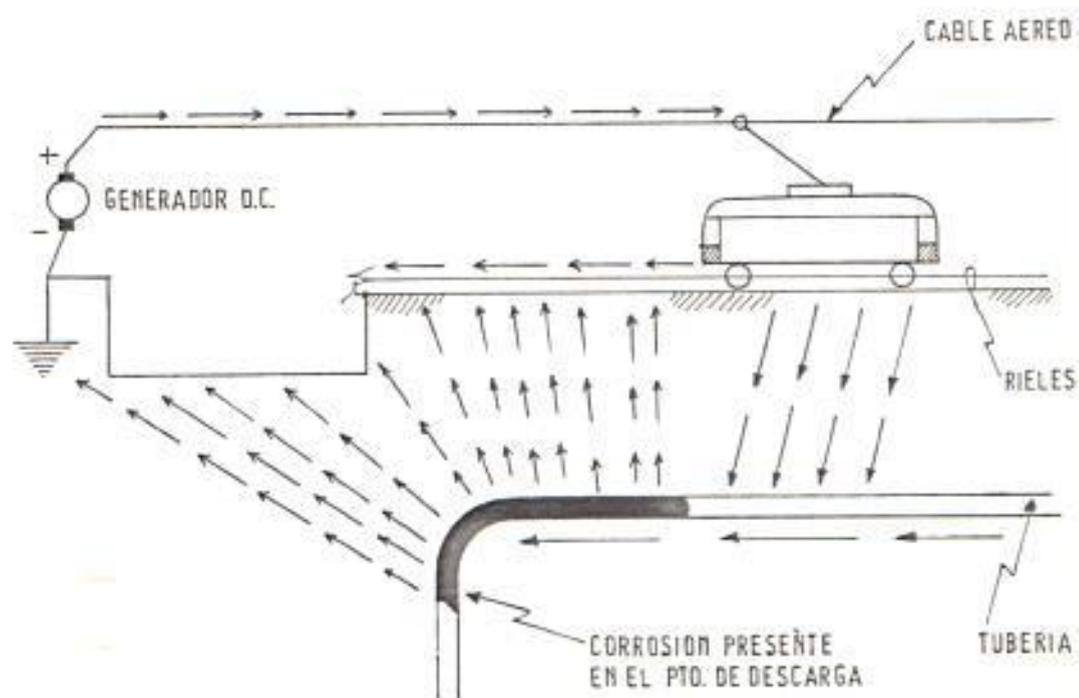


FIG. 1.2 - ELECTROLISIS

el suelo, esta acción continua hasta que todo el zinc se disuelva o corroa. Esta misma acción es la base de la pila seca o batería como se ilustra en la figura 1.3.

El zinc, el cual es el mismo metal utilizado para galvanizar las tuberías, es utilizado como recipiente en la pila seca. Una barra de carbón es ubicado en el centro de dicho recipiente y el espacio entre ambos es llenado de una sustancia química. Cuando un alambre conductor o un lámpara es conectada entre el zinc y el carbón se establece un circuito eléctrico y la acción química entre el carbón y el zinc produce el flujo de corriente desde el zinc hacia la sustancia química y a través de dicha sustancia hacia el carbón, y a través del conductor o lámpara de regreso al zinc (ver figura #1.4). Una vez que el zinc se ha corroído en su totalidad se dice que la pila ha sido descargada.

Para un estudio formal de la corrosión es necesario introducir términos como: Electrodo, cátodo, ánodo y electrolito.

Electrodo es un metal, o material conductor de corriente eléctrica. Un electrodo puede ser un ánodo

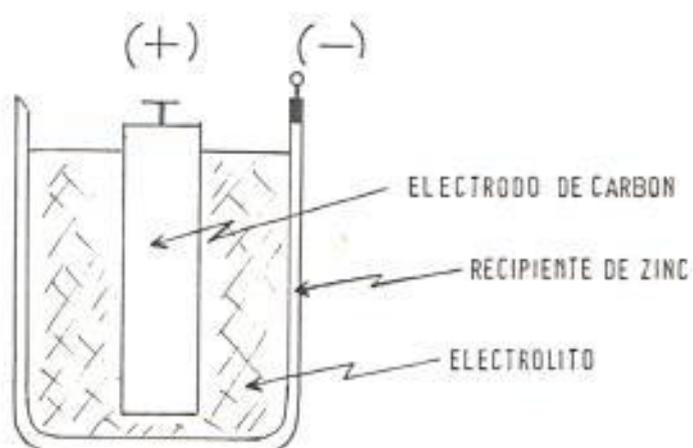


FIG. 1.3 - DISEÑO ELECTRICO DE LA PILA SECA.

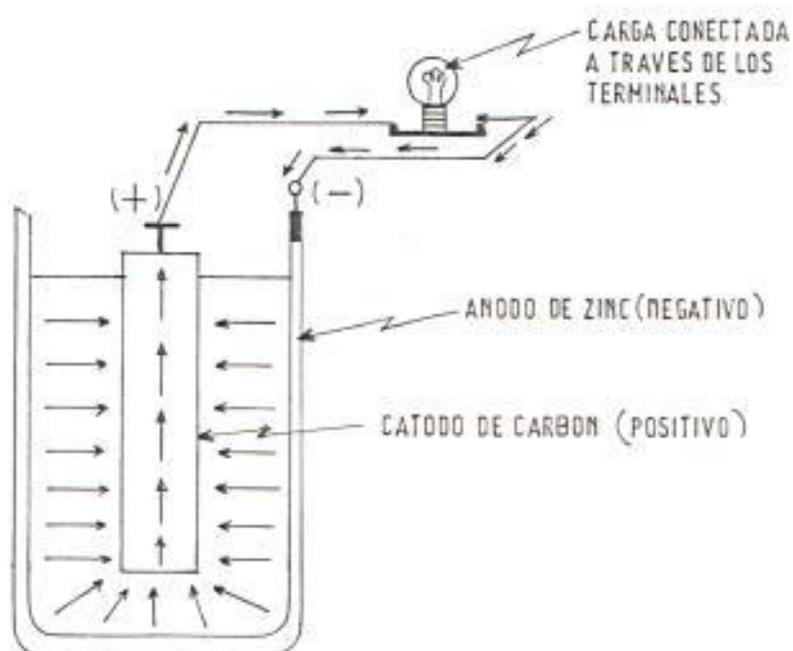


FIG. 1.4 - DIRECCION DEL FLUJO DE LA CORRIENTE EN EL INTERIOR DE LA PILA SECA.

o un cátodo.

El ánodo es el electrodo desde el cual fluyen electrones hacia el conductor metálico o circuito externo que une el ánodo con el cátodo.

El cátodo constituye el electrodo hacia el cual fluyen los electrones provenientes del circuito externo.

La polaridad adoptada para designar al ánodo y al cátodo es positivo y negativo respectivamente; para no causar confusión puesto que la convención común es la contraria a la adoptada, se debe tener presente los siguientes puntos en base del flujo convencional de corriente:

- a) El flujo convencional de corriente desde el positivo al negativo deberá ser desde cátodo al ánodo en el circuito externo.
- b) El flujo convencional de corriente desde el positivo al negativo deberá ser desde el ánodo al cátodo en el electrolito.

El electrolito es la solución conductora de corriente entre el ánodo y el cátodo. Esta solución puede ser química en forma líquida o pasta, agua, suelo, o una combinación de dos o más de estos elementos. La característica fundamental del electrolito es la resistividad, la cual se mide en ohmios-centímetros.

Cada metal y algunos materiales como el carbón cuando se los ubica en un electrolito, tal como lodo o agua tienen un potencial electroquímico con respecto a dicho electrolito, este es diferente para cada metal y a su vez, es diferente para un metal sumergido en diferentes electrolitos. Este potencial se conoce comúnmente como potencial de media celda, así dos de estas medias celdas se requiere para la formación de una pila seca. Una lista de potenciales de media celda constituye la denominada serie galvánica o serie electromotiva. En la tabla # II. se presenta una serie galvánica de metales comunes.

En soluciones o suelos que contengan diferente químicos y sales, estos potenciales de media celda pueden cambiar considerablemente y el potencial de algunos de estos metales podrían hacerse positivo en relación al potencial del otro metal.

El electrodo de referencia de Hidrógeno se lo utiliza únicamente en laboratorios de corrosión, en la práctica para medir los potenciales de media celda se utilizan electrodos de referencia como el de Sulfato de Cobre, o también el electrodo de Calomelano.

TABLA II.- POTENCIAL DE MEDIA CELDA EN SOLUCION DE SU PROPIA SAL.

ELECTRODO POSITIVO O METAL NOBLE		POTENCIAL CON RESPECTO AL ELECTRODO DE REFERENCIA (ELECTRODO DE HIDROGENO) EN VOLTIOS
Dro		+1.36 a +1.5
Carbón		+0.90
Platino		+0.86
Plata		+0.80
Cobre		+0.34 a +0.47
Sulfato de Cobre		+0.34
Referencia-Hidrógeno		0.0
ELECTRODO NEGATIVO O METAL BASE		
Plomo		-0.12
Estaño		-0.14
Hierro		-0.05 a -0.35
Acero oxidado		-0.25
Acero limpio		-0.45
Zinc		-0.77
Aluminio		-1.7
Magnesio		-2.4

De todo lo estudiado hasta el momento se puede señalar que para que exista corrosión galvánica o una celda de corrosión galvánica se debe tener las siguientes condiciones:

- a) Debe haber un ánodo y un cátodo.
- b) Debe haber un potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo.
- c) Debe haber un camino conductor de electricidad que conecte al ánodo y al cátodo.
- d) El ánodo y el cátodo deben estar sumergidos en el electrolito.

Una vez que se cumplan las condiciones anteriores fluirá una corriente eléctrica y se destruirá el metal anódico, diciéndose entonces que se produce la corrosión galvánica.

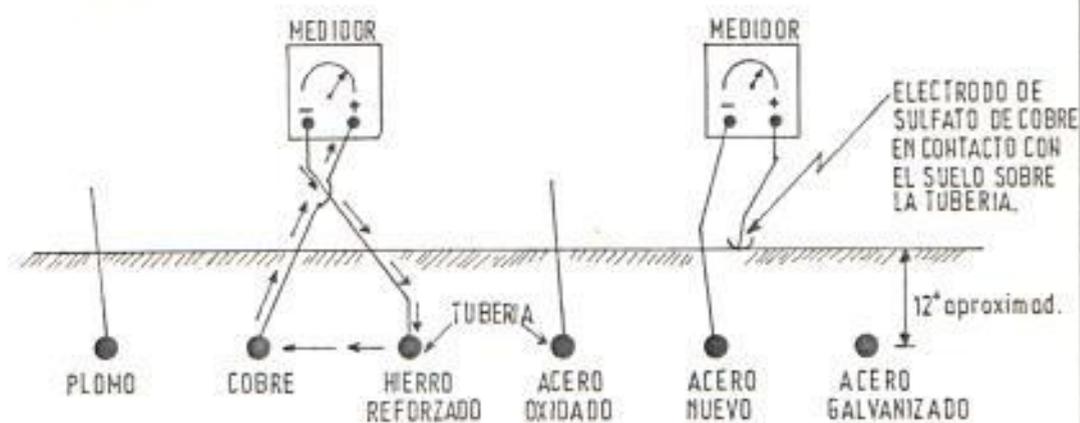
1.4.1. CORROSION GALVANICA PRODUCIDA POR EL USO DE METALES DIFERENTES

Duando dos estructuras cualesquiera, las cuales no son del mismo metal, son conectadas entre

si por medio de alambre conductor, por medio de soldadura, o aún por contacto accidental, de tal manera que un camino de corriente se establezca entre las dos estructuras, uno de los metales tenderá a corroerse, es decir este último se convertiría en un ánodo. Esto se debe a que existe un potencial de media celda para cada metal, lo cual a su vez establece una diferencia de potencial entre las dos estructuras; tal diferencia de potencial es causa para que circule una corriente galvánica. En la figura #1.5 se puede apreciar una combinación de pares de metales diferentes que son comúnmente utilizados para estructuras enterradas tales como tuberías, sistemas de puesta a tierra, pilotes, etc.

En las figuras # 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11, se indican los metales que se destruirían en estructuras típicas donde se tienen metales diferentes.

Cabe señalar que la magnitud de la corriente galvánica no depende únicamente de los potenciales de media celda, sino también de



TIPOS DE TUBERIA CONECTADAS Y FLUJOS DE CORRIENTES	caída de potencia a través de 10 ohmios	FLUJO DE CORRIENTE	PERDIDA ANUAL DEL METAL	
ACERO GALVANIZADO ACERO NUEVO	 10 Ω	0,16 VOLT.	0,16 AMP.	0,32 LBS.
ACERO NUEVO ACERO OXIDADO	 10 Ω	0,10 "	0,01 "	0,20 "
ACERO OXIDADO HIERRO REFORZADO	 10 Ω	0,02 "	0,002 "	0,04 "
HIERRO REFORZADO COBRE		0,175 "	0,175 "	0,35 "
COBRE PLOMO		0,14 "	0,014 "	0,96 "

FIG. 1.5- PRUEBAS A TUBERIAS SUMERGIDAS EN SUELOS CORROSIVOS.

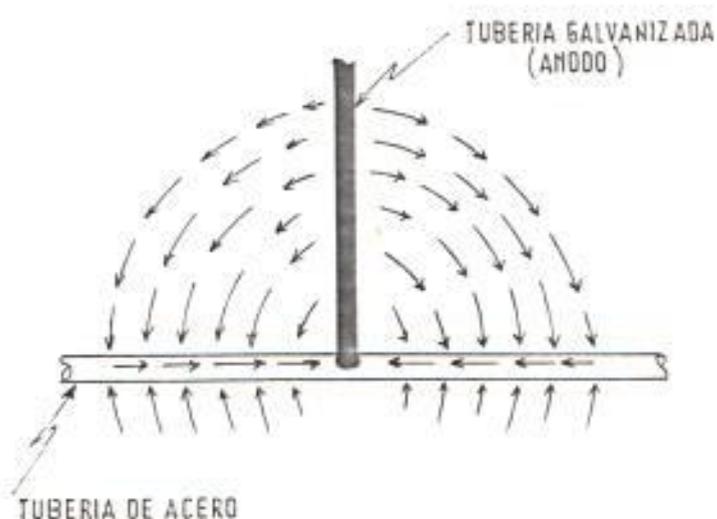


FIG. 1.6 - DIRECCION DE FLUJO DE LA CORRIENTE ENTRE METALES DIFERENTES ENTERRADOS EN SUELO CORROSIVO.

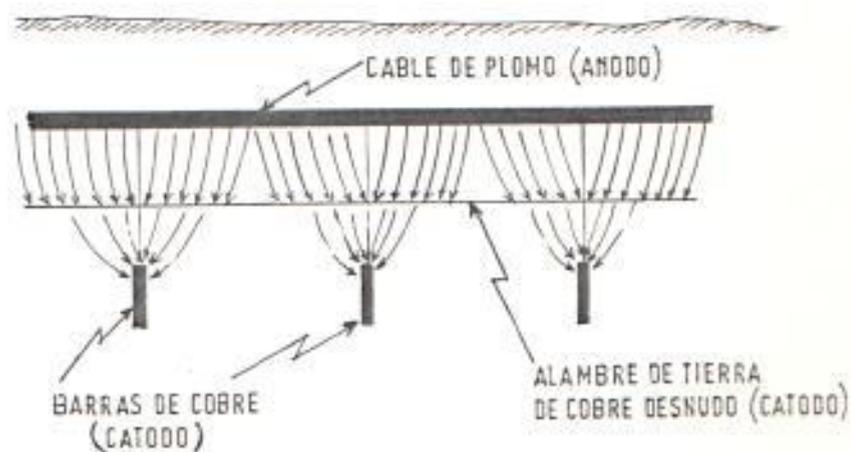


FIG. 1.7 - CORROSION DE CABLE DE PLOMO.

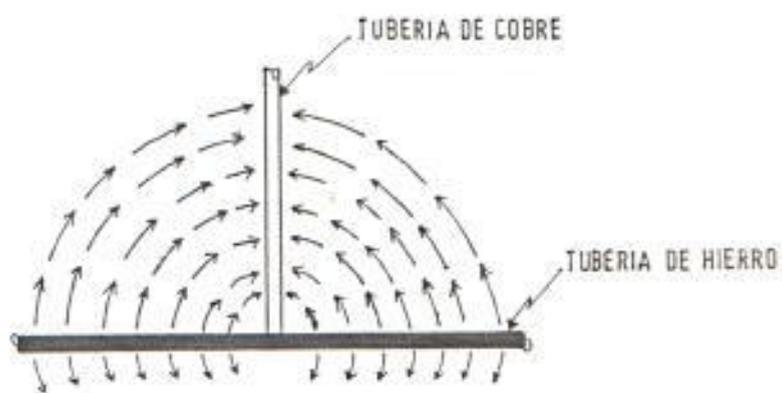


FIG. 1.8- CORROSION PRODUCIDA POR METALES DIFERENTES.

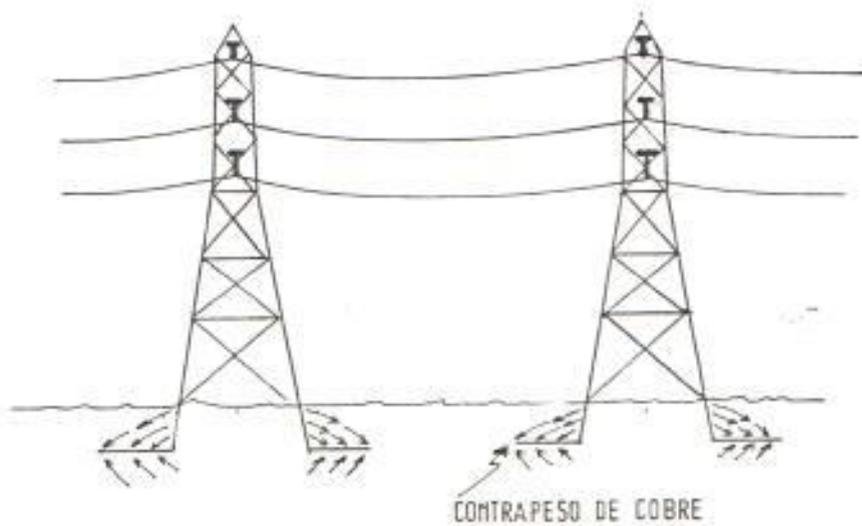


FIG. 1.9 - CORROSION CAUSADA EN LAS BASES DE TORRES DE TRANSMISION.

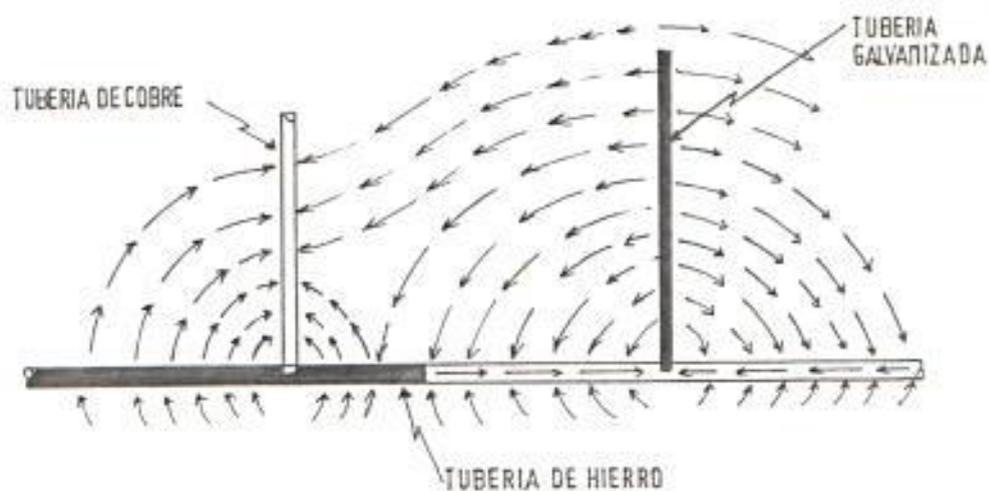


FIG. 1.10 - CORROSION PRODUCIDA POR METALES DIFERENTES.

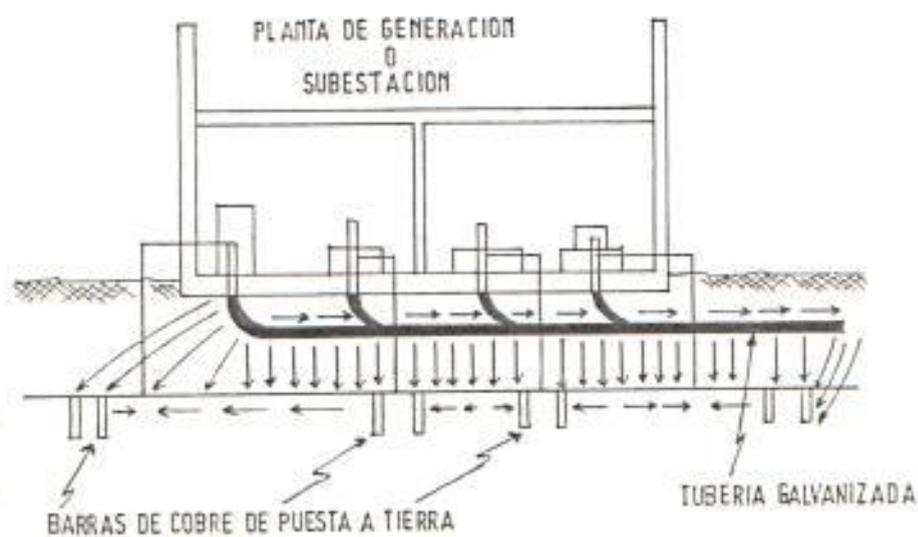


FIG. 1.11 - CORROSION EN TUBERIAS GALVANIZADAS EN SUBESTACIONES O PLANTAS DE GENERACION.

las características del suelo y de otros factores discutidos posteriormente.

1.4.2. CORROSION GALVANICA PRODUCIDA POR SUELOS DIFERENTES

Al enterrar una estructura metálica, esta puede ser situada en diferentes capas, o por otro lado en su recorrido encontrarse con diferentes tipos de terrenos, esto sería motivo para que se produzcan diferentes potenciales de media celda de la estructura metálica con respecto a los diferentes electrolitos (diferentes tipos de suelos). Por lo tanto, se estaría en el caso de varias diferencias de potenciales en una misma estructura, produciéndose así corrientes galvánicas que viajarían desde un tramo de la estructura enterrada en un tipo de suelo a otro tramo de tubería enterrada en otro tipo de suelo.

La cantidad de sales químicas contenidas en los suelos, contenido de polvo, resistividad eléctrica, humedad y la aireación son las condiciones que producen la generación de

corrientes galvánicas en los diferentes tipos de suelos.

Las figuras #1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16, muestran algunas condiciones de suelo que producen la corrosión.

1.4.3. CORROSION GALVANICA PRODUCIDA POR EL USO DE MATERIALES NO HOMOGENEOS

Los metales generalmente utilizados para la construcción de estructuras enterradas, o sumergidas en agua, son fabricadas utilizando diferentes tipos de oxidos y metales. Esto es causa para que en la superficie de un metal aparezcan pequeñas particulas de metales diferentes. Cuando las estructuras son enterradas, estas pequeñas particulas pueden tener un potencial de media celda con respecto al terreno diferente al potencial de media celda de las otras particulas o de la estructura en general. El efecto de esto seria similar al que se produce cuando se utilizan metales diferentes.

Si las particulas de metales diferentes son

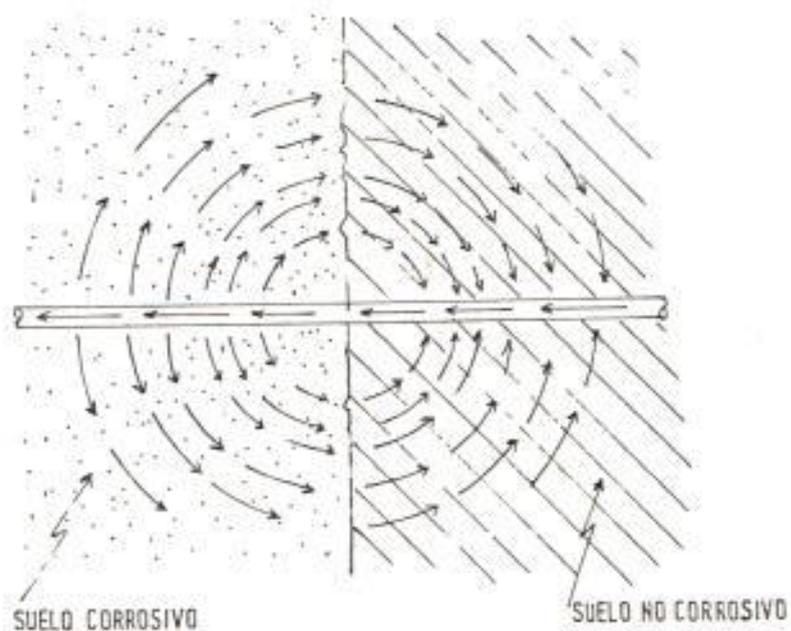


FIG. 1.12 - CORROSION CAUSADA POR SUELOS DIFERENTES.

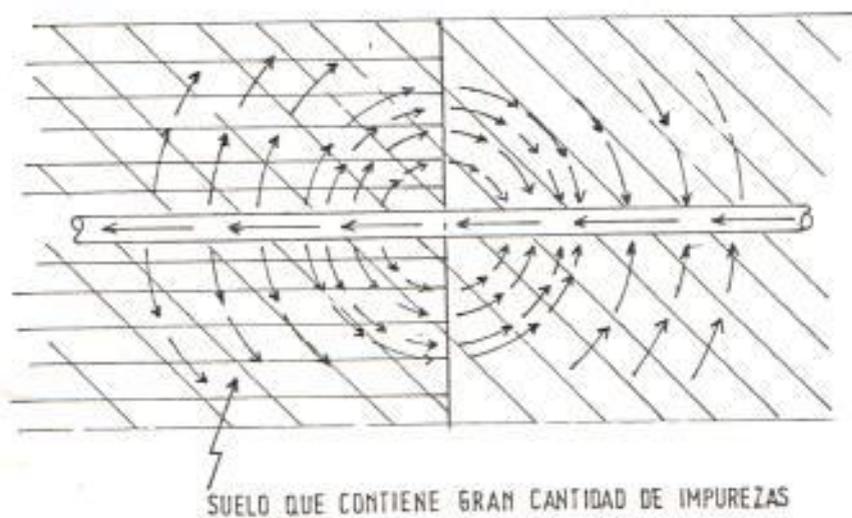


FIG. 1.13 - CORROSION CAUSADA POR LA DIFERENCIA EN CONTENIDO DE IMPUREZAS.

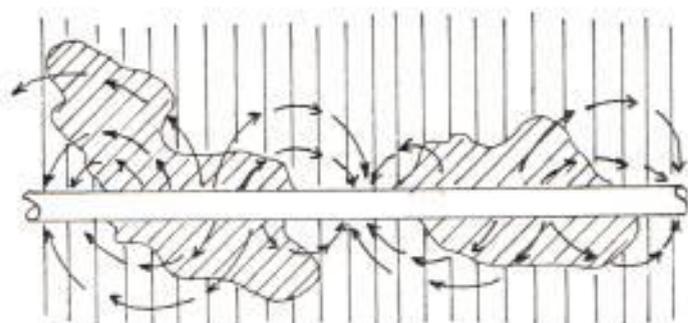


FIG. 1.14. CORROSION CAUSADA POR MEZCLA DE DIFERENTES SUELOS.

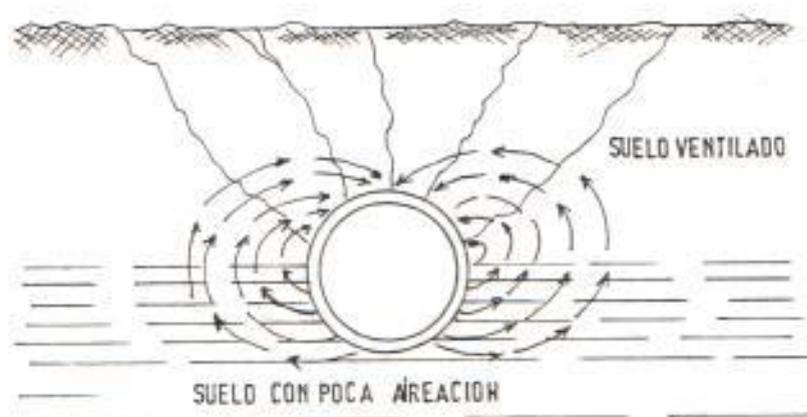


FIG. 1.15 - CORROSION CAUSADA POR DIFERENCIA DE AERACION.

pequeñas en relación a la superficie del metal, y los potenciales de media celda son tales que las pequeñas superficies de metal resultan ser anódicas, entonces se produciría una corrosión violenta pues, se concentraría en una pequeña área de metal causando el picado del mismo, siendo esto muy peligroso si la estructura es por ejemplo un oleoducto.

En la figura #1.17 se muestra la corrosión galvánica producida por el uso de materiales no homogéneos.

1.4.4. EFECTO DE LA CORRIENTE Y EL POTENCIAL EN LA CORROSION GALVANICA

En los numerales anteriores se estudio la forma como se establece un diferencia de potencial entre dos metales, los cuales al estar unidos por soldadura, accidentalmente o por medio de un alambre conductor, hacen circular una corriente galvánica entre los dos metales. La magnitud de dicha corriente galvánica dependerá de la diferencia de potencial existente entre el ánodo y el

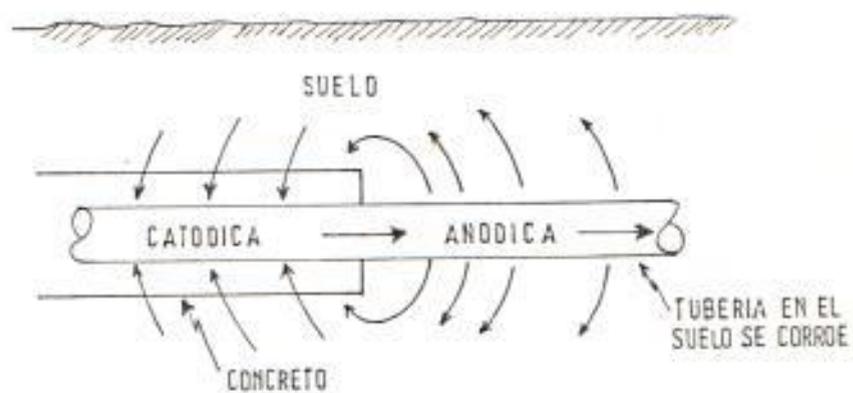


FIG. 1.16- CORROSION PRODUCIDA EN TUBERIAS PARCIALMENTE CUBIERTAS DE PAVIMENTO.

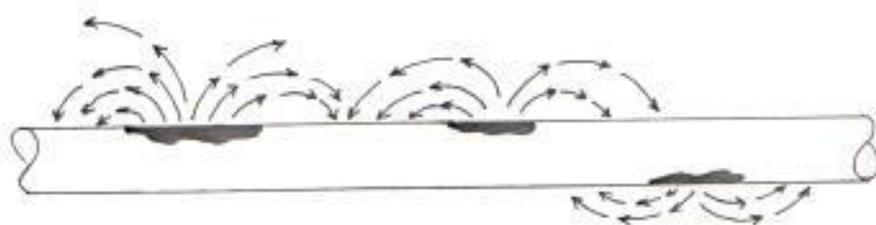


FIG. 1.17- CORROSION CAUSADA POR LA NO HOMOGENEIDAD DE LOS METALES.

cátodo, de la resistividad del electrolito y de la resistencia del circuito de retorno.

En la figura #1.18 a - b, se puede apreciar un circuito equivalente de la celda galvánica. Al observar el circuito equivalente se tiene que la corriente está dada por la siguiente expresión:

$$I = \frac{V_{ca}}{R_e + R_g} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$I = \frac{V_c - V_a}{R_e + R_g} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde:

I = Corriente galvánica

V_{ca} = Voltaje de la celda galvánica

V_c = Voltaje de media celda del cátodo.

V_a = Voltaje de media celda del ánodo.

R_e = Resistencia del electrolito

R_g = Resistencia del circuito de retorno.

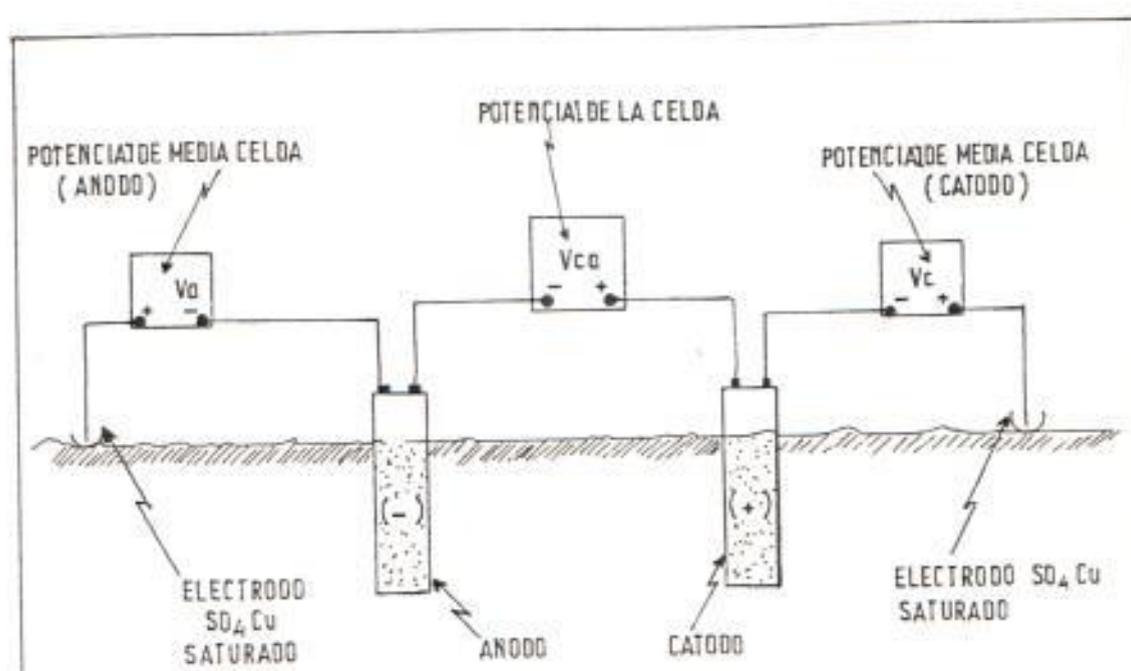


FIG. 1.18. a - CELDA GALVANICA TIPICA.

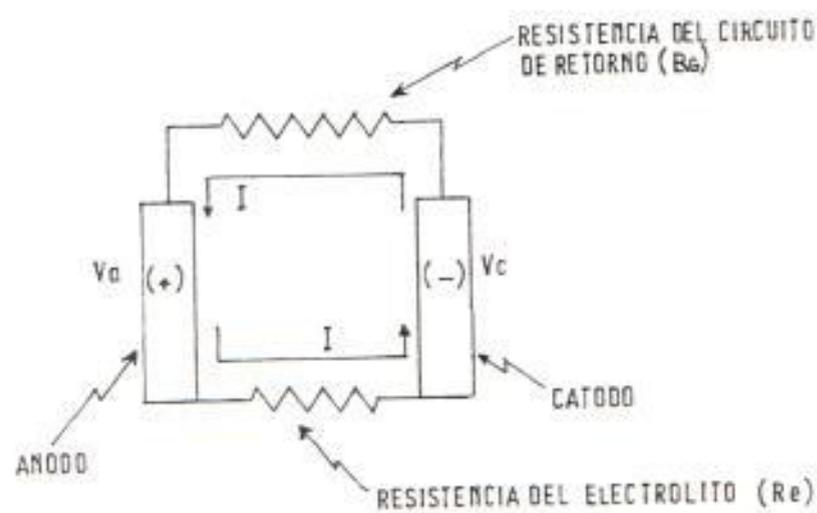


FIG. 1.18. b - CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA CELDA GALVANICA.

La ecuación 2 no es exacta. debido a que en esta se desprecia el efecto de polarización. el cual tiende a disminuir la intensidad de la corriente galvánica. El efecto de polarización constituye la concentración de iones de hidrógeno en la superficie catódica. siendo esta la causa por la que se presta atención a la concentración de oxígeno. pues este hace que se disuelvan los iones de hidrógeno en el electrolito. La capa polarizante se la puede considerar como una capa aislante que introduce una resistencia óhmica. la misma que tiende a disminuir la corriente de corrosión. En la práctica se utiliza una caída de tensión de 2V para compensar el fenómeno de polarización.

1.4.5. EFECTO DEL AREA RELATIVA DE LOS ELECTRODOS

Un entendimiento del efecto que producido por el tamaño relativo entre las áreas anódicas y catódicas. es muy importante para poder explicar el por qué en una combinación de metales diferentes se puede producir una corrosión muy severa bajo ciertas condiciones de áreas y en cambio bajo otras condiciones de

Áreas se produce una corrosión casi despreciable.

Cuando nos encontramos ante el caso en que el ánodo es relativamente pequeño en relación al cátodo, y que ambos están en contacto y sumergidos en un electrolito, se puede observar que el ánodo estará sujeto a una descarga de corriente de una elevada densidad (amperios por unidad de área) y que la densidad de corriente en la superficie del cátodo será muy pequeña para polarizarlo. Bajo estas condiciones y además en un medio de baja resistividad, la corrosión sería muy severa, esto se debe a que mayor cantidad de metal anódico será disuelto en el electrolito.

Si en cambio, nos encontramos en la situación opuesta, es decir cuando el ánodo es relativamente grande en relación al cátodo: la corriente continuaría descargándose desde el ánodo pero, su densidad sería muy pequeña en la superficie anódica y además, la densidad de corriente en la superficie del cátodo sería muy elevada. Como producto de esto se tiene que la corrosión sería casi despreciable.

En la figura #1.19 se puede observar como varia la velocidad de la corrosión al variar la razón de áreas cátodo/ánodo.

1.4.6. EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE LOS ELECTRODOS

El efecto de la distancia entre los electrodos, juega un papel muy importante en el proceso de la corrosión galvánica. Al encontrarse los electrodos relativamente cercanos la corrosión a producirse sería mayor que si los electrodos estuviesen ubicados a mayor distancia entre sí, este se debe a que mayor distancia entre los electrodos mayor es la resistencia eléctrica entre el cátodo y el ánodo y, como consecuencia se tendrá una menor corriente galvánica.

1.5. FORMAS Y MEDIOS PARA PREVENIR Y ELIMINAR LA CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS EN GENERAL

Entre los métodos que se utilizan para prevenir y eliminar la corrosión encontramos los siguientes:

a) ELIMINANDO EL USO DE LOS METALES DIFERENTES.-

Una reducción considerable de la corrosión puede ser obtenida al evitar el uso de metales diferentes que estén conectados eléctricamente, especialmente en suelos corrosivos.

Algunos usos de metales diferentes son difíciles de eliminar, y en muchos casos estos resultan prácticos y económicos para lo cual es necesario que se los aisle eléctricamente. Sin embargo en estructuras en donde las áreas catódicas resultan pequeñas en relación a las anódicas, el uso de metales diferentes no causaría daños de magnitud considerable, aún en suelos corrosivos; esto se debe a la polarización completa de las áreas catódicas.

b) INSTALANDO AISLAMIENTO ELECTRICO

Una reducción considerable de la corrosión se consigue con la instalación adecuada de aislamiento eléctrico en acoplamientos, uniones, etc, siempre que esto sea factible; un ejemplo de esto se puede ver en la figura #1.20. Esto no solamente debería realizarse en estructuras en donde se utilicen metales diferentes sino también en sitios en donde por ejemplo existan

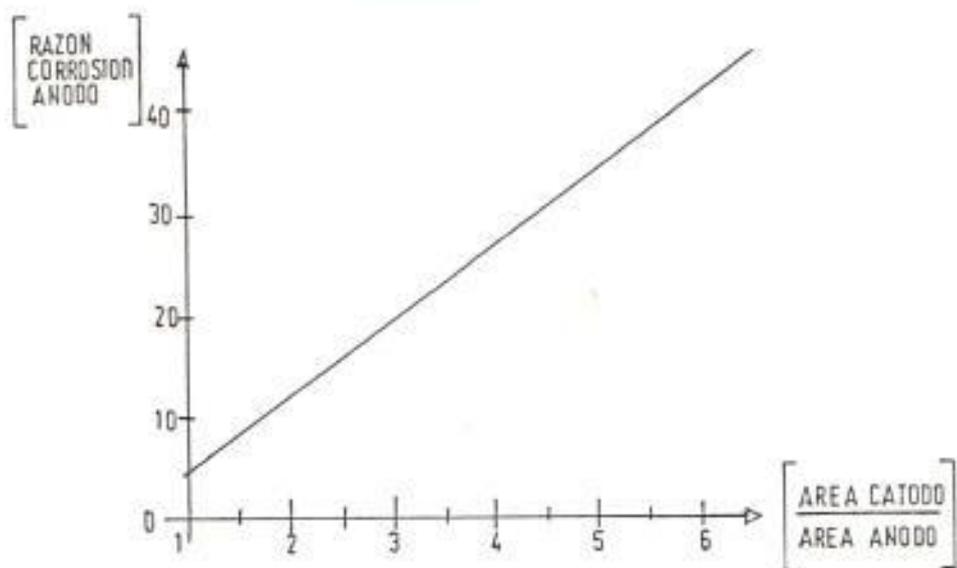


FIG. 1.19_ EFECTO DEL AREA DURANTE LA CORROSION GALVANICA.

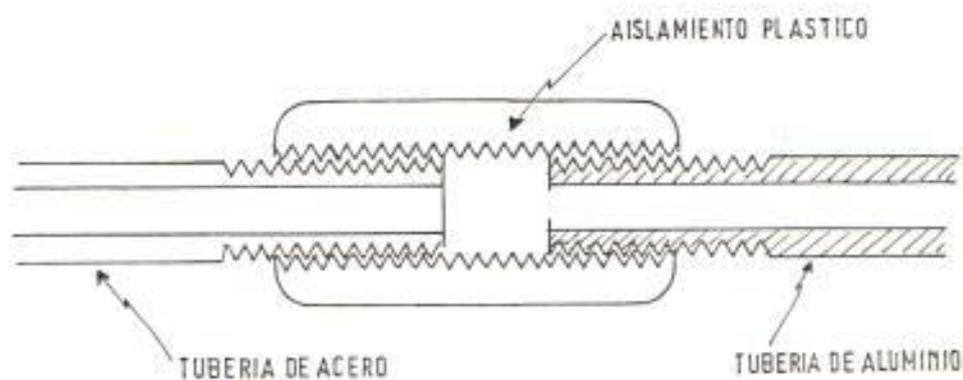


FIG. 1.20_ PROTECCION CONTRA LA CORROSION POR MEDIO DE LA APLICACION DE AISLAMIENTO ELECTRICO.

metales iguales pero, uno pertenezca a una estructura vieja y el otro a una estructura nueva. En muchos países se utiliza esta práctica para prevenir la corrosión en acueductos, sistemas de distribución de gas, etc.

c) INSTALANDO REVESTIMIENTO PROTECTOR

En la construcción de sistemas de tuberías, el revestimiento protector es muy utilizado, en especial en tuberías de acero. Considerando muchos factores que contribuyen a la corrosión, y muchos de los cuales son imprescindibles en la realización del diseño y de la construcción. El uso de un alto grado de revestimiento resulta muy económico, especialmente en sistema cuya interrupción traería graves consecuencias que incluso terminarían en desastres. Muchas veces la aplicación de este método reduce en alto grado la reducción de otros tipos de protección como por ejemplo la protección catódica.

d) INSTALANDO PROTECCION CATODICA.-

Cada día la aplicación de la protección catódica

para reducir la corrosión, se hace mayor. Este método resulta aplicable para todo tipo de estructura que se encuentre enterrada o sumergida en un medio corrosivo.

La protección consiste en inyectar una corriente DC en sentido contrario a la corriente galvánica, produciendo de esta manera la transformación de las áreas anódicas en catódicas. La magnitud de la corriente debe ser tal que tienda a hacer que el potencial estructura suelo (potencial de media celda de la estructura con respecto a suelo) sea más electronegativo que -850mV . La corriente de protección se las obtiene mediante pruebas en laboratorios de corrosión. La NACE (National Association of Corrosion Engineers) es la entidad de encargada de normalizar dichas corrientes de protección, las mismas que están dadas de acuerdo al material que se desee proteger.

Dada la importancia de este método de protección contra la corrosión, el capítulo II se lo dedicará exclusivamente al estudio de esta.

C A P I T U L O I I

PROTECCION CATODICA: TIPOS Y METODOS DE PROTECCION CATODICA

2.1. TEORIA BASICA DE LA PROTECCION CATODICA

En el capítulo anterior se indicó que la protección catódica constituía una de las soluciones contra el problema de la corrosión galvánica de una estructura dada y se realizó una breve introducción a esta técnica, esto hace necesario que se realice una explicación más seria de lo que es la protección catódica.

Se entiende por protección catódica a la reducción o eliminación de la corrosión, convirtiendo a la estructura a proteger en una superficie catódica para lo cual inyecta una corriente directa en sentido contrario a la corriente de corrosión o corriente galvánica; la inyección de corriente la puede realizar mediante ánodos de sacrificio o mediante una fuente DC.

Cuando la corriente de protección fluye desde el electrolito hacia el metal, un cambio químico toma lugar, el mismo que produce que el potencial

estructura suelo del metal se vuelva mas electronegativo que el potencial de la estructura cuando no estaba protegida. La corriente de protección que fluye desde las camas de tierra a las áreas catódicas, y el resultado de los cambios químicos que toma lugar en las áreas catódicas, hace el potencial del cátodo mas negativo, con el resultado que exista una pequeña diferencia de potencial entre las áreas catódicas y anódicas, y que la corriente galvánica sea reducida. La corriente que fluye desde las camas de tierra también tiende a eliminar el flujo de las corrientes galvánicas desde las áreas anódicas. Cuando una corriente de protección fluye para polarizar completamente las áreas catódicas, ninguna corriente galvánica fluye y la corrosión es eliminada. En la práctica, luego que una polarización completa ha sido conseguida, es factible mantener la corrosión en un nivel cero con una corriente de protección menor que la corriente inicial. En algunos suelos, y bajo ciertas circunstancias, si se mantiene constante la corriente de protección, se tiende a originar una película de polarización en la superficie del metal, la cual disminuye. La cantidad de corriente requerida para dar una protección completa depende de factores como:

- a) Resistencia eléctrica del revestimiento protector

- y del área metal expuesta a la corrosión.
- b) Condiciones del suelo.
 - c) Extensión relativa de las áreas catódicas y áreas anódicas.
 - d) Distribución de la corriente de protección.
 - e) Tipo de metal utilizado en la estructura.

La NACE (National Association of Corrosion Engineer) es la entidad encargada de recomendar valores referenciales de densidades de corrientes de protección, esto es valores que podrán ser utilizados para el dimensionamiento de los sistemas de protección pero, dichos valores no necesariamente serán los valores de trabajo del sistema de protección catódica para obtener un nivel de protección adecuado.

El método generalmente utilizado para determinar si se está suministrando la suficiente corriente externa, consiste en establecer si el potencial estructura suelo con respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 es más electronegativo que -850mV .

Las figuras #2.1 a - b - c muestran sistemas típicos de protección catódica. Cabe la pena señalar que la

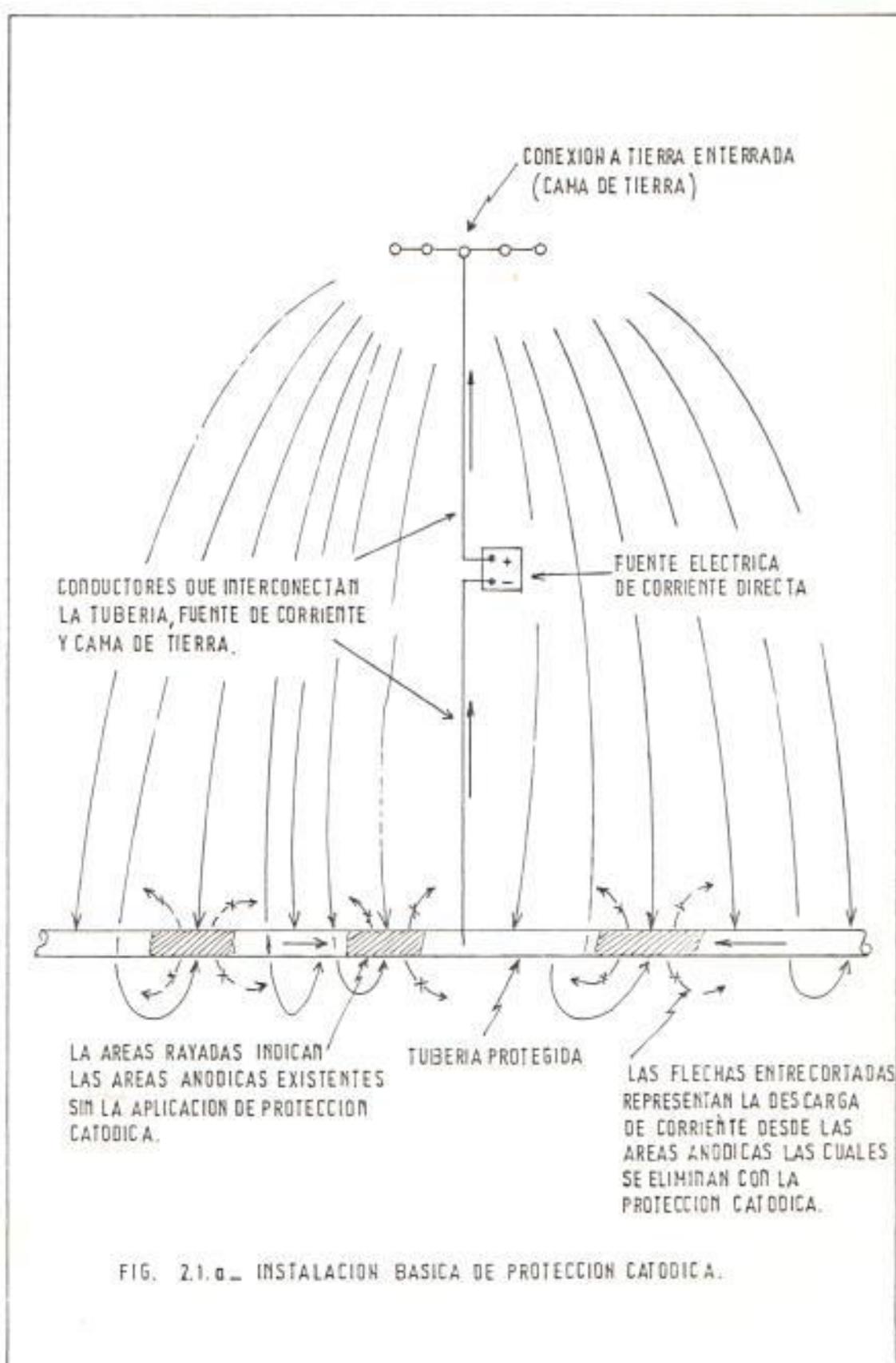


FIG. 2.1.a. - INSTALACION BASICA DE PROTECCION CATODICA.

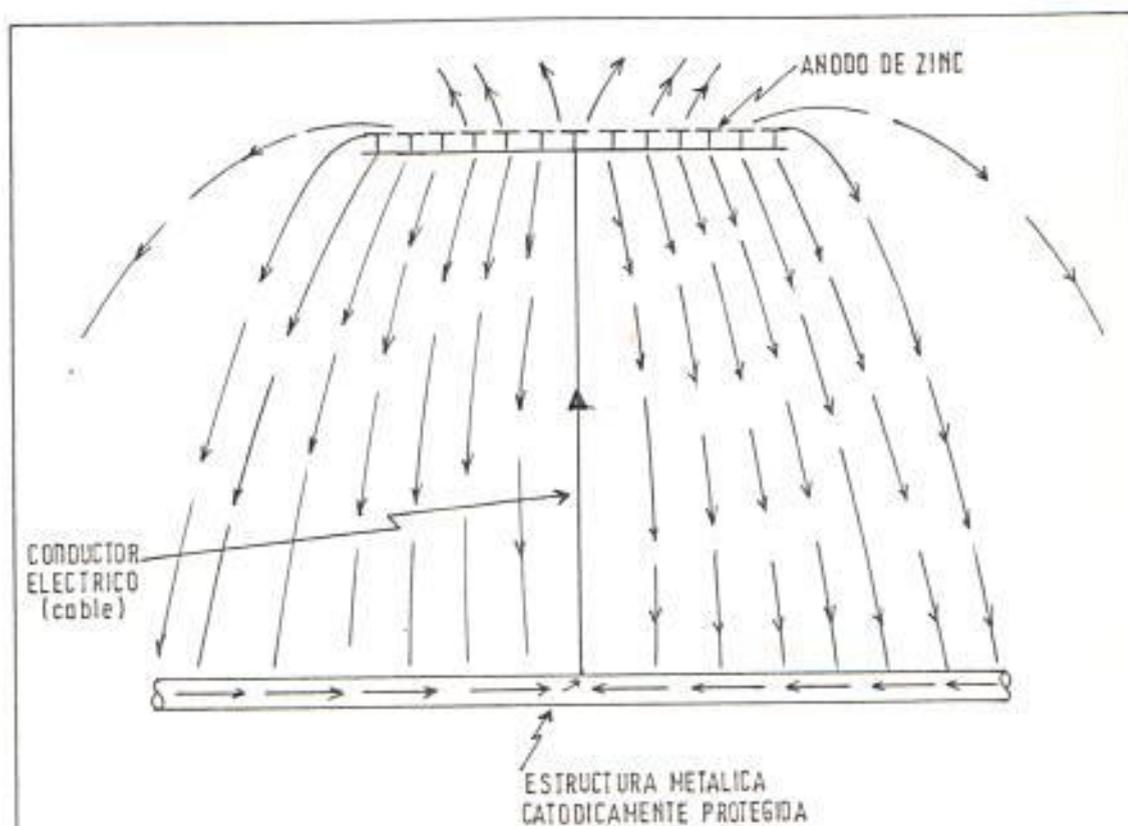


FIG. 2.1. b_ ANODO DE ZINC CONECTADOS EN GRUPOS CON CONEXION COMUN A LA ESTRUCTURA.

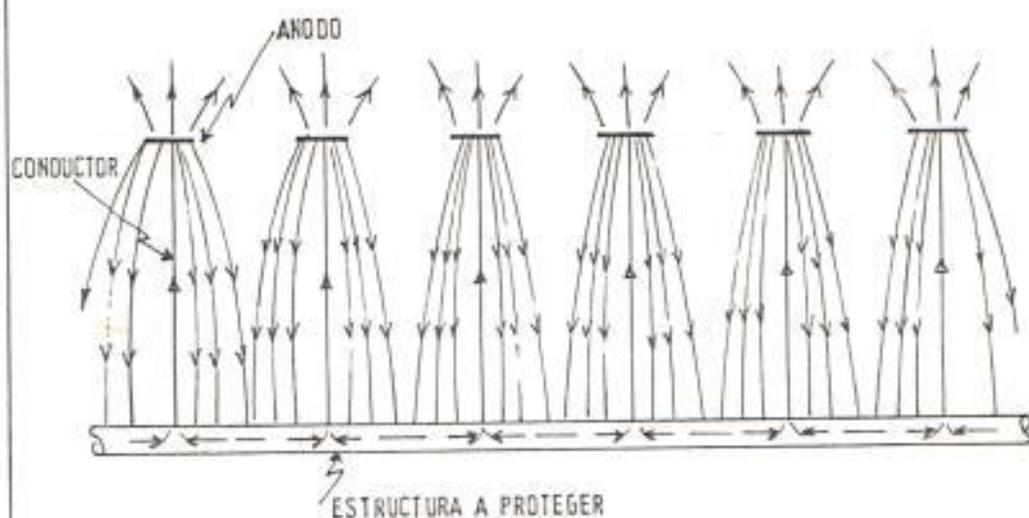


FIG. 2.1. c_ ANODOS DE ZINC INSTALADOS A LO LARGO DE LA ESTRUCTURA CON CONEXION DIRECTA DESDE LA ESTRUCTURA A CADA ANODO.

protección catódica es dada únicamente a las áreas externas expuestas al medio corrosivo pero no a las áreas internas. Esto será cierto aún en el caso que por el interior de la tubería circule un electrolito, esto se debe a que la corriente es atrapada por la estructura y regresada a la fuente, también se dice que es debido al apantallamiento eléctrico. Además las superficies expuestas al aire también no reciben protección catódica debido a que el aire no es conductor eléctrico. Otro ejemplo de apantallamiento eléctrico sería un grupo de tuberías a la cual se le da protección catódica como se muestra en la figura #2.2, en este sistema se dará protección únicamente a las tuberías externas y una pequeña corriente fluirá hacia las estructuras internas. De lo anterior se concluye que las estructuras internas estarían totalmente desprotegidas en cambio las externas recibirían protección catódica completa, es por esto que para estos casos se utilizan sistemas especiales de protección catódica.

2.2. TIPOS DE PROTECCION CATODICA

Los tipos de protección catódica están dados por la forma de inyectar la corriente de protección, esto es si se utiliza una fuente de corriente directa

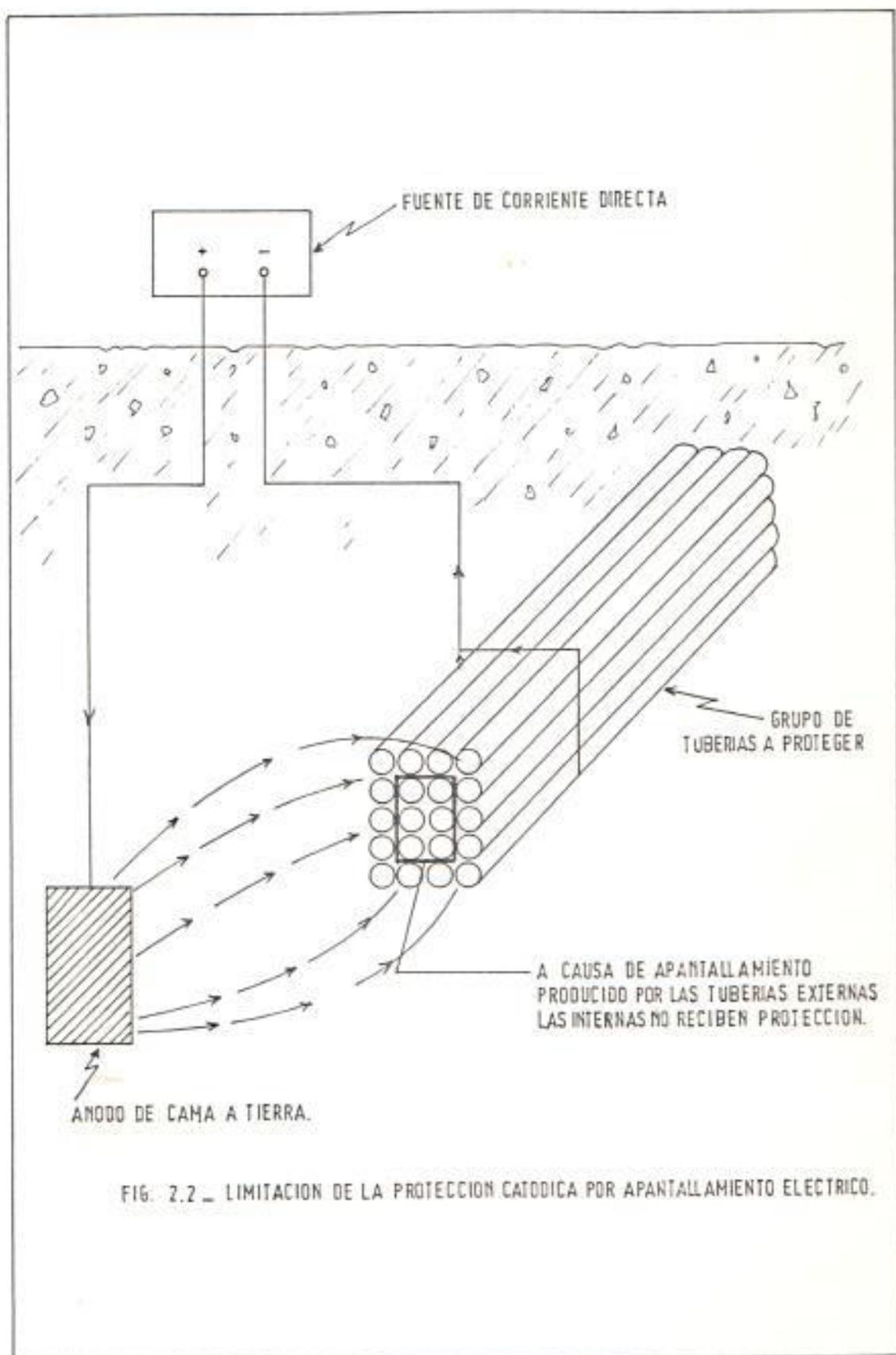


FIG. 2.2 - LIMITACION DE LA PROTECCION CATODICA POR APANTALLAMIENTO ELECTICO.

(generador DC, puente rectificador, banco de baterías, etc), o si se utilizan otros metales cuyos potenciales de media celda sean menos nobles, los mismos que irán conectados eléctricamente a la estructura a proteger; el primer caso se denomina protección catódica mediante corriente impresa y el segundo se denomina protección catódica utilizando ánodos de sacrificio.

2.2.1. PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO

Un ánodo galvánico o también llamado ánodo de sacrificio es un metal el cual tendrá una diferencia de potencial con respecto a la estructura a proteger descargando de esta manera una corriente sobre dicha estructura, la misma que se da en sentido contrario a la corriente producida durante el proceso de la corrosión. Para dar protección a la estructura el ánodo de sacrificio debe estar enterrado o sumergido en el medio que rodea a la estructura, y además la estructura a proteger y el ánodo deben estar unidos por medio de un conductor eléctrico. En la figura #2.3 se puede apreciar un sistema elemental de la protección catódica utilizando ánodos de

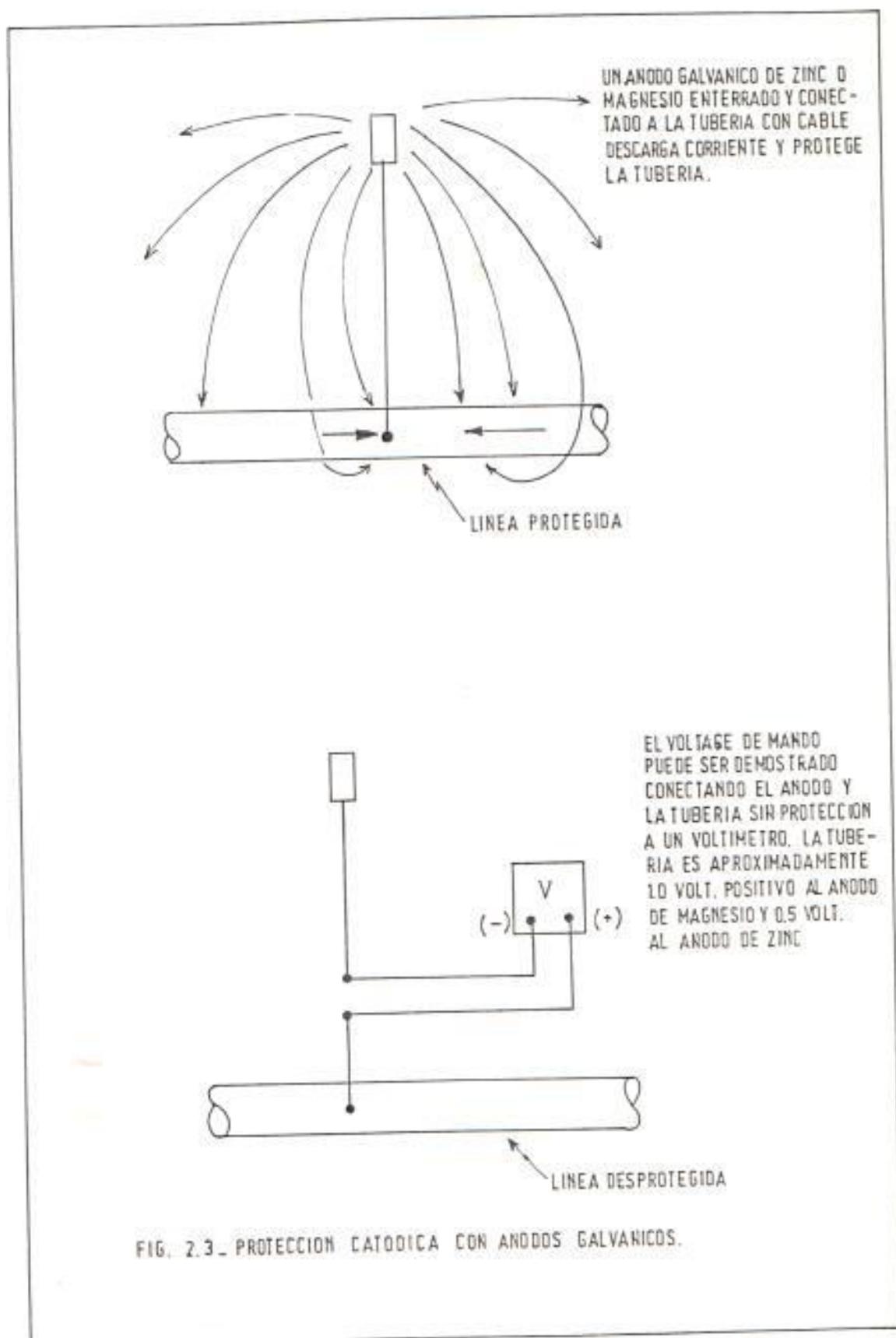


FIG. 2.3. PROTECCION CATODICA CON ANODOS GALVANICOS.

sacrificio.

Este método de protección catódica es utilizado en instalaciones que requieren de una pequeña corriente de protección, esto se debe a las pequeñas magnitudes de potenciales de media celda que manejan los ánodos de sacrificio.

Dada la pequeña diferencia de potencial que se establece entre la estructura a proteger y los ánodos galvánicos, los valores de corriente están limitados por los valores de resistividad del suelo que contiene a la estructura; esto significa que para instalaciones normales, los ánodos galvánicos son utilizados en terrenos de baja resistividad; se conoce como instalación normal, una en la cual se espera que la corriente proveniente de un ánodo galvánico proteja una considerable cantidad de superficie de la estructura.

2.2.1.1. TIPOS DE ANODOS GALVANICOS

La protección catódica utilizando

ánodos de sacrificio se la realiza mediante ánodos de aleaciones de zinc, magnesio o aluminio, que son menos nobles que el acero, además estos tienen la ventaja de estar disponibles en el mercado a precios más económicos. A continuación se describirá cada uno de ellos:

1) ALEACIONES DE MAGNESIO

Estas aleaciones son por lo general las más recomendadas para la fabricación de ánodos galvánicos, por las siguientes razones:

- a) La diferencia de potenciales entre la aleación de magnesio y el acero (este último es el más utilizado en estructuras enterradas), es mayor que la que hay entre el zinc y el aluminio con el hierro. En consecuencia, por unidad de peso de metal aplicado, la aleación de magnesio entrega más corriente que los otros metales. A continuación anotamos los potenciales de

estos metales con respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre:

Aleación de magnesio	-1.45V
Zinc	-1.1V
Aluminio	-1.1V

Estos potenciales son desde luego medidos en una estructura de acero protegida catódicamente y cuyo potencial de polarización es igual a -850mV .

- b) Los ánodos de aleación de magnesio son atacados en menor forma por la polarización, de modo que hay tan poca probabilidad que la diferencia de potencial respecto al acero baje a un nivel inferior al requerido por la protección.

c) Estos ánodos poseen una mayor capacidad de amperios-hora/kilogramos.

En uso normal la capacidad de estos ánodos es del orden del 1.000 amperios-hora/libra (2.204 A-H/kg).

2) ZINC

Se requiere ánodos de zinc de alta pureza a fin de garantizar una corriente protectora efectiva. El zinc además produce una corriente de salida relativamente baja, debido a que la diferencia de potencial del zinc respecto al acero es de solamente 0.25 V y comparados con los 0.60 V que brinda el magnesio resulta muy baja.

Sin embargo, debido a su pequeña corriente de salida, tiene una duración más prolongada que el

magnesio de lo que se desprende que su empleo se limita únicamente a instalaciones que requieren de una pequeña corriente protectora y larga vida de servicio.

3) ALUMINIO

El aluminio conteniendo un 5% de zinc y 0.17% de hierro tiene un uso limitado a la protección en el agua de mar. Debido además que tiene una diferencia de potencial similar a la del zinc respecto al acero protegido; su aplicación es también similar, aunque en la práctica no se ha llegado todavía a ampliar su uso.

La tabla III muestra en resumen las características de los ánodos galvánicos.

TABLA III.- RESUMEN DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS GALVANICOS

MATERIAL	DIFERENCIA DE POTENCIAL RESPECTO AL ACERO A -0.85V	DIFERENCIA RESPECTO AL ELECT. Cu/CuSO4	A-H/Kg
Mg	0.6	-1.45	2204
Zn	0.25	-1.10	335
Al	0.25	-1.10	2200

2.2.2. PROTECCION CATODICA CON CORRIENTE IMPRESA

Con la finalidad de librarnos del limitado voltaje de mando asociado con los ánodos galvánicos, se utiliza una fuente externa DC con el fin de imprimir un corriente de protección a la estructura a proteger; la fuente DC debe ir conectada a la cama de tierra y a la estructura a proteger como se muestra en la figura #2.4.

El terminal positivo de la fuente debe ser conectado siempre a la cama de tierra, por

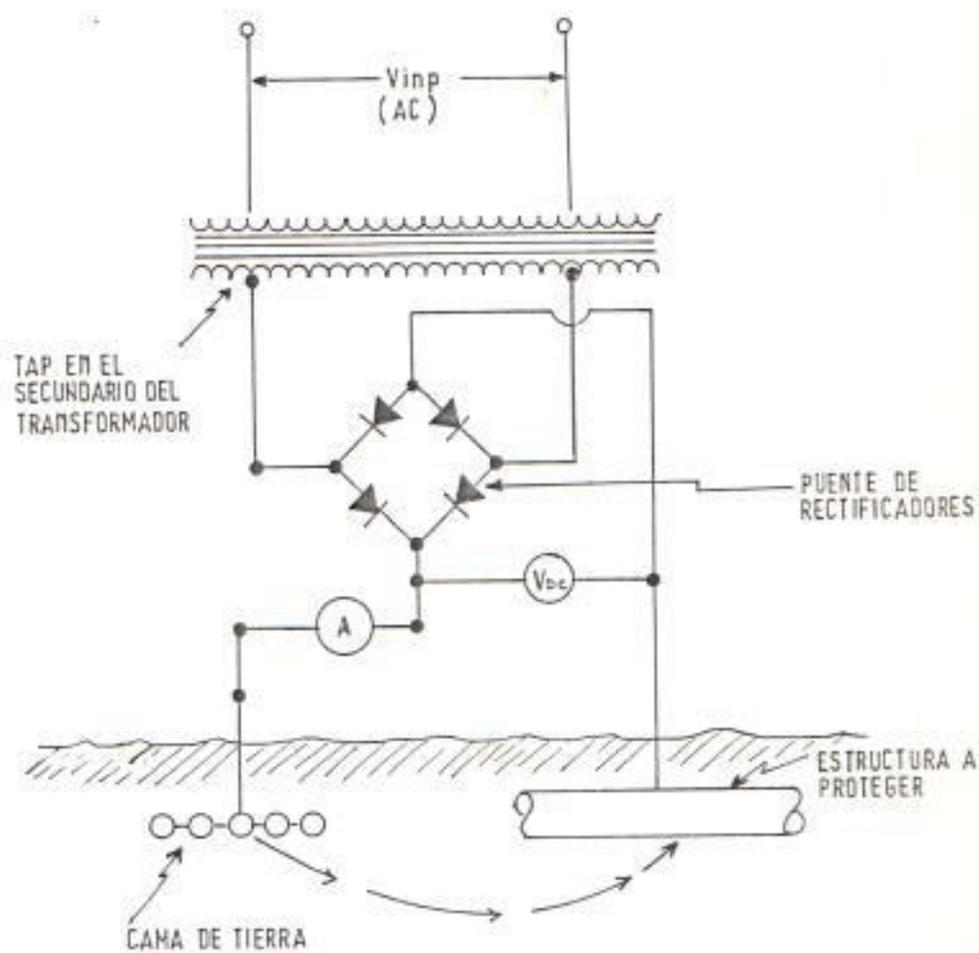


FIG. 2.4_ CIRCUITO BASICO DE PUENTE DE RECTIFICADORES PARA EL USO EN PROTECCION CATODICA.

medio de la cual se descarga la corriente de protección necesaria para dar protección. El terminal negativo debe ir conectado a la estructura a proteger en los puntos de crenage. En el caso que los terminales de la fuente sean erróneamente conectados lo que se conseguiría son resultados opuestos a los deseados.

Algo importante resulta el hecho que todas las partes de las camas de tierra que se encuentran enterradas sufrirán la corrosión en todos sus puntos. Esto incluye al cable que sale de la fuente hasta la cama de tierra, y el cable que interconecta los ánodos entre sí en la cama de tierra. Para prevenir la descarga de corriente desde los cables se debe utilizar cables con aislamiento adecuado para uso subterráneo o que puedan ser usados sumergidos en agua, y también las uniones deberán ser aisladas correctamente.

La fuente mas común es el puente rectificador, este dispositivo convierte la corriente alterna en corriente directa. Los rectificadores generalmente están provistos de

dispositivos para variar la salida de voltaje en pequeños incrementos en rangos razonablemente amplios.

Otras fuentes de poder de corriente directa pueden ser: un grupo de baterías, generadores DC, etc.

2.2.2.1. MATERIALES PARA ANODOS AUXILIARES

Los ánodos para el uso de sistemas de corriente impresa preferiblemente deberían de corroerse a una velocidad relativamente baja cuando descarguen corriente.

Cualquier material conductor de corriente podría ser empleado como ánodo auxiliar, esto se debe a la razón fundamental para su selección es la economía, lo que determina que el material a usarse debe ser aquel que presente menor costo y a la vez su utilización entregue resultados satisfactorios de su operación.

Como los ánodos son los que se consumen cuando estos protegen a una estructura, lo ideal será que el material seleccionado pueda considerar el consumo relativamente bajo y un costo reducido. El hierro puro por ejemplo (que es menos noble que el acero), tiene un rango de pérdida de peso de aproximadamente 7 kg/A, al comparar con el acero de desecho de tubería resulta poco económico.

Otros materiales para ánodos ampliamente utilizados es el carbón o grafito. Los ánodos de estos materiales también se consumen a baja velocidad (del orden de una libra o menos por amperio-año). Estos ánodos están disponibles en diferentes tamaños y formas.

Para trabajos marinos, se han obtenido buenos resultados al utilizar aleación de plomo plata. Dichos ánodos poseen una película de

peróxido en su superficie externa, lo cual permite que los ánodos se consuman a una velocidad muy baja.

También son utilizados los ánodos de platino los cuales se consumen a una velocidad relativamente baja.

La tabla IV muestra la característica de los diferentes tipos de ánodos comúnmente utilizado para sistemas de protección catódica de corriente impresa.

TABLA IV.- CONSUMO DE MATERIALES UTILIZADOS
COMUNMENTE COMO ANODOS
AUXILIARES.

MATERIAL	RANGO DE CONSUMO
Tubería de acero de desecho, rieles, etc.	6.6 a 9 Kg/A-año
Hierro fundido, tuberías viejas, etc.	0.9 a 9 Kg/A-año
Bloques de grafito	hasta 0.9 Kg/A-año
Piomo o plata	0.1 Kg/A-año

a) ACERO DE DESECHO

Tiene la ventaja que es obtenible en cantidades grandes y a un bajo costo. Para densidades de corriente normalmente empleadas para protección, este material cuando viene en forma de rieles viejos, tuberías viejas o secciones estructurales adquiere una reducción uniforme que es proporcional a la corriente. Sin embargo, ya que este tipo de material se consigue en secciones largas y comparativamente delgadas y cuando estas tienen que ser enterradas en el suelo pueden atravesar diversos estratos de suelo con distintas resistividades, se tiene como resultado el consumo rápido de estos y como consecuencia se queda desconectado el ánodo del sistema.

b) HIERRO FUNDIDO DE DESECHO, TUBERIAS VIEJAS, ETC.

Por lo general las piezas de hierro fundido tienen la ventaja de tener una sección transversal relativamente delgada, de modo que una sola pieza podría estar ubicada en un suelo de resistividad relativamente uniforme. Además si estas piezas se las reviste de grafito, este último se consume antes que el hierro, provocando la duración mas larga de estos ánodos, y reduciendo su rango de consumo.

c) GRAFITO

El empleo de este material ha sido incrementado debido que tiene como característica un bajo rango de consumo, y aunque resulta un poco más caro que el hierro fundido, es comúnmente utilizado pues su renovación es menos frecuente que el hierro.

Los ánodos de este material generalmente están disponibles en forma cilíndrica e impregnados en resina o cera que reducen la posibilidad de fractura conforme el ánodo es consumido. Traen además incorporados terminales y cables para conexión, pues su instalación es delicada debido al material que resulta muy frágil.

Las dimensiones más comunes de fabricación y disponibles en el mercado varían entre 65mm. por 760mm. de longitud, hasta 150mm. de diámetro por 1.830mm. de longitud.

Para la instalación en suelos, los ánodos de grafito son regularmente rellenos de cera o resina con rellenos de materiales con disco de coke. Con estas características se puede conseguir densidades superficiales de corriente de hasta 11A/m lo que hace que con esta corriente de salida el rango de

consumo sea relativamente bajo.

Si se eleva demasiado los rangos de salida se deteriora la superficie. Sin embargo se puede elevar el rango de salida de corriente en forma temporal, para polarizar la estructura a proteger y sin provocar un deterioro mayor del ánodo.

2.3. SELECCION DE TIPOS DE ANODOS Y ESPACIAMIENTO

Antes de realizar la selección del tipo de ánodos que se deban de utilizar en una instalación dada se deben de haber resuelto las siguientes interrogantes:

- a) Cual sería la mejor alternativa: utilizar ánodos galvánico o utilizar corriente impresa?
- b) Cual será la cantidad de corriente requerida para lograr protección catódica?

Para la selección del tipo de ánodos se deben cumplir las siguientes es condiciones:

- a) La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo (estructura a proteger) debe ser de magnitud tal que pueda vencer el voltaje de la celda galvánica.
- b) El material del ánodo debe tener la suficiente cantidad de energía para así permitir la prolongada duración de una cantidad razonable de material. El contenido de energía del material de un ánodo está dada por los A-h/LB.s
- c) Los ánodos deben tener una buena eficiencia.

En el caso de un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio el espaciamiento que debe haber entre un ánodo y otro debe ser proporcional al área cubierta por cada ánodo. Para el caso de sistemas de corriente impresa los ánodos deben estar separados de una forma tal que se pueda tener una buena distribución de corriente. en los capítulo IV y V se describen estos criterios por medio de ejemplos de diseño.

2.4. INSTRUMENTOS Y MEDICIONES EN LA PROTECCION CATODICA

Las condiciones de potencial y de corriente asociadas

con la corrosión galvánica y la interpretación de las mediciones, constituyen una parte muy importante en la investigación de la corrosión y en la aplicación de la protección catódica. Así pues debido a que la corrosión de un metal enterrado o sumergido, está asociada con potenciales eléctricos y el flujo de corriente eléctrica, los puntos en donde toma lugar la corrosión pueden ser determinados mediante mediciones eléctricas.

Las mediciones eléctricas en investigaciones de corrosión y aplicación de protección catódica, pueden ser realizadas a estructuras muy grandes pero, los valores asociados a dichas mediciones pueden ser muy pequeños.

Existen factores que tienen influencia sobre la selección de los instrumentos de medición, como lo son: amortiguamiento, portabilidad, sensibilidad, periodo, exactitud, etc. El amortiguamiento es el término utilizado para describir el control de oscilamiento periódico del sistema en movimiento, de tal manera que la aguja se estabilice rápidamente en su posición final; esta característica es muy por ejemplo cuando se realizan mediciones de corrientes parásitas de sistemas de carros eléctricos. El

periodo de un instrumento se refiere al tiempo después que la corriente o potencial es aplicado a los terminales antes que la aguja se estabilice y se pueda tomar lecturas. En estudios de protección catódica es común el uso de multímetros como por el conocido como MILLER.

2.4.1. MEDICIONES DE VOLTAJE

Las mediciones de potencial con respecto al electrolito son utilizadas comúnmente como criterio de protección. La base de esto es que si la corriente está fluyendo hacia la estructura a proteger, debe de haber un cambio de potencial el cual es una combinación de la caída de voltaje a través de la resistencia entre la estructura protegida y el medio ambiente y, del potencial de polarización desarrollado en la superficie de la estructura. La resistencia entre la estructura protegida y el medio ambiente incluye la resistencia de cualquier pintura aislante o revestimiento de la estructura. El consecuente resultado es que la estructura protegida se hace más negativa con respecto a su medio ambiente. Esto se ilustra en la

figura #2.5.

Si suficiente corriente es colectada por las áreas catódicas a polarizar a potencial de circuito abierto de las áreas anódicas, la corrosión sería detenida debido a que no habrá potencial que cause la circulación de corrientes galvánicas.

En la práctica, en aplicaciones de protección catódica, tales delicados blancos resultan poco practicables, y es usual tener como resultado flujo de corriente desde las áreas anódicas. Esto, sin embargo indica que la medición de potencial de polarización debería de ser más exacta con el fin de predecir la cantidad mínima de corriente que daría protección completa en la superficie del metal a proteger. En base de esto, el lugar deseable para medir el potencial de polarización debería ser entre la superficie del metal y el medio que lo rodea tal como se representa los terminales marcados con la letra F en la figura #2.5 y que constituyen los terminales de polarización. En la

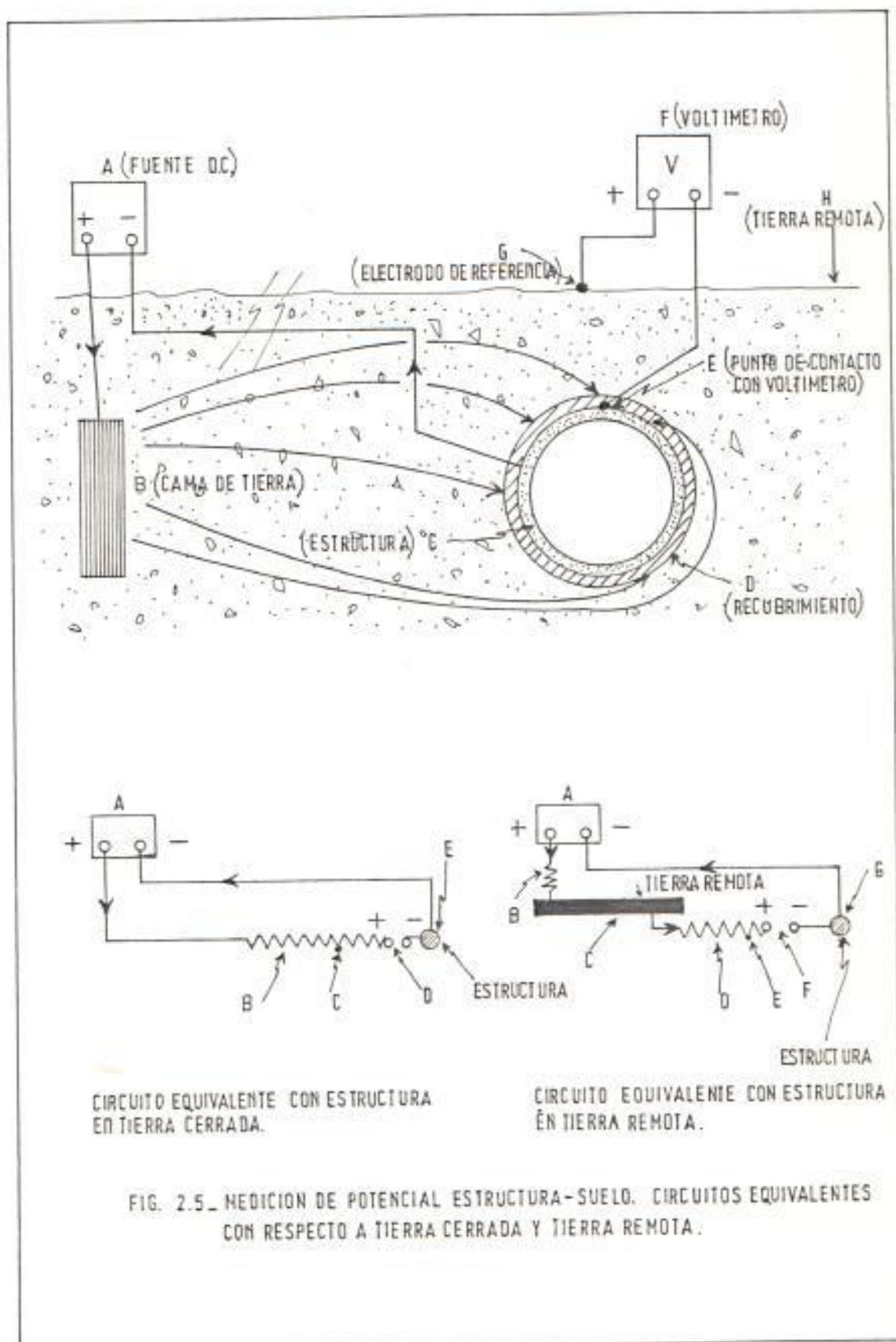


FIG. 2.5_ MEDICION DE POTENCIAL ESTRUCTURA-SUELO. CIRCUITOS EQUIVALENTES CON RESPECTO A TIERRA CERRADA Y TIERRA REMOTA.

práctica esto muy pocas veces es posible (especialmente en estructuras enterradas), por lo tanto se hace necesario medir el potencial entre la estructura y superficie del medio ambiente directamente encima de la estructura. El potencial medido entonces incluirá el potencial de polarización más una porción de caída de voltaje a través de la estructura con respecto a la tierra remota tal como se muestra el voltaje entre la estructura y el punto A en la figura #2.5. Bajo algunas condiciones, resulta ideal el medir el voltaje entre la estructura y la tierra remota (punto C).

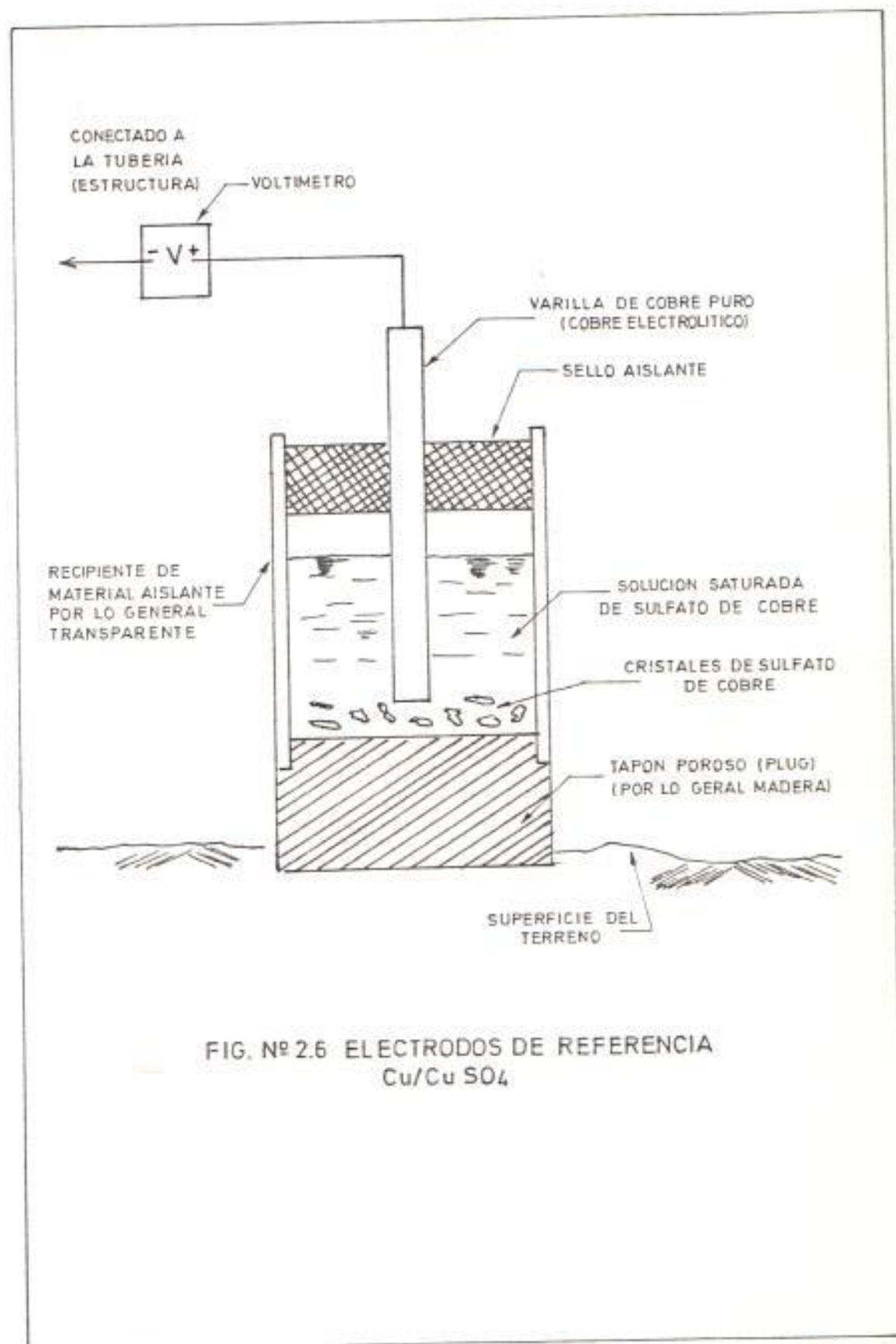
La expresión tierra remota utilizada en el párrafo anterior y representada en la figura #2.5, significa el conductor infinito (sin resistencia eléctrica) el cual es la masa de la tierra.

Una vez que se ha resuelto donde medir el potencial, la próxima pregunta es como hacerlo y cuanto voltaje es necesario para indicar protección. Sin embargo al medir un potencial entre la estructura y la tierra, es fácil instalar un conductor eléctrico que conecte el voltímetro con la estructura, pero conectar un

conductor desde el voltímetro a tierra (electrolito) resulta un problema. Este problema se soluciona al utilizar un electrodo de referencia.

Un electrodo de referencia (también se conocen como media celda) muy común es el electrodo de Cobre-Cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), el mismo que se ilustra en la figura #2.6. Cualquier lectura de voltaje tomada entre la estructura y el electrodo de referencia consistirá de dos potenciales de media celda. Uno de estos será el potencial de media celda entre el electrodo mismo y la tierra a través del del contacto con esta por medio de un tapón poroso; este voltaje es constante. En la práctica no es necesario conocer tales voltajes por separado, debido a que se está interesado principalmenete en los cambios de de la estructura con respecto al electrolito y estos cambios son bien deducidos a través del voltímetro. En la práctica se ha adoptado un valor máximo de -850mV como requisito mínimo indicativo de protección catódica.

El grado de protección catódica también podría



ser evaluado utilizando otros electrodos de referencia que sean estables para lo cual los potenciales los potenciales indicativos de protección catódica sean diferentes cuando sus potenciales de media celda difieran de aquel del voltaje del electrodo Cu/CuSO_4 . El electrodo de calomelano es utilizado por muchos investigadores. También es muy utilizado el electrodo de Cloruro de Plata-Plata en trabajos marinos, cuando el electrodo deba de ser sumergido.

El electrodo de Zinc realiza un buen trabajo cuando es instalado permanentemente como electrodo de referencia para realizar mediciones periódicas, esto se lo hace con el fin de poder realizar el chequeo de los potenciales de protección.

2.4.2. MEDICIONES DE CORRIENTE

Como se conoce la corrosión es producida por una corriente galvánica que circula desde la estructura en ciertos puntos.

Debido a que la estructura presenta una cierta

resistencia eléctrica, se produce una caída de tensión en dicha estructura. Las caídas de tensión son usualmente muy pequeñas, pero pueden ser determinadas mediante el método denominado dos puntos de prueba donde se dispone de dos puntos de prueba ubicados sobre la estructura a una distancia conocida; la corriente puede ser medida mediante la caída de tensión entre los dos puntos y, con la resistencia eléctrica de acuerdo al material y valiéndose de la ley de Ohm. Este procedimiento se muestra en la figura #2.7.

Con este procedimiento se podrá determinar además la dirección de la corriente y los lugares en donde esta cambie de dirección; el cambio de dirección de la corriente nos indica los lugares en donde están localizadas las áreas anódicas.

2.4.3. MEDICIONES DE RESISTENCIA DEL SUELO

Las mediciones de resistividades eléctricas del electrolito es una arma muy importante en los estudios de la corrosión y de la protección catódica; así por ejemplo se tiene

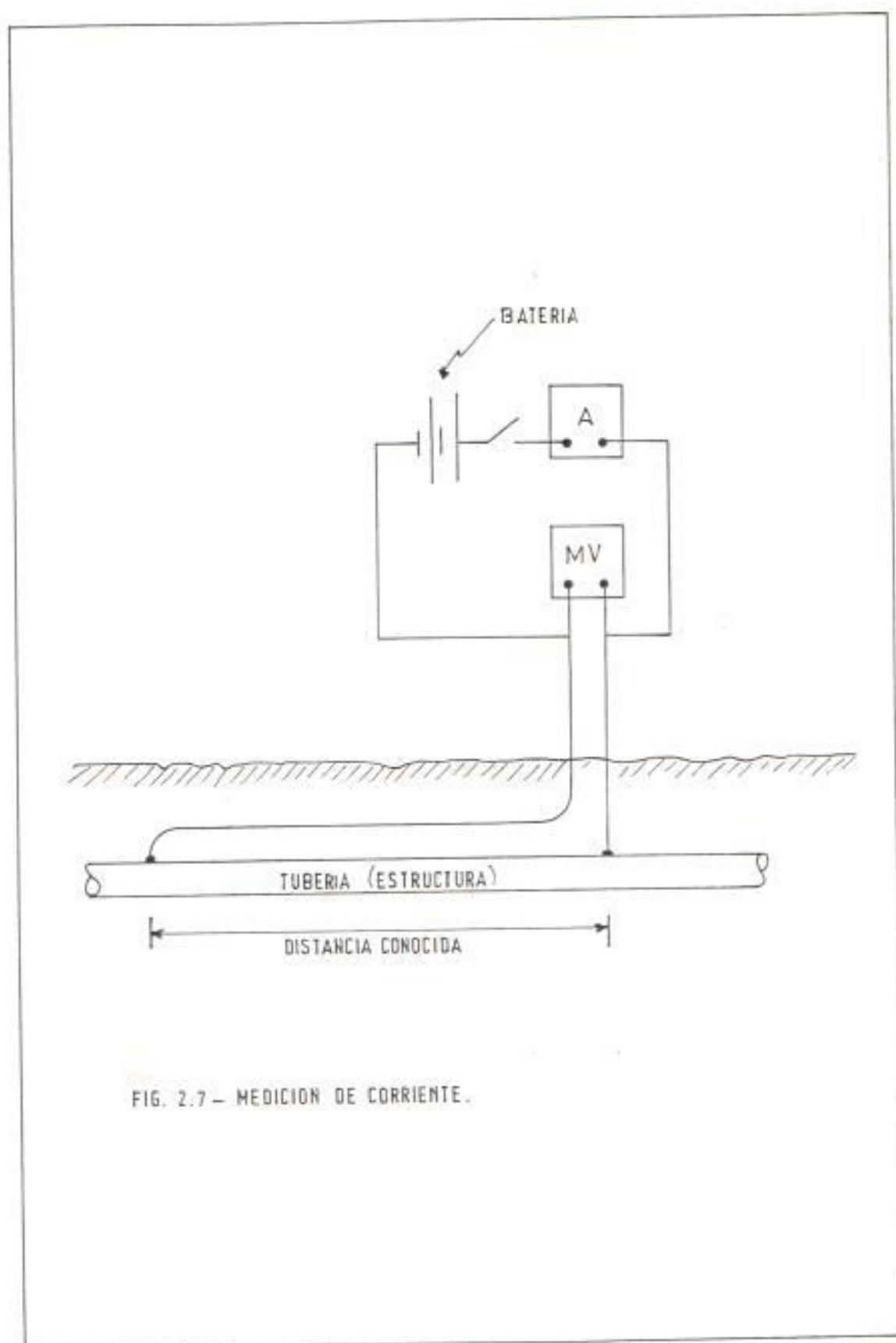


FIG. 2.7 - MEDICION DE CORRIENTE.

que cuando una estructura atraviesa terrenos de diferentes estratos, las partes que se encuentran sumergidas en zonas de baja resistividad serán las más atacadas por la corrosión. Es necesario conocer como mínimo los datos de resistividad del lugar en donde irían ubicadas las camas de tierra. Tales datos permitan al diseñador conocer el tipo de ánodos a utilizar, tamaño y número de los mismos y, también permiten calcular los nominales de la fuente DC a utilizar en el caso de que el sistema sea por corriente impresa.

La unidad adoptada para para la resistividad de los suelos es el ohmio-centimetro.

En la tabla V muestra una forma de clasificar a los suelos según su resistividad.

Existen dos métodos para medir la resistividad de los electrolitos, estos métodos son: el método de la caja de suelos y, el método de medición de resistividad en el sitio.

TABLA V.- CLASIFICACION DE LOS SUELOS SEGUN SU RESISTIVIDAD

RESISTIVIDAD (OHMIDS-CM)	DESCRIPCION
HASTA 500	MUY CORROSIVO
500 - 1000	CORROSIVO
1000 - 2000	MODERADAMENTE CORROSIVOS
2000 - 10000	MEDIANAMENTE CORROSIVOS
10000 O MAS	PROGRESIVAMENTE MENOS CORROSIVOS

a.) METODO DE LA CAJA DE SUELOS

En este método se extrae una muestra del electrolito, a la misma que se le aplica una diferencia de potencial y se toman lecturas de la corriente y voltaje. Una vez que se realizan las lecturas citadas, se procede a calcular la resistencia del espécimen ($R=V/I$).

La resistividad del suelo se la calcula con la ayuda de la ecuación 4. Siendo esta ecuación dependiente de las dimensiones de la caja y de la resistencia anteriormente calculada.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: ρ = Resistividad del
electrolito.
 A = Área transversal de la
caja.
 L = Longitud de la caja.

En la figura #2.8 se muestra un caja de resistencias.

b) MEDICION DE RESISTIVIDAD EN EL SITIO

Este método es uno de los más utilizados. Para realizar la prueba de resistividades se con la ayuda de este método se colocan cuatro electrodos (a una profundidad de cuatro pies) en puntos colineales como se indica en la figura #2.9 con una distancia entre cada electrodo igual a la profundidad de los mismos. Luego se inyecta una corriente (I) por medio de los electrodos extremos, esta corriente producirá una diferencia de potencial (ΔV) entre los electrodos internos y se calcula la resistencia entre los electrodos internos

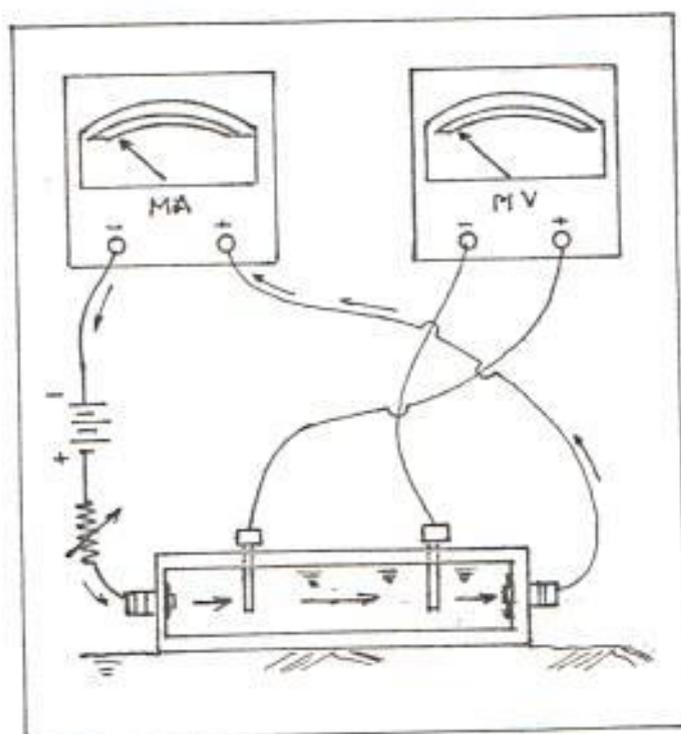


FIG. Nº 2.8 CAJA DE SUELOS PARA MEDICION DE RESISTIVIDAD

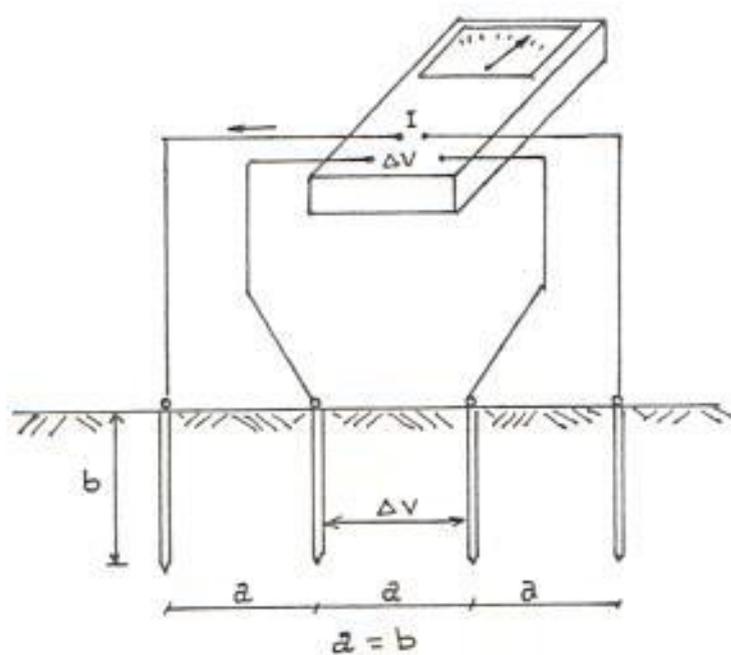


FIG. Nº 2.9 MEDICION DE RESISTIVIDAD
DE SUELOS POR EL METODO
DE LOS 4 ELECTRODOS

($R = \Delta V / I$). Para convertir la resistencia a calculada a resistividad se multiplica R por un factor igual a 191.2 multiplicado por el espaciamiento entre electrodo en pies, obteniéndose la resistividad en ohmios-centímetros.

Un ejemplo de esta práctica constituye el siguiente: Sea el espaciamiento entre los electrodos igual a 5 pies, la corriente inyectada igual a 500mA, y se produce una caída de voltaje de 410mV. Entonces la resistencia será igual a $410/500 = 0.82$ ohmios. El factor será entonces $191.2 \times 5 = 956$. Por lo tanto el suelo tendrá una resistividad de $0.82 \times 956 = 784$ ohmios-centímetros.

2.4.4. MEDICION DEL pH

En muchos casos, los sitios en donde se encuentra enterrada la estructura son aproximadamente neutros ($pH=7$). Sin embargo en otros sitios, dadas las condiciones bastante particulares, estos pueden ser alcalinos ($pH > 7$) o ácidos ($pH < 7$); las condiciones alcalinas no constituyen un problema serio a

las estructuras, pues, tal medio no es agresivo para metales como el acero. Así, cuando el metal está sumergido o enterrado en una solución caústica ($\text{pH} \approx 11$), esta puede descargar corriente sin una pérdida apreciable del metal. Sin embargo tales condiciones resultarían desastrosas para estructuras hechas de aluminio. En cambio las condiciones alcalinas a la estructura metálica tiene el efecto general de hacer más difícil polarización de la estructura a potenciales de protección cuando la protección catódica es aplicada; esto incrementa los requerimientos de corriente en el área.

CAPITULO III

IMPORTANCIA DE LA PROTECCION CATODICA DE UNA CENTRAL A VAPOR Y DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS A SER PROTEGIDOS

3.1. DESCRIPCION GENERAL

Para poder realizar el estudio de la protección catódica en la central a vapor es necesario que se realice un estudio de las partes constitutivas de la central. Así se tiene los siguientes elementos:

a) GENERADOR ELECTRICO

En la central a analizar, el generador es del tipo sincrónico, accionado por una turbina a vapor; la capacidad del generador es de 86MVA, con un voltaje en terminales de 13.8KV, la velocidad de sincronismo es de 3600 RPM, a un factor de potencia de 0.85.

b) LA TURBINA

La turbina de vapor es una máquina rotativa que utilice la energía contenida en el chorro del vapor proveniente de las toberas, el cual al

incidir sobre los álabes de la turbina produce el movimiento del rotor de la misma.

La turbina está formada de dos partes importantes, que son el distribuidor y el rodete, siendo estas fijas y móviles respectivamente.

El vapor al recibir la energía producto de la combustión viaja a alta velocidad hacia el distribuidor donde se expande adiabáticamente produciéndose la transformación de energía potencial o de presión en energía cinética. Los gases al abandonar el distribuidor a través de las toberas se dirige hacia los álabes del rotor, realizándose la conversión de energía cinética en energía mecánica, la misma que es transmitida al generador eléctrico a través del eje, para por último realizar la conversión de energía mecánica a eléctrica.

La turbina de la central en estudio es del tipo acción - reacción, de eje horizontal con 14 etapas de de rotores (1 etapa de velocidad, 10 etapas de impulso y 3 de reacción). Un diagrama de la turbina se presenta en la figura #3.1.

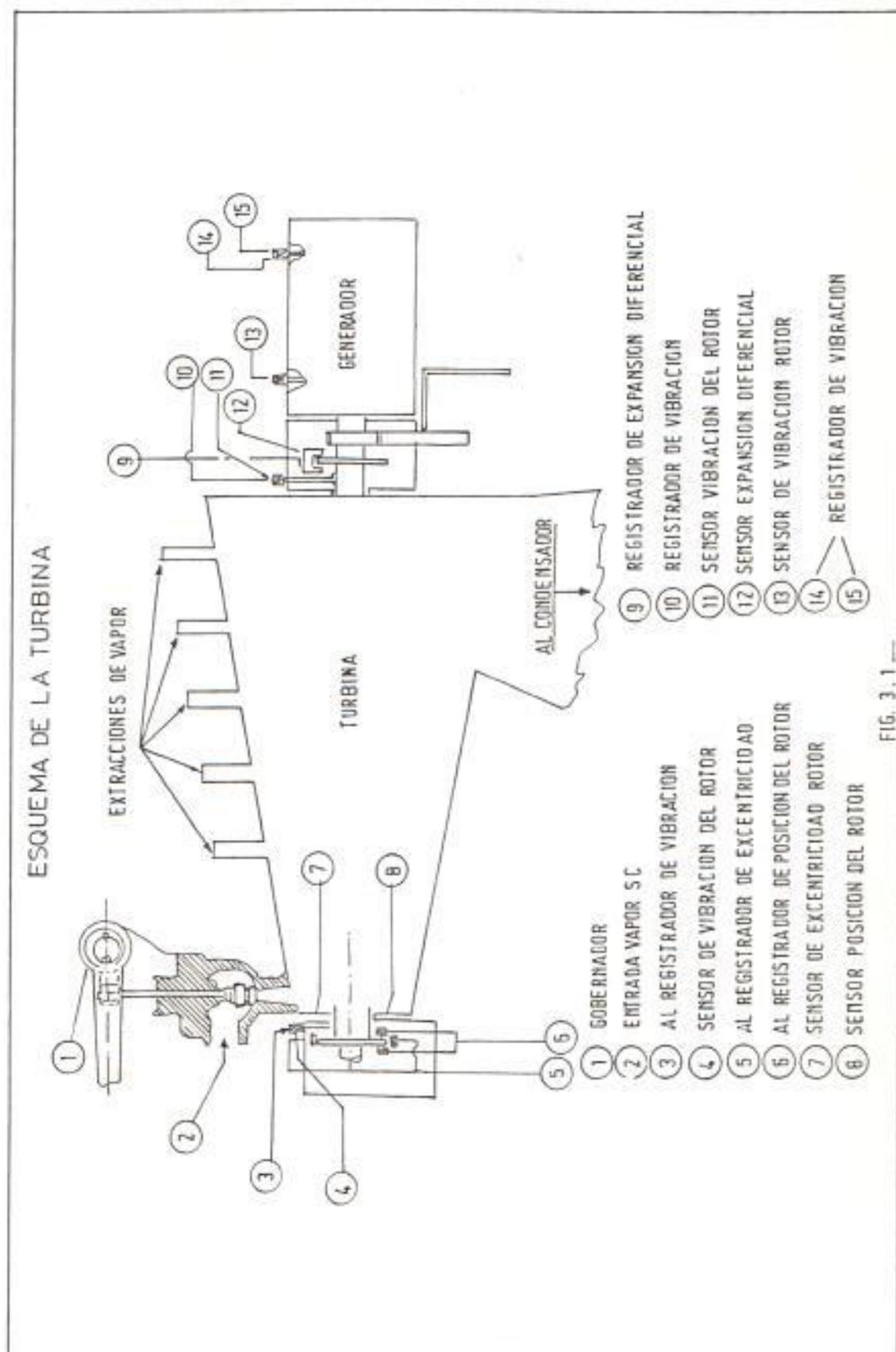


FIG. 3.1

c) CALDERA

En la caldera es el lugar en donde se produce el vapor a alta presión y temperatura. La caldera de la central en estudio es del tipo industrial, de una presión aproximada de 1500psi.

Los sistemas que se tienen en la caldera son ciclo de agua - vapor, sistema de combustible y, el sistema de aire gas.

d) CONDENSADOR

La función del condensador es la de condensar el vapor que sale de la turbina una vez que ha entregado su energía. Por lo tanto el condensador provee un recinto a muy baja presión con el propósito que el vapor entregue el máximo de su energía a su paso por la turbina.

El efecto que produce es de disminuir la presión del condensador y aumentar la eficiencia del ciclo.

En definitiva las funciones del condensador se las resume así:

- 1) Condensar el vapor, o sea, convertir el vapor en líquido para que su bombeo sea fácil y económico.
- 2) Recuperar la mayor cantidad del vapor utilizado en el proceso.
- 3) Extraer el aire y otros gases no condensables que son nocivos y además ocupan espacio disminuyendo el área de trabajo.

En el proceso de condensación el vapor ingresa por la parte superior del condensador en forma radial y al ponerse en contacto con la superficie exterior de una gran cantidad de tubos, el vapor se condensa.

El agua condensada se almacena en un recipiente de gran volumen que se conoce como pozo de condensado, desde el cual se extrae el agua de condensado por medio de las bombas de condensado y se alimenta el ciclo. Por el interior de los tubos del condensador circula agua salada, con la cual se obtiene una temperatura baja en los tubos.

El agua de circulación entra por la parte superior de la cámara de agua como se puede apreciar en la figura #3.2, para luego pasar por los tubos superiores hasta la cámara de retorno y salir por los tubos inferiores.

e) EQUIPOS AUXILIARES

Los equipos auxiliares están constituidos por los equipos que hacen posible el funcionamiento del ciclo agua - vapor, para generar energía eléctrica. A estos equipos se los puede identificar con gran facilidad dentro de los sistemas a los cuales pertenecen, así se tiene:

1) Sistema de condensado.-

El sistema de condensado consiste en el circuito que va desde el condensador al desaireador, como se aprecia en la figura #3.3, en la cual constan las bombas de condensado que son encargadas de succionar el agua del pozo del condensador, filtros, eyectores, calentadores de agua de presión, válvula de control.

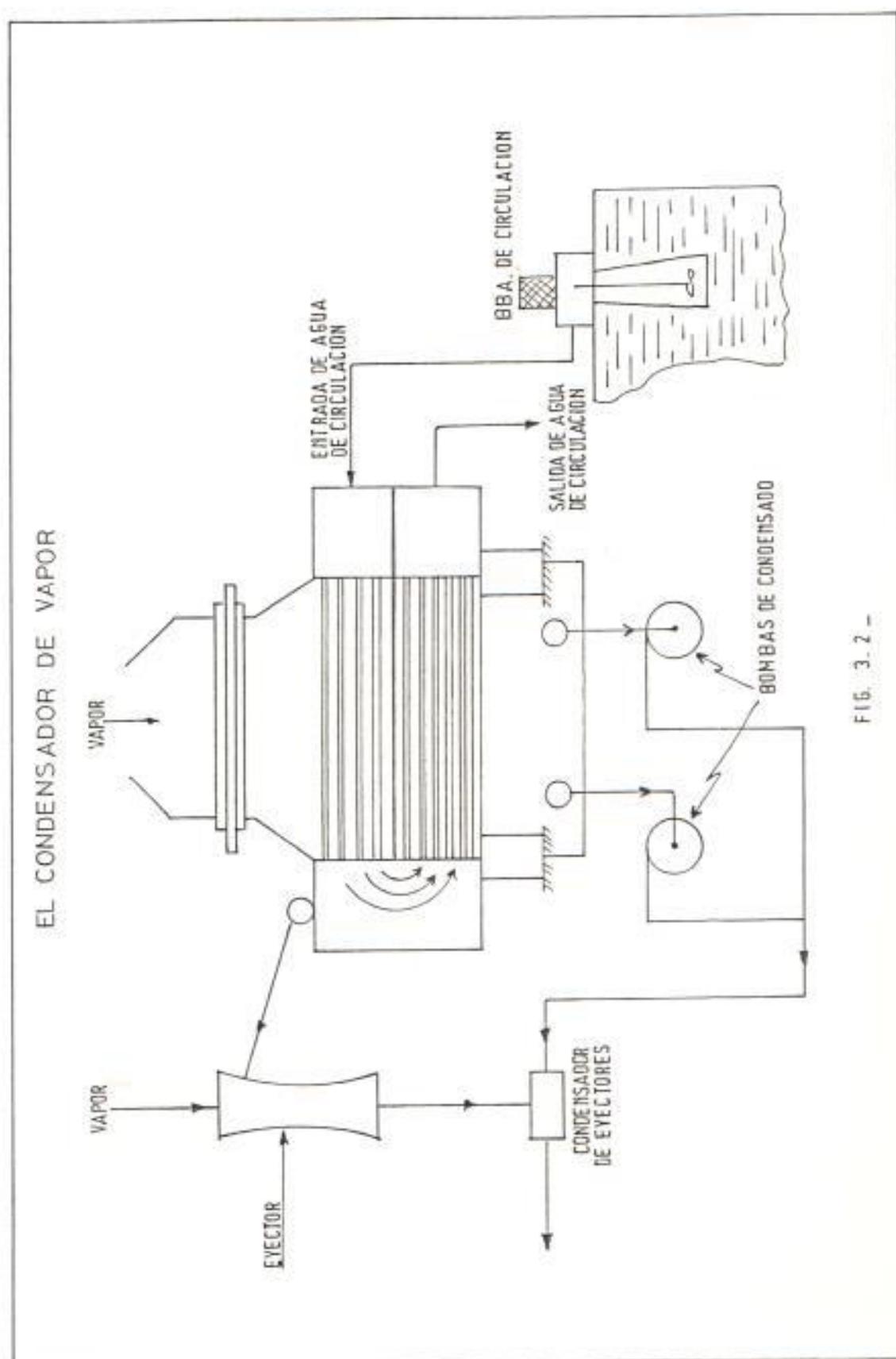


FIG. 3.2 -

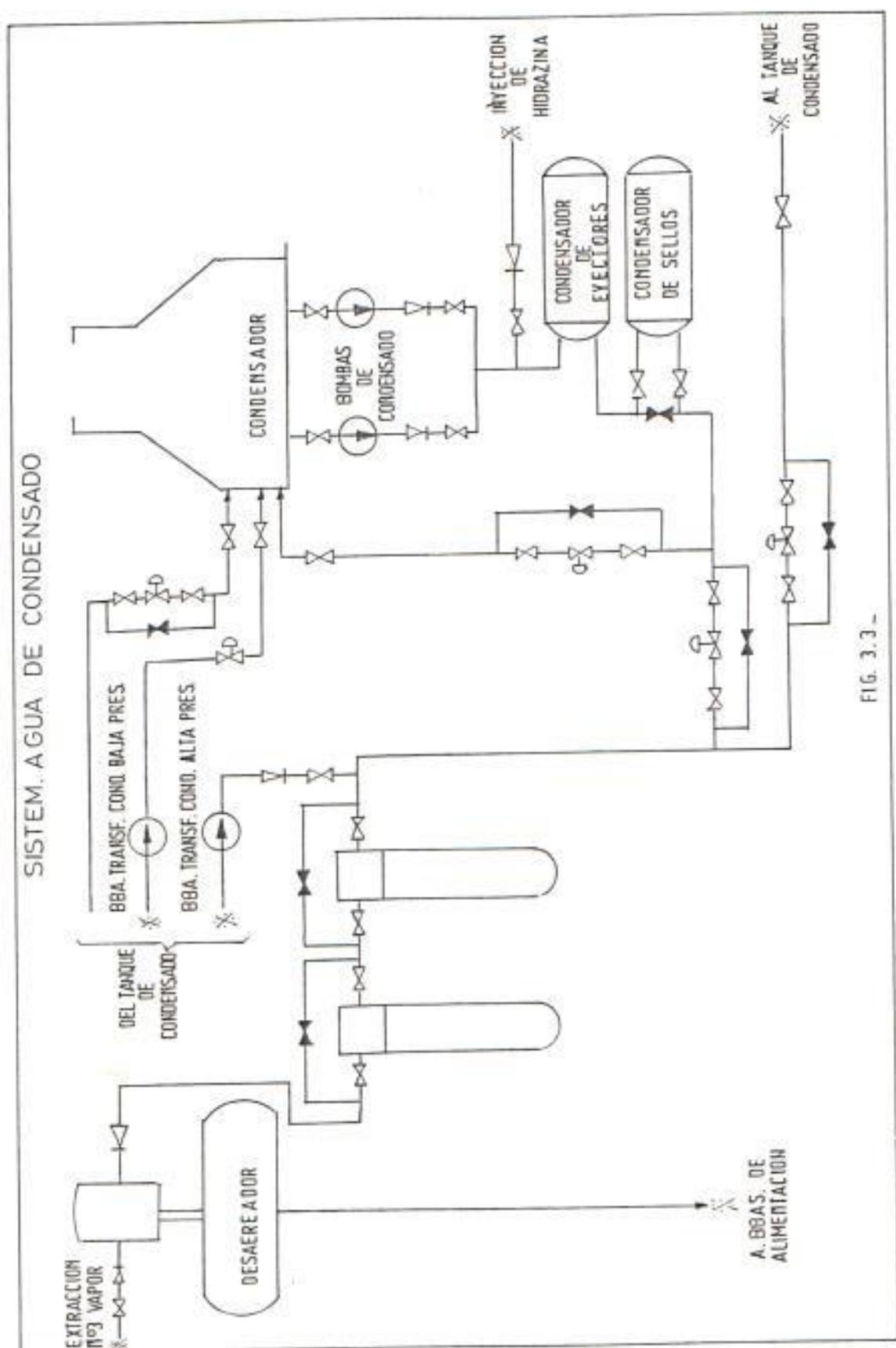


FIG. 3.3 -

2) Sistema de alimentación.-

Este sistema comprende el circuito de agua de alimentación de la caldera que va desde el desaireador al domo superior. La figura #3.4 muestra los elementos constitutivos del sistema de circulación.

3) SISTEMA DE CIRCULACION

Este sistema tiene por finalidad el entregar agua en la cantidad suficiente para que se pueda realizar la condensación del vapor que sale de la turbina, lo cual se logra extrayendo el calor del vapor en el condensador. Este equipo además proporciona agua para enfriar equipos, hidrógeno, aceite de lubricación, etc.

En la figura #3.5 se muestran los diferentes elementos del sistema de condensado. Los principales elementos del sistema de circulación, las válvulas de descarga motorizadas, los filtros debris, las válvulas de descarga, la línea que va al circuito de enfriamiento, y la línea que va al circuito de lavado de los tubos del condensador.

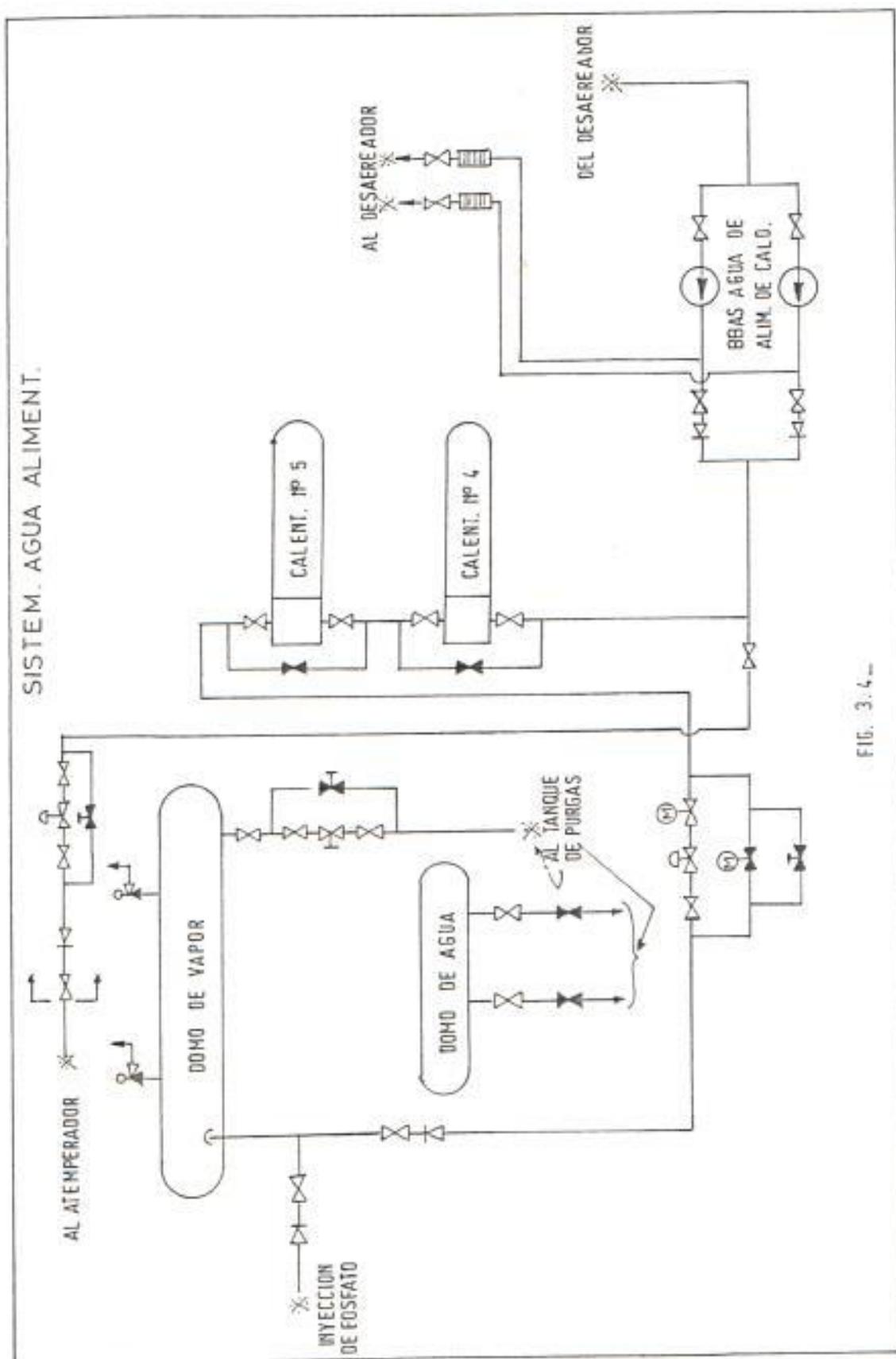


FIG. 3.4.-

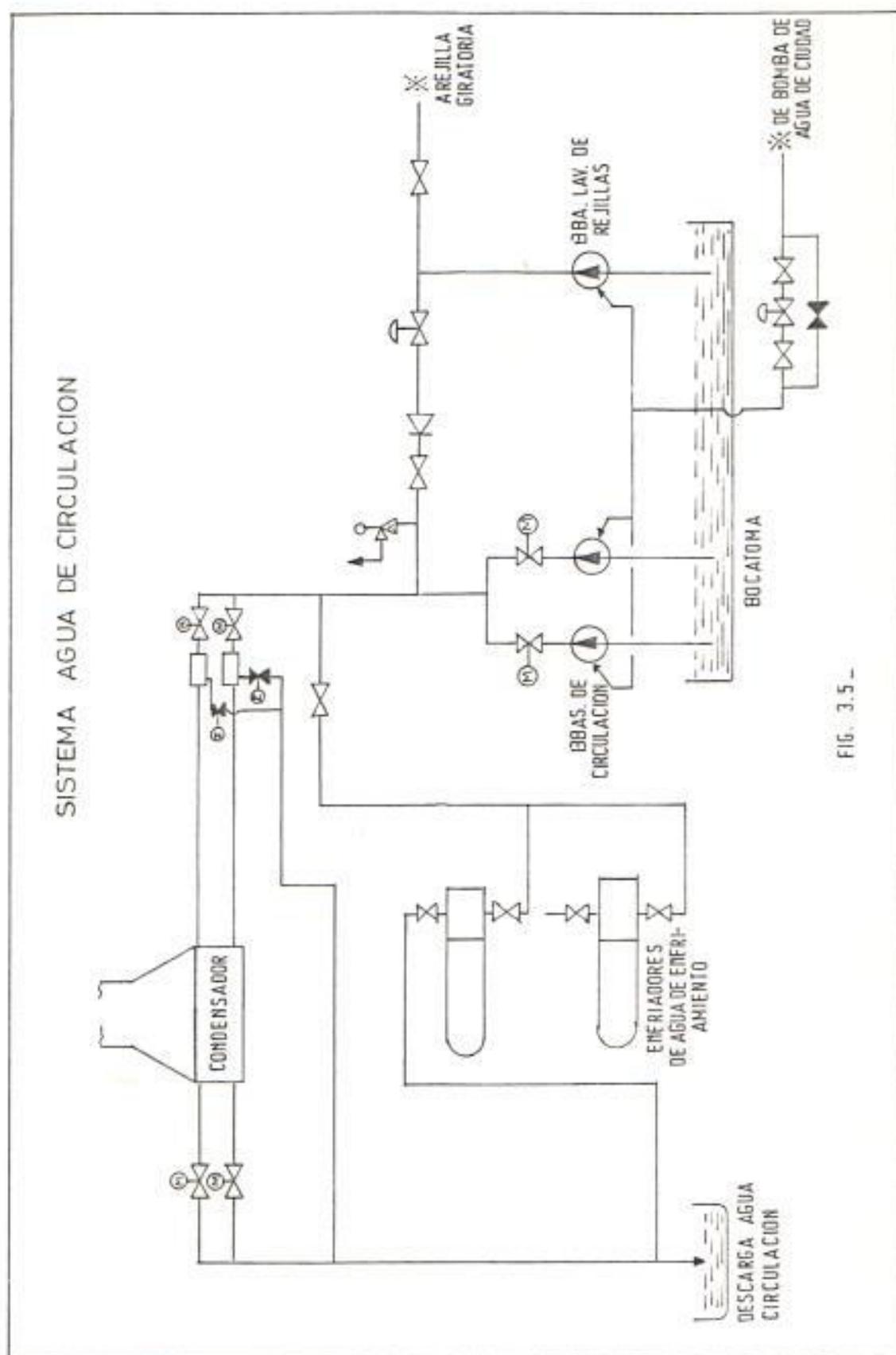


FIG. 3.5.-

3.2. ELEMENTOS QUE REQUIEREN DE LA PROTECCION

En el numeral anterior se realizó una descripción general de una central a vapor. En el presente numeral se procederá a realizar una descripción de cada uno de los elementos que requieren de la protección catódica, para lo cual se estudiará los detalles constructivos, modo de operación y justificación de la necesidad de la protección catódica de los diferentes elementos. Los elementos a estudiar son: bombas de circulación y lavado, condensador, rejilla giratoria de la bocatoma y tuberías.

3.2.1. BOMBAS DE CIRCULACION Y LAVADO

Las bombas de circulación y lavado constituyen bombas del tipo turbina vertical, cuyo nombre se deriva de la disposición de las mismas. Una ventaja que deduce la utilización de este tipo de bombas es que debido a su disposición, estas bombas utilizan poco espacio para su instalación en relación a otros tipos de bombas, y además es la fundición del lugar de trabajo es suficientemente simple.

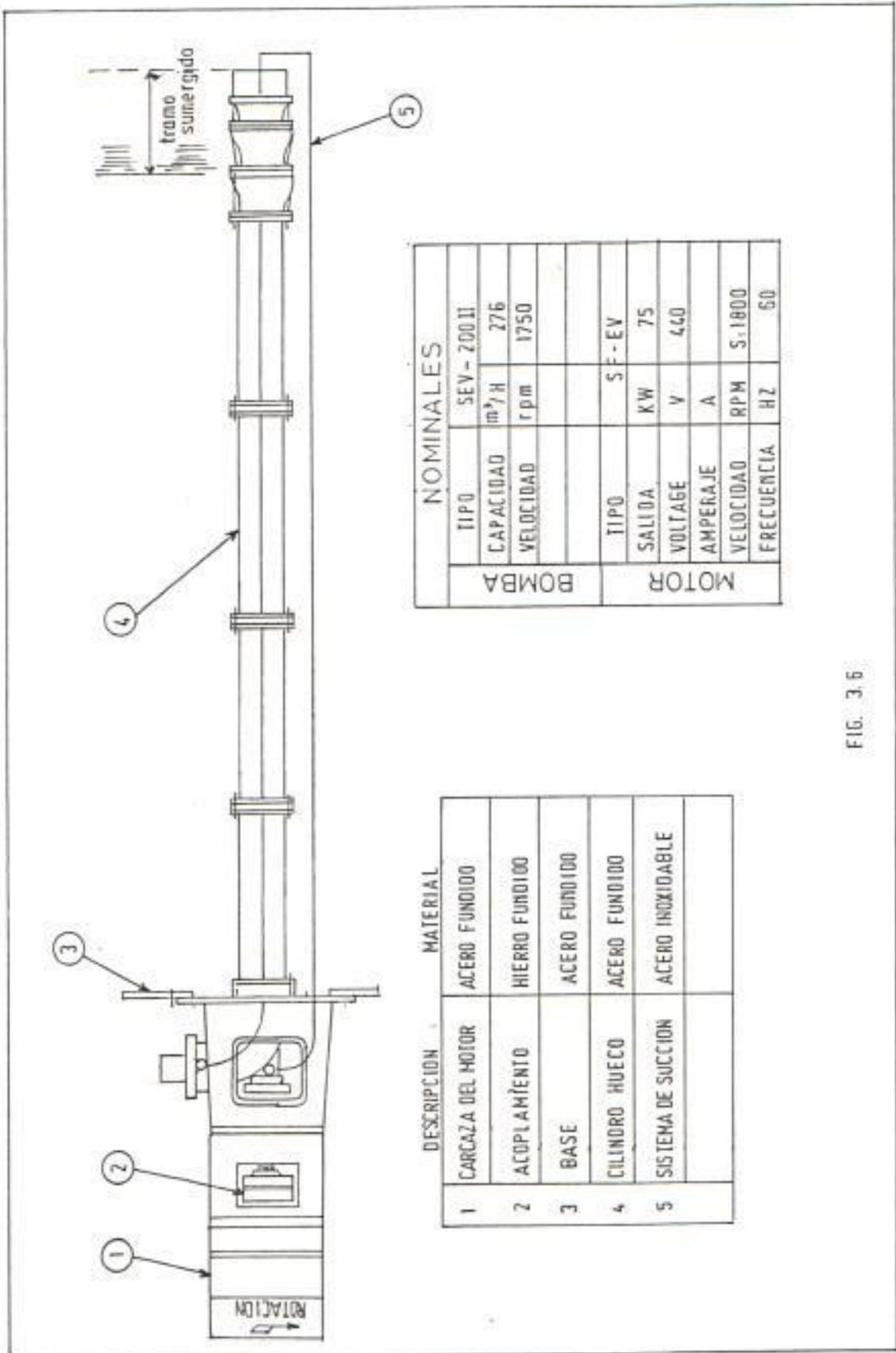
Este tipo de bomba está constituida básicamente por un cilindro hueco en conjunto con una succionadora de tipo abierta. El cilindro hueco está conectado al extremo de descarga por medio de la columna de descarga. El eje de la bomba está contenida en mangas estacionaras.

Para su instalacion esta bomba requiere de una fundición de concreto bastante simple, que es donde se alojara el motor, la bomba, y los diferentes elementos constitutivos que lo requieran. Además se requiere de una base metálica que sirve para la sujeción del motor, la bomba, etc.

En la figura #3.6 se muestra un diagrama de este tipo de bombas, en la misma que se señala sus diferentes partes constitutivas y los materiales de los cuales está constituida.

Todo el sistema de bombas se encuentra solidamente aterrizado por medio de varillas de cobre de 1.8m de longitud.

Todo lo anterior nos muestra la utilizacion



DESCRIPCION	MATERIAL
1 CARCAZA DEL MOTOR	ACERO FUNDIDO
2 ACOPLAMIENTO	HIERRO FUNDIDO
3 BASE	ACERO FUNDIDO
4 CILINDRO HUECO	ACERO FUNDIDO
5 SISTEMA DE SUCCION	ACERO INOXIDABLE

NOMINALES	
TIPO	SEV - 200 II
CAPACIDAD	m ³ /H 276
VELOCIDAD	rpm 1750
TIPO	SF - EV
SALIDA	KW 75
VOLTAGE	V 440
AMPERAJE	A
VELOCIDAD	RPM 5.1800
FRECUENCIA	HZ 60

FIG. 3.5

de diferentes metales, que sumado al hecho de encontrarse localizadas en un terreno muy agresivo causan la presencia de dos tipos de corrosión:

a) Corrosión localizada.-

Como se señaló en el capítulo I, este tipo de corrosión se debe a la no uniformidad de los materiales utilizados.

b) Corrosión galvánica.-

Se produce entre las partes que están fabricadas de diferentes materiales, así por ejemplo: varillas de hierro fundido de la fundición de concreto, hierro fundido del cilindro hueco, y acero galvanizado de las tuberías.

La instalación a analizar presenta las siguientes características:

Potencial estructura/suelo	-500mV(Cu/CuSO ₄) 2
Superficie a proteger	51.16m

Resistividad del agua salada 40 ohmios-cm.

La densidad de corriente necesaria para dar protección es $D_c = 15 \text{ mA/m}^2$.

Los ánodos que se seleccionaron fueron de hierro fundido al silicio con las siguientes características:

Longitud	11.5m
Peso	11.8kg
Corriente de salida	615mA/ánodo

El número de ánodos instalados está dado por:

$$N = 767.615/615 = 1.25 \text{ ánodos}$$

Se instaló un ánodo, pero ya que no se obtuvo el nivel de polarización necesario, se instalaron dos ánodos por bomba. Uno de los ánodos se encuentra cubierto por una tubería PVC, esto se lo realiza con el fin de limitar la corriente de protección. Con la instalación de los dos ánodos se consiguió un voltaje estructura suelo de $\approx 50\text{mV}$ (Cu/CuSO₄). En la figura #3.7 se muestra un diagrama simplificado de la protección catódica existente.

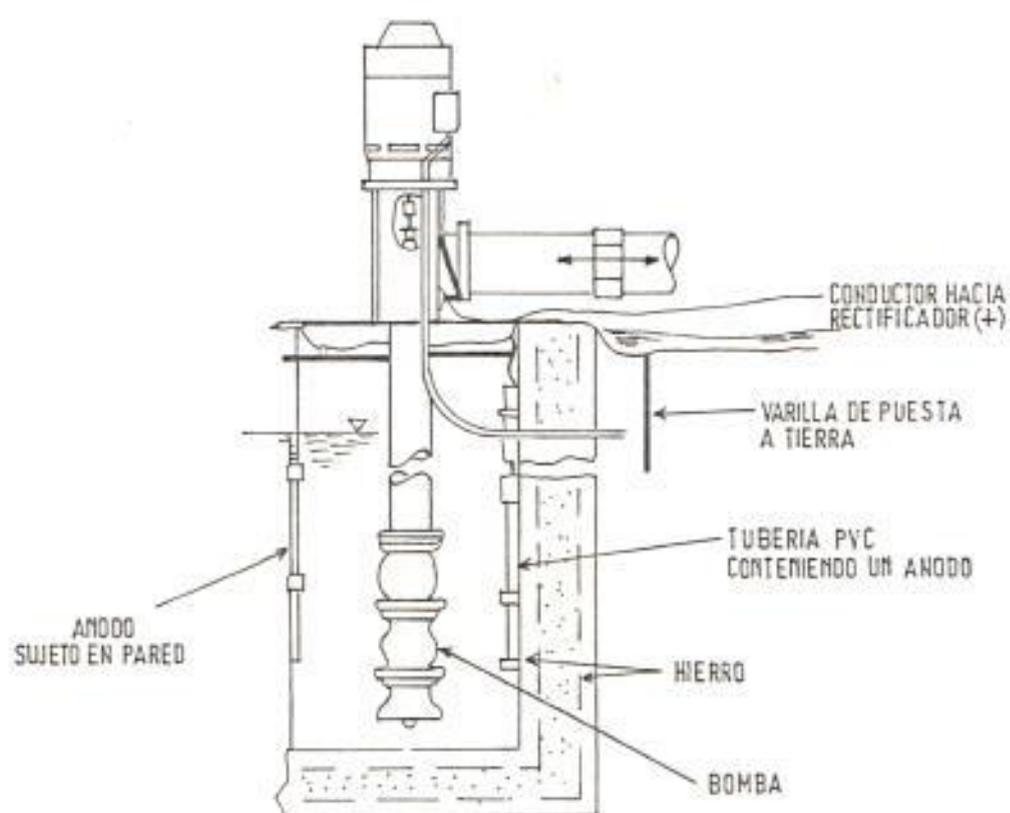


FIG. 3.7 - DISPOSICION DE LA PROTECCION CATODICA EN BOMBAS DE CIRCULACION Y LAVADO.

Cabe señalar que la protección catódica del sistema de bombas trabaja en coordinación con el sistema de rejillas giratorias y estacionarias, y con el el tablaestaca de la bocatoma.

3.2.2. CONDENSADOR

En el numeral correspondiente a la descripción general de la central se realizó un descripción del condensador en lo que respecta a su modo de operación, es por esto que es necesario una descripción de las diferentes partes constitutivas del mismo.

El condensador como se señaló anteriormente es del tipo de flujo radial. El condensador está constituido por la carcaza, dos cámaras de agua, los tubos de nefriamiento y los soportes de los tubos.

La cámara de agua está dividida en 2 secciones, la de la derecha y la de la izquierda; esto hace posible el realizar mantenimiento de una de estas partes mientras la otra mitad del condensador es alimentada de

agua normalmente, lograndose de esta manera que no salga de servicio la unidad.

De acuerdo al principio de flujo radial la carcasa es mayor que el diametro del haz de tubos, de manera que exista espacio al rededor del juego de tubos con el fin de dar acceso a la superficie de condensado desde todas las direcciones.

Los tubos son enrollados en los espejos en ambos extremos. En la figura #3.8 se puede apreciar el condensador en mención.

La corrosión de las cámaras de agua y de los tubos a causa de las grandes diferencias de potencial que se generan en las diversas entre las partes del condensador, ha sido motivo de granpreocupación; tales diferencias de potencial se deben al uso de diferntes materiales utilizados en la construcción del condensador. A continuación se enumeran las diferentes partes del condensador con sus dimensiones y sus materiales constitutivos:

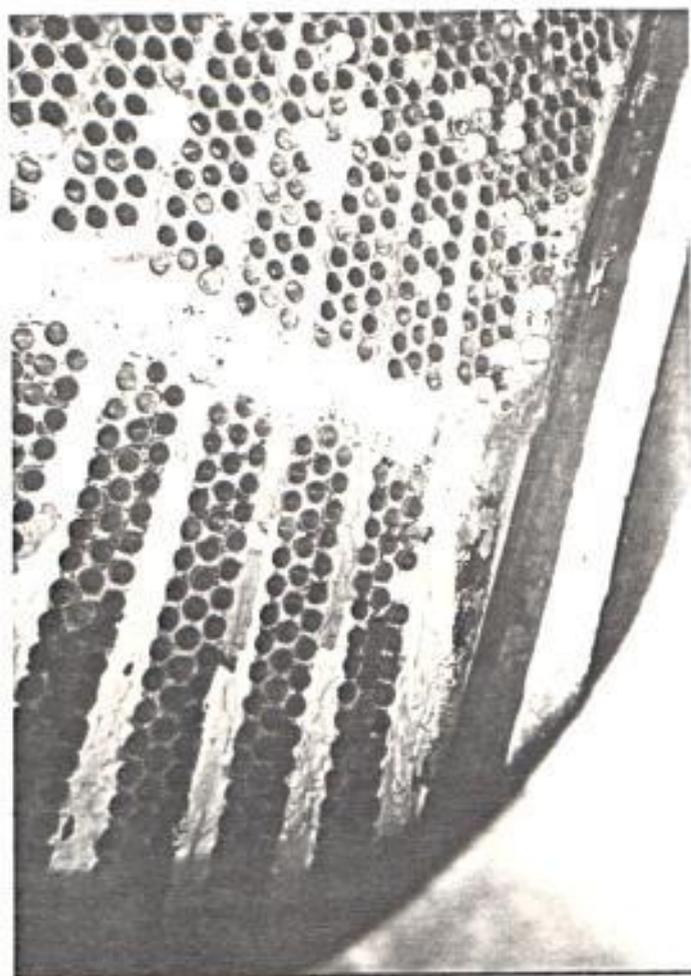


FIG. Nº 3.8 EL CONDENSADOR

a) TUBOS DE ENFRIAMIENTO

Diámetro externo	25.4mm
Espesor	0.5mm
Número de tubos	6566
Material	Titanio (TTH35)

b) ESPEJOS

Material	Bronce Naval
----------	--------------

c) CAMARA DE AGUA

Material	Acero al Carbón
Recubrimiento	Resina epoxidica

c) AREA DE ENFRIAMIENTO 430M²

Como agua de enfriamiento se utiliza agua salada cuya resistividad varia entre valores de 33 ohmios-cm a 43 ohmios-cm.

Debido a que en el condensador la cubierta está protegida con recubrimiento anticorrosivo, un picado de la lámina protectora, causará una concentración de corrientes galvánicas, y por lo tanto producirá una corrosión localizada; además debido a que se utilizan diversos materiales,

se deduce que es necesario proveer al condensador de un sistema de protección catódica.

Los potenciales de las diferentes partes del condensador con respecto al electrolito son los siguientes:

Acero al carbón	-0.61V(Cu/CuSO ₄)
Bronce Naval	-0.40V "
Titanio	-0.10V "

Con el fin de obtener un nivel de protección adecuado se ha adoptado el sistema de protección que se muestra en la figura #3.9, el cual consiste de 16 juegos de ánodos divididos en 8 circuitos es decir, 2 ánodos por circuito. Cada juego de ánodos recibe energía eléctrica DC de una fuente de 20A. 18V.

De acuerdo a la disposición de los ánodos adoptada, en que los ánodos se encuentran en la cubierta de las cámaras de agua, en el caso que el flujo de corriente sea en forma radial, las superficies equipotenciales se expandirán en forma semiesférica. Sin embargo, a que la

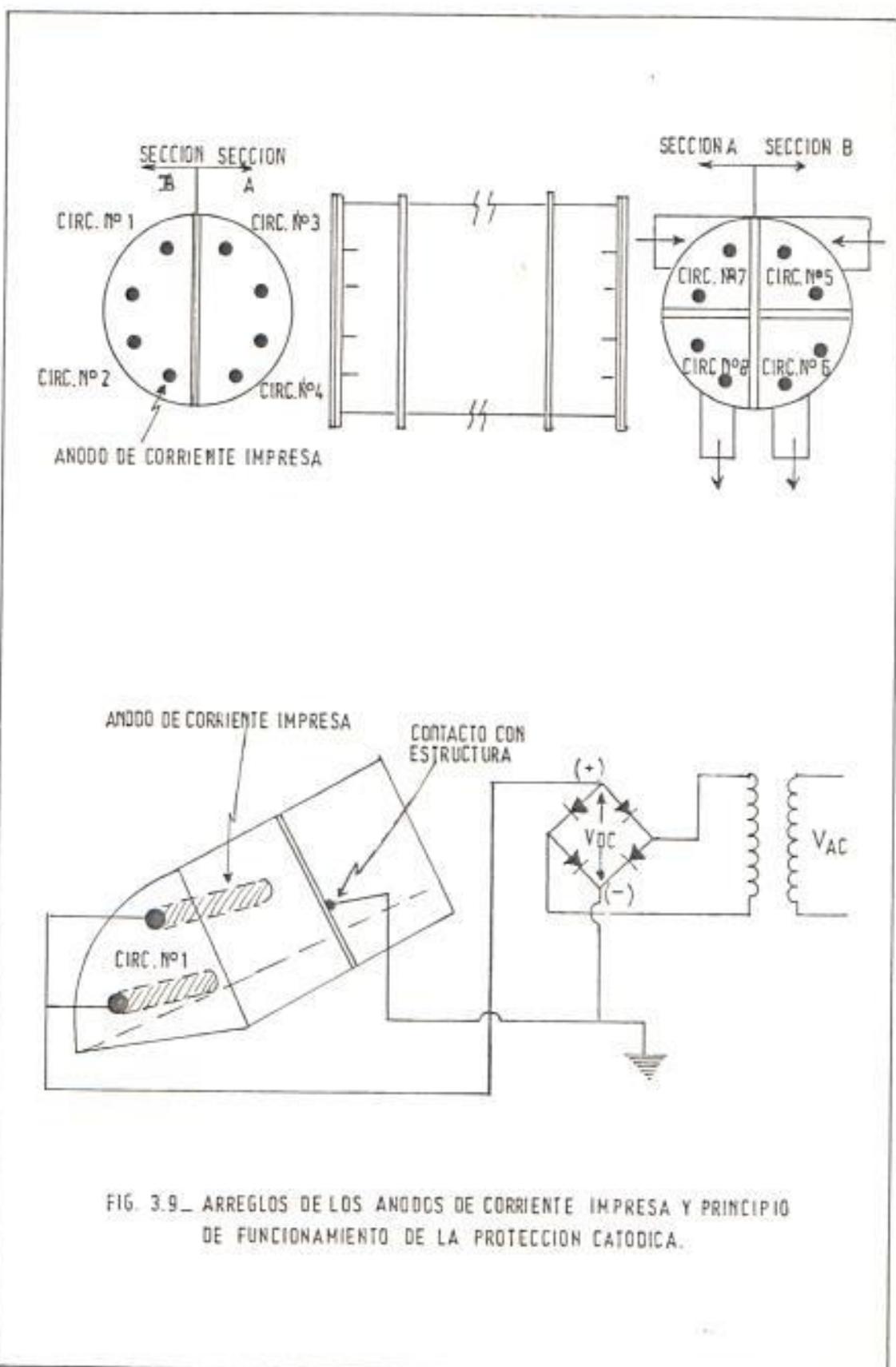


FIG. 3.9_ ARREGLOS DE LOS ANODOS DE CORRIENTE IMPRESA Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCION CATODICA.

superficie interna de la cámara de agua está protegida con recubrimiento anticorrosivo, existirá muy poco flujo de corriente hacia la cubierta, pero las líneas de fuerza serán perpendiculares a los espejos.

Para la medición de los potenciales de protección se han colocados electrodos de zinc en la carcasa del condensador (uno por cada cuadrante). La señal de voltaje es entregada a un circuito automático de control de voltaje constante, para de esta manera dada las condiciones de resistencia variable del agua de enfriamiento, no se pierda el potencial de protección.

3.2.3. REJILLA GIRATORIA

Este elemento de la central constituye una canasta cubierta por una rejilla continua, la cual sirve de trampa de impurezas de gran tamaño contenidas en el agua de alimentación; la misma que luego de haber atrapado las impurezas, es roceada de agua por medio del sistema roceador. El agua que ha sido arrojada por el roceador es luego arrojada a

un sistema de desague.

El movimiento de la rejilla se debe a un motor colocado en la parte superior de la misma: dicho motor transmite el movimiento a la rejilla mediante el sistema de cadenas transportadoras.

El funcionamiento de la rejilla puede ser dividido en operación manual y operación automática. La operación automática automática puede ser a su vez de dos formas: operación por diferencia de nivel, y operación a tiempo fijo en combinación con la diferencia de nivel de agua. En la figura #3.10 se puede apreciar la rejilla en estudio.

Los materiales que constituyen las diferentes partes de la rejilla giratoria son:

Canastilla	Acero fundido
Cadena transportadora	Acero galvanizado
Marco de la rejilla	Acero fundido.

Los potenciales que presentan las diversas partes respecto del agua salada se detallan a continuación:

Acero fundido	-0.65V (Cu/CuSO ₄)
Acero galvanizado	-0.76V "



FIG. Nº 3.10 REJILLAS GIRATORIAS

Debido a que los potenciales anteriores se encuentran por debajo de los 850mV (Cu/CuSO₄) necesarios para que no exista protección catódica, es necesario dar dicha protección a las rejillas giratorias. El método utilizado es por corriente impresa.

La corriente necesaria para dar protección es de 30A a una tensión de 12V, la misma que es descargada a través de un juego de 6 ánodos dispuestos de tal forma que se logre una uniformidad de la densidad de corriente. La figura #3.11 muestra el sistema de protección catódica de las rejillas giratorias y rejillas fijas.

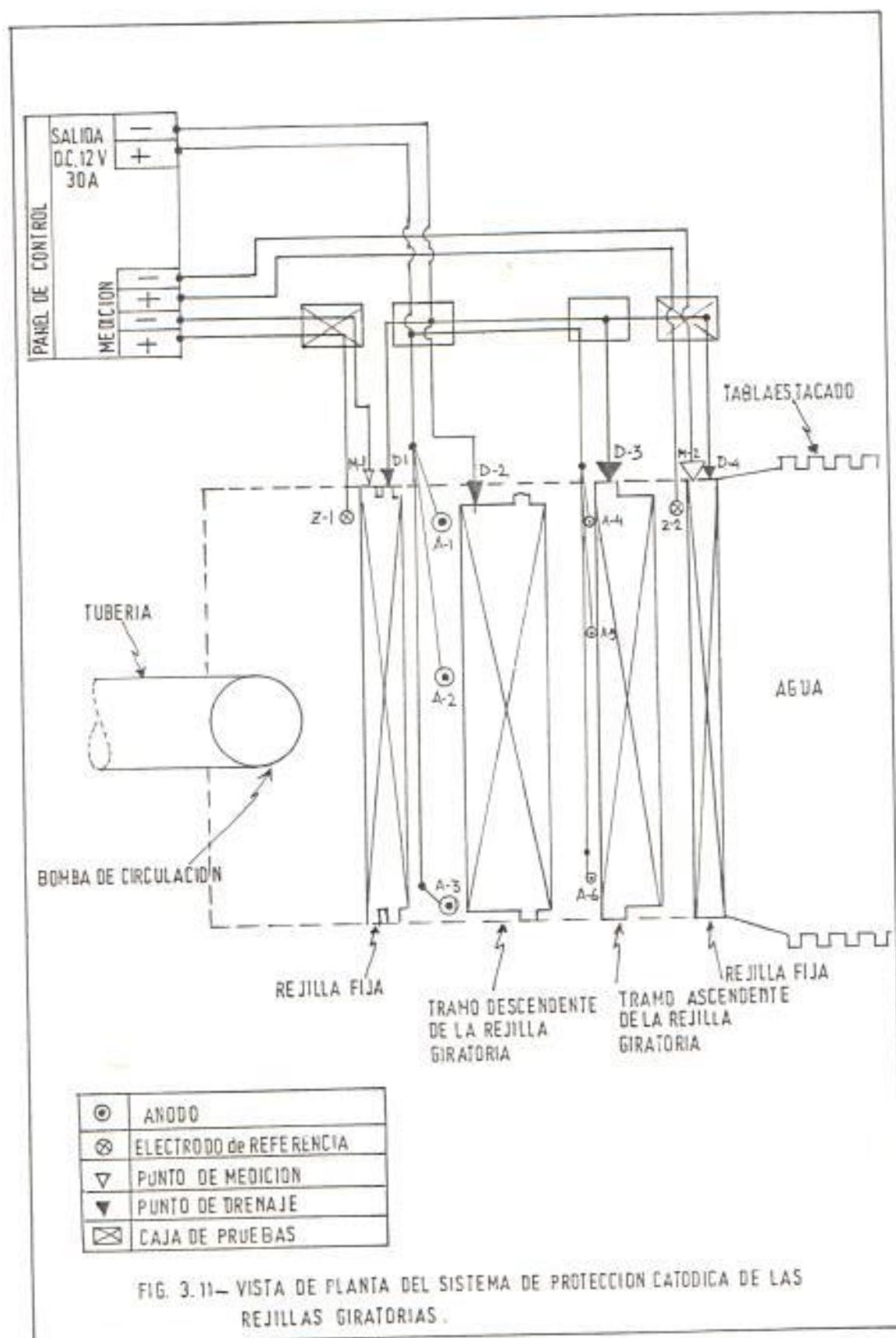
Los ánodos utilizados en esta instalación son ánodos de plomo plata. Estos ánodos están sumergidos en agua salada. Los ánodos de plomo plata son sostenidos mediante tuberías PVC, las que a su vez están sujetas a las paredes de la bocatoma mediante bandas PVC. Los ánodos de corriente impresa obedecen a las siguientes características:

Material	Plomo-Plata
Diámetro	30mm
Longitud	220mm

Para la medición de potenciales se ha provisto de dos electrodos de referencia de Zinc de alta pureza. las características de estos electrodos son las siguientes:

Número de	
electrodos de referencia	2
Método de instalación	Montados en pared
Diámetro	50mm.
Longitud	200mm.

Con este sistema de protección se ha obtenido potenciales desde -850mV a -1050mV en diferentes puntos de medición.



CAPITULO IV

DISEÑO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE CORRIENTE IMPRESA APLICADO AL CONDENSADOR

4.1. DATOS PRELIMINARES

El condensador a proteger obedece a las características señaladas en el capítulo anterior. En este condensador se tiene las siguientes áreas que necesitan de la protección catódica:

Cámara de agua	89m	2
Espejos	22m	2
Tubos	246m	2

Este condensador utiliza como agua de enfriamiento agua salada.

4.2. MEDICIONES

A) MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO

Para realizar las mediciones de resistividad del agua de enfriamiento se utilizó el método de la

caja de resistividades, para lo cual se tomaron muestras de agua a diferentes horas. Los resultados de esta prueba fueron que la resistividad del electrolito variaba desde 33 ohmios-cm a 43 ohmios-cm; para el diseño se ha adoptado un valor de resistividad de 40 ohmio-cm.

b) MEDICION DE POTENCIAL

Para este tipo de mediciones se utilizó el MILLER y un electrodo de Cu/CuSO₄. Los resultados obtenidos se indican a continuación de acuerdo al material:

Acero al carbón	-0.61V (Cu/CuSO ₄)
Bronce Naval	-0.40V "
Titanio	-0.10V "

Dado que los valores anteriores no son más electronegativos que -850 mV (Cu/CuSO₄), se deduce que las diferentes partes del condensador están sometidas al fenómeno de la corrosión. Además se puede apreciar que debido a que los tubos tienen un potencial menos noble que el resto de las partes del condensador, estos son los que están más afectados por la corrosión.

4.3. CALCULOS Y DISEÑO

Para el diseño de la protección catódica del condensador se ha adoptado los valores mínimos de densidad de corriente recomendados por la NACE, los cuales son dados de acuerdo al material a proteger; de esta manera se tiene los siguientes valores de densidad de corriente:

Cámara de agua	0.04A/m ²
Espejos	0.60A/m ²
Tubos	0.60A/m ²

Con los valores de densidad de corriente (Dc), y de áreas a ser protegidas (A), se realiza el cálculo de la corriente necesaria para dar protección a cada elemento tal como se realizó en el capítulo anterior:

ELEMENTO.	A.	Dc.	Ip=Dc.A
Cámara de agua	89m ²	0.04 A/m ²	3.56A
Espejos	22 "	0.60 "	13.20 "
Tubos	246 "	0.60 "	147.60 "

La corriente total requerida para dar protección catódica al condensador es: $I_p = 164.36A$.

rectificador, para lo cual es necesario calcular las constantes del circuito DC indicado en la figura #4.2. Las constantes del circuito son:

a) RESISTENCIA DEL CONDUCTOR

El conductor utilizado para las diferentes conexiones es #4 AWG - THW, el mismo que presenta una resistencia de 0.259ohmios/1000pies y, longitud es aproximadamente de 30m; por lo tanto la resistencia total del conductor será:

$$R_c = 0.000259 \times 30 \times 3.28 = 0.255 \text{ ohmios/circuito}$$

b) RESISTENCIA DE LOS ANODOS RESPECTO DEL ELECTROLITO

La resistencia de los anodos respecto del electrolito que los rodea está dada por la siguiente ecuación:

$$R_a = \frac{0.000171}{N L} \rho [2.3 \text{ Log}(8L/D) - 1 + (2L/S) 2.3 \text{ Log} 0.656N]$$

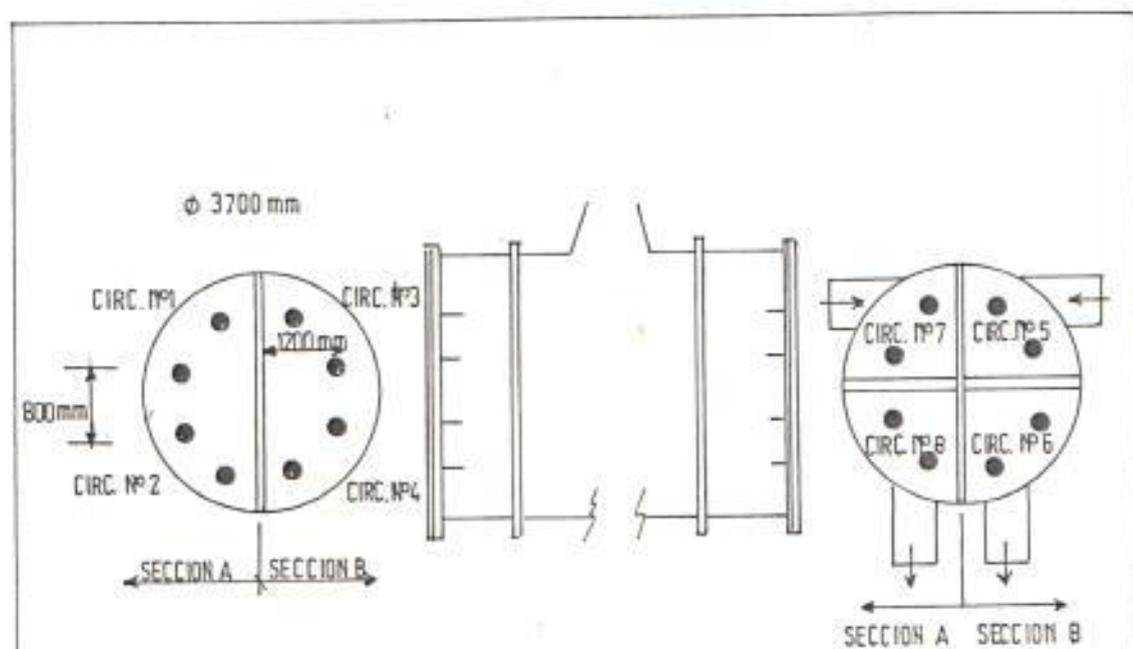


FIG. 4.1 - DISPOSICION DE LOS ELECTRODOS EN EL CONDENSADOR.

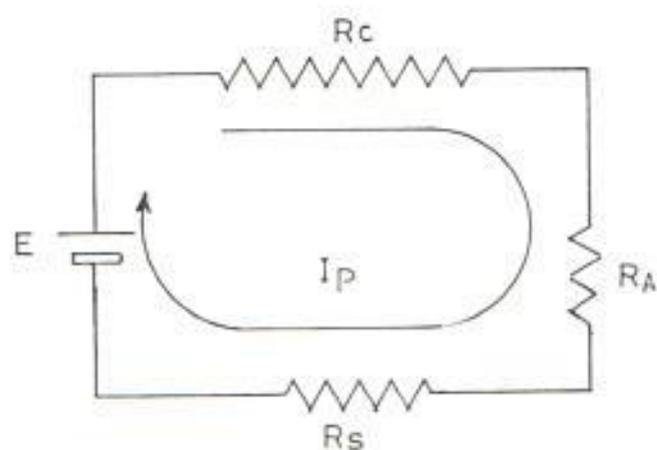


FIG. 4.2 - CIRCUITO EQUIVALENTE D.C. DE LA PROTECCION CATODICA DEL CONDENSADOR

E = VOLTAGE NECESARIO PARA PRODUCIR I_p
 R_c = RESISTENCIA DEL CONDUCTOR
 R_A = RESISTENCIA DE LOS ANODOS
 R_s = RESISTENCIA DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER

- Donde: ρ = Resistividad del electrolito (40 ohmios-centímetros).
- L = Longitud de cada ánodo cm. (22.0034 cm)
- N = Número de ánodos (N=2)
- S = Espaciamiento entre ánodos cm. (124.21 cm)

Reemplazando valores en la ecuación anterior se tiene:

$$R_a = 0.4567 \text{ ohmios/circuito}$$

b) RESISTENCIA DEL CIRCUITO DE LA ESTRUCTURA

La resistencia de la estructura a proteger (por cada circuito) está dada por la suma de las resistencias de cada uno de los elementos a proteger, la misma que es:

$$R_s = 0.0913 \text{ ohmios}$$

c) VOLTAJE DE LA FUENTE DC

La resistencia total del circuito será:

$$\begin{aligned} R_t &= R_c + R_a + R_s \\ &= 0.0255 + 0.4567 + 0.0913 \\ &= 0.5713 \text{ ohmios} \end{aligned}$$

Aplicando la ley de ohm al circuito se obtiene el valor del voltaje necesario para poder inyectar la corriente de protección:

$$\begin{aligned} E_s &= I_p \cdot R_t \\ &= 20 \times 0.5735 \\ &= 11.47V. \end{aligned}$$

En resumen se tiene: La corriente necesaria para dar protección catódica al condensador es 20A, y la tensión necesaria para producir dicha corriente es 11.47V. El rectificador que mas obedece a los requerimientos establecidos es de las siguientes características:

Entrada	440V AC - 60Hz - monofásico
Salida	18V DC - 20A

Dada la importancia que tiene el condensador en la central y, puesto que continuamente hay variaciones de resistencia del electrolito, es necesario que el rectificador posea un control automático de voltaje constante de protección.

A continuación se describirá el equipo de protección catódica:

1) RECTIFICADOR

El rectificador es de onda completa tipo puente, de potencial ajustado automáticamente. Este consiste del puente rectificador de diodos y tiristores, y del circuito de control automático el cual se encarga de mantener constante el potencial de protección (850mv Cu/CuSO4) del elemento a proteger. El control automático mantiene el potencial de protección en un valor constante realizando incrementos y disminución de la corriente de protección de acuerdo al potencial detectado.

El terminal positivo se lo conecta al ánodo de corriente impresa y, el terminal negativo al objeto a proteger. El terminal RE se lo conecta al electrodo de referencia y el terminal FI se lo conecta al objeto a ser protegido.

Los ocho circuitos esta contenidos en un misco armario, es por esto que el conjunto rectificador utiliza una entrada trifásica a 440V. Las especificaciones del equipo rectificador son las siguientes:

LADO ACFases	3
Frecuencia	60Hz
Voltaje	440V
Capacidad	4.7KVA.
LADO DCVoltaje nominal	18V DC
Ajuste manual de voltaje	3 - 18V
Ajuste automático de voltaje	5V, 10V, 18V
Corriente nominal	20A

LADO DE DETECCION

....Rango de ajuste de potencial	-1.5V -0V - +1.5V
Corriente de entrada	100 uA
Voltaje de entrada	0V +/- 1.5V (18V, 20A)

Los diagramas de conexiones se los puede observar en la figura #4.3.

2) ANODOS

a) Anodos de corriente impresa.-

Debido a que los ánodos de corriente impresa

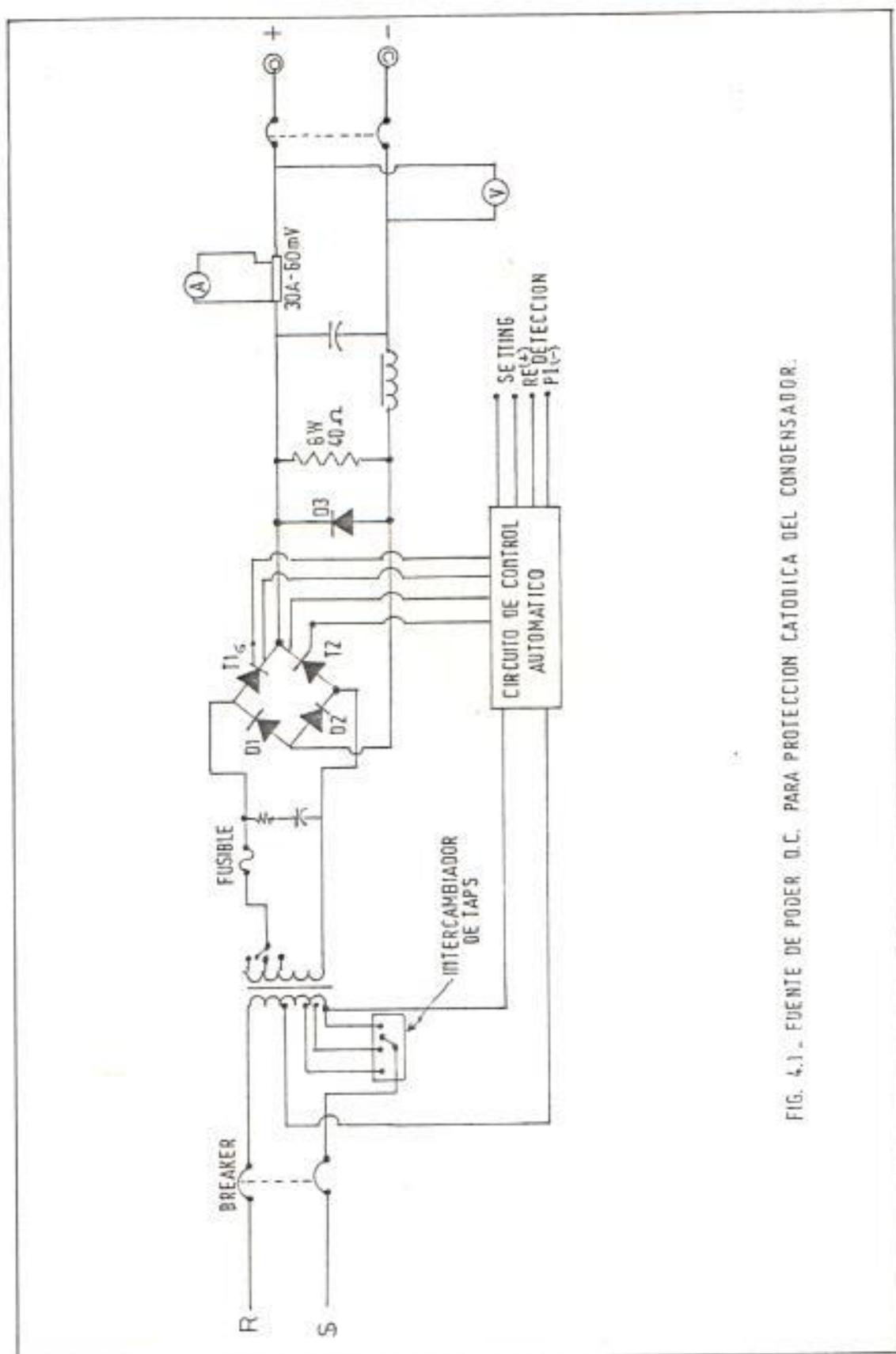


FIG. 4.1 - FUENTE DE PODER D.C. PARA PROTECCION CATORICA DEL CONDENSADOR.

estarán sumergidos en agua salada, estos deberán ser de un material inerte en agua salada como lo son los ánodos de plomo plata. Estos ánodos tienen una longitud de 22cm y un diámetro de 3cm. Los ánodos de corriente impresa están ubicados en la cubierta de las cámaras de agua tal como se indicó en la figura #4.1.

b) Electrodo de referencia.-

Con el fin de tener una referencia al medir el potencial de polarización de la estructura protegida, y así poder controlar el potencial de protección, se utilizan electrodos de Zinc de alta pureza, en un número de 8 (1 ánodo/circuito). Los electrodos de Zinc se encuentran también ubicados en la carcasa de las cámaras de agua a una distancia de 300mm de los espejos.

3) CONDUCTORES.-

El conductor utilizado para las diferentes conexiones es Cu #4 AWG con aislamiento THW.

Las uniones del conductor con los ánodos se la realiza por medio de conectores de compresión, y estos a su vez cubierto con resina epóxica.

CAPITULO V

DISEÑO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE ANODOS DE SACRIFICIO APLICADO A TUBERIAS

5.1. DATOS PRELIMINARES

La tubería a proteger catódicamente sirve para transportar el agua de enfriamiento desde de las bombas de circulación hasta el condensador.

Dicha tubería, está formada por dos tuberías de descarga que salen de las bombas de circulación, y que luego de un tramo de 2m, se unen por medio de una unión Y para formar una sola tubería que va enterrada hasta llegar al condensador donde nuevamente se bifurca.

A continuación se detalla las características de la tubería:

Diámetro	1000mm
Espesor	89mm
Longitud	150m
Recubrimiento	ninguno
Material	Acero fundido.

5.2. MEDICIONES

Las mediciones de campo son necesarias para tener conocimiento de las variables involucradas en el diseño. Las mediciones realizadas son: Medición de potencial estructura suelo y mediciones de resistividad del suelo.

a) MEDICION DE POTENCIAL ESTRUCTURA SUELO

Como se señaló en el capítulo II este tipo de medición se la realiza con el fin de cuantificar el grado de corrosión al cual está expuesta la tubería.

La medición de voltaje de la tubería con respecto al suelo fue realizada utilizando el voltímetro del MILLER (MCM's) modelo B-3, y como electrodo de referencia un electrodo de Cu/CuSO₄ ubicado a 30.48 m. de la tubería.

La lectura obtenida fue de -580V (Cu/CuSO₄); por lo tanto se concluye que la estructura no está polarizada a un potencial de protección (-850mV), lo que hace necesario que se implemente un sistema de protección catódica para dicha tubería.

b) MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

Para tomar un valor promedio de la resistividad del terreno en el cual se encuentra enterrada la tubería, se tomaron cuatro lecturas de resistividad en cuatro puntos diferentes. El método que se utilizó para medir la resistividad es el método de los cuatro electrodos. La longitud a la que fueron enterrados los electrodos fueron de 1m, por lo tanto los electrodos se los separó uno del otro una distancia de 1m. Los resultados obtenidos se indican en la figura #5.1.

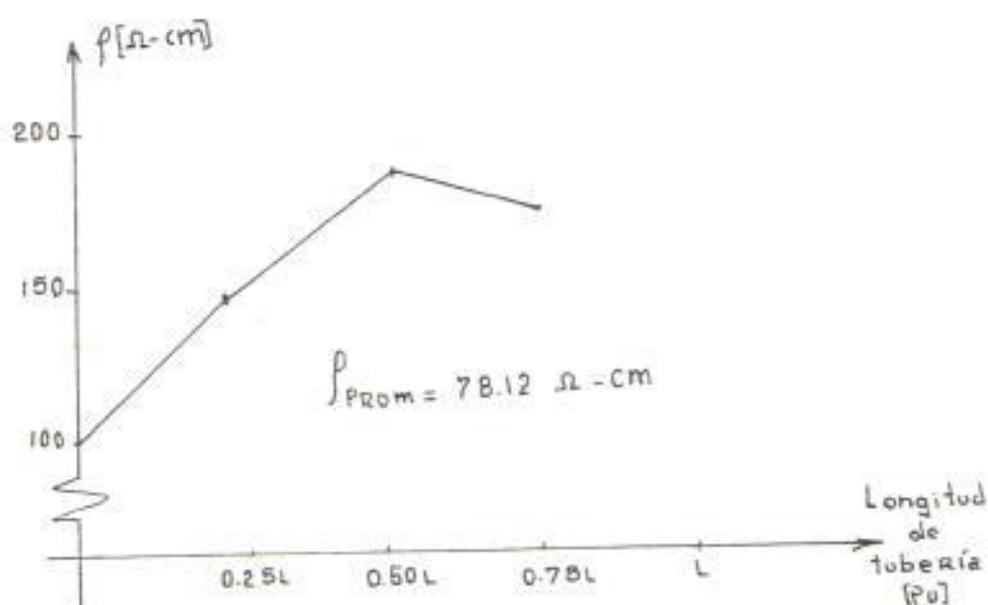


Fig. #5.1.- PERFIL DE RESISTIVIDADES

5.3. CALCULOS Y DISEÑO

Para realizar los cálculos de la protección catódica de la tubería, se adoptará la densidad de corriente recomendada por la NACE; la cual corresponde a una tubería de acero fundido, enterrada en un suelo salino y húmedo, y que no posee recubrimiento protector. Dicha magnitud de corriente es igual a 24.75 mA/m^2 .

Una vez que se seleccionó la densidad de corriente requerida, se procederá al cálculo de la corriente requerida para dar protección catódica. La corriente requerida para dar protección catódica está dada por:

$$I_p = D_c \cdot A$$

donde: I_p = Corriente de protección.

D_c = Densidad de corriente (24.75 mA/m^2)

A = Área a proteger (41.89 m^2).

Por lo tanto: $I = 24.75 \times 41.89 = 1037.14 \text{ mA}$.

Puesto que la corriente total de protección es menor a 2A el método más adecuado para dar protección catódica es por medio de ánodos de sacrificio.

El siguiente paso es seleccionar el tipo de ánodos a

utilizar. El tipo de ánodos que se utilizará en el diseño es el tipo de ánodos de aleación de Magnesio, cuyas características se indican a continuación:

Longitud	50.8cm
Diametro	10.16cm
Peso	22lb
Corriente de salida a una eficiencia del 50%	92mA

El numero de ánodos (N) está dado por:

$$N = \frac{1037.1mA}{92mA/\text{ánodo}} = 12 \text{ ánodos.}$$

El área a proteger por cada ánodo es:

$$\frac{92mA/\text{Anodo}}{Dc} = \frac{92}{24.75} = 3.71 \text{ m}^2$$

Puesto que el espaciamento entre cada ánodo es proporcional los 40 ft^2 que protege cada ánodo, el espaciamento entre cada ánodo en la cama de tierra es:

$$S = \frac{3.71}{3.14:1} = 1.18 \text{ m}$$

La figura #5.2, muestra la disposición de los ánodos. En la figura anteriormente mencionada, los ánodos están ubicados a una distancia de 3m respecto de la tubería, en forma paralela a ella.

Para el cálculo de la vida útil de los ánodos, se considera un factor de utilización de 0.85, lo que significa que una vez que halla consumido el 85% de un ánodo este deberá ser reemplazado para mantener el nivel de protección prefijado. Entonces la vida útil de cada ánodo será:

$$\begin{aligned} \text{Vida útil} &= \frac{0.116 \times \text{Peso lb} \times \text{factor utilización}}{\text{Corriente de salida A}} \\ &= \frac{0.116 \times 22.046 \times 0.85}{0.092} = 23.6 \text{ años} \end{aligned}$$

La comprobación teórica del diseño obedece a la siguiente regla: la resistencia real del circuito R_t deberá ser menor que la resistencia $R_p = E/I_p$, donde E es el potencial del ánodo de aleación de magnesio respecto al acero, e I_p es la corriente total de protección. Osea:

$$R_t \leq R_p$$

$$R_p = E/I_p = 0.60/1.0371 = 0.5785 \text{ ohmios}$$

La resistencia del circuito (R_t) está formada por la

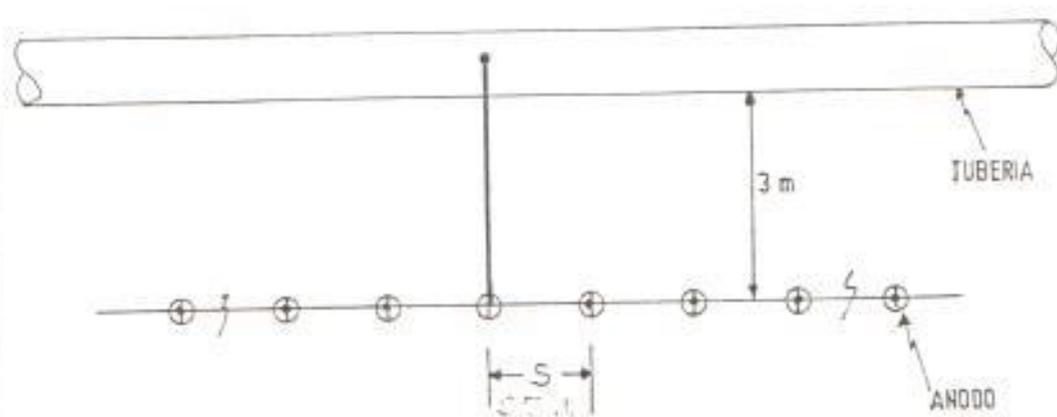


FIG. 5.2 _ DISPOSICION DE LOS ANODOS.

resistencia de los ánodos respecto al suelo, resistencia del conductor y, resistencia de la estructura.

a) RESISTENCIA DE LOS ANODOS RESPECTO DEL SUELO

Esta es calculada mediante la ecuación:

$$R_a = R_v + R_i/N$$

donde: R_v = la resistencia de los ánodos respecto al suelo

R_i = la resistencia interna de los ánodos respecto del backfill.

Los Anodos de aleación de magnesio vienen sumergidos un backfill de las siguiente características:

Material	Gypsum/betonita
Resistividad(ρ_b)	200 ohmios - cm
Longitud(L_b)	91.4 cm
Diámetro(D_b)	20.3 cm

Para el cálculo de R_v se utiliza la siguiente ecuación:

$$R_v = \frac{0.000171}{N L} \rho_b [2.5 \text{ Log}(8L_b/D_b) - 1 + (2L_b/S) 2.3 \text{ Log} 0.656n]$$

Substituyendo valores se tiene:

$$R_v = 4.83 \times 10^{-5} \text{ ohmios}$$

La resistencia R_i se la calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R_i = R_{i1} + R_{i2}$$

Donde, R_{i1} y R_{i2} se las calcula de la siguiente manera:

$$R_{i1} = \frac{0.000171}{L} \rho_b [2.3 \log (8L/D) - 1]$$

$$R_{i2} = \frac{0.000171}{L_b} \rho_b [2.3 \log (8L/D_b) - 1]$$

Reemplazando valores se tiene:

$$R_{i1} = 0.0551 \text{ ohmios}$$

$$R_{i2} = 0.0408 \text{ ohmios}$$

Por lo tanto:

$$R_i = 0.0143 \text{ ohmios}$$

Por último se tiene que :

$$R_a = 4.83 \times 10^{-5} + 0.0143 \text{ , } R_i = 0.00124 \text{ ohmios.}$$

b) LA RESISTENCIA DE LA TUBERIA

La resistencia eléctrica de la tubería (R_s) es

dada por el fabricante:

$$R_s = 0.01609 \text{ ohmios/km} \times 0.15 \text{ km} = 0.0024 \text{ ohmios.}$$

c) RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORAS

El conductor a utilizar desde la tubería hasta la cama de tierra (3m) sera #2 AWG con aislamiento THW, el cual tiene una resistencia de 0.162 ohmios por cada 100ft; por lo tanto la resistencia del conductor desde la tubería hasta la cama de tierra es:

$$3 \times 3.2808 \times 0.162 / 1000 = 0.0016 \text{ ohmios.}$$

El conductor a utilizar para interconectar los anodos en la cama de tierra es #6 AWG con aislamiento THW, el mismo que tiene una resistencia de 0.410 ohmios/1000 pies. La longitud del conductor para este fin es 480.15 ft. por lo tanto la resistencia del subalimentador es:

$$480.15 \times 0.410 / 1000 = 0.1669 \text{ ohmios.}$$

Por lo tanto la resistencia total del conductor (R_c) es:

$$R_c = 0.0016 + 0.1669 = 0.1685 \text{ ohmios}$$

La resistencia total del circuito está dada por la suma de todas las resistencias anteriormente calculadas:

$$R_t = R_a + R_s + R_c$$

$$R_t = 0.00124 + 0.0024 + 0.1685$$

$$= 0.17214 \text{ ohmios.}$$

El procedimiento para la instalación del equipo de protección catódica se indica a continuación:

a) INSTALACION DE LOS ANODOS

Como se indicó anteriormente los ánodos irán ubicados a 3m de la tubería y manteniendo un paralelismo con ella; espaciados entre sí 43.65ft. Se ubicarán de modo que queden lo más vertical posible respecto al suelo y enterrados a una profundidad tal que permanezcan en suelo mas o menos homogéneo. Por lo general es práctico colocar los ánodos a un nivel similar al del nivel inferior de la tubería. Además es necesario colocar estacas para marcar la ubicación de los ánodos.

b) CONEXIONES ELECTRICAS

Los ánodos vienen provistos de cables para realizar las conexiones.

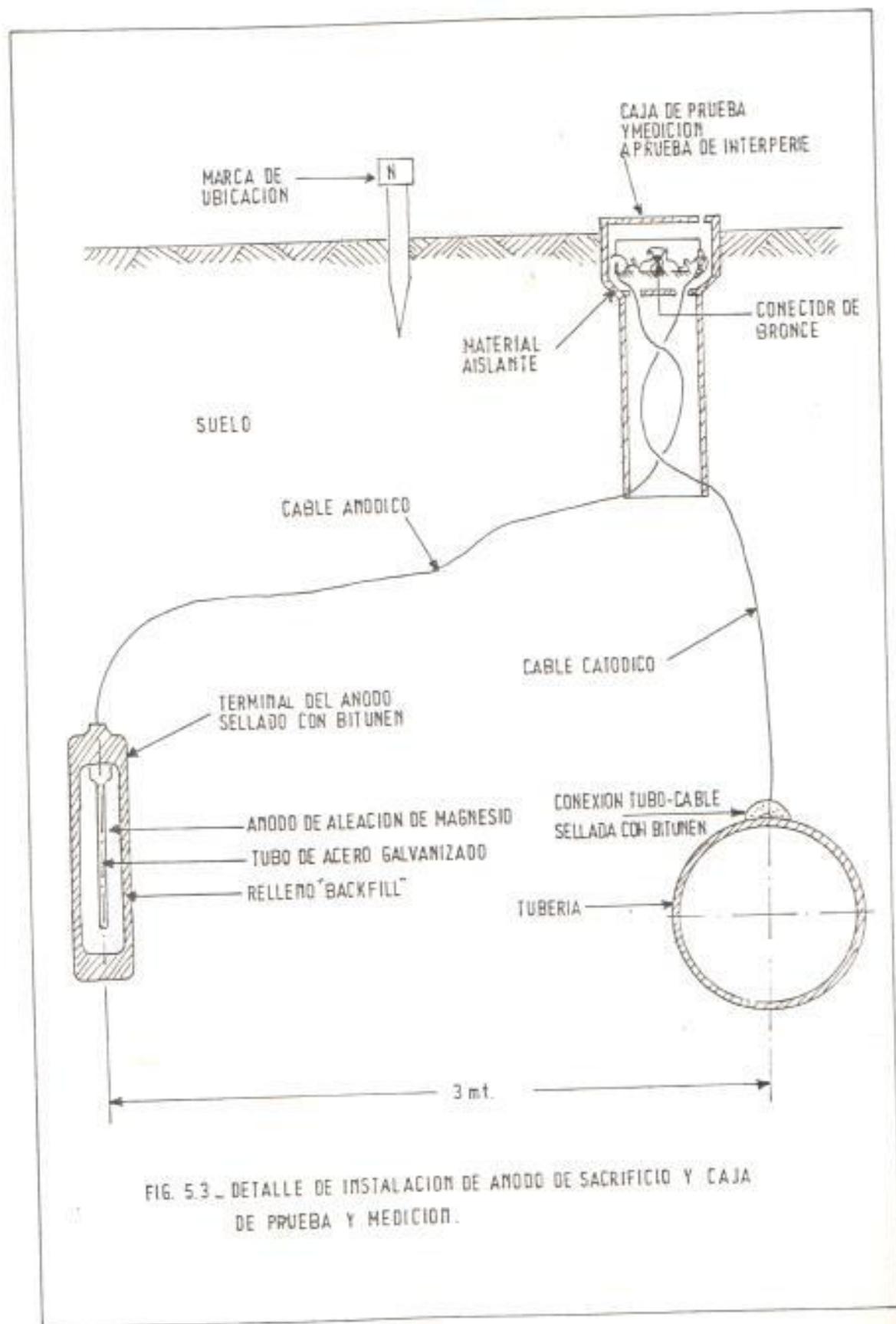
Los conectores deben ser de bronce y soldados a la

tubería con soldadura de plata. Para asegurar un buen contacto eléctrico, las piezas y cables deben de estar completamente limpias. Además una vez que se realicen las conexiones es necesario cubrirlas con resina epóxica o con cinta PVC.

c) CAJAS DE PRUEBAS Y REGISTROS

Para facilitar la ejecución de pruebas para controlar la operación correcta del sistema de protección, todos los ánodos deben de ir provistos de cajas de pruebas y registros. Estas cajas contienen un panel de 20cmx20cm. de material aislante; sobre dicho panel se conectan los terminales de los cables que viene de la tubería y del ánodo. Estos terminales están unidos a una barra de conexión, desmontable con el fin de realizar mediciones.

Las condiciones mencionadas de instalación se presentan en la figura #5.3.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar el presente trabajo se concluye lo siguiente:

- 1.- Las estructuras estudiadas, tales como las rejillas giratorias y fijas, bombas de circulación y lavado están sometidas al fenómeno de la corrosión del tipo galvánica localizada. La corrosión en las estructuras anteriormente mencionadas son causadas por pares de metales entre los que se encuentran el bronce, acero fundido, hierro fundido cubierto por concreto, etc. Otras causas para que se produzca la corrosión constituyen la alta velocidad relativa del agua con respecto a las estructuras y, la baja resistividad del agua.
- 2.- Para el caso del condensador se tiene que la corrosión es causada por los mismos agentes que producen la corrosión de los elementos mencionados anteriormente, adicionandose a estos las altas temperaturas que se manejan en el interior de este elemento.

De lo estudiado se puede realizar las siguientes recomendaciones:

- 1.- Es necesario que los ingenieros eléctricos eviten en lo posible la utilización de metales diferentes en los diseños y construcciones eléctricas en general, pues esta es la causa más fuerte para que se produzca la corrosión de dichas estructuras.

- 2.- Se recomienda como criterio general para la selección del tipo de protección catódica que para estructuras que requieran una corriente de protección superior a 1A se utilice protección catódica por corriente impresa, en caso contrario se deberá utilizar ánodos de sacrificio.

- 3.- Es necesario señalar que las densidades de corriente recomendadas por la NACE son únicamente referenciales, esto es puede darse el caso en que dicha densidad de corriente sea mayor que la corriente de puesta en trabajo del sistema de protección catódica. Así por ejemplo en el caso del condensador se ha asumido una densidad de corriente necesaria para dar protección igual en cada uno de los ocho cuadrantes; pero se tiene que durante el trabajo del sistema de protección catódica la demanda de corriente por circuito será diferente en cada uno, debido a que se tienen

diferentes condiciones de operación del condensador (temperatura y velocidad) en cada sección de las cámaras.

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

1. MILLER M. C. Hidden corrosion cost, American Gas Association - Annual Convention, Octubre 1948.
2. BARDEEN A. W. SHEADEL J. M. Corrosion as it affects insulator and conductor hardware, AIEE - Winter General Meeting, Enero 1956.
3. WILSON R. B. Mississippi's management is sold on the value of corrosion control, Ebasco Services, Diciembre 1950.
4. MONDAY J. C. Increasing megawatts by defending steam condensers and heat exchangers against galvanic corrosion and cavitation, The American Society of Mechanical Engineers, Mayo 1979.
5. ROMERO N. Corrosion en las instalaciones subterráneas del sistema eléctrico de la ciudad de Guayaquil - tesis para la revalidación de Ingeniero en Electricidad. ESPOL, Noviembre 1971.
6. LaDUE F. L. Introduction to corrosion, NACE, 1969.
7. FONTANA M. Corrosion engineering, McGraw - Hill book company INC, 1967.
8. MILLER M. C. Galvanic couples and cathodic protection, Petroleum Engineering, Mayo 1947.
9. MILLER M. C. Characteristics and field use of electrical instruments for corrosion investigation and cathodic protection, Ebasco Services, Febrero 1951.

10. MILLER M. C. Corrosion of buried metals and cathodic protection, Ebasco Services, Mayo y Junio 1944.
11. MILLER M. C. The electrical engineer's responsibility for recognizing corrosion as a factor in the desing of electrical estructures, NACE, Julio 1947.
12. MILLER M. C. Detection and control of corrosive action, Ebasco Services, Septiembre 1949.
13. WAHLQUIST H. W., FANETT H. M. Practical use of galvanic anodes, Ebasco Services, Diciembre 1947.
14. LICHTENSTEIN J. Prevention of condenser inlet tube corrosion, NACE, Mayo 1974.
15. LEWIS B. Cathodic protection of vertical turbine pumps, NACE, Abril 1978.
16. SCHMITT D. R., LAMBERT F. L. Water turbine pump failure, NACE, 1980.
17. NIKOLAKAKOS S., Cooling water systems components - Part I - Corrosion and Corrosion protection methods, Ebasco Services, NACE, 1982.