

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

PROYECTO DE PROTECCION CATODICA  
AL CAMPO SAN RAMON, TAB.

381

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A

ANGEL RIOS FARARONI

México, D. F.

1976



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS. TESI

AÑO. 1976

F-CHA           

PROG. 44

363

Con cariño y profundo agradecimiento

a mis padres:

ANGEL RIOS ALEMAN

y

CARMEN FARARONI DE RIOS.

A mis hermanos

ANA MARIA  
ELVIA  
VICTORIA  
MARTIN y  
SANDRA LUZ.

Con afecto y respeto por las atenciones  
que me brindaron.

AL ING. MANUEL F. GUERRERO FERNANDEZ

AL ING. PABLO TORRES RENDON

AL ING. CANDIDO RIOS ALEMAN

A MIS MAESTROS.

JURADO ASIGNADO:

Presidente	Prof. MANUEL F. GUERRERO FERNANDEZ.
Vocal	Prof. PABLO BARROETA GONZALEZ.
Secretario	Prof. ESPERANZA SCHROEDER GUTIERREZ.
1er. Suplente	Prof. ALBERTO SOLANO SALAZAR.
2do. Suplente	Prof. SILVIA LILIA TEJEDA CASTAÑEDA.

Sitio donde se desarrolla el Tema: AGUA DULCE, VER.

Nombre y firma del Sustentante: ANGEL RIOS FARARONI

Nombre y firma del Asesor del Tema: ING. MANUEL F. GUERRERO  
FERNANDEZ

"Yo puedo desaprobado lo que usted diga;  
pero defenderé hasta la muerte su dere-  
cho a decirlo".

VOLTAIRE.

## INDICE

"PROYECTO DE PROTECCION CATODICA AL CAMPO SAN RAMON, TAB."

CAPITULO I. - ANTECEDENTES.

CAPITULO II. - FUNDAMENTOS BASICOS SOBRE LA CORROSION.

- a). - Formas de la corrosión.
- b). - Química y electroquímica de la corrosión.
- c). - Fenomeno de la polarización.
- d). - Corrosión galvánica.

CAPITULO III. - METODOS DE LA APLICACION DE LA PROTECCION CATODICA.

- a). - Protección catódica con ánodos galvánicos.
- b). - Protección catódica con rectificadores de corriente.

CAPITULO IV. - DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA AL CAMPO SAN RAMON, TAB.

- a). - Plano de la red de bombeo neumático y líneas de descarga del campo San Ramón, Tab.
- b). - Cálculo de la corriente necesaria en amperes.
- c). - Gráficas de resistividades y potenciales.
- d). - Cálculo del número y peso de los ánodos que se requirieron para éste proyecto.

CAPITULO V. - CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

a). - Análisis de costos de la obra.

b). - Fórmulas y cálculos del número de punteos.

CAPITULO VI. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LA SUPERVISION DEL PROYECTO.

CAPITULO VII. - BIBLIOGRAFIA.

## CAPITULO I. - ANTECEDENTES

El Distrito petrolero de Agua Dulce, dependiente de la Gerencia de Explotación de Petróleos Mexicanos se encuentra localizado en la planicie costera del Golfo de Mexico correspondiente al Istmo de Tehuantepec - y comprende la parte oriental del Municipio de Coatzacoalcos, Ver. y la occidental del Municipio de Huimanguillo, Tab.

Está limitado al norte por una línea que corresponde al límite de la plataforma continental, al sur por la carretera Coatzacoalcos-Villahermosa y los ríos Zonapa y Tonalá, al oriente por el meridiano  $93^{\circ} 54'$  -- oeste y al occidente por el meridiano oeste  $94^{\circ} 17'$ , colinda al este con el Distrito de Comalcalco, al sur con el del Plan y al oeste con el de Nanchital.

La mayor parte de la superficie del Distrito está formada por terrenos de bajo relieve, pantanosos, con vegetación constituidas principalmente por gramíneas. El clima es tropical con temperatura media --- anual de  $28^{\circ}\text{C}$ . , con prolongada estación de lluvias.

Dentro de éste Distrito de Agua Dulce se encuentra localizado el campo petrolero San Ramón dentro del Municipio de Huimanguillo, perteneciente al Estado de Tabasco dentro de los límites aproximados siguientes:

Al norte el paralelo  $18^{\circ} 14'$

Al sur el paralelo  $18^{\circ} 12'$  ambos de latitud norte.

Al este el meridiano  $93^{\circ} 58'$

Al oeste el meridiano  $93^{\circ} 57'$  ambos de longitud oeste.

#### DESCUBRIMIENTO DEL CAMPO SAN RAMON.

El descubrimiento de éste campo se llevó a cabo por los trabajos sísmológicos de reflexión y de subsuelo en los pozos perforados en los campos de Sánchez Magallanes y de Pailebot, se detectó un bloque con condiciones propicias para contener hidrocarburos.

El 23 de Agosto de 1967 se abrió el pozo No. 1 resultando productor de aceite y gas.

El campo San Ramón ocupa el cuarto lugar en el Distrito en cuanto al volúmen original de hidrocarburos. Existen áreas en éste campo en donde el índice de Isohidrocarburos alcanzan un valor de 33.86.

El volúmen original de aceite y gas asociado disuelto del campo se calculó mediante el método denominado de índices de Isohidrocarburos, considerando el área probada total del campo conforme la tabla del estado actual del campo.

#### LINEAS DE DESCARGA.

Todos los pozos terminados como productores cuentan con líneas de descarga definitiva de 3"Ø. El flujo es directo a un cabezal general de grupo y prueba en la batería de éste campo. En ésta batería se recibe la producción de hidrocarburos, localizada en las inmediaciones del pozo San Ramón No. 1.

Existe un oleoducto de 6"Ø por 3.0 Km. que está conectado de la batería de San Ramón al oleoducto de 6"Ø Pajonal-Magallanes.

El total de tubería que conecta a los pozos con la batería es de 70 KM. aproximadamente, siendo éstas de 3"Ø.

A la fecha se tiene operando una estación de compresoras que se ubica entre los pozos Pajonal 28 y San Ramón 33.

#### COMUNICACIONES.

El Campo San Ramón cuenta con un camino de terracería transitable todo el año, con una longitud aproximada de 5.8 Km. y para el acceso a los pozos se cuenta con caminos de terracería con un desarrollo aproximado de 200 Km.

Se cuenta además con una red de microondas automáticas que se acoplan con los equipos multicanales y radios correspondientes que hacen posible el enlace al sistema de larga distancia de Petróleos Mexicanos.

Dadas las condiciones del terreno sobre el que se encuentra el Campo San Ramón, siendo éste de tipo pantanoso, los ductos tendidos en éste campo se encuentran expuestos a una corrosión severa por estar sumergidos dichos ductos en el pantano, además otra de las causas de que el ataque a las tuberías sea severo es que el agua de éste terreno contiene gran cantidad de sales, lo que hace que la corrosión se produzca con mayor intensidad.

Bajo éstas consideraciones se estimó necesario proteger dichas líneas, para lo cual se elaboró un Proyecto de Protección Catódica con ánodos galvánicos de magnesio y reducir así la corrosión en éste campo.

La tabla anexa del estado actual de producción del campo San --

Ramón justifica la necesidad del proyecto que se llevó a cabo.

Así mismo se procede en el capítulo No. 11 a explicar los fundamentos de la corrosión para así entender el porqué debe protegerse las estructuras enterradas, para que de ellas se espere una mayor duración y -- por lo tanto una mayor eficiencia en la producción petrolera, ya que ésta -- protección como un medio de preveer la corrosión elimina en gran parte -- las posibilidades de destrucción de las tuberías, lo que da como resultado -- la eliminación de fallas en ductos, que a la postre significa una utilidad --- económicamente grande.

ESTADO ACTUAL DE PRODUCCION DEL  
CAMPO SAN RAMON, TAB.

POZO N°	M <sup>3</sup>		M <sup>3</sup>	
	ACEITE	CRUDO	GAS DE FORMACION	GAS INYECTADO
1-A		3	10 100	2 400
4		12	2 000	8 100
7		10	4 100	7 900
8-I		100	5 000	
9		43	21 400	
10		20	11 000	
20		14	5 400	4 100
20-DS		6	11 900	3 500
21		27	6 100	6 700
21-DS		47	3 000	
21-DI		50	3 500	4 100
22-DS		192	7 100	
24-S		62	14 700	
27		47	15 800	8 600
29		14	9 800	5 600
38-S		51	14 900	6 400
38-I		50	5 500	6 000
39		69	5 600	4 700
39-DS		21	2 400	2 800
39-DI		20	4 600	2 100
40		19	1 500	
41		11	2 800	
43		32	11 100	
44-D		69	10 600	
49		13	7 300	6 500
50		11	3 600	9 000
51-S		100	1 000	9 900
52		24	5 000	5 000
54		50	15 900	3 200
58		21	2 800	
59-AI		28	5 200	7 900
60		22	1 000	7 700
65		22	5 400	9 100
67		67	5 000	4 800
68		45	17 400	6 600
70-S		77	10 000	2 800
70-I		38	16 700	2 100
73		45	14 000	9 300
83		9	6 700	4 000
TOTAL:		1,561 M <sup>3</sup>	306,900	

## CAPITULO II. - FUNDAMENTOS BASICOS SOBRE CORROSION.

### ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSION.

La vida útil del equipo de la Industria petrolera se acorta a menudo como un resultado de la corrosión y en los últimos 10 años se han tenido grandes adelantos en su detección y remedios aplicados para controlar la en la producción del petróleo.

En términos técnicos simplificados la corrosión han sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente y representa la diferencia entre una operación libre de problemas con gastos de operación muy elevados.

Para efectos prácticos es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en éste campo radica mas en su control que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

El ingeniero que trabaja en problemas de corrosión necesita saber donde empezar y tener un conocimiento básico para reconocer la corrosión, como se produce, como impedir su celeridad, que herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variables de diseño que afectan a la corrosión, selección de materiales y la forma de interpretar y aplicar la información del problema corrosivo, así como saber donde obtener ayuda.

Todos los metales son susceptibles de sufrir el fenómeno de la corrosión, así como las aleaciones, no habiendo material útil para todas -

las aplicaciones; por ejemplo el oro conocido por su excelente resistencia a la atmósfera, se corroe si se pone en contacto con mercurio a temperatura ambiente. Por otra parte el acero no se corroe en contacto con el mercurio, pero rápidamente se oxida expuesto a la atmósfera.

Afortunadamente se tienen bastantes metales que pueden comportarse satisfactoriamente en medios específicos, y también se tienen métodos de control de la corrosión que reducen el problema. Los paros de las plantas pueden ocurrir y ocurren como un resultado de la corrosión, provocando gastos directos e indirectos de aspecto económico y humano.

Dentro de los aspectos económicos tenemos:

- a). - Reposición del equipo corroído.
- b). - Coeficiente de seguridad y sobrediseño para soportar la corrosión.
- c). - Mantenimiento preventivo como la aplicación de recubrimientos.
- d) - Paros de producción debido a fallas de corrosión.
- e). - Contaminación de productos.
- f). - Pérdidas de eficiencia ya que los coeficientes de seguridad, sobre diseño de equipo y productos de corrosión por ejemplo, decrecen la velocidad de transmisión de calor.
- g). - Daño de equipo adyacente a aquél en el cual se tuvo la falla de corrosión.

Dentro de los aspectos humanos y sociales tenemos:

- a). - La seguridad, ya que fallas violentas pueden producir incen-

dios, explosiones y liberación de productos tóxicos.

- b). - Condiciones insalubres por ejemplo, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c). - Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales -- como en combustibles usados en su manufactura.
- d). - Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

#### FORMAS DE LA CORROSION.

La corrosión ocurre en muchas y muyvariadas formas pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

1. - Naturaleza de la substancia corrosiva: La corrosión puede -- ser clasificada como húmeda o seca. Para la primera se re quiere un líquido o humedad mientras que para la segunda -- las reacciones se desarrollan con gases a altas temperaturas.
2. - Mecanismo de la corrosión: Este comprende las reacciones electroquímicas o bien las reacciones químicas.
3. - Apariencia del metal corroído: La corrosión puede ser uni-- forme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad -- en toda su superficie o bien puede ser localizada, en cuyo -- caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

En el ataque microscópico la cantidad de metal disuelto es míni- ma y puede conducir a daños muy considerables antes que el problema sea

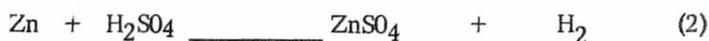
visible.

## QUIMICA Y ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION.

La corrosión como reacción química. Para poder comprender el fenómeno corrosivo como resultado de una reacción química, es necesario disponer de algunos principios elementales de química, los cuales se enunciarán brevemente a continuación.

### CORROSION EN ACIDOS.

Una de las formas de obtener hidrógeno en el laboratorio es colocar un pedazo de zinc dentro de un vaso conteniendo un ácido diluido, tal como el clorhídrico o el sulfúrico, al depositarse el zinc en la solución ácida, el zinc se ataca rápidamente desprendiéndose el hidrógeno, tal y como se indica en las reacciones 1 y 2



Otros metales también son corroídos o disueltos por medio de ácidos liberando hidrógeno:



Las reacciones 3 y 4 indican que el fierro y el aluminio también son corroídos por el ácido clorhídrico.

### CORROSION EN SOLUCIONES NEUTRAS Y ALCALINAS,

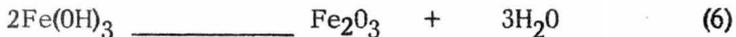
La corrosión de los metales también puede presentarse en agua

limpia, agua de mar, soluciones salinas y soluciones alcalinas y básicas. En la mayoría de éstos sistemas, la corrosión solo ocurre cuando éstas - contienen oxígeno disuelto. Las soluciones acuosas disuelven rápidamente el oxígeno requerido en los procesos corrosivos. La corrosión más familiar de éste tipo es la oxidación del hierro cuando se expone a una atmósfera húmeda o bien en agua.

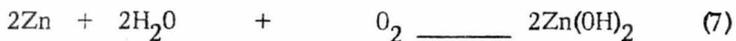


Esta reacción muestra que el hierro se combina con el agua y el oxígeno para darnos la sustancia insoluble de color café rojizo que es el hidróxido férrico.

Durante la oxidación en la atmósfera, existe la oportunidad de que el producto de la reacción se seque, por lo que el hidróxido férrico se deshidrata y forma el óxido café rojizo que es tan familiar.



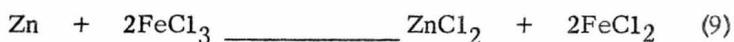
Reacciones similares se presentan cuando el zinc se expone al agua o en el aire húmedo.



El óxido de zinc resultante es el depósito blanco que se observa en los equipos galvanizados.

## CORROSION EN OTROS SISTEMAS.

Los metales también pueden ser atacados en soluciones que no contengan oxígeno o ácidos. Las soluciones típicas para éste proceso son aquellas soluciones denominadas oxidantes que contienen sales férricas y compuestos cúpricos en los que la corrosión se presenta de acuerdo con las siguientes reacciones:



Es pertinente notar que en la reacción 9 el cloruro férrico cambia a cloruro ferroso a medida que el zinc se corroe. En la reacción 10 el zinc reacciona con el sulfato de cobre para formar la sal soluble del sulfato de zinc, obteniéndose además un depósito esponjoso de cobre metálico sobre la superficie de zinc, por ésta razón las reacciones similares a ésta reciben el nombre de reacciones de sustitución metálica.

## PRODUCTOS DE LA CORROSION.

El término productos de la corrosión se refiere a las sustancias obtenidas durante las reacciones de corrosión y éstas pueden ser solubles como en el caso del cloruro de zinc y del sulfato de zinc o insolubles como en el caso del óxido de fierro e hidróxido de fierro.

La presencia de los productos de la corrosión es una de las formas por las cuales se detecta ésta, por ejemplo, el óxido. Sin embargo, es conveniente hacer notar que los productos insolubles de la corrosión no siempre son visibles, por ejemplo, al exponer una pieza de aluminio al

aire se forma una película de óxido casi invisible que protege al metal de un ataque posterior y la película es casi invisible porque es extraordinariamente delgada, siendo ésta la razón del uso extensivo del aluminio en la construcción de ventanas, cancelas y molduras automotrices.

#### ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION.

Reacciones electroquímicas. - Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es decir, es una reacción química que comprende el fenómeno de oxidación y reducción.

Como la corrosión metálica es casi siempre un fenómeno electroquímico involucrando un proceso electroquímico, es importante comprender la naturaleza básica de las reacciones electroquímicas.

La definición anterior de reacción electroquímica puede ser mejor comprendida observando en detalles una reacción típica de corrosión, así por ejemplo, la reacción del zinc con el ácido clorhídrico queda mejor expresada recordando que el ácido clorhídrico y el cloruro de zinc están ionizados en soluciones acuosas, por lo que podemos escribir:



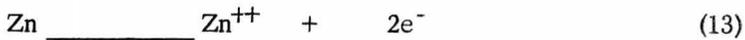
Cuando la reacción se escribe en ésta forma es obvio que el ión-cloruro no participa en forma directa en la reacción puesto que el ión-cloruro aparece en ambos miembros de la ecuación y no es alterado por la reacción de corrosión, es decir, la valencia del ión-cloruro permanece sin cambio.

De acuerdo a lo anterior, la ecuación 11 se puede escribir en forma simplificada como:

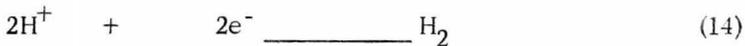


Esta última ecuación indica que la corrosión del zinc en ácido clorhídrico consiste simplemente en la reacción entre el zinc y los iones hidrógenos, que son reducidos a gas hidrógeno disminuyendo su valencia.

Por lo anterior, la reacción 12 puede ser simplificada aún más - al dividirla en una reacción de oxidación y una reacción de reducción.

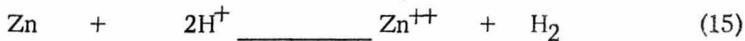


Oxidación (reacción anódica)



Reducción (reacción catódica)

Cuya suma nos da:



Una reacción de oxidación tal como la ecuación 13 significa un incremento en estado de oxidación o valencia con producción de electrones y en forma similar la reacción de reducción representa una disminución en el estado de oxidación o valencia y el consumo de electrones tal y como se ve en la ecuación 14.

La suma de las reacciones 13 y 14 nos dan la reacción total -- (reacción 15). En términos de corrosión una reacción de oxidación recibe el nombre de Reacción Anódica, mientras que a la reacción de reducción se le denomina Reacción Catódica.

Todo proceso de corrosión necesita por lo menos una reacción - de oxidación y una reacción de reducción, por lo que podemos resumir que las reacciones de la corrosión son electroquímicas en naturaleza, y debido a ésto es posible dividir el proceso de la corrosión en reacción anódica y reacción catódica que permiten simplificar la presentación de la mayoría de los procesos.

#### REACCIONES ANODICAS.

Durante el ataque corrosivo la reacción anódica siempre es la oxidación de un metal, a un estado superior de valencia, por ejemplo, las reacciones 1, 2, 3 y 4.

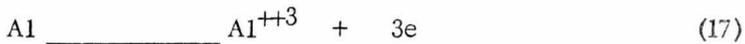


Todas ellas representan la reducción de los iones hidrógeno a gas hidrógeno, en forma semejante a la reacción 14 y la única diferencia entre ellas es la naturaleza de sus procesos anódicos de oxidación. Lo anterior permite ver que la corrosión por ácidos es muy simple ya que en cada caso la reacción catódica es simplemente el desprendimiento del gas hidrógeno de acuerdo a lo explicado en la reacción 14.

Este desprendimiento de hidrógeno ocurre con una gran variedad de metales y de ácidos, tales como el clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico-

acético, fórmico y otros ácidos orgánicos solubles en agua.

Separando las reacciones 1, 2, 3 y 4 en reacciones anódicas y - catódicas, vemos que las ecuaciones 1 y 2 representan la oxidación del - zinc a sus iones, mientras que la 3 y 4 indican la oxidación del fierro y - el aluminio a sus iones, tal y como se indica en las siguientes reacciones:



De acuerdo con éstas reacciones, la reacción anódica se puede representar en forma general como sigue:



es decir la corrosión del metal M da por resultado su oxidación para formar iones con valencia +n y la liberación de n electrones.

El valor de n depende de la naturaleza del metal, así por ejemplo la plata es monovalente mientras que otros metales como el fierro, ti tanio y uranio son polivalentes y algunos pueden tener cargas positivas -- tan elevadas como 8.

La ecuación 18 es entonces general y se aplica a todas las reacci ones de corrosión.

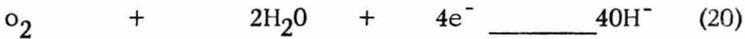
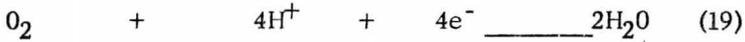
#### REACCIONES CATODICAS.

Hay varias reacciones catódicas que se encuentran durante la co rrosión de los metales tales como las que se enlistan a continuación:

Desprendimiento de hidrógeno



Reducción de oxígeno (en soluciones neutras y alcalinas)



Reducción de iones metálicos



Depósito de metal



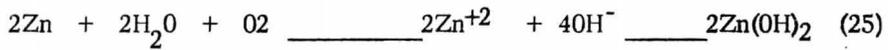
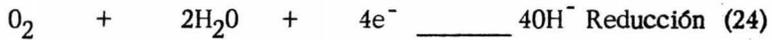
La reducción del oxígeno es una reacción catódica muy común ya que el oxígeno está presente en la atmósfera y las soluciones están expuestas a la misma.

La reducción de iones metálicos y el depósito de metales aunque es menos frecuente causa problemas de corrosión muy severos.

Todas estas reacciones tienen en común que consumen electrones y todas las reacciones de corrosión son simplemente combinaciones de una o más de las reacciones catódicas indicadas, unidas con una reacción anódica similar a la ecuación 18.

Podemos establecer entonces que la mayoría de los casos de corrosión metálicas pueden ser reducidas a éstas seis ecuaciones ya sea en forma aisladas o en combinaciones, así por ejemplo el zinc se corroe en agua o en aire húmedo en la siguiente forma:





Los productos de ésta reacción son iones zinc  $\text{Zn}^{+2}$  y iones  $\text{OH}^-$  que inmediatamente reaccionan para formar el hidróxido de zinc insoluble.

#### FENOMENO DE POLARIZACION.

Es interés primordial del ingeniero de corrosión, el conocer la velocidad a la cual se desarrollan las reacciones catódicas y anódicas que pueden ser determinadas por varios métodos físicos y químicos.

Cuando una reacción electroquímica se retarda, se dice que está polarizada y hay dos tipos diferentes de polarización: polarización por activación y polarización por concentración.

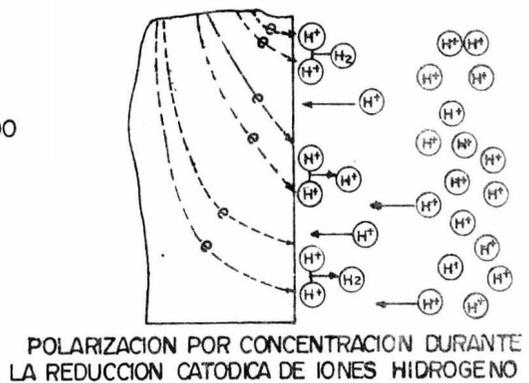
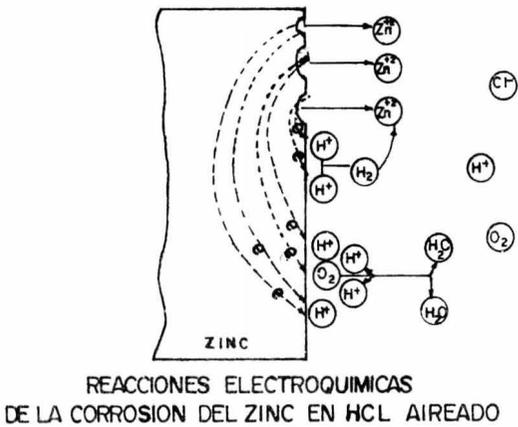
La polarización por activación se refiere a aquéllos factores retardadores de la reacción que son inherente a la reacción misma como por ejemplo, la velocidad a la cual los iones hidrógeno se reducen a gas hidrógeno.

La polarización por activación es función de varios factores que incluye la velocidad de transporte del electrón al ión hidrógeno y de la temperatura del sistema, por lo que la velocidad de desprendimiento del hidrógeno es muy diferente para cada metal.

La polarización por concentración se refiere al retardo de la reacción electroquímica como resultado de los cambios de concentración en la solución adyacente a la superficie metálica.

Si la reacción procede a muy alta velocidad y la concentración de -

iones hidrógenos de la solución es baja, se puede ver que la reacción en la región cercana a la superficie metálica se agota en sus iones hidrógeno -- puesto que son consumidos en la reacción química.



Bajo éstas condiciones, la reacción es controlada por la velocidad de difusión de los hidrógenos iónicos a la superficie metálica.

El conocimiento del tipo de polarización que se presenta es muy útil y que permite predecir las características del sistema corrosivo, por ejemplo si la corrosión es controlada por la polarización por concentración -- entonces cualquier incremento en la velocidad de difusión de las especies activadas como el  $H^+$  deberá incrementar la velocidad de corrosión del metal.

Por otra parte si la reacción catódica se controla por polarización por activación, entonces la agitación no tendrá ningún efecto en la velocidad de la corrosión.

#### FACTORES DE CORROSION.

El potencial de un metal que se corroe es muy útil en los estudios de la corrosión y se obtienen fácilmente en condiciones de campo y se determina midiendo la diferencia de potencial existente entre el metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia apropiado.

Los electrodos de referencia más utilizados son el electrodo saturado de calomel, el electrodo de cobre-sulfato de cobre y el electrodo de platino hidrógeno.

#### POTENCIALES DE OXIDO REDUCCION.

El potencial de óxido reducción se refiere al potencial relativo de una reacción electroquímica en condiciones de equilibrio por lo que las reacciones deben proceder a la misma velocidad en ambas direcciones.

Estos potenciales también son conocidos con el nombre de potenciales Redox, potencial de media celda y serie de fuerzas electromotrices.

Los potenciales de óxido reducción son muy útiles ya que pueden ser utilizados para predecir si un metal es o no corroído en un medio ambiente dado. Esto se puede establecer por medio de la siguiente regla generalizada:

"En cualquier reacción electroquímica la media celda más negativa tiende a oxidarse, mientras que la media celda más positiva tiende a -

reducirse".

Aplicando esta regla al zinc que se corroe en soluciones ácidas, - podemos ver que la media celda zinc metálico-iones zinc, es más negativa- que la media celda iones hidrógeno-hidrógeno gaseoso por lo que aplicando- la regla anterior se ve que el zinc deberá ser corroído en soluciones ácidas.

Se puede ver que todos los metales que tienen potenciales Redox- mas negativos que la media celda iones hidrógeno-gas hidrógeno, serán co- rroídos por soluciones ácidas lo cual incluye a metales como el plomo, es- taño, níquel, fierro y aluminio junto con los otros metales con potenciales- negativos.

Por otra parte, el cobre, mercurio, plata paladio y los otros me- tales con potenciales mas positivos que la media celda iones hidrógeno gas- hidrógeno, no serán corroídos por soluciones ácidas, es decir el cobre por ejemplo, podría ser un buen material para guardar ácidos, sin embargo el- cobre se corroe si el ácido contiene oxígeno, ya que el potencial Redox de- cobre es menos positivo que el potencial de las medias celdas o pilas de --- oxígeno, tal y como se muestra en la tabla de los potenciales Redox a 25°C.

TABLA DE POTENCIALES STANDARD DE OXIDO-REDUCCION

REDOX A 25°C				
Au -----	Au <sup>+++</sup>	+	3e <sup>-</sup>	1.42 noble
Pt -----	Pt <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	1.20
O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup>	+	4e -----	2H <sub>2</sub> O	1.23
Pd -----	Pd <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	0.83
Ag -----	Ag <sup>+</sup>	+	e <sup>-</sup>	0.799
2Hg -----	Hg <sub>2</sub> <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	0.798
Fe <sup>+++</sup> -----	Fe <sup>++</sup>	+	e <sup>-</sup>	0.771
O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	+	4e -----	4OH <sup>-</sup>	0.401
Cu -----	Cu <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	0.34
Sn <sup>++</sup> + 2e	-----		Sn <sup>++</sup>	0.154
2H <sup>+</sup> + 2e	-----		H <sub>2</sub>	0.000 REF.
Pb -----	Pb <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.126
Sn -----	Sn <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.140
Ni -----	Ni <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.230
Co -----	Co <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.270
Cd -----	Cd <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.402
Fe -----	Fe <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.440
Cr -----	Cr <sup>+++</sup>	+	3e <sup>-</sup>	- 0.710
Zn -----	Zn <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 0.763
Al -----	Al <sup>+++</sup>	+	3e <sup>-</sup>	- 1.660
Mg -----	Mg <sup>++</sup>	+	2e <sup>-</sup>	- 2.380
Na -----	Na <sup>+</sup>	+	e <sup>-</sup>	- 2.710
K -----	K <sup>+</sup>	+	e <sup>-</sup>	- 2.920 ACTIVO

## DIAGRAMAS DE POTENCIAL ION pH.

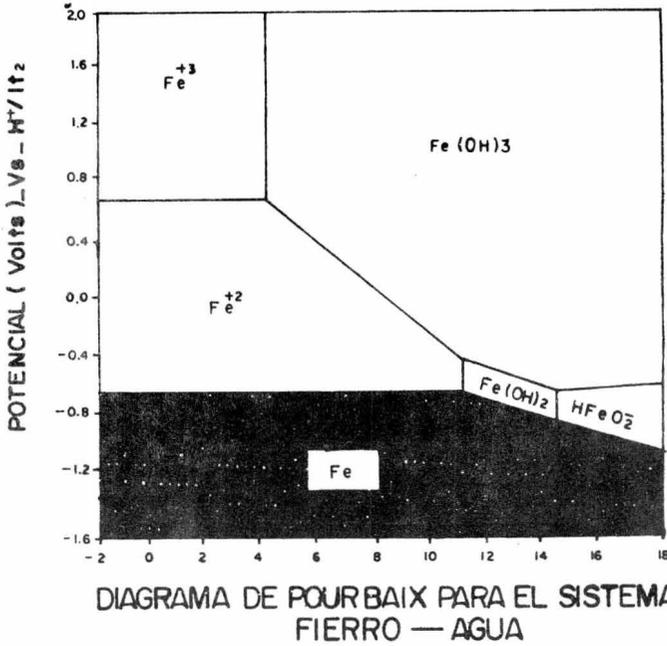
El uso de los potenciales Redox puede ser extendido, graficando los potenciales Redox como función de pH de la solución.

Estos diagramas se conocen como diagramas de Pourbaix y se elaboran utilizando cálculos electroquímicos, datos de solubilidad y constantes de equilibrio.

Es necesario recordar que el pH es simplemente el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno de tal manera que un pH de 7 indica que se tiene  $10^{-7}$  iones gramos de hidrógeno por litro de solución y corresponde a una solución neutra, mientras que un pH-0 representa una solución muy ácida y un pH-14, representa una solución muy alcalina.

El diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H<sub>2</sub>O como el que se representa en la figura siguiente permite ver que a potenciales más positivos que a 6 volts y PH menor que 9, los iones ferrosos son la substancia estable por lo que el hierro deberá corroerse en estas condiciones suministrando iones Fe<sup>+2</sup>.

En otras regiones del diagrama se puede ver que la corrosión del hierro produce iones férricos, hidróxido férrico, hidróxido ferroso y en condiciones muy alcalinas iones complejos de hierro.



El principal uso de los diagramas de Pourbaix, que pueden ser -  
construídos para todos los metales son:

1. - Predecir si hay o no corrosión.
2. - Estimar la composición de los productos de la corrosión.
3. - Predecir cambios del medio ambiente que ayuden a prevenir  
o reducir el ataque corrosivo.

El diagrama de Pourbaix en el sistema del fierro-agua, la re---  
gión obscura indica que el fierro no se corroe bajo estas condiciones de po  
tencial y pH, es decir, si el potencial de corrosión del fierro se hace sufi-  
cientemente negativo, por ejemplo - 1.2 volts, el fierro no se corroerá en

ningún sistema que varfe desde PH muy ácido hasta pH muy básico.

Estas observaciones es el fundamento de la protección catódica - del fierro.

### CORROSION GALVANICA.

En las instalaciones de plantas, se emplean una gran variedad -- de metales y aleaciones diferentes, que a menudo están en contacto físico - y eléctrico. Este contacto o acoplamiento de metales diferentes algunas ve- ces causa velocidad de corrosión elevada, que recibe el nombre de corrosión galvánica.

La corrosión galvánica se presenta cuando se tienen las siguien- tes condiciones.

1. - Cuando se conectan dos metales diferentes, el más activo o - metal anódico se corroe mas rápidamente mientras que el metal más noble o metal catódico tiende a protegerse.

2. - A medida que la diferencia de potencial entre los dos metales se incrementa, la corrosión galvánica también aumenta.

Un ejemplo de la corrosión galvánica se presenta al conectar tu- berfas de aluminio y de fierro que dan como resultado una mayor velocidad de corrosión en la tuberfa de aluminio.

La corrosión galvánica se presenta también con mucha frecuencia en cambiadores de calor en donde los tubos generalmente son de cobre, mien- tras que el resto del cambiador de calor es de acero.

En estas condiciones la parte de acero funciona anódicamente disol viéndose mientras que los tubos de cobre funcionan catódicamente protegién-

dose.

#### Reconocimiento de la Corrosión Galvánica.

Para asegurarse de que éste tipo de corrosión está ocurriendo es necesario tres condiciones:

1. - Presencia de dos metales electroquímicamente diferentes.
2. - Contacto eléctrico entre los dos metales.
3. - Los metales deberán estar expuestos a un electrolito.

#### Prevención de la Corrosión Galvánica.

La forma de prevenir la corrosión galvánica se puede hacer con los siguientes métodos:

1. - Evitando el uso de metales diferentes siempre que esto sea posible. Si no lo es, tratar de usar metales que estén lo mas cercano posible entre sí en la serie galvánica.

2. - Es necesario evitar una relación en áreas desfavorables, es decir bajo ninguna circunstancia conectar una pequeña área anódica a una gran área catódica.

3. - Si se utilizan metales diferentes, aislar eléctricamente uno del otro instalando juntas aislantes.

4. - Si es necesario utilizar metales diferentes, y no pueden ser aislados, la parte anódica deberá ser diseñada de manera de poderlas reemplazar fácilmente ó construirlas de materiales mas gruesos para alargar la vida del equipo bajo los efectos de la corrosión.

Comparación de la serie galvánica con los potenciales Redox.

Existe alguna confusión con la literatura con respecto a las apli-

caciones de los potenciales Redox y la serie galvánica ya que los valores - tabulados en éstas dos series son muy similares por lo que es conveniente indicar que el potencial de óxido reducción se usa para predecir si un metal solo se corroe o no, mientras que la serie galvánica se aplica para predecir cuando se presentará la corrosión galvánica y también cual de los dos metales aplicados presenta la mayor velocidad de corrosión.

#### Prevención de la corrosión por métodos electroquímicos.

La protección catódica se utiliza cuando un metal se hace mas catódico o negativo, imprimiéndole una corriente eléctrica y conectándolo con otro metal mas activo que el metal del equipo que se desea proteger. Por ejemplo cuando un equipo de acero se conecta a una pieza de zinc, el zinc se corroe dando protección al fierro, en éste caso el zinc es el metal anódico y recibe el nombre de ánodo de sacrificio, mientras que el acero funciona como cátodo recibiendo protección.

#### SERIE GALVANICA EN AGUA DE MAR DE ALGUNOS MATERIALES METALICOS COMERCIALES.

Activo ó Anódico	MAGNESIO
	ALEACIONES DE MAGNESIO
	ZINC
	ACERO GALVANIZADO
	ALUMINIO 1100
	ALUMINIO2024
	ACERO
	HIERRO DULCE

HIERRO

ACERO INOXIDABLE 13% Cr, Tipo 410

ACERO INOXIDABLE 18-8, Tipo 304

(Activo)

SOLDADURA Pb- Sn

PLOMO

ESTAÑO

BRONCE AL MANGANESO

LATON NAVAL

NIQUEL (activo)

ALEACION 60 Ni - 30 Mo - 6 Fe- 1 Mn

LATON AMARILLO

LATON ADMIRALTY

LATON ROJO

COBRE

BRONCE AL SILICIO

CUPRONIQUEL 70 - 30

BRONCE G

SOLDADURA DE PLATA

NIQUEL (pasivo)

ALEACIO 76 Ni - 16 Cr - 7 Fe (Pasiva)

ACERO INOXIDABLE 18-8, tipo 304

(Pasiva)

PLATA

GRAFITO

ORO

Noble o Catódico

PLATINO

## RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS.

El uso de recubrimientos para el control de la corrosión de las estructuras metálicas se basa en el hecho de que, si dichas estructuras son aisladas del medio ambiente que las rodea, la corrosión no podrá ocurrir. Por tal motivo los recubrimientos deberán tener las siguientes características:

- a). - Buenas propiedades de aislamiento eléctrico.
- b). - Buena adherencia sobre la superficie metálica en las que son aplicadas.
- c). - Buena resistencia a los agentes corrosivos (agua, iones y gases.)
- d). - Estabilidad de sus propiedades a través del tiempo.

Los recubrimientos son muy efectivos cuando se utilizan en forma adecuada, sin embargo en la práctica han demostrado que por sí solos no son la mejor respuesta al control de la corrosión. Este hecho es el mejor argumento a favor de la aplicación complementaria de la protección catódica.

Ahora la corriente necesaria para alterar el potencial eléctrico de una estructura metálica enterrada o sumergida, hasta niveles de protección, es una función del área expuesta al medio agresivo. De ahí que si los recubrimientos se reducen considerablemente a esa área, la corriente de -

protección registrará también una reducción importante que se traducirá en un ahorro de dinero por concepto de energía eléctrica. Esto se debe a que únicamente se requerirá proteger las pequeñas áreas metálicas expuestas al medio corrosivo que resultan de las deficiencias del recubrimiento.

En los últimos años los trabajos de control de corrosión de tubería y de todo tipo de estructuras metálicas enterradas o sumergidas han comprendido el uso de buenos recubrimientos y de protección catódica.

Tipo de Recubrimientos.

Existen en la actualidad una inmensa variedad de recubrimientos anticorrosivos, sin embargo solo nos ocuparemos de aquéllos sistemas de recubrimientos que se han desarrollado para tuberías y otras estructuras susceptible de ser protegidas catódicamente y que además han encontrado aplicaciones en las instalaciones de Pemex.

Los sistemas mas comunes son los siguientes:

Sistema primario. - Esmalte. - Enrollado (simple o doble).

Este sistema se usa ampliamente para recubrir tuberías enterradas. Consiste en la aplicación, previa limpieza de la tubería, de una pintura base o de imprimación, la cual se aplica en forma de película a un espesor de 3 milésimas de pulgada en película húmeda. El objeto de este "primer", aplicado es favorecer la adhesión del esmalte caliente que se aplica una vez que el citado "primer" se encuentra completamente seco.

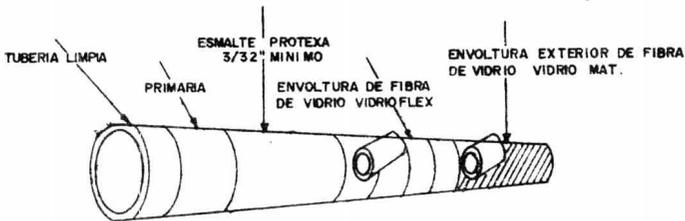
La temperatura del esmalte debe ser tal que permita su aplicación en forma de película continua a un espesor mínimo de 0.093", una vez que haya sido reforzado con una capa de fibra de vidrio. Por lo general la

temperatura está comprendida entre 200 y 240°C.

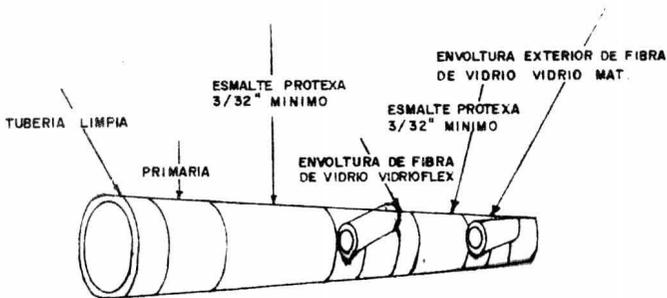
Simultáneamente con la aplicación del esmalte, la tuberfa se forra en forma de espiral con la tela de fibra de vidrio (vidrio Flex u otra -- semejante). Este forrado se hace con un traslape mínimo de 1/4" y máximo de 3/4" de modo que dicha tela queda embebida y centrada en el esmalte -- sin mostrar arrugas ni torcimientos.

Finalmente la tuberfa se envuelve con fieltro o revestimiento exterior (vidrio mate), la envoltura puede ser simple o doble dependiendo de las especificaciones particulares del caso.

Las figuras siguientes muestran los sistemas de recubrimientos para tuberfas.



SISTEMA STANDAR DE RECUBRIMIENTOS



SISTEMA DOBLE DE RECUBRIMIENTO

### CAPITULO III. - METODOS DE LA APLICACION DE LA PROTECCION CATODICA.

Existen dos métodos para la aplicación de la protección catódica:

- 1). - Protección Catódica con Anodos Galvánicos.
- 2). - Protección Catódica con Rectificadores de Corriente.

Cada método está hecho para suministrar corriente directa aprovechable para la protección de las estructuras. La selección del método que se use depende de las consideraciones económicas y técnicas. Cada método tiene sus ventajas y desventajas.

#### 1. - Protección Catódica con Anodos Galvánicos:

Los ánodos galvánicos o de sacrificio son aplicables y efectivos cuando el requerimiento de corriente sea bajo, donde las estructuras a ser protegidas exista una resistividad del suelo relativamente baja.

El uso de ánodos galvánicos o de sacrificio tienen ventajas y desventajas. Enumerando, tenemos que las ventajas son las siguientes:

- a). - No necesita suministro de una fuente de energía externa.
- b). - Rara vez causan interferencia a otras estructuras.
- c). - Costos mínimos después de su instalación.
- d). - El costo de instalación es bajo.
- e). - Poco costo en la mano de obra,
- f). - Poco o ningún derecho de vía.
- g). - Una mejor eficiencia en la utilización de la corriente protectora.

Las principales desventajas en la utilización de los ánodos galv

nicos son:

- a). - Tiene limitado su potencial de drenaje de corriente.
- b). - No se puede utilizar donde las resistividades del suelo son muy altas.
- c). - Tiene baja y limitada corriente de salida.
- d). - No es aplicable para proteger grandes diámetros de tubería desnuda o por sobremente recubierta.

Cuando los ánodos galvánicos son enterrados y conectados a estructuras bajo tierra se forma una celda galvánica.

El ánodo consiste de un metal electronegativo a la estructura, - siendo así anódico y corrodible, mientras que la estructura viene a ser -- catódica y protegida. De la tubería la corriente regresa al ánodo a través del cable de cobre que cierra el circuito.

El Zinc y el Magnesio son dos de los principales metales usados como ánodos galvánicos, aunque la aleación Zinc-Aluminio se usa mucho - en el agua salada. Los ánodos de plomo han sido empleados pero en menor escala. Estos metales son normalmente electronegativos al acero.

Los ánodos galvánicos son generalmente empaquetados y enterrados con un relleno químico consistente principalmente de yeso, bentonita - y sulfato de sodio y calcio, éste relleno químico se llama BACK-FILL.

El propósito de rellenar las excavaciones donde se colocan los - ánodos se fundamenta en lo siguiente:

- a). - Se reduce el factor de polarización.
- b). - Se distribuye el ataque o corrosión a lo largo de todo el ánodo.

c). - Se reduce la resistencia de contacto entre ánodo-suelo.

Los rellenos típicos para ánodos galvánicos están constituido como sigue:

	RESISTIVIDAD APROX.			
	CaSO <sub>4</sub> (Hidr.)	BENTONITA	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ohms - Cm
(A)	25 %	75%	-	250
(B)	50 %	50 %	-	250
(C)	75 %	20 %	5 %	50

El relleno (A) se utiliza en zonas húmedas y de baja resistividad.

El relleno (B) se utiliza frecuentemente con ánodos de Zinc.

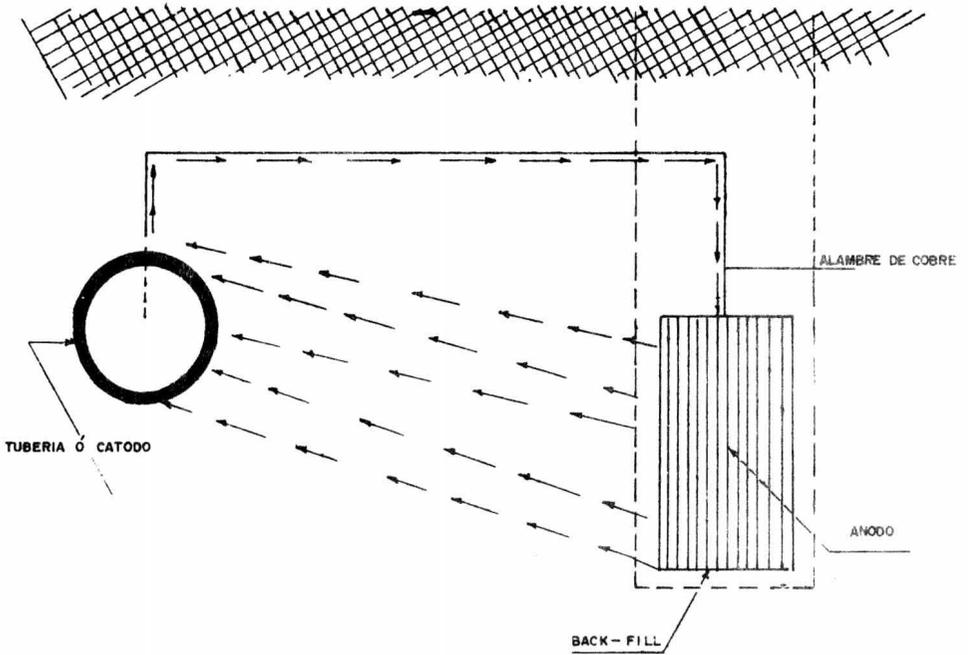
El relleno (C) que tiene baja resistividad, es útil en suelos de alta resistividad.

Estas sustancias químicas permiten un mayor y más estable trabajo bajo potencial, reduciendo los efectos indeseables de la polarización, permitiendo bajar la resistencia del ánodo hacia la tierra y distribuir el ataque corrosivo sobre todo el ánodo para prevenir fallas prematuras.

El potencial del Zinc (en el relleno químico) es aproximadamente 1.1 volts medido con referencia a un electrodo de CuSO<sub>4</sub>. El potencial del Magnesio medido de la misma forma es aproximadamente 1.55 Volts.

Para un potencial Tubo-Suelo de 0.85 Volts, el potencial de drenaje del ánodo de Zinc es aproximadamente 0.70 Volts.

En la siguiente figura se ilustra lo descrito.



En el diseño de un sistema de protección catódica se deberá procurar que sea simple, eficiente y económico.

Hay dos puntos fundamentales que determinar:

- 1). - Número total de puntos de drenaje de corriente.
- 2). - Intensidad de corriente por aplicar en cada punto de drenaje.

Para obtener un diseño simplificado se deberán reducir al mínimo los puntos de drenaje de corriente de protección, es decir espaciar dichos puntos entre sí lo mas posible. Naturalmente esto estará en función del tipo de estructura de que se trate y la calidad del recubrimiento.

Una vez determinado el espaciamiento máximo entre puntos de drenaje, se determinará la corriente mínima aplicable en cada punto.

Existe otra relación que es la siguiente:

$$I = \frac{A a d}{100000}$$

Donde:

I = Intensidad de corriente en amperes.

A = Area máxima del tubo (A-IIDL) en ft<sup>2</sup>

a = Porcentaje del área desnuda.

d = Densidad de corriente, en Ma/ft<sup>2</sup>

Con ésta misma fórmula se puede calcular el % del área desnuda que tiene la tubería.

La determinación de porcentaje de área desnuda se debe hacer en los puntos donde se aplicó la corriente de prueba, con el fin de obtener la calidad del recubrimiento que tiene la tubería.

Los factores del material son:

Para el Magnesio \_\_\_\_\_ 0.116

Para el Zinc \_\_\_\_\_ 0.0424

Para el Aluminio \_\_\_\_\_ No se tiene.

Los pesos de los anodos comerciales son:

9, 17, 32, 50, 100, 250 Libras.

Las eficiencias de corriente son:

Para el Magnesio \_\_\_\_\_ 50 %

Para el Zinc \_\_\_\_\_ 90%

Como FU se considerará un 90% de todo el ánodo, es decir, se --

considera que un 10% no se utiliza.

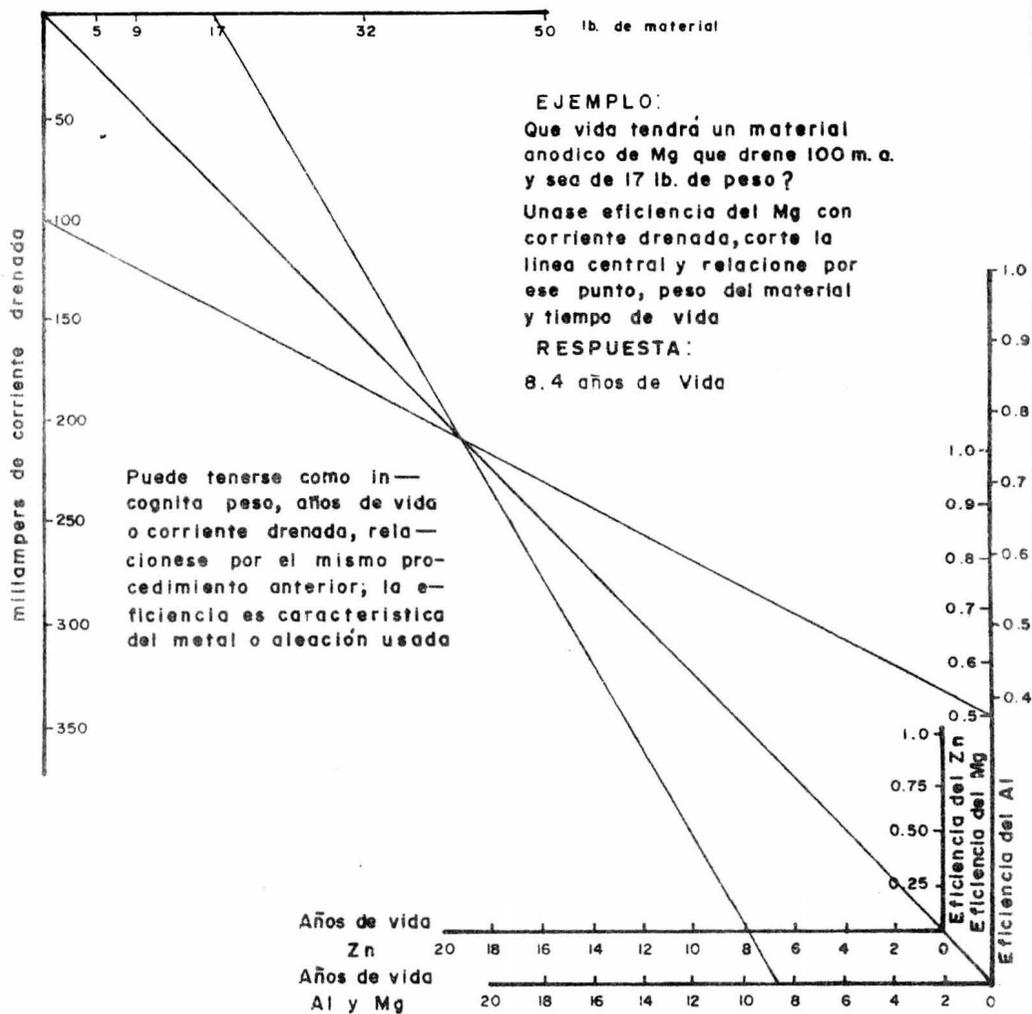
La intensidad de corriente de protección (I) se determina en la forma descrita. Para éste cálculo también se usa el nomograma adjunto.

Los principales factores que controlan y determinan la producción de la corriente de los ánodos galvánicos son:

- a). - El tamaño y la condición del recubrimiento de la estructura a ser protegida.
- b). - La resistividad de la tierra alrededor del ánodo.
- c). - El tamaño y forma del ánodo (Incluyendo relleno).
- d). - Composición del ánodo.
- e). - El tipo y cantidad de relleno usado.
- f). - Distancia del ánodo a la estructura a ser protegida.
- g). - La profundidad a la cual el ánodo es enterrado.
- h). - El número de ánodos y su potencial entre ellos.
- i). - El potencial tubo-suelo de la estructura.

La producción de la corriente de los ánodos galvánicos tienen una relación inversa con las resistividades del suelo circundante a ella, a condición de que los otros factores del control sean constantes. Por ejemplo la producción de corriente de un ánodo de 17 libras de Magnesio, empacado, enterrado en un suelo de 1000 Ohms-om., protegiendo una tubería desnuda a 10 piés fuera y teniendo un potencial resultante de la estructura de 0.85 volts. Podrá ser aproximadamente de 15 m. a.; mientras que en su suelo de 500 Ohms-Cm., será 300 m. a., aproximadamente.

Las siguientes fórmulas y tabla No. 1 pueden ser usadas para -



**EJEMPLO:**  
 Que vida tendrá un material anodico de Mg que drene 100 m. a. y sea de 17 lb. de peso?

Unase eficiencia del Mg con corriente drenada, corte la linea central y relacione por ese punto, peso del material y tiempo de vida

**RESPUESTA:**  
 8.4 años de Vida

Puede tenerse como incognita peso, años de vida o corriente drenada, relacionese por el mismo procedimiento anterior; la eficiencia es característica del metal o aleación usada

**NOMOGRAMA DE ANODOS DE SACRIFICIO**  
 RELACIONA PESO DE MATERIAL, CORRIENTE DRENADA, AÑOS DE VIDA, EFICIENCIA

ELABORADO EN EL DEPARTAMENTO DE CORROSION  
 SUBDIRECCION DE EXPLOTACION  
 INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO  
 ING. J. F. GUERRA RECASENS

estimar anticipadamente la producción de corriente aproximada de los ánodos estandares de Magnesio y de zinc, en las estructuras desnudas o con poco recubrimiento, a ser protegidas, tomando una distancia de 10 piés entre el ánodo y la estructura y con un valor de resistividad del suelo cerca de 500 Ohms-Cm., El factor de la tabla No. 2 nos sirve para corregir los valores de la producción de corriente anticipada para diferentes valores que -0,85 Volts del potencial tubo-suelo para las estructuras a ser protegidas:

$$IM = \frac{150000 FV}{P} \qquad IZ = \frac{50000 Fy}{P}$$

Donde:

IM = Producción de corriente para ánodos de Magnesio en Miliamperes.

IZ = Producción de corriente para ánodos de Zinc en miliamperes.

P = Resistividad del suelo, en Ohms-Cm.

F = Factor de la tabla No. 1

Y = Factor de corrección para valores resultantes del potencial tubo-suelo- de la tabla No. 2

T A B L A No. 1

TAMAÑO DEL ANODO EN LBS. _____	FACTOR
3 _____	0.59
5 _____	0.66
9 _____	0.81
17 (empaquetado) _____	1.00
32 (empaquetado) _____	1.16
50 (empaquetado) _____	1.22

T A B L A No. 2 CORRECCION "Y"

P/S	MAGNESIO	Zinc
- 0.70	1.14	1.60
- 0.80	1.07	1.20
- 0.85	1.00	1.00
- 0.90	0.93	0.80
- 1.10	0.64	0.00
- 1.20	0.50	0.00

Donde tiene la estructura un buen recubrimiento, la producción de corriente del ánodo será menor que la corriente anticipada para las estructuras desnudas. La resistencia de la estructura recubierta a la tierra es -- mayor y debe ser considerada en la resistencia total del circuito. Para estimar la producción de corriente de una línea bien recubierta se multiplican las constantes 150,000 y 50,000 por 0.8. Esto hace un promedio de 20% menor que la producción de corriente anticipada de los ánodos.

Para la instalación de ánodos múltiples la producción total de corriente, puede ser determinada calculando la producción de un simple ánodo y multiplicándolo por el factor propio dado en la siguiente tabla No. 3.

T A B L A No. 3

NUMERO DE ANODOS EN PARALELO.	FACTOR DE AJUSTE, ESPACIAMIENTO DE ANODOS EN PIES.			
	5	10	15	20
2	1.839	1.920	1.946	1.964
3	2.455	2.705	2.795	2.848
5	3.589	4.188	4.429	4.563
8	5.152	6.277	6.768	7.036
10	6.616	7.643	8.304	8.679



La selección del tipo de ánodo galvánico que se usa en la protección catódica, es un problema económico. El costo por libra de Magnesio es aproximadamente dos veces más que el Zinc. El Magnesio tiene un alto potencial de drenaje, liberando una gran cantidad de corriente y por eso se consume más rápidamente. Es un medio de resistividades de un suelo dado, el Magnesio se consume 2.5 veces más rápido que el Zinc.

Sin restricciones en el circuito, el costo del Magnesio por lo tanto será de cinco veces más alto que el Zinc, donde un ánodo de Zinc puede proveer la necesidad de protección.

El ánodo de Magnesio podrá proteger toda la estructura, resultando una pérdida de energía, sin embargo, la producción de corriente y el voltaje de drenaje son factores que limitan el uso de los ánodos de Zinc.

El uso de los ánodos de Zinc son generalmente mas económicos donde las resistividades del suelo son más bajas de 1,000 Ohms-Cm., a condición de que el requerimiento de corriente no sea muy alto y la producción de corriente deseada pueda obtenerse. Las resistividades de los suelos encontrados en muchas áreas son demasiado altas para utilizar el Zinc razón por la cual se usa muchas veces el magnesio para la protección catódica.

## 2). - PROTECCION CATODICA CON RECTIFICADORES DE CORRIENTE.

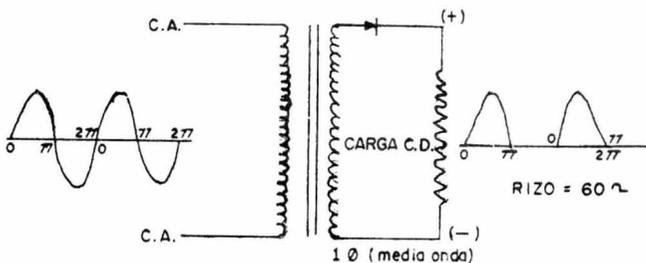
El segundo método para la aplicación de la protección catódica a estructuras metálicas es donde se usa una corriente externa. La fuente de energía externa puede ser suministrada por un generador de gas, por un generador termoelectrico, por un generador movido por el viento o, --

por cualquier otra fuente de energía que genere electricidad. Estos métodos son generalmente utilizados únicamente en lugares donde el suministro de la energía de corriente alterna no es disponible.

En nuestro caso, la fuente externa de la corriente directa, es un rectificador de corriente alterna que transforma a ésta en corriente directa que es la única forma en que puede ser utilizada adecuadamente en los procesos electrolíticos como es en el caso de fenómeno de la corrosión.

Aún cuando existan rectificadores de corriente alterna con elementos rectificadores de muy diversos materiales, los más comúnmente usados son los que utilizan diodos de Selenio y diodos de Silicio. La rectificación de la corriente se lleva a cabo al colocar los diodos antes mencionados en un círculo eléctrico de corriente alterna con una carga eléctrica adecuada.

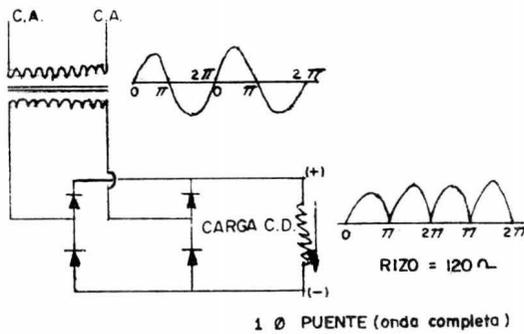
El tipo básico de este circuito funciona en forma similar a una válvula check en una línea de agua, permitiendo que la corriente fluya libremente en una sola dirección (Hacia adelante para una sola mitad de la onda senoidal de la corriente alterna), bloqueando el voltaje en la dirección contraria sobre la otra mitad de la onda.



**CIRCUITO DE UN RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA**

En este tipo de rectificación, solamente se bloquea la mitad de la onda, produciendo una forma de corriente directa pulsátil, esta naturalmente la hace poco eficiente y en algunos casos poco deseable para ser usada en la protección catódica.

Para poder utilizar ambas mitades de la onda, es necesario utilizar un circuito de onda completa como se indica en la siguiente figura:



### CIRCUITO DE UN RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

En éste caso la corriente es directa pero se ha cambiado la frecuencia del rizo de 60 a 120 ciclos, éstos rectificadores emplean diodos de Selenio o de Silicio que tienen las siguientes características:

#### DIODOS DE SELENIO.

Los diodos de Selenio son placas que generalmente tienen capacidades de 26, 33, 36, 40, 45 volts. Estos valores medios efectivos indican la capacidad del bloqueo de voltaje inverso de la celda.

## DIODOS DE SILICIO.

Los diodos de Silicio indican su capacidad en Volts de pico inverso empezando de 50 Volts y llegando hasta 1000 ó mas.

Un rectificador típico de protección catódica con una salida de -- corriente directa de 20 Volts requiere un voltaje de corriente alterna de aproximadamente 24 Volts, la capacidad de los diodos deberán entonces tener el valor de  $1.414 \times 24$  ó 33.936 necesarios para bloquear los picos de la onda senoidal.

Los diodos de Silicio son particularmente vulnerables a sobrecargas de corriente o voltaje por lo que deberán ser protegidos por switches -- especiales con fusibles, accionantes con alta velocidad y supresores de voltaje de pico fabricado con Selenio.

Para una unidad rectificadora completa, se necesita un gabinete, un circuito de apertura (breaker), un transformador, elementos rectificadores, shunt de corriente directa, voltímetro amperímetro, la información adicional sobre los rectificadores para protección catódica se obtiene naturalmente a solicitud expresa del comprador.

Los rectificadores usados en la protección catódica por corriente impresa son generalmente baratos y simples en su construcción, operando con corriente alterna de 60 ciclos monofásicos por lo que se pueden conectar rápidamente a las líneas de transporte de energía eléctrica para -- uso doméstico.

Estos operan con eficiencias menores del 100% que significa que se obtiene una salida de corriente eléctrica menor a la entrada de corrien-

te alterna suministrada al rectificador y operan a su máxima eficiencia -- cuando trabajan a su máxima capacidad por lo que al diseñar la protección catódica se deberá diseñar el rectificador de tal forma que opere lo más -- cercano posible a su capacidad máxima.

La eficiencia del rectificador se puede calcular midiendo la entrada de corriente alterna, con ayuda de un wattímetro y midiendo el voltaje y amperaje de salida de la corriente directa.

La eficiencia de un rectificador se determina con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\text{Volts (C. D.) Amperes (C. D.)} \times 100}{\text{Watts. (C. A.)}}$$

Por ejemplo un rectificador operando a 20 amperes y 32 Volts de corriente directa tiene una potencia de corriente alterna de 940 Watts., luego la eficiencia será:

$$\frac{20 \text{ Amp.} \times 32 \text{ Volts} \times 100}{940 \text{ Watts.}} = 68 \%$$

La diferencia entre las potencias de entrada de C. A. y de salida de C. D., representan la pérdida de potencia debida al proceso de rectificación y que se manifiesta como un desprendimiento de calor en el rectificador siendo necesario enfriar los diodos para que no se calienten mucho y fallen.

Los rectificadores se enfrían por medio de ventiladores que pasan una corriente de aire forzado a través de la armazón que sopla los diodos encerrados en el gabinete del rectificador o bien sumergiendo los componentes del rectificador en aceite aislante para uso eléctrico, cedien

do a éste el calor y enfriando el aceite en la parte exterior del rectificador por circulación contfnua del líquido enfriador.

Las principales ventajas del uso del rectificador en la aplicación de la protección catódica son:

1. - Gran voltaje de drenaje.
2. - Intensidad de corriente alta.
3. - Se aplica en todas las resistividades del suelo.
4. - Flexibilidad en el control de la intensidad de corriente.
5. - Aplicable para toda estructura desnuda o pobrementemente recubierta.
6. - Porcentaje grande y extensas estructuras.

Las principales desventajas del uso del rectificador en la protección catódica son:

1. - Altos costos de instalación.
2. - Altos costos de mantenimiento.
3. - Problemas de interferencia con e estructuras extrañas.

En el uso del rectificador se desarrolla a proposito una celda -- electrolítica donde la estructura a ser protegida se hace un cátodo de la -- celda y el lecho de uso del rectificador un ánodo. Los lechos de uso consisten en un número de ánodos en paralelo de grafito, carbón, durirón o desperdicios de metal. Mientras la corriente se suministra en la tierra a través del lecho, los ánodos se consumen, mientras que la estructura que está conectada al polo negativo del rectificador recibe la corriente de la tierra y es protegida. La fuerza protectora que sale del rectificador, es regulada -- para vencer la intensidad de corriente que trata de salir de los puntos anó-

dicos de la tubería.

El suministro de la energía de corriente alterna es registrada por un medidor de corriente en kilowatts-hora. La caja del interruptor se instala en el circuito de corriente alterna el cual contiene un interruptor térmico o magnético para proteger al rectificador contra sobre carga.

La corriente alterna bajando al voltaje por un transformador, se suministra a una unidad del rectificador donde éste cambia la corriente alterna en corriente directa. Esta unidad o elemento del rectificador consiste en unidades aisladoras de cobre o de Selenio o por diodos de Silicio. La corriente directa va desde la terminal positiva del rectificador a la cama o lecho donde se suministra a la tierra. La tubería es el retorno negativo del circuito externo de la celda electrolítica.

Tres principales sistemas de lechos son usados, en cada sistema los ánodos pueden instalarse verticalmente u horizontalmente.

#### 1. - Lechos de uso tipo distante:

En éste caso los lechos de uso son instalados en un punto distante de la estructura a ser protegida. Este tipo de lecho se usa en las tuberías desnudas o recubiertas donde hay gran distribución de corriente deseada. El primer ánodo del lecho podrá ser localizado a unos 100 ó 1000 pies, de la línea de la tubería ó de la estructura a ser protegida. Grandes distancias son usadas por los primeros dos ánodos donde la tubería es desnuda o pobremente recubierta. Donde el recubrimiento es bueno, las distancias cortas serán suficientes y suministra una distribución adecuada de la corriente. Aunque con éste método se obtiene una gran distribución de corriente protec

tora, los problemas por interferencias con líneas extrañas son más complejos y propiamente la mano de obra será costosa.

### 2. - Lechos de uso con ánodos distribuidos:

Este método es usado para proteger efectivamente áreas de tuberías y estructuras complejas, tales como cimientos de estaciones de compresoras, estaciones de bombas, patios de tanques, terminales de líneas de tuberías y refinerías. Los ánodos del lecho de uso, son distribuidos en varios puntos y muchas veces en un modelo de orden no geométrico que rinde un efecto defensivo de una estructura a otra. Un mínimo de corriente protectora se requiere para conseguir la protección. Este método requiere mas ánodos, particularmente cuando hay numerosas estructuras enterradas.

### 3. - Lechos de uso tipo paralelo:

El lecho de uso tipo paralelo es una manera efectiva para proteger líneas desnudas en medios altamente corrosivos donde los requerimientos de corriente son extremadamente altos, las resistividades del terreno altas y donde muchas líneas extrañas están cerca de la estructura a ser protegida, donde la interferencia es un problema mayor.

Este tipo de lecho de uso, puede ser utilizado con ánodos paralelos y próximos a la estructura a ser protegida.

Los ánodos son instalados contínuos o semicontínuos en circos de coque en focos horizontales y localizados en derechos de vía de las líneas de tubería. El costo total del tipo lecho paralelo es una fracción del costo total del tipo lecho distante. Además el diseño de camas tipo paralelo es menos costoso por que se requieren pocas pruebas.

En cada uno de éstos métodos los ánodos son normalmente instalados en rellenos de coque, una práctica bastante popular a venido a ser el emplear, ánodos de grafito o de durirón preempacados con coque antes de su instalación. Esta particularidad es ventajosa donde los terrenos son fangosos, ya que la necesidad previene un tapado apropiado del relleno, y también elimina la necesidad de acarrear el relleno de coque hasta los lugares de trabajo.

Para el diseño de un sistema de lechos de uso con rectificador se tomarán en cuenta los siguientes factores:

- a). - Tipo y condición de la estructura.
- b). - Disponibilidad del suministro de corriente.
- c). - Mano de obra apropiada.
- d). - Resistividad del suelo .
- e). - Requerimiento de corriente.
- f). - Problemas de interferencias con líneas extrañas.
- g). - Accesibilidad.
- h). - Equipo y material necesario.

El tipo y condición de la estructura a ser protegida son consideraciones fundamentales en el diseño del Sistema de Protección Catódica en lechos de uso con rectificador, ya sea que la estructura esté recubierta o no; las condiciones del recubrimiento, el tamaño y el largo de la tubería a ser protegida y la continuidad eléctrica de la estructura son factores fundamentales.

La disponibilidad del suministro de la energía eléctrica sirve para

el diseño del rectificador, una serie de pruebas de resistividades del suelo son realizadas para localizar el medio de más baja resistividad para el lecho. Las pruebas del suelo también sirven para determinar la profundidad del ánodo y donde los ánodos deben ser instalados, ya sea vertical u horizontalmente. La resistividad del suelo generalmente es un factor de control para localizar el lecho y el suministro de energía eléctrica.

Antes de que establezca el sitio del lecho de uso, la prueba de requerimiento de corriente se lleva a cabo empleando temporalmente un lecho y un generador portátil de corriente directa o un acumulador como fuente de energía. Las pruebas de potencial tubo-suelo son hechas en varios puntos con la prueba de corriente desde el lecho encendido y apagado intermitentemente.

Mientras que la cama-suelo esta temporalmente montada deberán hacerse pruebas a estructuras extrañas que puedan estar afectadas por la corriente protectora. Si revela serios efectos por estructuras extrañas el lecho puede ser cambiado fácilmente. Si revela un efecto moderado por las estructuras extrañas, puede ser mitigado con un punteo, entonces la cantidad aproximada de la corriente consumida por éstas estructuras extrañas puede ser determinada. La suma de la corriente consumida de las estructuras extrañas necesarias para liberar las interferencias y el requerimiento aparente, determina la corriente total aproximada requerida para la protección de la estructura original.

Un sitio accesible del rectificador debe ser considerado cuando se planea la instalación, puesto que el medidor de energía debe leerse a in-

tervalos regulares, en periódicas inspecciones ya que el trabajo de mantenimiento es necesario.

La selección del material y el equipo es muy importante para una buena instalación del rectificador, además que el cuidado de la instalación es otro factor esencial.

Los siguientes puntos son importantes y deben ser considerados para una buena instalación y elección del rectificador.

- a). - Seleccionar un diseño adecuado del rectificador.
- b). - Seleccionar el cable del lecho de uso. El tamaño adecuado del conductor con adecuado aislante para enterrarse directamente y para uso de la protección catódica.
- c). - Seleccionar el tipo adecuado, tamaño y correcto número de ánodos considerando las condiciones del medio y de la naturaleza del suelo.
- d). - El método de hacer al ánodo, cabeza del cable de conexión y aislantes a usarse en orden para lograr una conexión adecuada y durable.
- e). - Seleccionar un relleno adecuado de coque.
- f). - El equipo adecuado para relleno adecuado de coque.
- g). - Enterrar suficientemente los cables para evitar daños por zapatas de toma de arrastre por exposición
- h). - Instalación adecuada del rectificador considerando el suelo, otros factores y medidas protectoras.
- i). - Instalación adecuada del ánodo.

Otra forma para calcular las características fundamentales del-

rectificador (amperaje y voltaje) es el siguiente:

1. - Se determina la resistencia del ánodo en función de la resistividad del suelo y el diámetro y largo del ánodo, para ello se emplea la siguiente tabla:

DIAMETRO DEL ANODO	LONGITUD	RESISTENCIA DEL SUELO EN OHMS POR CM3					
		1000	2000	3000	4000	5000	6000
RESISTENCIA DE UN ANODO EN OHMS.							
3 IN	2 FT	8. 2513	16. 5029	24. 7542	33. 0071	41. 2773	49. 508
3 IN	3 FT	6. 2670	12. 4140	19. 5215	24. 8285	31. 0363	37. 2426
3 IN	4 FT	5. 0311	10. 0929	15. 0929	20. 1240	25. 1547	30. 1853
3 IN	5 FT	4. 2583	8. 5159	12. 7741	17. 0310	21. 2901	25. 5478
3 IN	6 FT	3. 7070	7. 4140	11. 1210	14. 8290	18. 5353	22. 2425
3 IN	7 FT	3. 2924	6. 5349	9. 8773	13. 1702	16. 4627	19. 7552
3 IN	8 FT	2. 9680	5. 9365	8. 9045	11. 3725	14. 8410	17. 8090

2. - Se determina la resistencia del dispositivo a tierra que se va a emplear utilizando la siguiente fórmula:

$$R_g = \frac{R_a \cdot F}{N}$$

En donde:

$R_g$  = Resistencia del dispositivo a tierra.

$R_a$  = Resistencia del ánodo.

$N$  = Número de ánodos.

$F$  = Factor de corrección (éste factor depende del número de ánodos y el espacimientto entre ellos).

3. - Se determina la resistencia total del circuito la cual se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$R_t = R_g + R_c + R_e$$

en donde:

$R_t$  = Resistencia total del circuito.

$R_g$  = Resistencia del dispositivo a tierra en Ohms.

$R_c$  = Resistencia de los cables del circuito, la cual es muy baja - y fácil de calcular conociendo el calibre y la longitud de los cables y generalmente despreciable con respecto al valor -- de la resistencia total ( $R_t$ ).

$R_e$  = Resistencia de la estructura a proteger con respecto a una tierra remota de resistencia nula. Su valor entre 0.25 y 0.5 Ohms, medida con una junta aislante colocada entre la tubería y otra estructura metálica, dependiendo su valor exacto del contacto con tierra que tenga la otra estructura.

4. - Se determina el voltaje a la salida del rectificador aplicando la siguiente fórmula:

$V_r$  = (Voltaje del rectificador en Volts).

$R_t$  = Resistencia total del circuito.

$I$  = Intensidad de corriente obtenida por el requerimiento de corriente en amperes.

$P/S$  = Potencial tubo-suelo en el punto de drenaje en Volts.

0.9 = Constante del potencial del grafito.

0.34 = Constante del potencial de la celda  $CuSO_4$

5. - Se efectúa un cálculo económico para determinar el número de

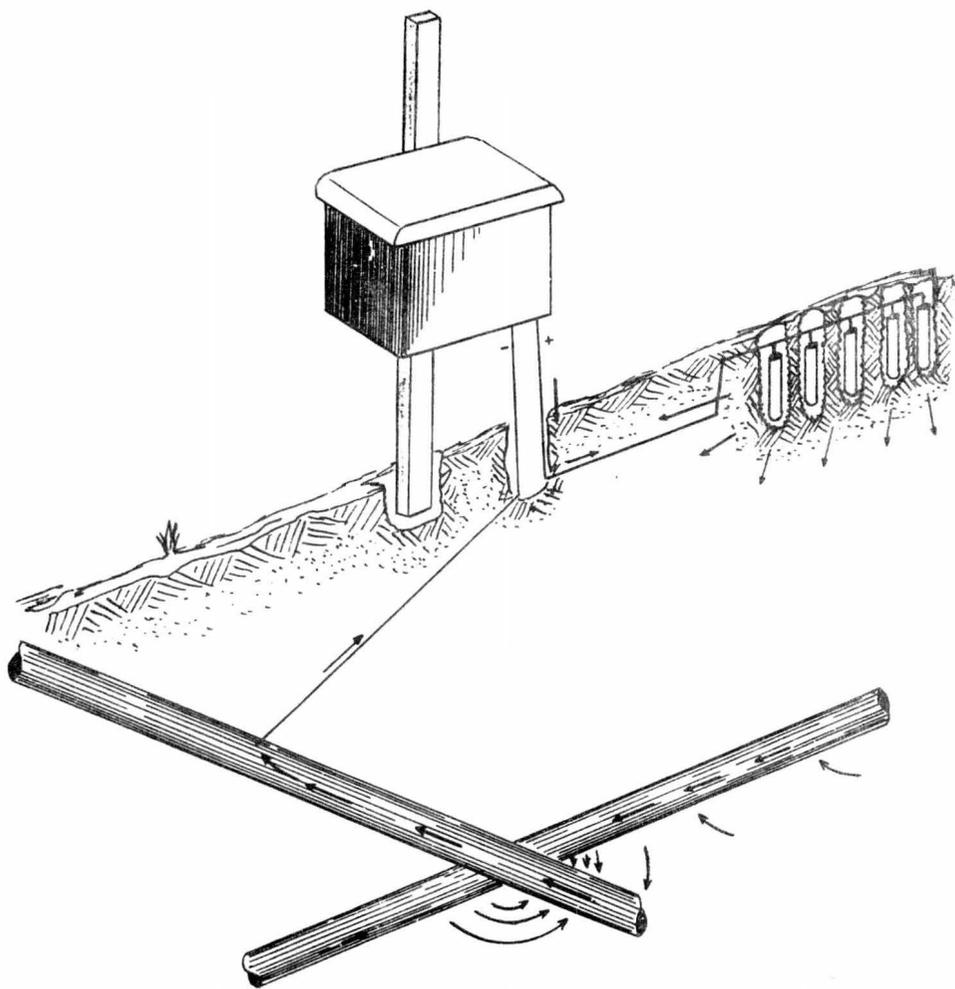
ánodos y su espaciamento para el rectificador deseado para proteger a las estructuras.

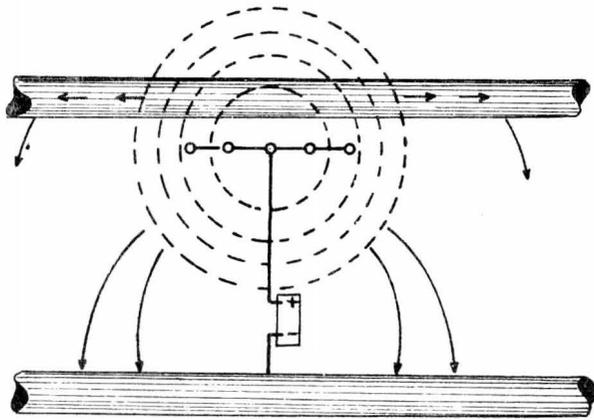
Dadas las consideraciones y la teoría necesaria en cuanto a los métodos de aplicación de la protección catódica se pone de manifiesto la importancia de ésta, descripción para dar paso a la parte práctica de este trabajo que es el diseñar dicha protección catódica en base a los resultados obtenidos en el campo con los aparatos descritos y la aplicación de la literatura condensada que en éste capítulo se expone.

Es conveniente hacer notar que los cálculos efectuados en el tema siguiente están basados netamente en resultados prácticos obtenidos al tomarle las resistividades y los potenciales al campo, en estudio, lo que dió por resultado la instalación de ánodos.

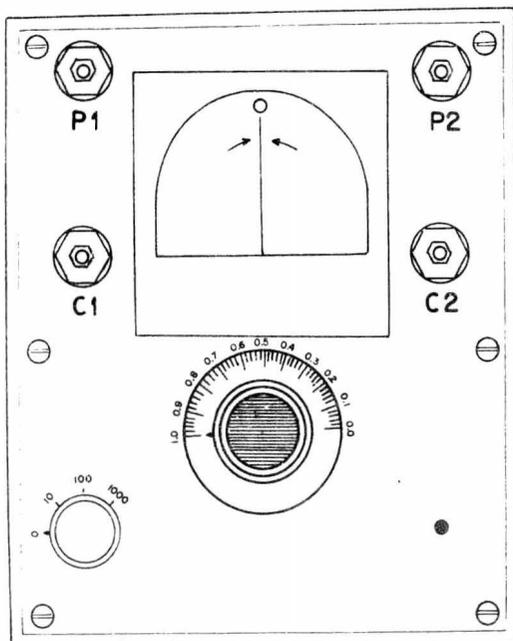
Actualmente a éste campo se le están tomando potenciales para checar el estado de Protección, ya que si alguna línea resultara deficientemente protegida, se programaría su refuerzo en base a estos potenciales posteriores.

CORROSION EN UNA ESTRUCTURA QUE  
CRUZA A LA TUBERIA PROTEGIDA  
CATODICAMENTE





CORROSION EN UNA ESTRUCTURA  
PROXIMA A OTRA QUE ESTA  
PROTEGIDA CATORDICAMENTE



VIBROGROUND MOD. 263 A

#### CAPITULO IV. - DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA AL CAMPO SAN RAMON, TAB.

Antes de iniciar el diseño es necesario hacer una distinción entre tuberías pobremente recubiertas y tuberías bien recubiertas.

En éste diseño al iniciar el estudio directamente en el campo la tubería que será protegida cae dentro de la primera clasificación por las deficiencias del recubrimiento, falta de juntas de aislamiento, pésimas condiciones de acceso y tránsito en sus derechos de vía.

Todos éstos factores suelen construir problemas más o menos serios para el diseño de protección catódica, por lo tanto, es necesario proceder en forma diferente que cuando se trata de tuberías nuevas.

Para éste proyecto se hizo una recopilación de los siguientes -- datos:

a). - Características de la tubería o sea, longitud, diámetro, - servicio (aceite, gas, agua, etc.)

b). - Datos sobre otras estructuras metálicas próximas, paralelas o que se cruzaron con la tubería en estudio así como de las tuberías derivadas o ramales de ésta.

c). - Datos sobre tipos, calidad y estado actual del recubrimiento. Estos datos son puramente estimativos ya que se hacen inspecciones puramente oculares.

d). - Plano del campo petrolero San Ramón. Tab. en donde están incluidos todos éstos datos.

e). - Se detectaron resistividades del suelo a cada 10 metros --

por el método de los cuatro electrodos con espaciamentos iguales entre - electrodos de 5' 3".

f). - Se determinaron los potenciales naturales del suelo con el multicombinado y la celda de cobre con  $\text{CuSO}_4$  a cada 90 metros, para ésto fue necesario soldar puntos de prueba con soldadura cadwel directamente - a la tubería para efectuar lecturas de potenciales lo más efectivas posibles.

g). - Se elaboraron perfiles de resistividades y potenciales del - suelo a lo largo de la tubería en estudio. Este perfil se trazó en papel semi logarítmico con tres ciclos, tomando el eje logarítmico para las resistivi- dades en Ohms-Cm con una amplitud de 100 a 1000 Ohms-Cm. , y el eje de la escala natural para las distancias en metros.

Una vez tomados éstos datos se procedió a laborar con los cálcu los siguientes:

1). - Obtención del número total de los puntos de drenaje de co- rriente.

2). - Cálculo de la intensidad de corriente por aplicar en cada -- punto de drenaje.

3). - Se redujo al mínimo el número de los puntos de drenaje de- corriente de protección es decir, se espaciaron dichos puntos entre si lo - máximo posible con el fin de tener undiseño amplificado.

h). - Se determinó la corriente mínima necesaria para proteger- longitudes de tubería previamente calculadas en el punto de mas baja resis- tividad. Con la fórmula ya conocida:

$$I = \frac{A a d}{100,000}$$

Dadas las características de la tubería en cuanto a deficiencias del recubrimiento y las limitaciones consecuentes del potencial máximo -- aplicables en los puntos de drenaje, el procedimiento adecuado para la protección es el de utilizar ánodos de magnesio.

Se deben instalar juntas aislantes en los lugares indicados con el fin de tener la estructura protegida; aislada eléctricamente de cualquier otra instalación y evitar fugas de corriente de protección.

Se deben instalar registros (postes de registro) para mediciones eléctricas periódicas con el fin de poder verificar una o dos veces por año el buen funcionamiento de las instalaciones. Los postes de registro serán instalados cada 1000 metros.

Al seleccionar el Km. de la red principal de Bombeo Neumático se hicieron las siguientes consideraciones para el gasoducto de 2"Ø que parte como injerto a los pozos número 51 y 83

En todo este campo la estructura presenta un 10 % de área desnuda y en éste caso el diámetro que se tomará en cuenta para los cálculos es el diámetro exterior de la tubería.

Al tomar resistividades y potenciales del terreno en donde se encuentra localizada la tubería, se determinaron puntos con lecturas bajas. Estos datos se graficaron en papel semilogarítmico y se seleccionó el kilómetro 0 + 060 que está dentro de la zona corrosiva con una resistividad del suelo de 1100 Ohms. , la longitud a proteger será entonces de 120 metros.

Utilizando la fórmula:

$$I = A \cdot a \cdot d.$$

Tenemos que:  $A_I = \Pi D L = 3,14 \frac{2.375 \text{ ft}}{12} \cdot 3.28 \text{ ft/m}.$

$$A_I = 2.03 \text{ ft}^2/\text{m}.$$

$$A_t = 2.03 \text{ ft}^2/\text{m} \times 120 \text{ m.} = 243.6 \text{ Ft}^2$$

$$I = 243.6 \text{ ft}^2 (0.10) \cdot 1.5 \text{ ma}/\text{Ft}^2 = 36.54 \text{ ma. (corriente necesaria para proteger 120 metros de tuberfa).}$$

$$a = 0.10 \quad d = 1.5 \text{ ma}/\text{Ft}^2$$

Con la resistividad del suelo, basándose en la gráfica de resistividad del suelo contra corriente drenada por un ánodo, tenemos que la corriente que drena cada ánodo es de 175 ma. por lo que:

$$\text{Número de ánodos} = \frac{36.54 \text{ ma}}{175 \text{ ma}} = 0.2 \text{ Aprox. 1 ánodo.}$$

Para verificar de cuántas libras será el ánodo tenemos que consultar la relación de rangos de pesos a resistividades y encontramos que 1100 Ohms cae dentro del peso de 32 lbs.

Para éste caso se instalará en éste Km. un ánodo de 32 lbs.

El segundo punto se seleccionó en el Km. 0 + 420 del plano de la red de Bombeo Neumático y líneas de descarga del campo San Ramón, Tab. y tomando la lectura con el Vibrograund, se determinó que la resistividad en éste punto es de 4000 Ohms.

Entonces se tendrá:

$$A_I = \Pi D L = 2.03 \text{ Ft}^2/\text{m}.$$

$$A_t = 2.03 \text{ Ft}^2/\text{m} (500 \text{ m.}) = 1020 \text{ Ft}^2$$

$$I = 1020 \text{ Ft}^2(0.10) \cdot 1.5 \text{ ma.}/\text{Ft}^2 = 153 \text{ ma.}$$

Con la gráfica de contracorriente y con los 4000 Ohms tendremos que un ánodo nos drenará una corriente de 41 Ohms.

El número de ánodos será de :

$$\frac{153}{41} = 3.73$$

mas o menos 4 ánodos.

Con la gráfica del factor de corrección tenemos que agruparlos de dos en dos para que trabajen con un factor de 0.85 por lo que drenarán una corriente de:

$$0.85 (41) = 34.85 \text{ ma. /ánodo}$$

$$34.85 \cdot 2 \text{ ánodos} = 69.70 \text{ ma.}$$

Calculando ahora para un grupo de tres ánodos, de la misma gráfica sacamos otro factor de corrección que en este caso tendrá el valor de 0.75 por lo que:

$$41 (0.75) = 30.75 \text{ ma./ánodo}$$

$$30.75 \cdot 3 = 92.25 \text{ ma. /ánodo.}$$

Al instalar una cama de dos ánodos con una corriente drenada de 69.70 miliamperes y otra de tres ánodos con un total de corriente drenada de 92.25 ma. tendremos la corriente necesaria para proteger los 500 metros de tubería de 3"Ø.

El peso de los ánodos tomando en cuenta la misma tabla de la gráfica de resistividades contra corriente drenada por un ánodo vemos que el peso requerido de los ánodos será de 9 Lbs. cada uno.

Así como se hicieron estos cálculos se hizo para el total de la estructura obteniéndose así el número total de ánodos a instalar en el cam

po San Ramón, Tab.

Cabe hacer mención que los puntos de drenajes de corriente necesaria para proteger una determinada longitud, fueron escogidos de acuerdo a las consideraciones pertinentes en los puntos donde precisamente la resistividad del suelo es baja, puesto que de acuerdo con la gráfica de resistividades donde se grafican éstas, nos está indicando que son en estos puntos donde la corrosión es mas severa. La cantidad de ánodos a utilizar fué la siguiente:

ANODOS DE 9 LIBRAS	_____	215
" " 17 "	_____	307
" " 32 "	_____	155
" " 50 "	_____	64

Para los cálculos de la corriente necesaria lo único que variamos fué la longitud y el área por estar en función del diámetro exterior de cada tubería.

Los diámetros considerados para las áreas ( $A = \pi \cdot D \cdot L$ ) son los siguientes:

2"Ø	_____	2.375
3"Ø	_____	3.500
4"Ø	_____	4.500
6"Ø	_____	6.625"
8"Ø	_____	8.625"
10"Ø	_____	10.750"
12"Ø	_____	12.750"
16"Ø	_____	16.750"

JUNTAS AISLANTES NECESARIAS

Para evitar que la corriente se vaya a tierra, es necesario instalar las siguientes juntas aislantes.

2 Juntas de 6"Ø cara realizada ASA 400

2 Juntas de 4"Ø cara realizada ASA 400

1 Junta de 2"Ø cara realizada ASA 400

140 Juntas de 3"Ø cara realizada ASA 400

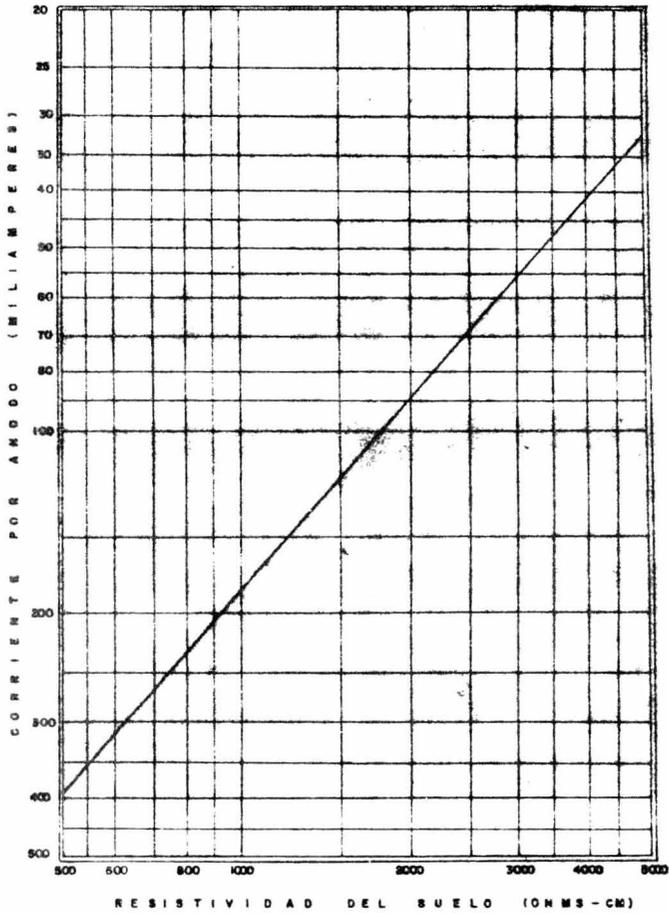
RESISTIVIDADES Y POTENCIALES TOMADOS SOBRE EL DERECHO DE VIA DEL GASODUCTO DE 2"Ø QUE PARTE COMO INJERTO DEL GASODUCTO DE 6"Ø DE LA RED DE BOMBEO NEUMATICO EN EL KILOMETRO 1 + 500 DEL CAMPO PETROLERO SAN RAMON, TAB.

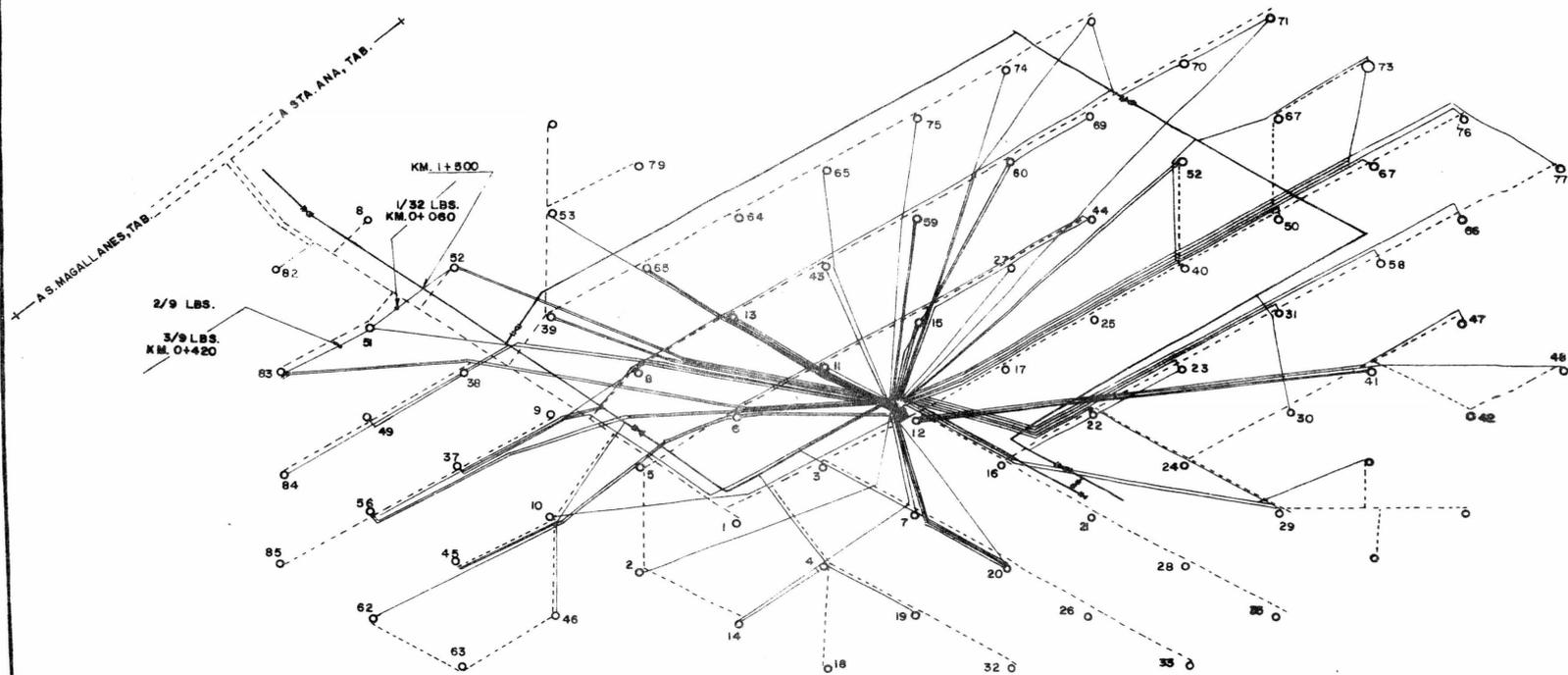
(DEL INJERTO A LOS POZOS NUMERO 51 y 83)

KM.	RESISTIVIDADES	POTENCIAL
0 + 000	2500	- 0.70
0 + 030	5000	
0 + 060	1100	
0 + 090	7000	- 0.70
0 + 120	3000	
0 + 150	6000	
0 + 180	7000	
0 + 210	7200	- 0.69
0 + 240	6000	
0 + 270	5000	
0 + 300	6100	- 0.70
0 + 330	6000	
0 + 360	5000	
0 + 390	6000	- 0.69
0 + 420	4000	
0 + 450	6100	
0 + 480	6000	- 0.67
0 + 510	5100	
0 + 540	3000	
0 + 570	3000	- 0.67
0 + 600	3000	

# GRAFICA DE RESISTIVIDAD CONTRACORRIENTE

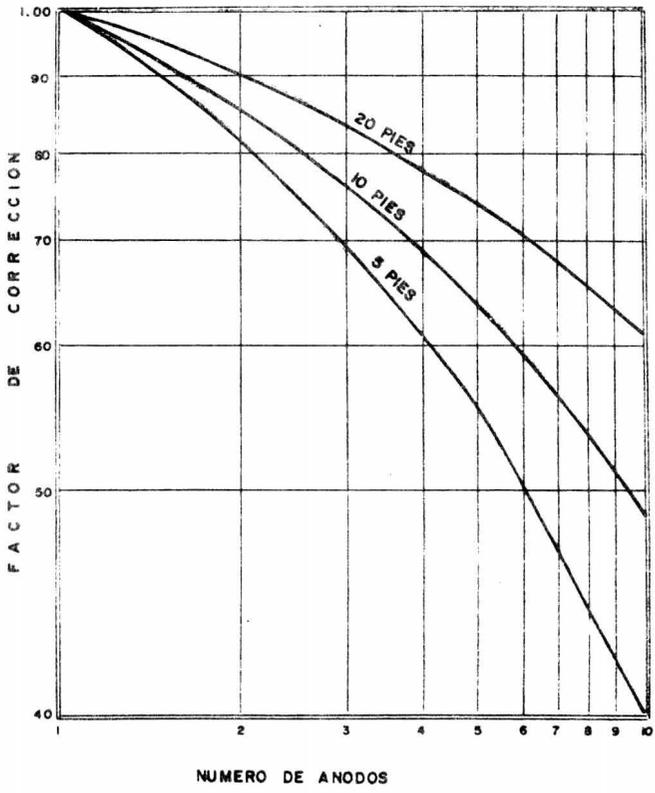
CORRIENTE PARA 10 AÑOS DE VIDA

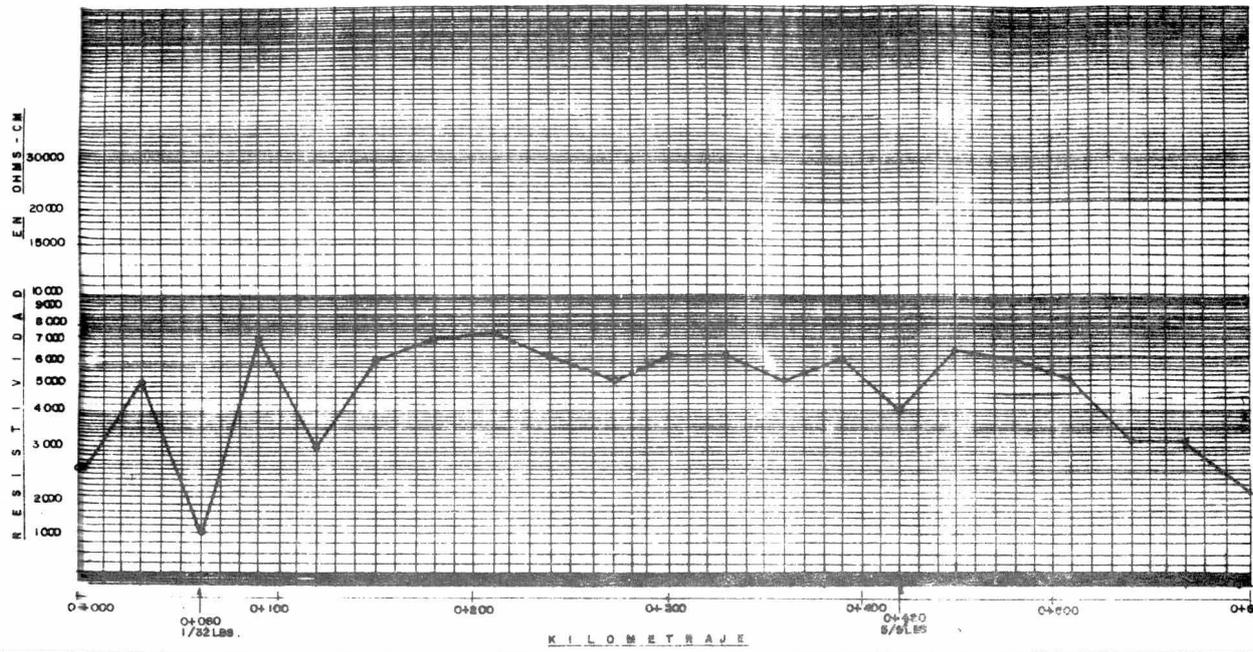
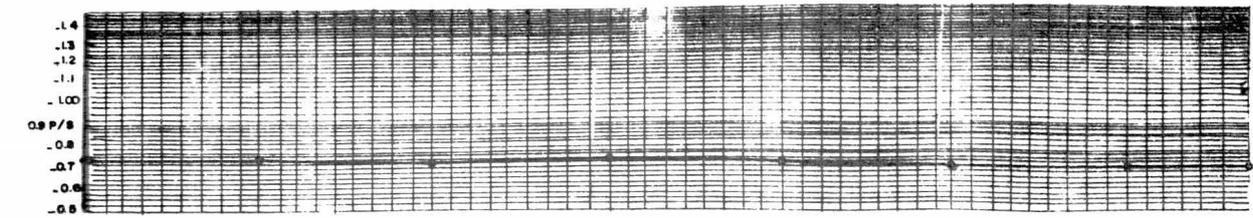




U.N.A.M. FACULTAD DE QUIMICA

PLANO DE LA RED DE BOMBEO NEUMATICO Y LINEAS DE DESCARGA DEL CAMPO PETROLERO SAN RAMON, TAB.





ZONA DE PROSPECCION  
 ZONA MODERADAMENTE CORROSIVA  
 ZONA MUY CORROSIVA

0+080  
 1/32 Lbs.

0+450  
 8/8 LBS

KILOMETRAJE

CAPITULO V. - CONSIDERACIONES ECONOMICAS.

COSTOS DE MATERIALES UTILIZADOS EN LA PROTECCION  
CATODICA DEL CAMPO SAN RAMON, TAB.

<u>PARTIDA</u>	<u>CONCEPTO</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>P. UNITARIO</u>
1. -	Anodos de Mg. de 48 lbs.	Pieza	\$ 1.389.00
2. -	Anodos de Mg. de 32 lbs.	Pieza	\$ 918.00
3. -	Anodos de Mg. de 17 lbs.	Pieza	\$ 434.00
4. -	Anodos de Mg. de 9 lbs.	Pieza	\$ 251.00
5. -	Back - Fill	Kg.	\$ 2.00
6. -	Alambre TW N <sup>o</sup> 12 de cobre	Mts.	\$ 5.95
7. -	Soldadura Cadwell	Pieza	\$ 25.00
8. -	Conectores	Pieza	\$ 3.00
9. -	Cinta Scotch No. 33 aislante	Rollo	\$ 16.00
10. -	Cinta Aislante Scotch-Fill	Rollo	\$ 36.65

RESUMEN DE LA OBRA: PROTECCION CATODICA AL  
CAMPO SAN RAMON, TAB.

No. de Anodos Instalados	718
No. de Soldaduras Instaladas	786
No. de Camas de Anodos Instaladas	281
No. de Puentes de Tuberías a Camas Anódicas	252.5
No. de Postes de Registro Instalados	58
No. de Soldaduras de Tuberías a Postes de Registro.	75
No. de Soldadura de Refuerzo a 1ra. Línea	58
No. de Puentes en Postes de Registro	$58 + 8.5 = 66.5$

## I. - ANALISIS DE COSTO DE LA OBRA HECHA PARA PEMEX.

No. de Anodos Instalados	718
No. de Postes de Registro Instalados	58
No. Total de Puentes (en camas anódicas y P. R.)	319
No. Total de Anodos Soldados	722
Cantidad de Cable de Cobre No. 12 AWG-600 Volts.	250 mts.

No. de Anodos Instalados por día.

$$\text{No. de Anodos} = 718$$

$$\text{No. de días} = 81$$

$$\text{Precio Unitario/Anodo Instalado} = \$ 186.00$$

$$S/\text{día} \times \text{ánodo} = 8.9 \times 186 = \$ 1655.40/\text{día}$$

No. de Postes de Registro Instalado por día.

$$\text{No. de Postes de Registro} = 58$$

$$\text{No. de días} = 81$$

$$\text{Precio Unitario/Poste} = \$ 855.10$$

$$\text{No. de P. R. Instalados por día} = 58/81 = 0.7$$

$$S/\text{día} \times \text{P. R.} = 0.7 \times 855.10 = 598.57/\text{día}$$

No. de puentes hechos por día.

$$\text{No. Total de Puentes} = 319$$

$$\text{No. de días} = 81$$

No. de Puenteos/día =  $319/81=4.0$  Puenteos/día  
 P. Unitario/Puenteo = 146.00  
 \$/día x puenteo =  $146 \times 4 = \$ 584.00/\text{día}$

No. de Soldaduras Hechas/día

No. de Soldaduras (al alma del Anodo) = 722  
 No. de días = 81  
 No. de Soldaduras hechas/día =  $722/81 = 9$  soldaduras  
 P. Unitario/dolsadura = \$ 14.00  
 \$/día x Puenteo =  $14 \times 9 = \$ 126.00$

Cantidad de Cable de Cobre No. 12 AWG - 600 Volts Gastado

Cable Extra = 250 mts.  
 No. de días = 81  
 P. Unitario/metro de cable = \$ 5.95  
 mts/días =  $250/81 = 3.2$  mts.  
 \$/mts. x día =  $3.2 \times 5.95 = \$19.05$

Costo de obra/día:

	1,655.40
	598.50
	584.00
	126.00
	19.05
	<hr/>
Total	\$ 2,982.95

La cantidad \$ 2,982.95 es lo que PEMEX pagó a la Cía. por día.

El costo total de la obra será:

$$2.982.95 \times 81 = \$ \underline{241.618.95}$$

El análisis final de este proyecto deberá incluir el precio de los ánodos por lo que a continuación se da el costo de éstos.

NUMERO, PRECIOS Y PESOS DE LOS ANODOS QUE SE INSTALARON EN EL PROYECTO DE PROTECCION CATODICA LLEVADA A CABO EN EL CAMPO SAN RAMON, TAB.

No. de Anodos	Peso (en Lbs).	P. UNITARIO	SUB TOTAL
41	48 lbs.	\$ 1,389.00	\$ 56,949.00
135	32 lbs.	\$ 918.00	\$123,930.00
299	17 lbs.	\$ 488.00	\$145,912.00
243	9 lbs.	\$ 251.00	\$ 60,993.00
T O T A L			\$387,784.00

Luego entonces el costo efectivo de la protección catódica llevada a cabo al campo San Ramón, Tab. por parte de Pemex será de:

$$387.784.00 + 241.618.95 = \text{S } \underline{629.402.95}$$

II. - ANALISIS DE COSTO DE LA INSTALACION DE CAMAS DE ANODOS Y  
 POSTES DE REGISTROS EJECUTADOS POR UNA CIA. AL PROYECTO  
 DE PROTECCION CATODICA AL CAMPO SAN RAMON, TAB.

Día en que se empezaron los trabajos	19 Marzo de 1976
Día en que se terminaron los trabajos	19 de Junio de 1976
No. de personas que laboraron en los trabajos	= 13
Salario diario/Persona	= \$ 80.00/día
Días trabajados/Persona	= 81
Días pagados/Persona	= 81
Erogación total/Persona	= 81 x 80=\$6, 480.00
Erogación total del personal	= 6, 480 x 13=84, 240.00

Análisis de lo que se gastó en materiales para llevar a efecto los  
 trabajos:

a). - Número de Soldaduras y su evaluación:

No. de Soldaduras Instaladas	= 919
Precio Unitario de una soldadura	= \$ 25.00
Erogación total por Soldadura	= 919 x 25 = \$ 22, 975.00

b). - Cantidad de alambre de cobre usado y su evaluación:

Cantidad de cable utilizado	= 6, 500 mts.
Precio Unitario/metro de cable	= \$ 5.95
Erogación total por concepto de cable	= \$ 38, 675 00

c). - Erogación por concepto de Back-Fill:

Cantidad gastada	= 4.500 Kg.
Precio Unitario	= \$ 2.30
Evaluación	= 2.30 x 4500 = \$ 10,350.00

d). - Erogación por concepto de cinta Scotch Aislante

Cantidad	= 20 Rollos
Precio Unitario	= \$ 16.90
Evaluación	= \$ 16.90 x 20 = \$ 338.00

e). - Erogación por concepto de conectores:

Cantidad	= 295
Precio Unitario	= \$ 3.00
Evaluación	= 295 x 3 = \$ 885.00

f). - Erogación por concepto de gastos de vehículos

No. de días	= 81
Gasto/día	\$ 100.00
Evaluación	= 81,100.00

El gasto total de la obra por parte de Cía será de:

	84,240.00
	22,975.00
	38,675.00
	10,350.00
	338.00
	<u>885.00</u>
Gasto Total	\$ 165,563.00

El gasto total/día que se erogó será de:

$$\$ 165,563.00/81 = 2,043.99$$

Relación de gastos a utilidades por día

$$2982.95 - 2043.99 = \$ 938.97/\text{día}$$

La utilidad neta de la Obra será de:

$$938.97 \times 81 = \$ 76,056.57$$

$$\text{Utilidad} = \$ 76,056.57$$

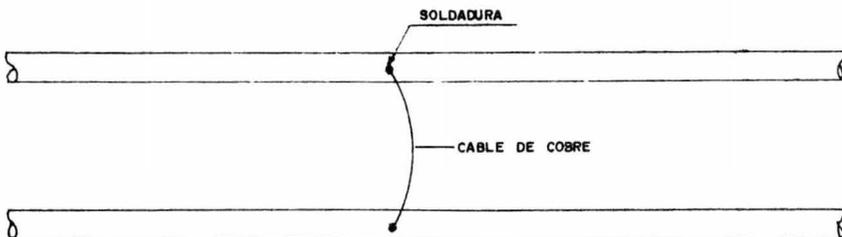
## FORMULA PARA CALCULAR EL NUMERO DE PUENTEOS.

Al llevarse a efecto el proyecto y la supervisión a la instalación de camas anódicas y postes de registro al campo San Ramón, Tab. se tuvo el problema de la determinación del número de puentes que habría de pagarse a la compañía encargada de llevar a efecto éstas instalaciones.

El personal de la sección prevención de corrosión de éste distrito de Agua Dulce, Ver. empezó a estudiar el problema ya que esta determinación del número de puentes era confusa y bastante tediosa, puesto que determinar este concepto implicaba contar una a una el número de cada tubería soldada y como éste número es bastante elevado su cuantificación se prestaba a errores.

Para ello se partió del siguiente concepto:

Para establecer un puenteo o "puente" es necesario tener dos tuberías o más las cuales van a ser unidas por un cable de cobre del No. 12, AWG 600 volts de la siguiente manera;



El dibujo anterior nos está indicando que éste puente incluye un alambre de cobre soldado a cada una de las tuberías. De esto se llegó a establecer la siguiente fórmula para el caso primero:

Primer Caso. - Cuando se encuentra una cama anódica soldada a "n" líneas (caso concreto, las 81 líneas que llegan a la batería del campo San Ramón, Tab.)

$$X = \frac{n - 1}{2}$$

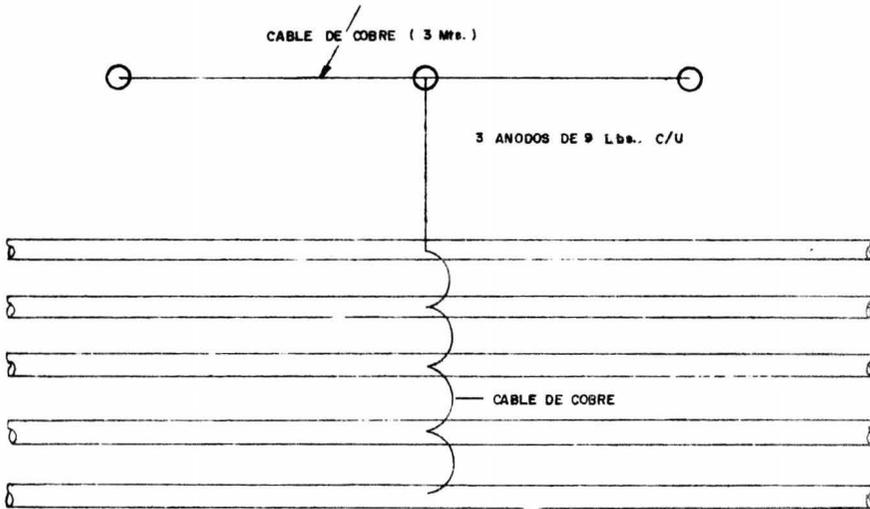
Donde:

X = Número de puentes.

n = Número de líneas soldadas.

- 1 Es la primera línea soldada que está incluida en el costo de la instalación de la cama o poste de registro.
- 1/2. - Es una media establecida tomando en cuenta que esto incluye la mitad del puenteo entre la soldadura de la primera línea y la siguiente, entre éste y la que sigue y así sucesivamente hasta "n" líneas.

Como ejemplo a esto se tiene la siguiente figura:



Segundo Caso. - En el caso mas general representado por la siguiente fórmula

la:

$$X = \frac{n - 1 (Y)}{2}$$

Donde:

X = Número de puentes.

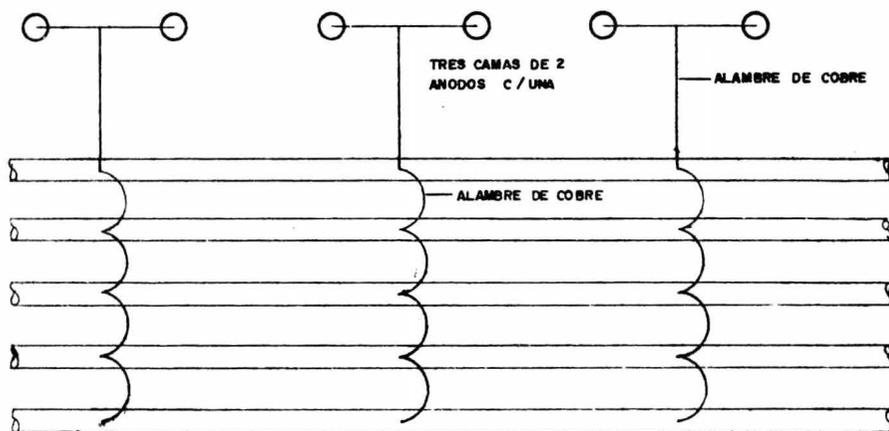
n. - Número de líneas soldadas.

Y. - Número de Camas anódicas instaladas.

- 1. - Es la primera línea soldada que está incluida en el costo de la instalación de la cama anódica o poste de registro.

1/2. - Es una media establecida tomando en cuenta que esto incluye la mitad del puento entre la soldadura de la primera línea y la siguiente, entre ésta y la que sigue y así sucesivamente hasta "n" líneas.

La siguiente figura concreta la fórmula anterior.



CAPITULO VI. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES AL  
DISEÑO DE PROTECCION CATODICA AL CAMPO  
SAN RAMON, TAB.

Al llevarse a efecto la supervisión de la instalación y puenteo de las camas de ánodos y línea de descarga y Bombeo Neumático al campo San Ramón, Tab. se recomendó y se concluyó lo siguiente:

1. - Para una mayor eficiencia en la protección catódica a éste campo, se procedió a instalar juntas aislantes en la bridas de línea de descarga y bombeo neumático de 2"Ø y 2"Ø interior, esto fué con el fin de que la corriente drenada por los ánodos fuera precisamente para proteger tuberías enterradas.

Estas juntas actúan como aislamientos eléctricos, ya que tienen sus bujes y arandelas que aislan las tuberías de otras estructuras aéreas, que en caso de no hacerlo, éstas estructuras aéreas consumirían parte de la energía eléctrica drenada por los ánodos y que en éste caso perjudica grandemente la eficiencia de la protección catódica a las tuberías enterradas.

Para dar una explicación mas consisa de lo anterior se anota lo siguiente:

Al llegar las líneas de descarga a la batería central de San Ramón se procedió a instalar juntas de 2"Ø interior en los cabezales de llegada a dicha batería, lo que dió por resultado una mayor eficiencia en la protección catódica a dichas líneas de llegada. Si ésto no se hubiese hecho, se tendría perdida de corriente eléctrica, lo cual bajaría la eficiencia en cuanto a la protección de dichas líneas.

2. - Al llevarse a efecto la instalación de las camas anódicas, se conectó un cable de cobre AGW-12 de 600 volts entre la cama anódica y la tubería para establecer el flujo de corriente entre la cama anódica y la tubería y luego de ésta por medio del electrolito a los ánodos.

Para la soldadura hecha en la tubería normalmente se utilizaba esmalte Protexa para aislar la soldadura y el cable, del medio (agua).

Se concluyó que este no es el material adecuado para éste tipo de aislamiento, ya que éste esmalte al contacto con el agua se torna quebradizo y se desprende fácilmente de la tubería, dejando al descubierto la soldadura y el alambre de cobre, por lo tanto el funcionamiento de dicho aislamiento es nulo, por lo tanto se utilizó un recubrimiento epóxico para zonas expuestas al agua, éste recubrimiento es 100% de sólidos a base de resina epóxica, pigmentos e inertes, que endurece por acción de un reactivo químico de resina poliamídica, pigmentos e inertes (componente poliamídico).

Las características de este recubrimiento es que proporciona espesores gruesos, que es aislante eléctrico (no conduce la electricidad), tiene resistencia a la inmersión en agua, e incluso puede aplicarse debajo del agua, su aplicación es manual.

Las características antes expuestas llevó a utilizar éste tipo de recubrimiento como aislante eléctrico.

3. - Para llevar a cabo la aplicación de la soldadura sobre la superficie de la tubería se utilizaba un diferencial de 2 toneladas de capacidad apoyado en su tripié cuya función es la de levantar la tubería, ya que-

ésta se encontraba dentro del pantano.

Se concluyó que éste es un método antieconómico, ya que tiene como principales desventajas el que utiliza mayor personal, además dadas -- las condiciones del terreno que es pantanoso, el tripié no soportaba la carga a levantar y se hundía, dando por resultado pérdida de tiempo y dinero.

Para ello se utilizaron unos tambores huecos al cual en una de sus bases se le adaptaba un pedazo de tubería de aproximadamente 2 metros con un orificio de 20 centímetros por lado en el centro de ésta, además ésta tubería está cortada transversalmente en su parte media, y su diámetro interior es de una pulgada mayor que la tubería a soldar.

Las ventajas que se obtuvieron con éste procedimiento fueron:

a). - Se utilizó la mitad del personal que el que originalmente se -- utilizaba para hacer el mismo trabajo con el Diferencial.

b). - No se tenían problemas de hundimientos, ya que éstos tambores se apoyaban directamente sobre la tubería a soldar. La altura de éstos tambores es de 1.50 mts. suficiente para sobresalir de la superficie del -- pantano.

c). - No es necesario izar la tubería.

4. - El sistema de Protección Catódica que se instaló se justifica -- por algunas fugas que se han presentado debido a la corrosión severa que -- sufren éstas líneas, ya que se encuentran en terreno pantanoso.

Se escogió un sistema a base de ánodos de magnesio para las líneas que van paralelas y las que se encuentran conectadas a los pozos, ya que un sistema con rectificadores no resultaría funcional por las pérdidas de co--

rriente que se producirían debido a los ductos que se cruzan con los considerados en el proyecto y por los pozos que se encuentran conectados a los mismos.

Los ánodos se deben instalar en terrenos húmedos para un mejor funcionamiento de los mismos.

Es recomendable que una vez instalados los ánodos se les tome la corriente que drenan para comprobar el estado en que se encuentran trabajando.

## CAPITULO VII. - BIBLIOGRAFIA.

1. - National Association of Corrosion Engineers.  
NACE Basic Corrosion Course.  
NACE, Texas 1970.
2. - Peabody W. A. Control of Pipeline Corrosion  
NACE 1967.
3. - Protección Catódica. Instituto Mexicano del Petroleo.  
Subdirección de Tecnologías de la Explotación. Departamento de Corrosión. Ing. Manuel F. Guerrero.
4. - Manual de Recubrimientos Anticorrosivos.  
Protexa 1971.
5. - Fontana, M. L. F. and Freene, N. D. Corrosión Engineering.  
USA, MC. Graw - Hill. Inc.  
New York 1967.
6. - Miller. Corrosion Instruments for Corrosion Engineers.  
Multicombination Meter Model B-3  
Mc. Miller Co. Inc.  
Handbook of operation and service model 263 Vibroground.  
Associated Research, Incorporated 1961.