

5  
2 Ene.



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Protección Catódica a  
Estructuras Marinas

**TESIS PROFESIONAL**  
Que para obtener el Título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
Presenta

**RAUL ALDECO RAMIREZ**



México, D. F.

1985



## **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 está 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.

PROTECCION CATODICA DE ESTRUCTURAS MARINAS

C O N T E N I D O

- I.- GENERALIDADES
- II.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA CORROSION
- III.- PROTECCION CATODICA A ESTRUCTURAS MARINAS
- IV.- ASPECTOS ECONOMICOS DE LA PROTECCION CATODICA
- V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VI.- BIBLIOGRAFICA

**I.- GENERALIDADES.**

**I.1.- Necesidad de Instalaciones Petroleras fuera de  
La Costa y para el Comercio Marítimo.**

**I.2.- Objetivo**

**I.3.- Materiales más comunmente empleados.**

### I.1.- NECESIDAD DE INSTALACIONES PETROLERAS FUERA DE LA COSTA Y PARA EL COMERCIO MARITIMO.

Entre las diversas etapas por la que la humanidad ha pasado durante su larga existencia, algunos historiadores consideran que a la fecha vive en la edad del hierro por el uso tan extensivo que hace de este metal.

El fierro ha llegado a ser indispensable para el hombre, ya que son innumerables los artículos fabricados en base a este metal y sus aleaciones que le permiten su actual nivel de vida, en particular, el acero al carbón, que es material insustituible, tanto para el desarrollo de sus industriales, como para satisfacer sus necesidades de construcción y de transporte masivo.

El empleo de hierro a gran escala se inició con el descubrimiento de un proceso industrial para reducir su óxido con carbón mineral, allá por el año de 1855, cuando Joseph Bessemer construyó el primer alto horno. A partir de entonces crecieron, en forma exponencial, las aplicaciones y el consumo del acero. Primero fueron satisfechas las necesidades militares más urgentes, después, las de una incipiente industria química, las de transporte terrestre y marino, y no fué hasta el año de 1867 cuando un constructor inglés patentó el empleo de varilla de acero como refuerzo del concreto, que su aplicación

se extendió a la construcción de viviendas, edificios, puentes, muelles, etc.

El progreso de la humanidad demandó a su vez otros bienes de consumo, entre ellos nuevos energéticos que se adaptaran mejor a los requerimientos de iluminación y calefacción de sus hogares, a la generación de energía eléctrica, a las crecientes necesidades de transporte individual y colectivo, a velocidades muy superiores a las que por siglos se había desplazado.

La demanda de estos energéticos trajo consigo el rápido desenvolvimiento de una nueva industria, la petrolera, la que desde luego se convirtió en un gran consumidor de artículos fabricados con acero de las más diversas características, especialmente de tubos para perforar los pozos de extracción de petróleo crudo y gas natural, para el transporte de éstos desde las áreas de producción hasta las refineries y de éstas a las principales zonas de consumo.

La explotación de los yacimientos de hidrocarburos, por razón natural, se inició en tierra firme, pero con el tiempo - fué necesario hacerla de pozos ubicados en zonas pantanosas, - playas, lagos y en la plataforma continental; primero con tirantes de agua de 10, 20 ó 30 metros y así sucesivamente, de modo que a la fecha se extraen en zonas con más de 500 m. de -

profundidad.

En México, los principales yacimientos petroleros y de gas natural se localizan en la zona sureste del país, básicamente al sur de Veracruz, en la parte norte de Tabasco, en la Plataforma Continental de éstos Estados, y en la Sonda de Campeche (figura 1).

El desarrollo de la Sonda de Campeche, a partir de 1979 y hasta 1983, ha sido un proceso dinámico que ha requerido instalar 72 plataformas fijas, de las cuales 43 son de perforación, 12 de producción, 6 de enlace, 6 habitacionales, 2 de bombeo y 3 de compresión de gas. Además, en la Sonda de Campeche se han construido en total 1260 km. de líneas submarinas, las cuales son 42 km. de 1.22 m. (48") de diámetro para boyas de Dos Bocas, Tab.; 727 km. de oleoductos de 91.4 cm. (36") -- consistente en tres líneas que unen los yacimientos con la Terminal de Dos Bocas, Tab., y dos que unen a las tres boyas para carga de buquetanques en Cayo Arcas, Camp.; 146 km. de gasoductos de 91.4 cm (36") de los cuales, 2 son para recolección y 1 de transporte de gas a tierra; 345 km. de líneas de recolección de diámetro de 40 á 60 cm. entre las plataformas instaladas; y con la finalidad de dar mayor fuidéz a la salida del crudo de exportación, se instalaron 8 monoboyas, ubicadas estratégicamente en Salina Cruz, Oax., en Rabón Grande, Ver., Cayo Arcas, Camp. y Dos Bocas, Tab.

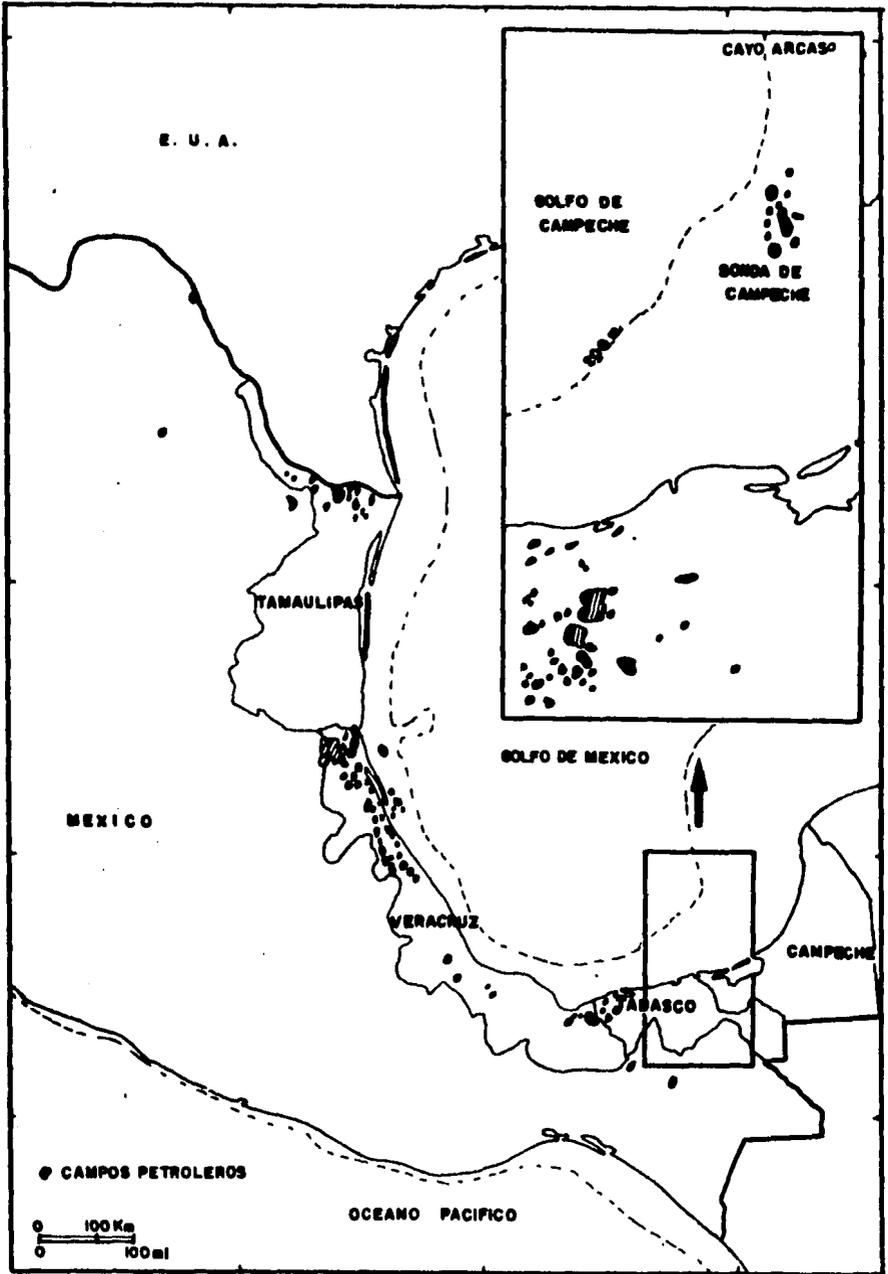


Fig. 1.- Principales campos petroleros ( hasta 1984 ).

En la figura 2 se ve el crecimiento de la producción -- anual de crudo desde 1976 hasta 1982 (Pemex, 1983).

El Golfo de Campeche, donde se encuentra la única pro-- vincia significativa en mares nacionales, produjo 62% de toda - la producción de crudo, y 22% de gas natural en 1983.

Las plataformas instaladas están ahora produciendo 1.67 millones de barriles por día (b/d) de crudo y 900 millones de piés cúbicos (MMcfd) de gas asociado.

En la actualidad se ha avanzado mucho en el aprovecha-- miento integral del gas asociado al crudo extraído, sobre todo si se tiene en cuenta que durante el pico de producción, en -- las plataformas fuera de la costa, se quemaban alrededor de -- 600 piés cúbicos por día.

La exploración de PEMEX está reducida al mínimo, y a la zona de mayor interés, como la plataforma continental de Yucatan, se prevé explorar cuando se apruebe el presupuesto res-- pectivo (Offshore, 1984).

PEMEX perforará únicamente los pozos necesarios para -- mantener la producción a los niveles actuales, y orientará la exploración a la búsqueda de crudo ligero para compensar decli-- naciones en su producción.

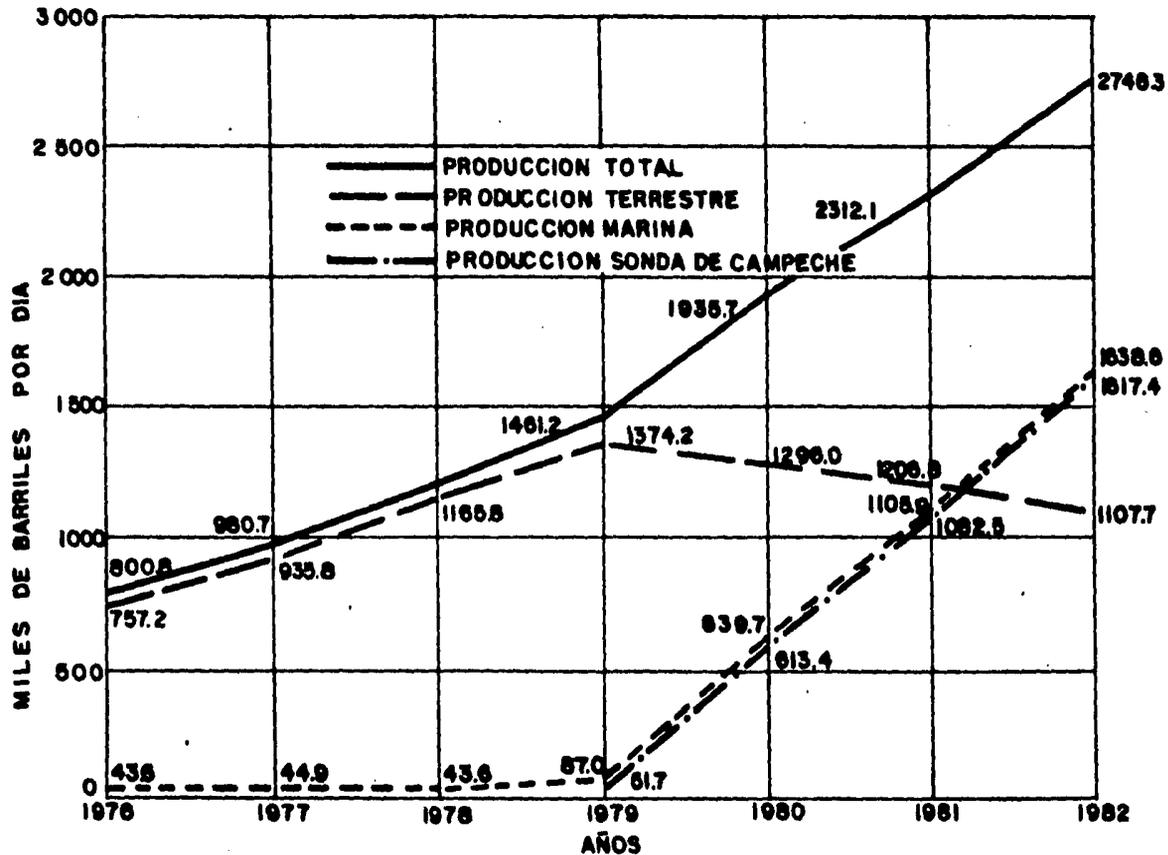


Fig. 2.- Producción anual de crudo desde 1976 hasta 1982.

Durante 1983, PEMEX reportó ganancias por más de 5000 millones de dólares. Las ganancias fueron sin contar los subsidios que dá a otras empresas e instituciones del país. Lo que ayudó a tener sus primeras ganancias en más de una década, fueron los altos costos internacionales de los combustibles y el crecimiento negativo del país. La demanda interna bajó de 4.50 a 1.03 millones de b/d.

De lo anterior se aprecia la importancia económica que tienen las exportaciones petroleras de México para su desarrollo económico y social. Por ello, resulta importante transformar éstas exportaciones de crudos en ventas al exterior de productos petroquímicos, ya que el valor agregado y la creación de empleos derivados de esta actividad redundan en un beneficio al país.

Dado que el medio más económico para efectuar las exportaciones del petróleo crudo y de sus derivados petroquímicos es el marítimo, Petróleos Mexicanos se ha visto en la necesidad de desarrollar una infraestructura adecuada para este fin, construyendo numerosos atracaderos, tanques de almacenamiento, plataformas marinas, boyas y líneas de conducción en el medio ambiente marino.

Del mismo que los usuarios de los múltiples artículos fabricados con acero al carbón, descubrieron que en determina-

dos servicios el material se oxidaba, que las superficies expuestas a la acción del aire salobre, a los suelos húmedos y al agua de mar se corroían rápidamente, así los técnicos de Petróleos Mexicanos han constatado la agresividad del ambiente marino en sus estructuras metálicas.

En previsión de ello los encargados de diseño, operación y mantenimiento de las costosas instalaciones de producción, refinación y distribución de petróleo, tienen un especial interés en el proceso de corrosión, ya que todas sus instalaciones erigidas en un ambiente salobre están en constante riesgo de corroerse.

Existen estimaciones de que tan solo en los Estados Unidos de América, la corrosión cuesta a la industria aproximadamente 8 mil millones de dólares al año.

Se ha aprendido, por el duro camino de la experiencia, que es necesario proteger las instalaciones, y en forma muy particular las construidas con acero al carbón cuando estarán en un medio ambiente marino. La conservación de la infraestructura petrolera, portuaria, militar, etc., representa un continuo esfuerzo por encontrar mejores soluciones al problema de controlar su corrosión.

## I.2.- OBJETIVO.

La responsabilidad de un estudio para el diseño de un sistema para controlar la corrosión en una estructura metálica y para su instalación, debe recaer en un ingeniero especializado en esta materia de corrosión. De lo contrario, las deficiencias en su protección física pueden resultar riesgosas y sumamente costosas, porque debe recordarse que los sistemas modernos de conducción por ductos representan una inversión cuantiosa, y que la incorrecta aplicación de métodos de control puede, y hace, más perjuicios que beneficios, y ocasiona grandes gastos por el daño innecesario a la estructura y las consecuentes mermas en su productividad. Esto es particularmente cierto cuando se recuerda el hecho de que materiales peligrosos son transportados por tuberías, y que la inadecuada aplicación de los sistemas protectores puede incrementar la probabilidad de daños a las instalaciones, pudiendo también eventualmente, involucrar riesgos económicos para el operador de la línea de conducción (Peabody, 1967).

El presente trabajo es una contribución a un mejor entendimiento de la protección catódica en estructuras metálicas marinas, considerando que a la fecha es la forma más eficiente en cuanto a recursos económicos invertidos, y la más satisfactoria en cuanto a la protección obtenida de éstas que en la --

actualidad representan una infraestructura indispensable para el desenvolvimiento industrial del país.

### I.3.- MATERIALES MAS COMUNMENTE EMPLEADOS.

Las estructuras expuestas al medio ambiente marino, ya sea que estén en contacto con el agua o no, están sujetas a la acción de diversos agentes destructivos contenidos en el medio. El grado de deterioro que sufrirán las estructuras dependerá directamente del material con que estén construidas.

Otros factores que determinan el deterioro de las estructuras son: las condiciones atmosféricas del lugar donde se encuentran localizadas (la temperatura y el contenido de humedad del aire son determinantes), las características del agua de mar (temperatura, salinidad, oleaje y corrientes) y la posición de la estructura con respecto al nivel del agua (permanentemente sumergida, en la zona de salpicadura o en la zona entre mareas).

Los materiales más utilizados para la construcción de estructuras que operarán en el medio ambiente marino son: el acero al carbón, el concreto reforzado y la madera.

Estos materiales son afectados en distintas formas y en mayor o menor grado según sea del que se trate, por ejemplo, en las estructuras construidas de concreto, la degradación de éste y el desgajamiento de las paredes determinan la vida útil

de tales estructuras, especialmente en los trópicos, donde la temperatura incrementa la acción de los agentes corrosivos sobre éste material. En las estructuras construidas con acero, la corrosión superficial es la principal causa de su deterioro y falla, y en el caso de edificaciones construidas con madera, el ataque por microorganismos es la principal causa de su destrucción.

La elección del material para utilizarse en la construcción de una estructura que ha de estar bajo los efectos destructivos del medio ambiente marino, está en función de numerosos factores, tales como: el uso directo de la estructura, el costo, las condiciones ambientales, la vida útil deseada y las normas, tanto de seguridad como de operación.

**II.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA CORROSION.**

**II.1.- La naturaleza de la corrosión.**

**II.2.- Naturaleza agresiva del medio ambiente marino**

**II.3.- Tipos de corrosión.**

**II.4.- Diferentes métodos para el control de la corrosión.**

**Protección catódica y protección catódica base.**

## II.1.- NATURALEZA DE LA CORROSION.

El fenómeno de la corrosión de las superficies metálicas ha sido definido en formas muy diversas por los especialistas que lo han estudiado, quienes en términos más o menos aproximados lo definen como sigue:

"Proceso mediante el cual los metales tienden a abandonar su estado metálico para formar compuestos semejantes a aquellos en que se les encuentra en la naturaleza".

"El resultado de un flujo de corriente eléctrica hacia el medio en que se encuentra".

"Proceso básicamente electroquímico donde se hace necesaria la presencia del oxígeno en alguna forma".

"La destrucción o deterioro del metal por reacción con el medio que lo rodea".

"Una reacción anódica que produce electrones, los cuales se consumen en una reacción catódica".

"Es la destrucción de un metal a un producto indeseable por reacción química con el medio ambiente".

Las definiciones anteriores, y otras que no se citan, -

coinciden en reconocer a la corrosión de los metales por su me  
dio circundante como un fenómeno de naturaleza electroquímica  
que tiene lugar en forma espontánea, por lo que la siguiente -  
podría ser una definición que conjugase la mayoría de los citados  
puntos de vista:

"La corrosión de un metal, sumergido o enterrado, es la  
destrucción de éste mediante la formación de compuestos (pro--  
ductos de la corrosión), en un proceso electroquímico que tiene  
lugar en las zonas de contacto con el medio que lo rodea".

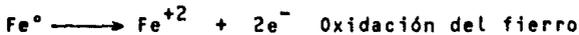
El medio que rodea al metal, en este caso, el agua de -  
mar, se dice que es agresivo por que favorece las reacciones -  
electroquímicas que tienen lugar en la corrosión. En el si---  
guiente inciso se verá el porqué de la agresividad del medio -  
ambiente marino.

El proceso electroquímico al que se hace referencia en  
la última definición, consiste en una reacción química de oxi-  
dación-reducción, en la que hay transferencia de electrones, -  
entendiéndose por oxidación a la parte de la reacción en la --  
cual el metal se corroe pierde electrones, y se convierte en -  
un ión positivo; y por reducción, la otra parte de la reacción  
en la cual otro ión diferente gana electrones restituyéndose a  
su condición elemental. Entonces, en la corrosión de los meta  
les, siempre se efectúa una reducción en el cátodo y una oxida

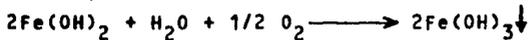
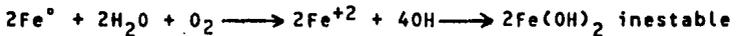
ción en el ánodo.

En este proceso se genera iones positivos y negativos, llamados respectivamente cationes y aniones por su tendencia a fluir en el medio conductivo al ánodo y al cátodo.

Las reacciones siguientes son las que se llevan a cabo en una reacción electroquímica del hierro en un medio ácido:



Si el medio está saturado con oxígeno, el compuesto químico que se forma es el conocido óxido pardo-rojizo que se acumula sobre la superficie atacada. Esto es:



En cada punto de la superficie metálica que se corroe - bajo el proceso electroquímico, existen los cuatro elementos - que constituyen a las pilas galvánicas (bimetalicas o eléctricas), que son: un ánodo, un cátodo, un medio por el cual podrán desplazarse los iones producidos (electrolito) y un conductor metálico, por el que se mueven los electrones, es decir,

una corriente eléctrica.

A continuación se analizará el mecanismo de las pilas - galvánicas, teniéndose como hecho que el entender éste simple mecanismo permitirá comprender sin dificultad el fenómeno de - corrosión y aceptar rápidamente la lógica de los procedimien-- tos anticorrosivos.

Cuando dos metales diferentes (electrodos) se sumergen en un electrólito o medio corrosivo, éstos, debido a sus potenciales eléctricos, naturales, y como consecuencia de las reacciones electroquímicas con el medio, se establecerá una dife-- rencia de potencial (voltaje) entre los electrodos (figura 3).

Si por medio de un conductor metálico se unen eléctricamente los electrodos, fluirá una corriente eléctrica que reforzará las reacciones electroquímicas entre los electrodos y el medio. Estas reacciones generan, a su vez, las condiciones -- propicias para que permanezca la corriente eléctrica (figura - 4).

Siempre el flujo de electrones es del electrodo negativo (menos positivo) al positivo, y la corriente eléctrica, por definición fluye del electrodo positivo (cátodo) al electrodo negativo (ánodo).

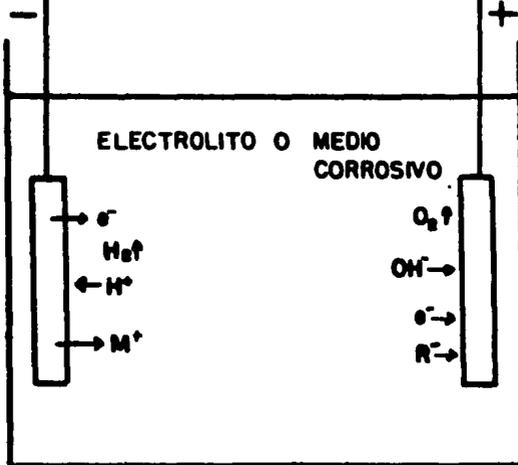
Los potenciales en los electrodos se dan en forma natu-

**ELECTRODO NEGATIVO  
(ANODO)**

**ELECTRODO POSITIVO  
(CATODO)**

**METAL CON  
MENOR POTENCIAL**

**METAL CON  
MAYOR POTENCIAL**



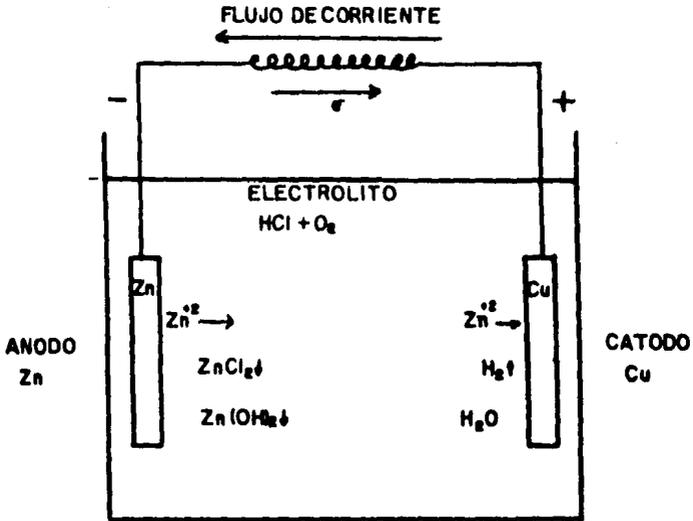
**M Metal, R Radicales del electrolito**

**REACCION ANODICA**

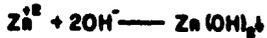
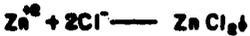
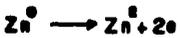
**REACCION CATODICA**



**Fig. 3.- Reacciones causadas por dos electrodos de diferente potencial en un electrolito.**



**REACCION ANODICA**



**REACCION CATODICA**

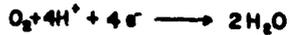


Fig. 4.- Circuito cerrado de dos electrodos de diferente potencial en un electrolito.

ral dada su constitución química y las características del ---  
electrólito, y se miden con respecto a electrodos de referen-  
cia. Comunmente se utiliza el electrodo de hidrógeno, al cual  
se le asigna arbitrariamente un potencial igual a cero.

Dichos potenciales son efecto inmediato de la cantidad  
de carga eléctrica que predomina en cada electrodo, debido a -  
las reacciones con el medio, y se cuantifica mediante unidades  
"volt" por medio de los "voltímetros".

En forma "atómica" los potenciales se originan con la -  
disolución del metal de los electrodos en diferente orden de -  
donde se obtienen iones positivos del metal ( $M^+$ ) y electrones  
( $e^-$ ). Los primeros reaccionan con iones negativos del medio,  
por ejemplo los hidróxilos  $OH^-$ , para formar compuestos eléctri-  
camente neutros (oxidación del metal), teniéndose en éste mo-  
mento un exceso de carga negativa en los electrodos; y, los --  
electrones se "consumen" reduciendo iones hidrógeno del medio,  
produciendo un exceso de carga positiva. Entonces, los poten-  
ciales en los electrodos se dán con la mayor o menor disolu-  
ción del metal de éstos por el medio.

Los potenciales eléctricos obtenidos en ésta pila galvá-  
nica (figura 5), se mantendrán durante determinado tiempo (el  
material del electrodo, el electrólito y la agitación de éste  
son decisivos), y luego se reducirán paulativamente hasta desa

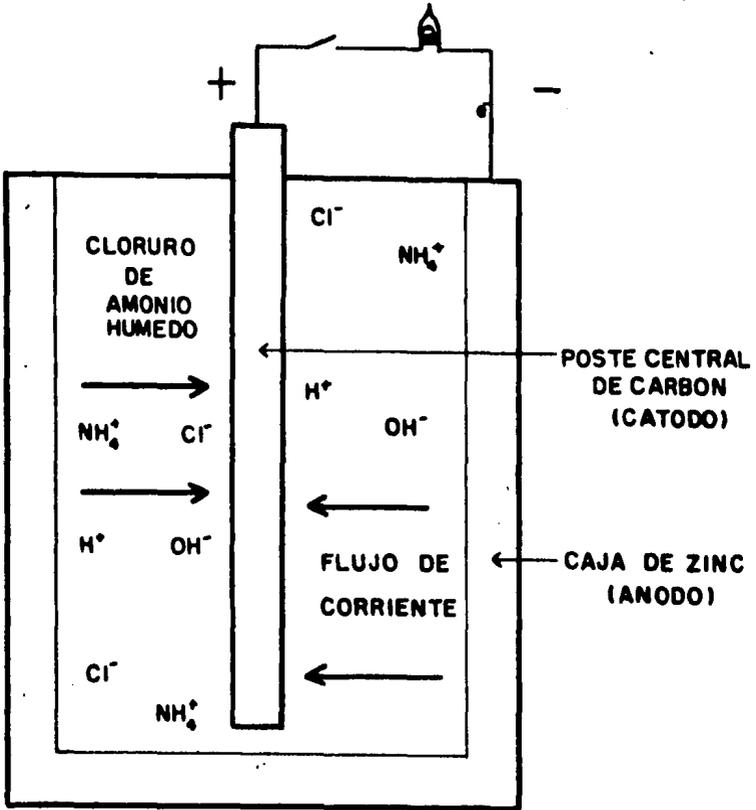


Fig. 5.- Sección transversal de una batería seca común.

parecer.

Cuando se unen eléctricamente los electrodos, dado que uno de ellos será "negativo", los electrones que reducian iones hidrógeno en éste electrodo fluirán al electrodo positivo a través del conductor metálico que los une (por tener éste mayor conductividad eléctrica que el electrólito). Con este flujo de carga negativa, corriente eléctrica, el electrodo negativo sólo se oxida, mientras que el positivo reducirá iones con los electrones que llegan, deteniendo totalmente su oxidación (figura 4).

Se puede generalizar: "siempre que dos metales diferentes sean sumergidos en un electrólito, al unirse eléctricamente sólo uno de ellos sufrira oxidación (corrosión), mientras - que el otro, donde se lleva a cabo la reducción, permanecerá - íntegro".

Como se mencionó, solamente uno de los electrodos de la pila galvánica sufre deterioro, y ésto está en función de los potenciales eléctricos que adquiere en el electrólito; pero, - ¿cómo saber cual de los dos electrodos se corróe y qué combina ción de metales hace más activa la pila? (se dice que una pila bimetálica es tan activa como elevada es la diferencia de los potenciales entre sus electrodos).

Por medio de pruebas de laboratorio se analizan combinaciones de materiales para un determinado electrolito, obteniéndose los potenciales individuales con respecto al electrodo de hidrógeno, y las diferencias de potenciales entre los electrodos. En la tabla 1 se muestran los potenciales electroquímicos de los metales.

La agrupación de los elementos de acuerdo a éstos potenciales (en magnitud y sentido) da origen a las "tablas de fuerzas electromotrices" o "tablas Redox", con las cuales se puede predecir si un material va a ser corroído o no en un medio ambiente específico en base a la siguiente regla: "para una reacción electroquímica, el electrodo que tenga el potencial menos positivo sufrirá la oxidación".

Por ejemplo, si se introduce un trozo de aluminio en un medio saturado de iones hidrógeno ( $H^+$ ), como cualquier solución ácida, es fácil predecir que el metal se corroerá en base a que su potencial óxido-reducción es negativo con respecto al correspondiente del hidrógeno (cero de la tabla). De igual forma, para una pila galvánica con electrodos de zinc y cobre, por medio de la tabla de fuerzas electromotrices, se obtienen los correspondientes potenciales de  $-0.763$  y  $+0.337$ , los cuales indican, según la regla mencionada, que el zinc es el metal que se oxida.

Comunmente se le denomina a un material "Noble o Catódico

T A B L A 1

**TABLA ESTANDAR DE POTENCIALES ELECTROQUIMICOS (FEM) PARA  
LOS METALES (FONTANA Y GREENE, 1978)**

	<u>Equilibrio de metal-ión metálico (actividad molar)</u>	<u>Potencial del electrodo vs electrodo normal de hidró- geno a 25 C. (volts)</u>
Metales	Au-Au <sup>+3</sup>	+1.498
Nobles	Pt-Pt <sup>+2</sup>	+1.2
o	Pd-Pd <sup>+2</sup>	+0.987
catódicos	Ag-Ag <sup>+1</sup>	+0.799
	Hg-Hg <sub>2</sub> <sup>+2</sup>	+0.788
	Cu-Cu <sup>+2</sup>	+0.337
	H-H <sup>+</sup>	0.000
	Pb-Pb <sup>+2</sup>	-0.126
	Sn-Sn <sup>+2</sup>	-0.136
	Ni-Ni <sup>+2</sup>	-0.250
	Co-Co <sup>+2</sup>	-0.277
	Cd-Cd <sup>+2</sup>	-0.403
	Fe-Fe <sup>+2</sup>	-0.440
	Cr-Cr <sup>+3</sup>	-0.744
	Zn-Zn <sup>+2</sup>	-0.763
Metales	Al-Al <sup>+3</sup>	-1.662
activos	Mg-Mg <sup>+2</sup>	-2.363
o	Na-Na <sup>+</sup>	-2.714
anódicos	K-K <sup>+</sup>	-2.925

co" si su potencial en la tabla Redox es positivo con respecto a la referencia cero del electrodo de hidrógeno, y como "Activo o Anódico" aquel cuyo potencial es negativo.

Las tablas Redox son obtenidas bajo estrictas condiciones experimentales y por lo general cualquier cambio en algunas de sus variables (temperatura, electrólito, composición química de los electrodos, etc.) hace variar la magnitud y hasta el sentido de los potenciales. Es por ello que deben utilizarse cuidadosamente, ya que conclusiones obtenidas de éstas - tablas en casos no apropiados, pueden conducir a costosos errores debido a corrosión acelerada.

Para un medio corrosivo dado, por ejemplo el agua de -- mar, es posible establecer tablas, llamadas series galvánicas, de varios metales ordenados de acuerdo a su potencial Redox en este medio. Difieren de las tablas Redox por el hecho de no - indicar los potenciales correspondientes y por ser su ordena-- miento en base a su comportamiento promedio (tabla 2).

Dicha serie galvánica sirve para indicar las combinacio-- nes de metales que originarán corrosión acelerada por forma-- ción de pilas galvánicas activas, que en forma general, mien-- tras mayor es la separación de los elementos en la serie galvá-- nica, mayor es la actividad de la pila formada y, como conse-- cuencia, mayor la corrosión en el electrodo activo. Para mate

riales juntos o relativamente juntos, la tendencia o activación de las pilas es mínima.

Lo anterior tiene como fundamento que la magnitud de la corrosión está en función de la corriente eléctrica originada por el desplazamiento de electrones del ánodo al cátodo, la cual a su vez depende de la diferencia de potencial entre los electrodos cuando están en el electrólito y de la resistencia total del circuito (ley de Ohm  $I = V/R$ ).

Si la corrosión electroquímica tiene un mecanismo igual al de las pilas galvánicas, entonces ¿cómo es que en forma natural se dan los elementos ánodo, cátodo, electrólito y conductor metálico es una estructura metálica sumergida en un medio corrosivo?

En forma general, el electrólito es el medio conductivo en el que se encuentra la estructura, ya sea agua de mar, lodo, etc.; el elemento conductor metálico es siempre la misma estructura y, para que existan las zonas anódicas y catódicas, debe existir una o más de las siguientes condiciones:

- a) Que la estructura esté construida en base a metales diferentes y que éstos tengan contacto eléctrico. Al estar en el medio conductivo actuarán los materiales como ánodo o cátodo según su colocación en la serie

T A B L A 2

SERIE GALVANICA DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES COMERCIALES  
EN AGUA DE MAR

Noble	Platino
o	Oro
Catódico	Grafito
	Plata
	Acero inox. 18-8, tipo 304 (pasivo)
	Acero inox. 13Cr, tipo 410 (pasivo)
	Aleación 76 Ni-16Cr-7Fe (pasiva)
	Níquel (pasivo)
	Soldadura de Plata
	Bronce (Cu-Sn)
	Cuproníquel 70-30
	Bronce al Silicio
	Cobre
	Latón rojo
	Latón admiralty
	Latón amarillo
	Aleación 60 Ni-30Mo-6Fe-1Mn
	Aleación 76 Ni-16Cr-7Fe (activa)
	Níquel (activo)
	Latón Naval
	Bronce al Manganesio
	Metal Muntz
	Estaño
	Plomo
	Soldaduras Pb-Sn
	Acero inoxidable 18-8, tipo 304 (activo)
	Acero inoxidable 13Cr, tipo 410 (activo)
	Hierro colado
	Hierro dulce
	Acero
	Aluminio 2024
	Aluminio 1100
Activo	Acero galvanizado
o	Aleaciones de Magnesio
Anódico	Magnesio

galvánica.

b) Que el contacto eléctrico de dos estructuras de diferente material en un medio conductor dé origen a la formación de una pila bimetalica.

c) Que en una estructura de un sólo material y libre de contacto eléctrico con otras estructuras, se formen los electrodos como consecuencia de alguno de los siguientes casos:

- Impurezas superficiales del material.
- Superficies alteradas por esfuerzos mecánicos en el material (deformaciones, concentración de esfuerzos como en los cordones de soldadura)
- Diferencia en el avance de oxidación (las partes nuevas casi siempre se comportan como zonas anódicas con respecto a las viejas).
- Diferencias en el electrolito causadas por diferencias en la concentración de oxígeno, en las sales disueltas, en la composición química o temperatura.
- Existencia de corrientes parásitas, como las que escapan de las líneas de transmisión y convierten en cátodos los puntos de entrada de la corriente a la estructura, y en ánodos los puntos de salida de ella.

## II.2.- NATURALEZA AGRESIVA DEL MEDIO AMBIENTE MARINO.

Por experiencia se sabe que en el medio ambiente marino los objetos construidos con acero al carbón, se deterioran rápidamente debido a la corrosión, y también se sabe que ésto sucede por la composición química del agua de mar.

En efecto, el agua de mar contiene en solución casi todos los elementos químicos, aunque en algunos casos en proporción mínima. Su salinidad varía entre 31 y 38 ‰ (cantidad total de sólidos disueltos en el agua, expresada como por ciento partes por mil, en peso), es ligeramente alcalina, con pH entre 8.0 y 8.4, y se encuentra en el rango de temperaturas entre -1.6 á 30°C (28 á 85°F).

En la tabla 3 (Gaythwaite, 1981) se muestra un análisis químico del agua de mar con salinidad de 35‰, como la que tiene el Golfo de México, en donde se puede apreciar que, por su mayor proporción, son once los elementos principales: siendo el cloro y el sodio, en forma de iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , los más abundantes; luego, también en forma iónica, el azufre en forma de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), el magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), el calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), el potasio ( $\text{K}^+$ ), el carbón ( $\text{HCO}_3^-$ ), el bromo ( $\text{Br}^-$ ), el estroncio ( $\text{Sr}^+$ ), el Boro ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y el flúor ( $\text{F}^-$ ).

El oxígeno disuelto en el agua es el elemento más - - -

T A B L A 3

COMPOSICIÓN DE AGUA DE MAR CON 35 ‰ DE SALINIDAD  
(EN ORDEN DE PESO ATÓMICO ASCENDENTE)

<u>Elemento</u>	<u>Microgramos por litro</u>
Hidrógeno	$1.10 \times 10^8$
Helio	0.0072
Litio	170
Estronio	0.0006
Boro	4,450
Carbono (inorgánico)	28,000
(disolvente orgánico)	500
Nitrógeno (disuelto en $N_2$ )	15,500,
(como $NO_3^-$ , $NO_2^-$ , $NH_4^+$ )	670
Oxígeno (disuelto en $O_2$ )	6,000
(como $H_2O$ )	$8.83 \times 10^8$
Flúor	1300
Neón	0.120
Sodio	$1.08 \times 10^7$
Magnesio	$1.29 \times 10^6$
Aluminio	1
Silicio	2900
Fósforo	88
Azufre	$9.04 \times 10^5$
Cloro	$1.94 \times 10^7$
Argón	450
Potasio	$3.92 \times 10^5$
Calcio	$4.11 \times 10^5$

<u>Elemento</u>	<u>Microgramos por litro</u>
Escandio	0.004
Titanio	1
Vanadio	1.9
Cromo	0.2
Manganeso	0.4
Fierro	3.4
Cobalto	0.39
Niquel	6.6
Cobre	0.9
Zinc	5
Galio	0.03
Germanio	0.06
Arsénico	2.6
Selenio	0.090
Bromo	$6.73 \times 10^4$
Criptón	0.21
Rubidio	120
Estroncio	8,100
Itrio	0.013
Circonio	0.026
Niobio	0.015
Molibdeno	10
Rutenio	0.0007
Rodio	
Paladio	
Plata	0.28
Cadmio	0.11
Indio	
Estaño	0.81
Antimonio	0.33
Telurio	
Yodo	64

<u>Elemento</u>	<u>Microgramos por Litro</u>
Xenón	0.047
Cesio	0.30
Bario	21
Lantano	0.0029
Cerio	0.0012
Praseodimio	0.00064
Neodimio	0.0028
Samario	0.00045
Europio	0.0013
Gadolinio	0.00070
Terbio	0.00014
Disproseo	0.00091
Holmio	0.00022
Erbio	0.00087
Tulio	0.00017
Yterbio	0.00082
Lutecio	0.00015
Hafnio	0.008
Tantalio	0.0025
Tungsteno	0.001
Renio	0.0084
Osmio	
Iridio	
Platino	
Oro	0.011
Mercurio	0.15
Talio	
Plomo	0.03
Bismuto	0.02
Radio	$1 \times 10^{-7}$
Torio	0.0004
Protactinio	$2 \times 10^{-7}$
Uranio	3.3

importante a su participación en la corrosión de los metales. El contenido de éste elemento varía directamente con la profundidad, aunque también depende de otras variables tales como la flora y las corrientes del medio.

La gran variedad de elementos químicos hacen del agua de mar un buen electrólito, lo que se traduce como un buen agente corrosivo comunmente denominado medio agresivo. Lo anterior obliga a una especial atención en el diseño de las estructuras, especialmente cuando son de acero y se desea una vida útil considerable. El agua de mar es posiblemente uno de los medios naturales más corrosivos (especialmente cuando está aereada), ya que su elevado contenido de sales disueltas hace de ella un electrólito de gran conductividad, esto es, con resistividades del orden de 20 Ohms/cm en promedio.

Cabe mencionar que en el caso de estructuras instaladas mar adentro, la profundidad a la que se encuentren sus elementos es un factor de mucha importancia, ya que a lo largo de ella existirán diferencias en las variables temperaturas, concentración de oxígeno y salinidad de agua, y por lo tanto en la agresividad del medio.

La corrosión del acero en el agua de mar a menudo sigue una distribución vertical característica, la cual puede variar con la zona geográfica. La velocidad de corrosión, por ejem--

plo, en un pilote vertical es típicamente de ligera a moderada, en la parte superior expuesta únicamente al aire, y solo existe corrosión uniforme (ataque general) por la humedad atmosférica. En la zona llamada de salpicadura, donde la estructura se moja y se seca intermitentemente, y la película protectora de corrosión resulta continuamente atacada, la velocidad de corrusión es máxima, quizá de 3 á 5 veces más severa que la debida solo a exposición atmosférica. En la zona entre mareas - - (abajo del nivel medio de marea alta y arriba del nivel medio de marea baja) la corrosión disminuye casi al mínimo, ya que - la estructura se protege por el efecto de la celda de concen--tración de oxígeno (o sea, funciona como cátodo:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ ); sin embargo, en algunas estructuras distintas - de los pilotes verticales, el ataque corrosivo puede ser seve--ro. La velocidad de nuevo se incrementa en la zona continua--mente sumergida, especialmente en las capas superiores donde - hay abundancia de oxígeno con respecto a los inferiores, o --- cuando hay fuertes corrientes que aceleran el efecto galvánico. Por debajo de la línea de fondo, la corrosión se hace mínima, ya que hay poco oxígeno y las películas protectoras permanecen intactas. En la figura 6 se muestra el patrón característico - en una estructura vertical (pilote de acero).

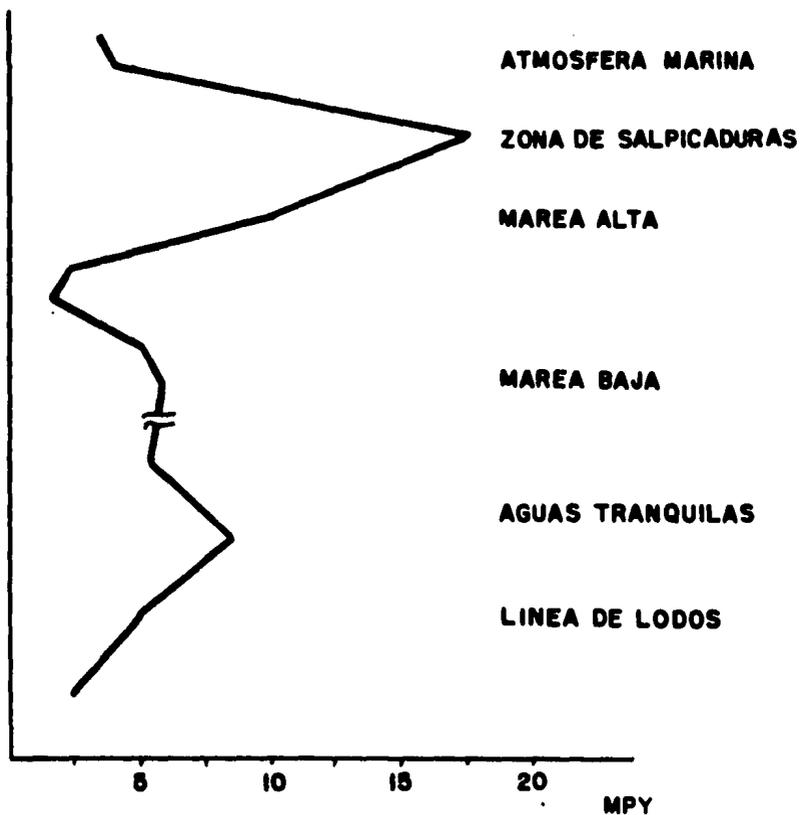


Fig. 6.- Velocidades típicas de corrosión de un pilote de acero en agua de mar (en milésimas de pulgada por año, MPY).

### II.3.- TIPOS DE CORROSION.

En el estudio de la corrosión se han dado numerosas clsificaciones, las cuales ubican al proceso en cuanto a:

- a) La naturaleza del medio agresivo
- b) El origen de la corrosión
- c) La apariencia de la superficie corroída..

a) La clasificación en cuanto a la naturaleza del medio corrosivo comprende dos tipos: Corrosión húmeda y corrosión seca.

El primer tipo, como su nombre lo indica, se presenta - sólo en superficies en contacto con un medio donde exista la - humedad, o bién, en superficies sumergidas. De forma similar, la corrosión seca es aquella que aparece en medios con bajo -- contenido de humedad o sin ésta. El fenómeno de corrosión en ambientes secos es muy lento, excepto cuando se trata de gases corrosivos a muy altas temperaturas, por lo que no se le dedica atención en presente trabajo.

b) La segunda clasificación, en cuanto a su naturaleza, comprende también dos tipos: corrosión química y corrosión --- electroquímica.

Cuando los compuestos químicos del medio reaccionan con

los de la estructura se tiene una corrosión química. Por ejemplo, un metal en una solución ácida ( $\text{Fe}^{++} + 2\text{HCl} \longrightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2$ ) donde los hidrógenos hacen la función del ánodo.

La corrosión electroquímica es aquella donde las reacciones medio estructura son del tipo electroquímico, es decir, donde simultáneamente se presentan los fenómenos de oxidación y reducción. La corrosión electroquímica puede ser inducida o natural, esto es, electrolítica o galvánica (figura 7; corrientes parásitas).

La corrosión electrolítica es el resultado de una corriente eléctrica directa (proveniente de una fuente externa), que entra y sale de la estructura metálica instalada en un electrólito. En los puntos por donde sale la corriente ocurre la corrosión.

La corrosión galvánica aparece cuando una corriente eléctrica se genera en el mismo metal de la estructura por una diferencia de potencial eléctrico en él. Esta corriente va del metal al electrólito y de éste al metal, comportándose en igual forma que en los puntos donde la corriente sale de la estructura, pues ahí es donde la corrosión aparece (figura 5; pila galvánica).

c) La apariencia de las superficies metálicas permite -

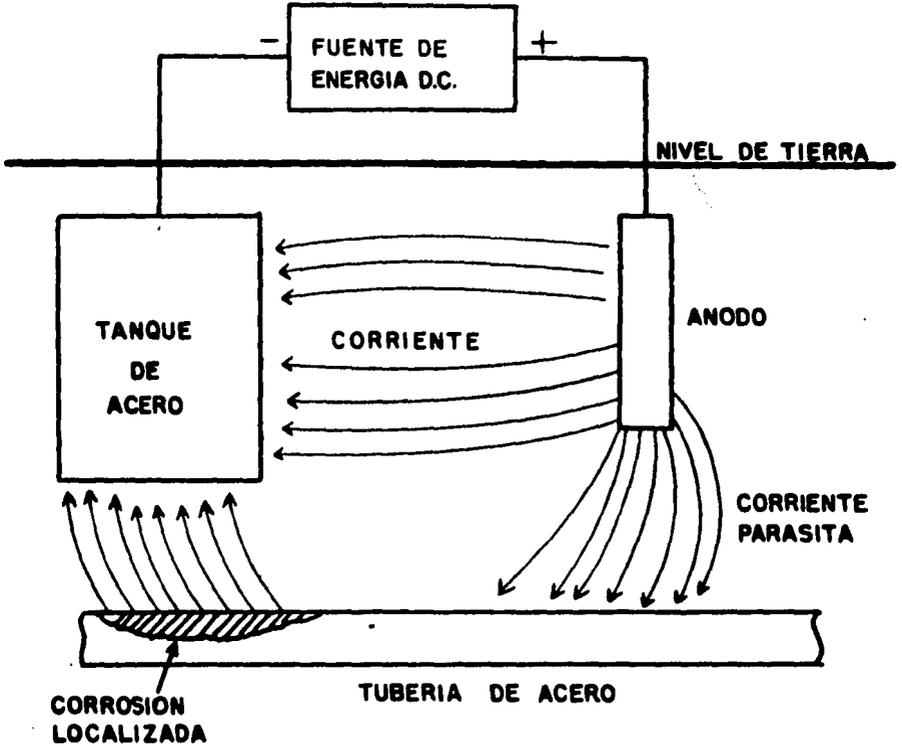


Fig. 7.- Mecanismo de corrosión por corrientes parásitas.

clasificar la corrosión como:

- Corrosión uniforme. Una superficie corroída uniformemente es aquella que ha sido atacada en su totalidad a la misma velocidad (relación entre penetración al material por unidad de tiempo).
  
- Corrosión localizada. Cuando los efectos de la corrosión solo se manifiestan en zonas específicas de la superficie expuesta al medio corrosivo. Se caracteriza por ser muy frecuente, impredecible y por la alta velocidad de corrosión que produce fallas prematuras en las estructuras. Este tipo de corrosión se subclasifica en: Corrosión macroscópica local, aquella que con una inspección visual se puede detectar, y corrosión microscópica local, que en apariencia exterior es mínima pero en forma interna ha destruido la estructura (un caso particular de éste tipo es la conocida disolución selectiva).

Otra clasificación de la corrosión en cuanto a su apariencia es:

- Corrosión generalizada o uniforme
- Corrosión en grietas
- Corrosión intercrystalina

- Corrosión en picaduras
- Corrosión por disolución selectiva
- Corrosión-erosión
- Corrosión bajo tensión.

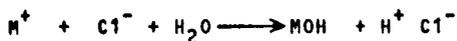
A continuación se describen en forma condensada las características principales de cada uno de éstos tipos de corrosión:

- Corrosión generalizada. Como se describió la corrosión uniforme (clasificación anterior).
- Corrosión en grietas. La corrosión en grietas, también conocida como corrosión en empaques, se da cuando la geometría de las estructuras metálicas permiten estancamientos de solución corrosiva. Estos estancamientos pueden ser, por ejemplo: los que se forman cuando hay picaduras u hoyos en la superficie, en las juntas, en los empaques porosos o en aislamientos anticorrosivos defectuosos.

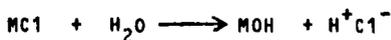
En el caso particular de las estructuras metálicas en contacto con agua de mar, éste tipo de corrosión empieza con la oxidación del metal de la estructura en forma uniforme (incluso en las grietas), desprendiéndose iones metálicos ( $M^+$ ), con la correspondiente reducción del oxígeno disuelto en el medio. Al principio el equilibrio entre los iones metal e iones

$\text{OH}^-$  se mantiene en todo el sistema de manera uniforme. Después de algún tiempo de incubación muy variable de acuerdo a la situación, la concentración de oxígeno disuelto en la solución contenida en la grieta disminuye, de modo que la reducción de  $\text{O}_2$  y la producción de  $\text{OH}^-$  es menor en esta zona (debido al estancamiento del medio corrosivo). Como consecuencia de la disminución de concentración de iones  $\text{OH}^-$  se produce un exceso de iones positivos metálicos en la grieta no realizándose la reacción catódica (reducción del oxígeno). Esta situación origina dos zonas con diferente potencial eléctrico (el interior de la grieta positivo y la vecindad de ella negativo), formándose entre éstas un campo eléctrico superficial a la estructura. Este campo eléctrico atrae iones negativos hacia la grieta, principalmente iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) dado que estos son más electronegativos que los iones  $\text{OH}^-$ , por lo que en la grieta se incrementa la concentración de ácido clorhídrico.

La reacción es la siguiente:



Al aumentar el pH las sales de metales se disocian de acuerdo a la reacción



Debido a reacciones como las anteriores, la concentra--

ción de iones metálicos disminuye en la fase líquida, es decir, la disolución del metal se acelera.

Fuera de la grieta se realiza la reducción del oxígeno, lo que protege catódicamente los alrededores de la grieta.

- Corrosión intercrystalina. Se trata de un tipo de corosión local originada por la formación de pilas galvánicas entre los límites de grano y el interior de éstos.

Partiendo de que los límites de grano son más reactivos que el interior del grano, en algunos casos ocurre corrosión intercrystalina que ataca solamente los límites, ocasionando la separación de los elementos que forman la aleación y con esto una disminución de la resistencia mecánica del material.

La actividad de éstos límites de grano puede ser originada por alguna de las siguientes causas:

- 1) Impurezas en el límite de grano del material
- 2) Enriquecimiento de un elemento de la aleación en los límites de grano.
- 3) Empobrecimiento de un material de la aleación en los límites de grano del material.

Las anteriores causas se originan en la solidificación del material.

Un ejemplo de éste tipo de corrosión se tiene en el latón, donde los límites de grano son más susceptibles a la corrosión por ser más ricos en zinc que en el interior de éstos.

- Corrosión en picaduras. Esta forma de corrosión se caracteriza por ser la que produce mayor daño, la de mayor incidencia y capaz de producir el menor desgaste de material. Se manifiesta por pequeñas perforaciones (picaduras) en el material, ya sea aisladas o en zonas hasta dar lugar a superficies rugosas. Es una de las formas de corrosión más perjudicial, ya que en el caso de tuberías, una sola perforación puede significar la falla del sistema. En forma general, las picaduras tienen la forma de cavidades semiesféricas, es decir, la profundidad de la cavidad es similar al diámetro superficial de agujero. Este tipo de corrosión es impredecible y con muy alta velocidad, por lo que es muy difícil detectarla por exámenes superficiales, aunado a que por lo general los orificios están tapados con los productos de la corrosión.

A continuación se describe por el cual se forma una picadura en una estructura metálica sumergida con agua de mar :

La estructura pasa un tiempo de incubación donde la corrosión apreciablemente no hace daño alguno, o esta es uniforme. El tiempo es variable según el material y la naturaleza del medio corrosivo. Al iniciarse la picadura el proceso es autocatalítico, es decir, que la corrosión se ve favorecida -- por efecto de las propias reacciones electroquímicas, resultando así que la velocidad de corrosión se va incrementando con el tiempo. La reacción en una picadura es de tipo anódica y el mecanismo es el siguiente:

Cuando el metal esta siendo perforado por agua de mar - aereada, al inicio, una rápida disolución ocurre dentro del hoyo, mientras que la reducción del oxígeno se realiza en las superficies adyacentes. La rápida disolución del metal dentro - de la cavidad conduce a que se forme una alta concentración de iones metálicos ( $M^+$ ) por falta de concentración de oxígeno - - ( $O_2$ ) hacia la picadura, se crea un campo eléctrico superficial que atrae, por su mayor movilidad en el medio, iones cloruro - ( $Cl^-$ ), teniéndose así en esta gran concentración de  $M^+Cl^-$ . Como consecuencia de la concentración de  $M^+Cl^-$  en la picadura, - se lleva a cabo la disolución de las moléculas de agua en iones  $H^+$  y  $OH^-$  (hidrólisis), los  $OH^-$  reaccionan con los  $M^+$  para formar  $M(OH)$  (precipitado generalmente), con lo que se incrementa el grado de acidéz del medio corrosivo contenido en la - cavidad. La disolución de metal se propicia con la gran cantidad de iones  $H^+$  y  $Cl^-$  que resulta.

La reacción catódica correspondiente se lleva a cabo en el resto de la superficie del metal que está en contacto con el medio (fuera de la picadura).

La corrosión en picaduras tiene un mecanismo muy similar al de la corrosión en grietas, de hecho, puede considerarse un caso particular de esta última. La corrosión en picaduras tiende a hacer perforaciones en el sentido de la gravedad.

- Corrosión por disolución selectiva. En la corrosión selectiva, como su nombre lo indica, el medio corrosivo "selecciona" un elemento de la aleación del metal para disolverlo y llevar a cabo la oxidación. Un caso típico es la desinquización (también llamada desincificación) que se da en el latón, donde el zinc es removido. Otros materiales que comunmente sufren este tipo de corrosión son el hierro colado y el aluminio.
  
- Corrosión erosión. Cuando se ve incrementada la velocidad de corrosión por los efectos del movimiento relativo entre el medio y la superficie metálica, se dice que ésta sufre el fenómeno de erosión-corrosión. Si el movimiento relativo es grande, las superficies se ven afectadas por un desgaste mecánico o por abrasión debido a que los productos de la corrosión son -

removidos por el flujo. Una superficie bajo este tipo de ataque presenta en su apariencia ondulaciones, muescas, hoyos redondos y generalmente un patrón direccional, lo que permite la detección inmediata de este fenómeno. Algunos materiales son, en forma especial, susceptibles a este tipo de corrosión. Principalmente aquellos que su velocidad de corrosión depende de la formación de una capa protectora formada por los propios productos de la corrosión, entonces, si el flujo arrastra o disuelve a éstos últimos, la corrosión aumenta. El aluminio, el plomo y algunos aceros inoxidables son ejemplos clásicos de materiales que forman capas protectoras con los productos de su corrosión.

Por otra parte, cuando se lleva a cabo la reducción de los iones hidrógeno en las zonas catódicas, en esta se forma una capa de gas hidrógeno ( $H_2$ ) que reduce la actividad de las reacciones (polarización). Si hay movimiento relativo fuerte, esta capa es disuelta y las reacciones mantienen su velocidad.

El fenómeno de reducción o paro de la velocidad de las reacciones por la formación de una capa o película protectora, es debida a los efectos de polarización o pasivación respectivamente.

- Corrosión bajo tensión. La ruptura por corrosión bajo tensión es causada por la presencia simultánea de esfuerzos tensionales y un medio corrosivo específico.

Cuando se está presentando la ruptura por corrosión bajo tensión, el metal o la aleación están virtualmente no afectados sobre la mayor parte de su superficie, mientras que finas rajaduras (grietas) progresan a través del material.

Las rajaduras generalmente proceden perpendiculares a la dirección de la tensión. Como norma se tiene que el aumentar la tensión disminuye el tiempo a que la estructura falle.

Lo más importante para evitar la fractura de estructuras sometidas a corrosión bajo tensión, es aplicar protección anticorrosiva del tipo catódico.

#### II.4.- DIFERENTES METODOS PARA EL CONTROL DE CORROSION.

Los procedimientos más utilizados para controlar la corrosión electroquímica se puede agrupar en los siguientes métodos:

- a) Sobrediseño de las estructuras
- b) Utilización de recubrimientos
- c) Uso de materiales resistentes a la corrosión
- d) Diseño anticorrosivo (geométrico)
- e) Modificación del ambiente corrosivo
- f) Protección anódica
- g) Protección catódica. Protección catódica base.

Cada uno de los métodos mencionados tiene características especiales que los harán indicados para determinadas situaciones, así como su cualidad de ser complementarios o suficientes.

La elección de método (o combinación de éstos) es función de numerosos factores, tales como las características geométricas de las superficies por proteger, las condiciones de operación de éstas (temperatura, presión, fricción; etc.), la apariencia deseada, la agresividad del ambiente, el presupuesto, etc.

A continuación se ve en que consiste cada uno de éstos

métodos:

a) Sobrediseño de las estructuras.

Con el conocimiento previo de que la estructura por diseñarse va a estar expuesta a un medio agresivo, y que la corrosión es un fenómeno que se presenta en forma natural, al diseñarse las estructuras se considera a éste fenómeno como un factor de diseño.

Este factor de diseño, que no es más que un sobrediseño de la estructura, consiste en modificar las dimensiones requeridas para compensar los efectos de la corrosión a lo largo de la vida esperada de la estructura.

Este método se basa en el supuesto de que la corrosión será del tipo uniforme y que la velocidad de ésta permanecerá constante. Bajo éstas suposiciones se puede determinar la penetración que se tendría en la estructura a lo largo de la vida útil proyectada, donde el sobrediseño de las superficies es equivalente a dicha penetración. De esta forma, la estructura asegura una vida útil independientemente de los ataques por corrosión. En general, el grosor de las paredes se diseña del doble del grosor que daría la vida útil. Por ejemplo. Si una vida útil de 10 años se requiere en un tanque, y se conoce que la velocidad de corrosión es de 3.17 mm/año (1/8"; aproximada-

mente 0.12 mpy), entonces el tanque se diseñará con un grosor de 6.35 mm (1/4"). Tal factor de diseño permite variaciones en la profundidad de penetración durante el ataque por corrosión uniforme, la cual en la mayoría de los casos no es completamente uniforme.

Aunque el método lleva a proyectos de elevado costo, es una práctica de uso común.

#### b) Utilización de recubrimientos

Uno de los primeros procedimientos empleados para conservar las estructuras construidas en base al acero, fué el de poner recubrimientos con el fin de evitar el contacto entre las superficies y el medio corrosivo.

Después, ya determinada la naturaleza electroquímica de la corrosión de las superficies metálicas, se empezaron a utilizar recubrimientos con propiedades dieléctricas que "aislan" las superficies del medio, y así evitar el flujo de corriente eléctrica que origina la corrosión.

Existe una gran variedad de éste tipo de recubrimientos, de donde sobresalen los de origen orgánico como los alquitranes, bitúmenes, resinas, pinturas, etc. y los que provienen de la química sintética, que en un espesor de recubrimiento rela-

tivamente pequeño proporcionan una alta resistencia eléctrica.

Los recubrimientos metálicos tienen hasta ahora una limitada aplicación, siendo el recubrimiento de zinc el único -- utilizado en forma común para estructuras de acero por su gran adherencia.

Además de las características eléctricas, un buen recubrimiento debe tener cualidades no menos importantes como mecánicas (flexibilidad, resistencia, etc.), adherencia, bajo índice de absorción de humedad, estabilidad química, inmunidad al ataque de bacterias, etc.

En la selección del recubrimiento exterior que conviene aplicar a una estructura metálica que va a ser protegida catódicamente contra la corrosividad del medio marino, es necesario distinguir dos casos en cuanto a la extensión de la superficie desnuda:

- 1) Ducto submarinos.- Por lo general las líneas de conducción que se tienden en el mar, enterrándolas o no, llevan dos recubrimientos, los cuales se aplican en una planta en tierra. El primero de ellos es anticorrosivo, impermeable y de adecuada resistencia dieléctrica y, el segundo consiste en una capa de concreto reforzado con malla de alambre y lastrado con mineral (ilmenita) o finos de hierro para evitar la

flotación de la tubería vacía, especialmente cuando es de 12 pulgadas de diámetro o mayor y para su estabilidad frente al oleaje y corrientes. Esta capa de concreto sirve para proteger mecánicamente el recubrimiento anticorrosivo. No obstante que el área desnuda de la tubería así protegida, y después de su tendido, es menor del 0.5 %, la mayoría de los diseñadores la consideran de 5 % hasta 10 %, en previsión del posible daño causado por efectos de las corrientes submarinas y por esfuerzos que pudieran dañar el recubrimiento anticorrosivo.

ii) Subestructuras Marinas.- Dado que las subestructuras marinas se arman en talleres localizados en la costa, para después ser remolcados hasta el sitio de su erección, lo cual se hace mediante maniobras de izaje con grúas y al hecho de que algunas de sus partes, como los pilotes, se sujetan a fuertes fricciones contra el suelo durante su hincado, el recubrimiento que se aplica para la protección anticorrosiva de los elementos estructurales de muelles, plataformas petroleras y boyas tiene características diferentes de las que se especifican para los ductos, buscándose ante todo su resistencia mecánica a impactos, a la acción química del agua de mar, que sean impermeables y que el grosor de su capa no incremente la - -

resistencia del elemento estructural al oleaje o a las corrientes de agua (por significar carga adicional a la estructura). Aún cuando los recubrimientos colocados en tierra tengan propiedades dieléctricas, en la práctica no se les considera como aislantes eléctricos. Por lo que, para fines de diseño de la protección catódica de una subestructura, se supone ésta totalmente desnuda.

Los recubrimientos anticorrosivos más usados para proteger ductos son: el esmalte de alquitrán de hulla y el asfalto. El procedimiento de su aplicación es, por lo general, el siguiente: Aplicación de un primario (pintura en base a hule clorado o alquitrán de hulla que se utiliza para obtener máxima adherencia entre el recubrimiento anticorrosivo y el ducto) sobre una superficie exenta de óxido, grasa, polvo y seca siguiendo normas de aplicación (PEMEX, 1974); aplicación del recubrimiento (en caliente) e, inmediatamente después, una capa de tela de fibra de vidrio que se impregna del recubrimiento (actuando como refuerzo de éste); y por último, se cubre con una cinta de fieltro de tela de vidrio saturada con el mismo esmalte o asfalto utilizado. Algunos fabricantes de éstos recubrimientos han utilizado con éxito asfalto o alquitrán de hulla lastrado con arena. También se emplean en líneas submarinas recubrimientos a base de plástico fundido, extruido o de -

cinta de polietileno enrollado, aunque con ciertas objeciones debido a que el concreto perfora la capa aislante durante su aplicación.

Los elementos estructurales en contacto con agua de mar por lo general se protegen con un recubrimiento primario, 100% inorgánico de zinc, postcurado o autocurado, aplicado en tálamo sobre una superficie que ha sido preparada de acuerdo a las normas establecidas (PEMEX, 1974).

La zona de marea y oleajes se protege con un recubrimiento 100% de sólidos a base de resina epóxica, pigmentos e inertes. Algunos diseños específicos en lugar de éste recubrimiento deciden la colocación en planta de una capa de neopreno de media a una pulgada de espesor, otros una placa de monel.

En algunas zonas, donde la temperatura del agua y las condiciones de corriente y oleaje son propicias, la bioacumulación crece desde la zona de salpicaduras hasta los 40 m. de profundidad; formándose con espesores de 20 a 25 centímetros (8 a 10 pulg.) en las zonas superiores de la subestructura, en los tubos de succión de agua (risers) y ductos conductores de los productos manejados, además de agregar un peso hasta de 2312 kg/m<sup>3</sup>. (144 lb/ft<sup>3</sup>). Para estas zonas se han utilizado recubrimientos a base de cobre/niquel aplicados sobre una capa de material aislante (U.S. offshore operation, 1983) con el --

fin de controlar la bioacumulación.

c) Uso de materiales resistentes a la corrosión

Basándose en el comportamiento natural de algunas combinaciones metal-medio ambiente, se ha descubierto un método muy efectivo para controlar la corrosión. En éstas combinaciones el fenómeno de la corrosión es nulo o bien, presenta una baja velocidad. Como ejemplos se pueden citar al ácido sulfúrico concentrado y el plomo, los medios caústicos y el níquel (o sus aleaciones).

En forma general, se tiene las siguientes reglas para las combinaciones no activas entre el metal y el medio corrosivo.

- "Si el medio se comporta como reductor y no como oxidante, el níquel o el cobre y sus aleaciones pueden ser utilizadas"
- "Para condiciones ambientales oxidantes, las aleaciones con alto contenido de cromo"
- "Cuando se tiene un medio muy corrosivo (altamente oxidante) se utiliza el titanio y sus aleaciones"

Actualmente los ductos de aleaciones de cobre/níquel han demostrado en el Mar del Norte y Golfo de México ser resis

tentes a la corrosión por picaduras y bioacumulación (Albaugh, 1984). El titanio, de reciente introducción en el medio marino, ha demostrado ser mucho muy resistente a la corrosión, tanto en aguas estáticas como a alta velocidad. Sobre el titanio no hay bioacumulación y posee la propiedad de ser un metal -- fuerte, ligero y no magnético, con un módulo de elasticidad -- aproximadamente de la mitad del acero. Por lo anterior, y por otras cualidades, el titanio puede competir en precio, a valor presente, con los materiales a base de cobre o aceros inoxidable (Gilbert, 1984).

En el caso de estructuras metálicas y de elementos de refuerzo del mismo material, la elección de éste está en función de variables tales como las propiedades mecánicas, el peso, el costo de material, etc., y no es posible, en la mayoría de los casos, utilizar dichas combinaciones. Para determinadas piezas, donde no intervienen directamente las variables mencionadas, este método resulta totalmente eficiente para evitar la corrosión.

El utilizar materiales de mayor pureza reduce la posibilidad de formación de celdas bimetálicas en el material, con lo que se logra una prevención de la corrosión.

#### d) Diseño anticorrosivo

Este procedimiento anticorrosivo vigila la geometría de

la estructura para evitar lugares de estancamiento del medio corrosivo, y cuida que los materiales empleados en su construcción no sean susceptibles a la formación de pilas galvánicas activas. Además, el diseño anticorrosivo procura que toda la superficie sea accesible para la limpieza y para la aplicación de recubrimientos.

En base a éste procedimiento, una estructura tendrá un buen diseño anticorrosivo si cumple con las siguientes recomendaciones:

- Evitar el contacto de materiales diferentes cuando és tos van a quedar expuestos al medio corrosivo. Si no es posible, tratar que los materiales utilizados tengan lugares próximos en la tabla o serie galvánica.
- Dado que son las zonas anódicas las que sufren corrosión, vigilar la relación entre éstas áreas y las catódicas (mientras mayor es la diferencia de superficies más acelerada será la oxidación).
- Utilizar siempre que sea posible soldadura en vez de remaches, las uniones remachadas siempre propician lu gares de estancamiento de las soluciones corrosivas.
- Aislar eléctricamente las estructuras de otras y del medio. Si es posible, emplear uniones aislantes para los propios elementos de la estructura (el fracciona-

miento de éstas facilita en gran forma la protección anticorrosiva).

- Diseñar tanques y contenedores de manera que tengan drenado fácil y accesibilidad para limpieza.
- Diseñar los sistemas de modo que sea fácil el reemplazo de piezas que se esperan que fallen rápido.
- Evitar tensión mecánica excesiva y concentración de esfuerzos en los componentes que están expuestos a medios corrosivos.
- Evitar, en tuberías donde fluyen corrosivos, giros -- drásticos, que éstos promueven la erosión corrosión.
- Evitar puntos calientes durante procesos de transferencia de calor; hay que hacer los gradientes suaves.
- Diseñar de modo tal que el aire no se mezcle. La reducción del oxígeno es una de las reacciones catódicas más comunes, y si el oxígeno es eliminado, la corrosión puede ser reducida o evitada.

La regla más general para el diseño anticorrosivo es: - evitar heterogeneidad. Metales disimilares, espacios con vapor, distribución desigual de esfuerzos y de calor constante. Por lo tanto, cuando se diseña, se debe intentar hacer todas las condiciones tan uniformes como sea posible a través del siste-

ma entero.

El método "diseño anticorrosivo" es considerado como el mejor método complementario de prevención.

e) Modificación del ambiente corrosivo

En determinadas situaciones es posible prevenir los - - efectos de la corrosión sin tener que modificar o adaptar las estructuras. Esto será posible siempre y cuando se pueda "neutralizar" el efecto oxidante del medio que va estar en contacto con la estructura.

La alteración del medio puede ser de naturaleza física o química.

En el primer caso destacan la temperatura y la velocidad del medio corrosivo por ser variables determinísticas en - cuando a la velocidad de corrosión.

El comportamiento de la actividad anódica con respecto a la temperatura del medio corrosivo varía según el material y la composición química de la solución. En algunos casos la relación es función inversa (dado que la solubilidad del oxígeno disuelto disminuye al aumentar la temperatura); en otros, la - actividad no se ve afectada; pero en forma general, al incrementarse la temperatura se incrementan las reacciones de oxidación.

La velocidad relativa entre el medio y la superficie metálica favorece, en forma general, al fenómeno de la corrosión. De forma muy significativa en los casos donde el flujo arrastra los productos de la corrosión y las capas protectoras de los metales. La corrosión-erosión es consecuencia típica de altas velocidades relativas.

En cuanto a las modificaciones de naturaleza química, el cambio en la concentración, la eliminación de los agentes agresivos y el uso de inhibidores en el medio corrosivo, son los procedimientos con mayor impacto sobre la velocidad de corrosión.

Mediante el análisis químico de los productos de la corrosión se puede determinar que compuestos y/o elementos químicos del medio son los que le dan la característica de agresivo. Con la eliminación o disminución de dichos agentes corrosivos se logra un efectivo control de la corrosión.

La concentración de los compuestos corrosivos determinan casi siempre el grado de actividad del medio, sin embargo, algunas soluciones ácidas se vuelven más agresivas cuando se diluyen, como en el caso del ácido sulfúrico contenido en envasas de plomo.

Si el medio corrosivo que va a estar en contacto con la estructura no permite la eliminación de sus agentes agresivos,

se puede lograr un aceptable control de la corrosión si se --  
agregan al medio sustancias químicas-inhibidores que disminu--  
yen -inhiben- la actividad electroquímica de la corrosión. Los  
inhibidores realizan su función por uno o la combinación de --  
los siguientes mecanismos:

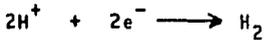
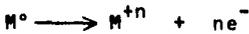
- i) Impidiendo las reacciones anódicas (disolución del -  
metal) mediante la formación de una intercapa super-  
ficial metal-inhibidor. Estos inhibidores, por su -  
suceptibilidad a ser absorbidos por el metal, se les  
conoce como "inhibidores de absorción".
  
- ii) Impidiendo las reacciones catódicas, principalmente  
las reacciones de reducción del hidrógeno por medio  
de agentes retardadores.
  
- iii) Aumentando la concentración de oxidantes para que el  
metal alcance la pasivación.

Es importante recordar que los inhibidores son especifi-  
cos en términos del metal, medio ambiente, temperatura y rango  
de concentración: y algunos inhibidores muestran efectos siner-  
géticos. La tabla 4 muestra algunos ejemplos.

#### f) Protección Anódica

De acuerdo con las dos siguientes reacciones (un metal

en un electrólito):



Parecerá que al aplicar corriente anódica a la estructura tenderá a incrementar la corrosión del metal (disolución) y disminuir la velocidad de evolución del hidrógeno. Esto generalmente ocurre excepto para metales que muestran transición - activo-pasivo, tales como el níquel, fierro, cromo, titanio y sus aleaciones. Si corrientes anódicas cuidadosamente controladas son aplicadas a éstos materiales, lográndose la pasivación, entonces la velocidad de disolución del metal es disminuida.

Para proteger una estructura anódicamente se usa un instrumento conocido como potentiostato; este aparato es un dispositivo electrónico que mantiene el metal a un potencial constante con respecto a un electrodo de referencia.

En la figura 8 se muestra el efecto de la pasivación de un metal en función del poder oxidante de una solución (potencial eléctrico). De ésta figura se ve que al aumentar la demanda de electrones, o la salida de éstos de la estructura, el metal tiende a la pasivación.

T A B L A 4

Ejemplos de sistemas Inhibidor - Medio - Metal.

Medio	Inhibidor	Metal por proteger	Concentración
Agua Potable	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Hierro fundido y acero	10 PPM
	Polifosfato	Fe, Zn, Cu, AL	5-10 PPM
	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Fe, Zn, Cu	Suficiente - para tener - PH 8.0
Agua de enfriamiento	$\text{Na}_2\text{CrO}_4$	Fe, Zn, Cu	0.1 %
	$\text{NaNO}_2$	Fe	0.05 %
	$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	Fe	1 %
Agua de mar	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	Zn	10 PPM
	$\text{NaNO}_2$	Fe	0.5 %
	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Todos	Dependiendo - del PIR
Acidos HCl	Ethylaniline	Fe	0.5 %
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Phenylacridine	Fe	0.5 %

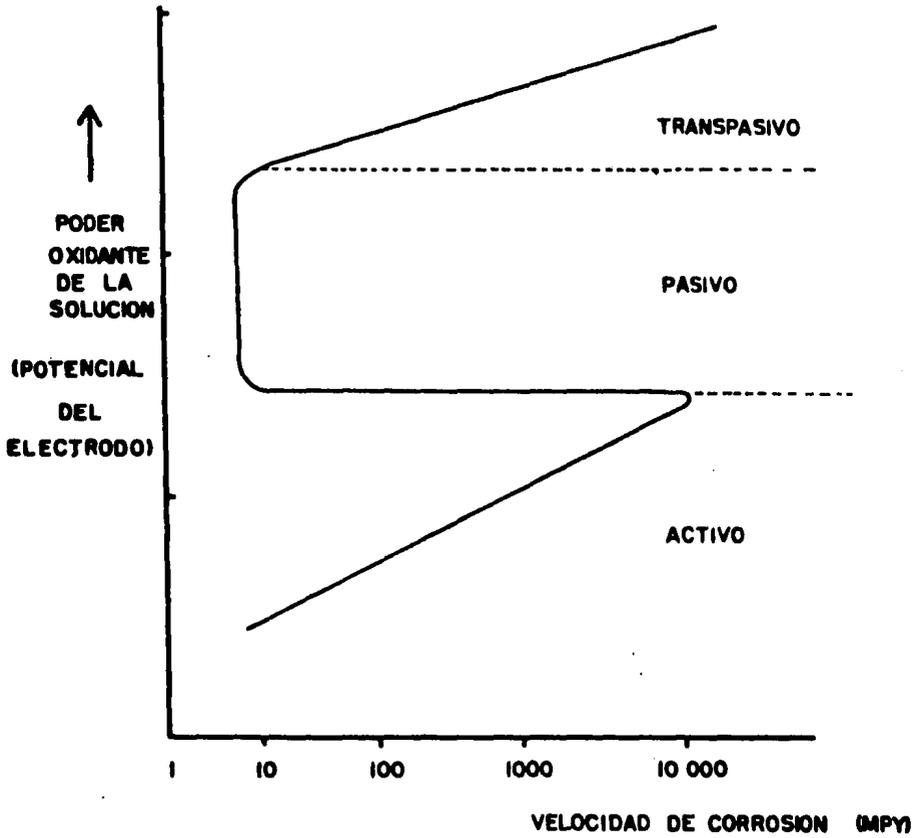
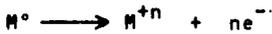


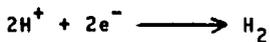
Fig. 8.- Velocidad de corrosión característica de un metal activo-pasivo, como función del poder oxidante de una solución.

g) Protección Catódica. Protección Catódica base.

Protección catódica. Este procedimiento tiene como fundamento la naturaleza electroquímica de la corrosión. Los principios de la protección catódica se explican considerando la corrosión típica de un metal M en un medio ambiente ácido, donde la disolución del metal y la evolución del hidrógeno ocurren.



Reacción Anódica



Reacción Catódica

La protección catódica se logra aportando electrones a la estructura metálica que se desea proteger. Al examinar las dos ecuaciones anteriores se ve que la adición de electrones tenderá a suprimir la disolución del metal y a incrementar la velocidad de la evolución del hidrógeno. Ya que la corriente fluye del polo positivo al negativo, como es convencional en la teoría eléctrica, entonces la estructura estará protegida si la corriente entra del electrolito a la estructura.

Existen dos caminos para proteger catódicamente una estructura:

- i) Con una fuente de energía externa, figura 10, y
- ii) Con el acoplado galvánico apropiado (un metal más --

anódico que la estructura, figura 9).

A éstos sistemas de protección se les denomina "de corriente impresa" y "por ánodos de sacrificio" respectivamente.

En la mayoría de los casos es suficiente con este procedimiento anticorrosivo para lograr un efectivo control de la oxidación de las estructuras, pero resultan sistemas de protección relativamente caros y voluminosos. En la práctica es común combinar éste procedimiento con otros de los mencionados, lográndose sistemas de protección 100% eficientes, de gran confiabilidad y, sobre todo, económicos.

Protección catódica base. En los años 1930 se estableció en forma empírica que si se mantenía una tubería a un potencial de  $-0.85$  volts respecto a una celda de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , el fenómeno de corrosión se prevenía totalmente. Más recientemente el National Bureau of Standards (USA) en 1951, publicó los datos experimentales del criterio que se debe adoptar para la protección catódica de estructuras ferrosas enterradas. De este estudio se concluyó que si cualquier estructura enterrada se mantiene a un potencial de  $-0.529$  volts respecto al electrodo de hidrógeno, estará protegido de la corrosión (Guerrero et al, 1968). Este último valor si lo refieren al potencial del  $\text{Cu}^{+2}/\text{CuSO}_4$  es de  $0.529 + 0.340 = 0.869$  que es ligeramente mayor al que se aplicaba en los años 30. A esto se le conoce --

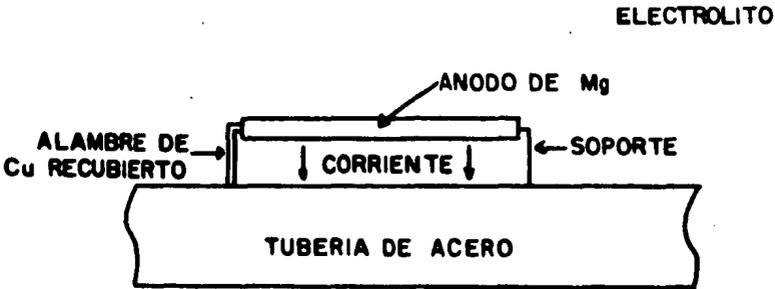


Fig. 9.- Protección catódica a base de ánodo de sacrificio.

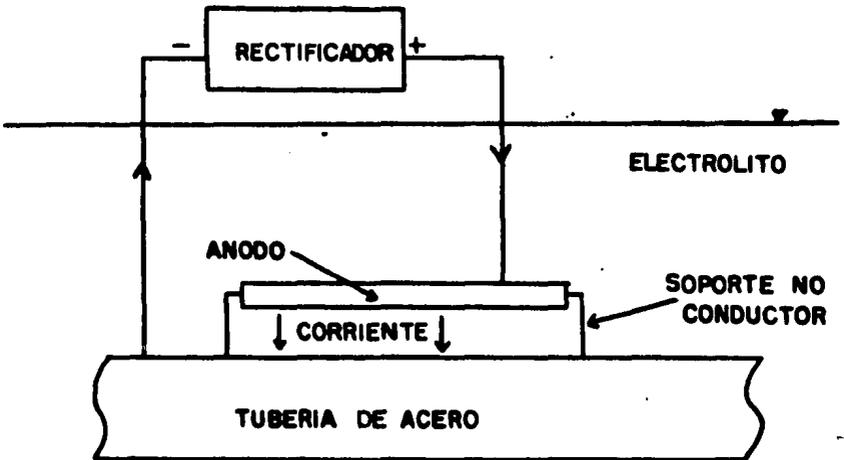


Fig. 10.- Protección catódica a base de corriente impresa.

como protección catódica base.

En agua de mar, lo mismo que en tuberías enterradas, -- las estructuras de acero están protegidas si son polarizadas a un potencial de  $-0.85$  volts referido al electrodo  $\text{Cu}^{+2}/\text{CuSO}_4$ .

**III.- PROTECCION CATODICA A ESTRUCTURAS MARINAS.**

**III.1.- Mediciones y pruebas necesarias para diseñar un sistema de protección catódica.**

**III.2.- Diseño del sistema protector**

**III.3.- Protección catódica de una estructura submarina.**

### III.1.- MEDICIONES Y PRUEBAS NECESARIAS PARA DISEÑAR UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA.

Para diseñar un sistema que proteja catódicamente una estructura metálica sumergida en agua de mar, es necesario contar con la siguiente información básica, la cual, previamente se debe obtener de los proveedores, pruebas de campo y mediciones directas en el sitio donde la estructura funcionará.

La información necesaria es:

- a) Potencial estructura-mar
- b) Resistividad del mar
- c) Requerimientos de corriente
- d) Temperatura de operación

A continuación se describe cada uno de éstos:

- a) El potencial de la estructura debe ser calculado y medido antes y después de instalar la estructura. Antes de protegerla para conocer el potencial natural de la estructura (relación metal electrólito), y después para determinar su grado de protección.

La significancia del potencial de la estructura radica en que a mayor potencial, mayor será la demanda de energía para lograr la protección catódica adecuada.

Para este fin se utiliza una media celda con electrodo de plata en solución saturada de cloruro de plata, o bien, una con electrodo de cobre en solución saturada de sulfato de cobre. En rigor lo que se mide es la diferencia de potencial entre la estructura y el electrodo metálico de la media celda -- que hace contacto con el medio a través de la solución saturada de cloruro de plata o de sulfato de cobre.

En la figura 11 se muestra un electrodo de  $Cu/CuSO_4$ , diseñado para estudios de protección catódica. Este electrodo tiene la ventaja de bajo costo, buena precisión y es robusto. El potencial de una estructura se determina con un voltímetro de alta resistencia.

b) La resistividad del agua de mar, y la del fango del fondo marino, se hace tomando una muestra de material, agua o lodo, que se coloca en un cubo de plástico de una pulgada cúbica de capacidad, dos de cuyas paredes opuestas son los electrodos que se conectan a un probador de tierras adecuado.

La resistividad indica la facilidad, o dificultad, con la cual una corriente eléctrica fluirá a través del agua, o fango; si la resistividad es baja, la corriente puede fluir fácilmente y se puede anticipar considerable corrosión, pero si

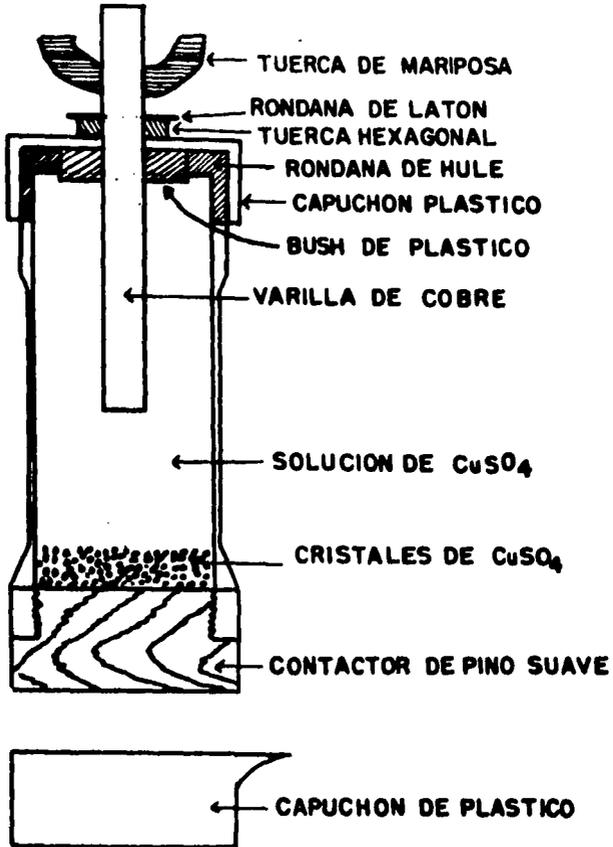


Fig. 11.- Electrodo de referencia usado para mediciones de campo.

La celda es de Cobre/Sulfato de Cobre.

la resistividad es alta, entonces el total de corriente generada, por una serie específica de circunstancias, será limitada y consecuentemente la corrosión se reducirá. Generalmente se considera como un medio muy corrosivo aquel que tiene resistividades menores de 1000 ohm-cm. En la tabla 5 se muestran algunos valores de resistividad.

El Sistema Megger es un instrumento que tiene integrado un voltímetro y un amperímetro, y un sistema electrónico que permite obtener directamente las lecturas de resistividad.

- c) Los requerimientos de corriente de plataformas, boyas y líneas submarinas se calculan a partir de los valores de densidad de corriente recomendados de --- acuerdo a la ubicación de la estructura, la profundidad a la que se encuentra y la extensión de la superficie metálica expuesta al medio. Además, dependerán (los requerimientos de corriente) de si la estructura está desnuda, si está protegida, del grado de daño del recubrimiento y de todas aquellas partes metálicas agregadas a la estructura originalmente diseñada.

En la tabla 5 se muestran las densidades de corriente recomendadas para metal desnudo en diferentes partes del mundo.

T A B L A 5

RESISTIVIDAD EN EL MAR Y DENSIDADES DE CORRIENTE RECOMENDADAS  
PARA LA PROTECCION CATODICA DE ACERO DESNUDO

<u>L u g a r</u>	<u>Resistividad del medio (ohm-cm)</u>	<u>Densidad de corrien te necesaria (ma/m<sup>2</sup>)</u>
Mar del Norte	30	130-150
Golfo de México	20	65
U.S.A. Costa Oeste	24	87
Golfo Pérsico	15	108
Indonesia	19	65
Atlántico Sur	--	130
Australia	--	130
Ductos enterrados	70 - 100	50
Fango Marino	70 - 100	11-30

Tablas más detalladas pueden conseguirse de la National Association of Corrosion Engineers (NACE, Houston).

d) Las temperaturas del medio ambiente y de operación - de la estructura son parámetros importantes que se - deben conocer desde el diseño. La resistividad del medio disminuye con la temperatura, aumentando así - la agresividad del medio. Si se manejan fluidos a - altas temperaturas, los ánodos tendrán una temperatura ligeramente menor (2 á 5 grados menos que la temperatura de operación). A causa de ésto, las propiedades electroquímicas, adhesivas de los recubrimientos y los requerimientos de densidad de corriente se verán afectados.

A altas temperaturas los ánodos de zinc son propensos a la corrosión intergranular, la eficiencia de los ánodos de aluminio es significativamente reducida y la tendencia, de los ánodos de zinc, a la pasivación es alta. Para efectos de diseño se deben consultar tablas donde se muestran las eficiencias de los ánodos con respecto a la temperatura.

Mollan y Eliassen (1984) recomiendan que para cada grado arriba de los 25 °C, aumentar la densidad de corriente para acero desnudo en  $1 \text{ ma/m}^2$ . Por otra parte, mediante las siguientes fórmulas empíricas que determinan éste requerimiento

de corriente y el potencial de protección necesario en función de la temperatura de operación de las estructuras:

$$\text{denc. corr. temp.} = (\text{denc. corr. base}) \left( \frac{0.662(T) + 21}{24} - 0.422 \right) \left[ \text{mA/ft}^2 \right]$$

$$\text{Pot.de Prot. temp.} = (\text{pot.de prot. base}) + \frac{(T) - 20}{1000} (0.733) \left[ \text{volts} \right]$$

donde la temperatura de operación (T) es dada en grados centígrados.

### III.2.- DISEÑO DEL SISTEMA PROTECTOR.

En realidad es poca la diferencia en costos entre una - protección catódica a base de ánodos de sacrificio y la obtención utilizando corriente impresa. Pero existen otros factores que gobiernan la decisión. Mackay y Alloys (1974) remarcan -- los tres principales defectos por los que se prefiere no usar los de corriente impresa en las estructuras en contacto con el medio marino; los cuales son:

- a) No han sido los sistemas lo satisfactoriamente robustos para soportar las condiciones físicas del medio.
- b) Al estar en uso, no se les ha dado ni el mantenimiento ni la supervisión adecuada.
- c) No han sido diseñados para dar una adecuada distribución de corriente ni protección por polarización.

Además de que menciona que en el Mar del Norte no se ha publicado el éxito de alguna estructura protegida catódicamente por corriente impresa.

Hedborg (1974), en su trabajo de corrosión en el medio ambiente marino, menciona lo siguiente acerca del sistema de - corriente impresa en el control de la corrosión: "Es de nues--

tra experiencia que los sistemas de corriente impresa son vulnerables a dañarse; por ejemplo la perforación bajo el agua -- del aislante de un cable, lo que causará que la energía del -- ánodo se pierda. Cables, cadenas, cuerdas que generalmente -- cuelgan de las plataformas, se pueden enredar con los ánodos y causar cortos en el sistema. Los rectificadores son algunas -- veces apagados debido a operaciones de cubierta y para conservar energía durante perforación, y frecuentemente sucede que -- los rectificadores permanecen apagados por períodos largos de tiempo. Con el espacio tan limitado en las plataformas, los -- rectificadores son algunas veces colocados en lugares donde se sobrecalientan o mojan, y esto causa quemaduras a los fusibles y a los diodos". Y estos problemas son únicamente inherentes a los sistemas de corriente impresa.

Si bien lo anterior es una realidad, también lo es que una alternativa para las plataformas en aguas profundas, donde el buceo ya no permite el reemplazo de ánodos de sacrificio, -- los sistemas de corriente impresa representan una opción más. Otra es el sobrediseño de ánodos de sacrificio en las partes -- más profundas.

En la actualidad la tendencia en la protección de instalaciones marinas es hacia la minimización de los problemas de mantenimiento, o hacia la reposición del sistema protector; --

razón por la cual, tratándose de estructuras marinas en aguas poco profundas, se prefiere proteger mediante el empleo de ánodos de sacrificio (material consumible como el zinc o el aluminio). Esta tendencia es aún más marcada en las plataformas petroleras como las que utiliza Pemex, debido a que la mayor parte de éstas son estructuras metálicas más o menos complejas, apoyadas en varias patas tubulares que se hincan en el piso marino, las cuales requieren de un buen número de refuerzos o venteos para tener la debida estabilidad ante el embate de las olas y del viento, además de los tubos utilizados para perforación, cárcamos para succionar agua limpia y de descarga de aguas negras.

El diseño del sistema protector a base de ánodos se basa en la consideración de los siguientes criterios:

- a) Se tiene cierta densidad de corriente que depende de la localización geográfica de la estructura, de la temperatura del agua, de la intensidad de las corrientes, de su grado de oxigenación y de la profundidad a la que se encuentra el lecho marino (ver tabla 5).
- b) Extensión del área desnuda o expuesta a la acción del agua de mar, y la parte de los pilotes en contacto con el fango o fondo marino.

- c) Un potencial estructura/mar de  $-0.85$  volts con referencia a una celda de cobre, o de  $-0.80$  volts con respecto a una celda de plata, una vez polarizada la estructura (potencial de protección).
- d) Una resistencia de contacto ánodo/medio que permita que éstos suministren la densidad de corriente especificada suficiente para proteger la estructura, aún con el ánodo gastado.
- e) Una buena capacidad del ánodo, lo que implica una cantidad de corriente producida por unidad de peso del ánodo. El ánodo, aún gastado, debe producir la energía requerida en las especificaciones del diseño de protección catódica.
- f) Una cantidad de material desgastable suficiente para que los ánodos alcancen una vida útil deseada (10 a 20 años).
- g) Una distribución de los ánodos en la estructura, tal que las líneas de corriente alcancen cualquier parte de la estructura.

Obviamente las dimensiones de los ánodos dependerán del metal o características electroquímicas de la aleación con que hayan sido fabricados, lo que les dará cierta capacidad - - -

(amp-hr/kg) y potencial.

Además de los criterios antes expuestos, se considera fundamental la existencia de un eficaz aislamiento eléctrico entre la estructura por proteger y otras instalaciones, por ejemplo: los oleoductos o gasoductos que se conectan con la plataforma o boya.

También, se acostumbra considerar toda la superficie exterior de los tubos de las plataformas, atracaderos o muelles en contacto con el agua o fondo marino, como elementos desnudos. Los ductos recubiertos con esmalte de alquitrán de hulla, asfalto reforzado con tela de vidrio lastrado con arena y los recubiertos con concreto se consideran, por lo general, con 5% (en algunos casos hasta 10%) de la superficie exterior como expuesta o desnuda.

Para dimensionar el tamaño de los ánodos más adecuados en la protección catódica que se desea impartir, se procede como sigue:

Primero. Establecer los requerimientos de diseño.

- Porcentaje de área desnuda de la estructura,  $p$  (%).
- Densidad de corriente por aplicar,  $i$  (ma/m<sup>2</sup>).
- Vida útil de los ánodos,  $L$  (años).
- Factor del material desgastable,  $m$  (kg/A-año) (por ta

blas).

- Factor de utilización de los ánodos,  $u(\%)$ . (por ta---  
blas).
- Espaciamiento máximo de los ánodos,  $S$  (m). (por ta---  
blas).

Segundo. Calcular el área exterior desnuda de la es---  
trutura por proteger, tanto para la sección en contacto con -  
el agua de mar, como para la que está hincada en el fondo mari  
no,  $A$  ( $m^2$ ).

Tercero. Calcular el peso total del metal anódico que  
se necesita para proporcionar la corriente demandada por la es  
trutura, para lo cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$W = \frac{A \times p \times i \times L \times m}{u}$$

Cuarto. Seleccionar, con ayuda de un catálogo del fa--  
bricante de ánodos, el tamaño comercial más adecuado con el --  
cual se logre una distribución racional de la corriente, y que  
se ajusten mejor al espaciamiento máximo requerido.

Quinto. Verificar que las dimensiones de los ánodos se  
rán las apropiadas para suministrar la corriente requerida (I)  
con los ánodos gastados y al final de su vida útil; la cual de  
be ser lo suficientemente grande para proporcionar la corrien-

te demandada, o sea que su resistencia de contacto con el medio debe ser tan baja como lo indica la Ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R}$$

Donde: I = Corriente de protección (corriente de salida del ánodo).

E = Diferencia de potencial ánodo/estructura.

R = Resistencia de contacto ánodo/medio.

La resistencia de contacto ánodo/medio se calcula utilizando la ecuación de H.B. Dwight modificada:

$$R = \frac{0.0627 \rho}{L} (\ln (4L/r_d) - 1)$$

Donde:  $\rho$  = Resistividad del medio (ohm-cm).

L = Longitud del ánodo (cm).

$r_d$  = Radio del ánodo gastado (cm).

El valor de  $r_d$  puede calcularse de acuerdo con la recomendación de la National Association of Corrosion Engineers -- (NACE), que considera:

$$r = \frac{a + 2b + c}{2\pi i} = \frac{c}{2\pi i}$$

$$r_d = \frac{r}{2}$$

Donde: r = Radio equivalente del ánodo nuevo.

a, b, c = Dimensiones del ánodo (base menor, altura y - base mayor de un trapecio).

C = perímetro del ánodo nuevo.

La corriente que inicialmente suministrarían los ánodos y que serviría para polarizar la estructura, se calcula con la fórmula de McCoy.

$$I_i = \frac{V}{p(0.315)} \frac{Aa}{C}$$

En donde:  $I_i$  = Corriente inicial proporcionada por cada ánodo

V = Diferencia de potencial al inicio de la polarización.

p = Resistividad del medio

Aa = Area exterior del ánodo en contacto con el medio.

Sexto. Adaptar las dimensiones y el peso de cada ánodo de acuerdo con la vida útil deseada y las limitaciones que imponga el fabricante a ellos. O bien, que por cuestiones de diseño, el constructor de la instalación de limitaciones en cuanto al peso, al grosor, largo máximo y a las dimensiones de los refuerzos o soportes.

La vida útil de los ánodos se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$L = \frac{W \times u}{m \times I}$$

Donde: L = Vida útil de los ánodos.

m = Equivalente electroquímico del material (kg/A-año).

I = Corriente drenada por el ánodo, amp. (requerimiento medio de corriente durante la vida útil).

W = Peso de cada ánodo (kg).

u = Factor de utilización de los ánodos.

Como el requerimiento de corriente de las plataformas marinas piloteadas depende de la resistividad del medio, el cálculo de la vida útil de sus ánodos debe hacerse teniendo presente que una parte de la estructura está en contacto con el agua, y otra dentro del fondo marino, y que los requerimientos se distribuirán proporcionalmente en ambas partes de la estructura.

### III.3.- PROTECCION CATODICA DE UNA ESTRUCTURA SUBMARINA.

A continuación se presenta el cálculo para la protección catódica de la subestructura de una plataforma de acero, como las que se emplean para la explotación de yacimientos petroleros localizados sobre la plataforma continental del Golfo de México.

Petróleos Mexicanos utiliza plataformas metálicas que tiene 8 patas. Las que utilizan en el Golfo de México tienen una longitud de 50 m. Estas patas se apoyan sobre pilotes de acero hincados en el lecho marino, en ocasiones con capas de fango de 2 á 10 m., y de una longitud de 30 á 40 m. dependiendo de su ubicación.

Normalmente éste tipo de plataformas se diseñan y se fabrican en dos partes; la subestructura y la superestructura. Los patios de fabricación se establecen en un lugar próximo y generalmente al lado de un estero, río o laguna. Mediante una rampa de lanzamiento se bota la subestructura, y de ahí se remolca al sitio de su erección, el cual se determina con estudios de prospección, controlándose con mucha precisión las coordenadas respectivas.

La estructura está contruida por elementos tubulares de acero al carbono, especificaciones ASTM A-139, A-252, A-381 y A-671 para las patas, travesaños, tirantes y pilotes. Las es-

pecificaciones son recomendadas por la American Society for --  
Testing Materials.

Aún cuando tanto la subestructura como la superestructu  
ra son protegidas contra la acción del medio salobre mediante  
la aplicación de un recubrimiento primario 100% inorgánico de  
zinc y acabado vinílico, para fines de diseño del sistema pro-  
tector contra la corrosión de las superficies expuestas, es --  
práctica común considerar tales superficies como totalmente --  
desnudas.

Sobre la base de que lo determinado para una sección de  
la subestructura es aplicable a todas las demás, en el presen-  
te caso solo se calculará el requerimiento de ánodos de sacri-  
ficio de la sección que se muestra en la figura 12, considerando  
do los siguientes parámetros de diseño:

- Longitud de las patas de Ø 91.4 cm. (36")	50 m.
- Número de patas	2
- Longitud de travesaños de Ø 50.8 cm. (20")	22-32 m.
- Número de travesaños	4
- Longitud de los tirantes de Ø 30.5 cm. (12")	1.94 á 2.09 m.
- Número de tirantes	8
- Longitud de los pilotes Ø 60.9 cm. (24")	30 m.
- Número de pilotes	2
- Resistividad del agua de mar	20 ohm-cm.

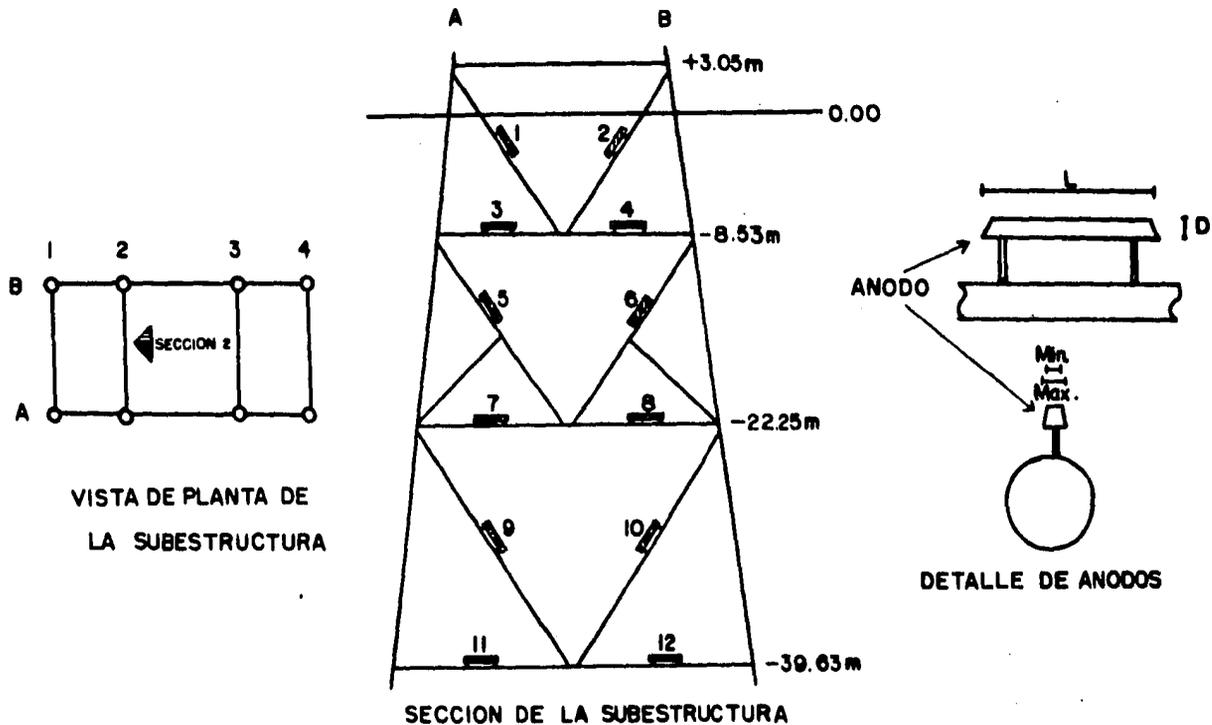


Fig. 12.- Anodos de sacrificio en la subestructura de una plataforma de perforación.

- Resistividad del fondo marino	85 ohm-cm.
- Corriente requerida en el mar	64.6 ma/m <sup>2</sup> (6 ma/pie <sup>2</sup> )
- Corriente requerida en el fango	32.3 ma/m <sup>2</sup> (3 ma/pie <sup>2</sup> )
- Vida útil de los ánodos	20 años
- Anodos de sacrificio	Aluminio (Galvalum III)
- Potencial de la estructura (estructura/celda Ag/AgCl)	-0.90 volts

Cálculo de la superficie expuesta:

$$\text{Area} = \pi \times \emptyset \times L$$

Area de las patas:

$$\pi \times 0.914 \text{ m} \times 48 \text{ m} \times 2 \text{ elementos} = 275.78 \text{ m}^2$$

de las patas en el fango:

$$\pi \times 0.914 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ elementos} = 11.49 \text{ m}^2$$

de los travesaños:

$$\pi \times 0.506 \text{ m} \times 22 \text{ m.} = 34.96 \text{ m}^2$$

$$\pi \times 0.506 \text{ m} \times 25.5 \text{ m.} = 40.52 \text{ m}^2$$

$$\pi \times 0.506 \text{ m} \times 29.1 \text{ m.} = 46.24 \text{ m}^2$$

$$\pi \times 0.506 \text{ m} \times 32.1 \text{ m.} = 51.01 \text{ m}^2$$

de los tirantes:

$$\pi \times 0.305 \text{ m} \times 1.94 \text{ m} \times 2 \text{ elementos} = 33.72 \text{ m}^2$$

$$\pi \times 0.305 \text{ m} \times 2.04 \text{ m} \times 2 \text{ elementos} = 3.91 \text{ m}^2$$

$$\pi \times 0.305 \text{ m} \times 2.09 \text{ m} \times 2 \text{ elementos} = 4.00 \text{ m}^2$$

y de los pilotes:

$$pi \times 0.609 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 2 \text{ elementos} = 114.91 \text{ m}^2$$

Con éstos datos calculados se determina la superficie -  
expuesta al agua de mar y al fango del fondo:

Superficie expuesta al agua de mar	460.14 m <sup>2</sup>
Superficie expuesta al fango	126.40 m <sup>2</sup>
Superficie total	586.54 m <sup>2</sup>

Corriente recomendada para proteger la estructura:

En el agua:

$$460.14 \text{ m}^2 \times 64.60 \frac{\text{ma}}{\text{m}^2} = 29725.04 \text{ ma}$$

En el fango:

$$126.40 \text{ m}^2 \times 32.28 \frac{\text{ma}}{\text{m}^2} = 4080.19 \text{ ma}$$

$$\text{Total} = 33805.23 \text{ ma}$$

Para el cálculo de la corriente drenada por los ánodos se consideran unidades de 181.6 kg. (400 lb) de peso, de sección trapezoidal con las siguientes dimensiones en centímetros: 15 x 18 x 15 x 250 (base menor, base mayor, altura y longitud; a, b, c, L), que es el tamaño que con mayor frecuencia instalan en las plataformas marinas de Pemex.

Para calcular la resistencia de contacto de los ánodos se emplea la fórmula de H B. Dwight:

$$R = \frac{0.1593 p}{L} (\ln(4L/r_d) - 1)$$

en donde:  $p_a$  = resistividad del agua = 20 ohm-cm.

$p_f$  = resistividad del fondo = 85 ohm-cm.

$r_d$  = radio del ánodo gastado =  $\frac{r}{2}$

$r$  = radio equivalente del ánodo nuevo

Se tendrá entonces:

$$r = \frac{15 + 2 \times 15 + 18}{2 \pi} = 10.03 \text{ cm.}$$

$$r_d = \frac{r}{2} = 5.02 \text{ cm.}$$

Por lo que la resistencia de contacto del ánodo ( $R_a$ ) es:

$$R_a = 0.1593 \times 20 \text{ ohm-cm} \times (\ln(4 \times 250 \text{ cm.} / 5.02 \text{ cm.}) - 1)$$

$$R_a = 0.0547 \text{ ohm. (para el agua)}$$

Por otra parte, la corriente drenada por cada ánodo ya gastado se calcula aplicando la ecuación de McCoy, que ha demostrado ser la que da resultados más apegados a la realidad.

$$I = \frac{V \times A_a}{p \times 0.315}$$

En donde, como se define antes:

I = Corriente drenada por el ánodo gastado, amp.

V = Diferencia de potencial ánodo/estructura polarizada, volt.

Aa = Area exterior de cada ánodo, cm<sup>2</sup>

p = Resistividad del medio, ohm-cm.

Para calcular el área exterior del ánodo gastado al 50% se procede de la siguiente forma:

$$a' = 15 (50\%) = 7.5 \text{ cm.}$$

$$b' = 18 (50\%) = 9.0 \text{ cm.}$$

$$c' = 15 (50\%) = 7.5 \text{ cm.}$$

$$L' = 250 \text{ cm.} - 20 \text{ cm.} = 230 \text{ cm.}$$

$$A = (7.5 \text{ cm} + 2 \times 7.5 + 9.0 \text{ cm.}) \times 230 \text{ cm.}$$

$$Aa = 7245 \text{ cm}^2$$

Para el ánodo seleccionado, galvalum III, el potencial es de 1.1 volts (referencia Ag/AgCl) según el fabricante. Entonces la diferencia de potencial ánodo/estructura es:

$$V = 1.10 - 0.90 = 0.20 \text{ volts.}$$

En consecuencia, la corriente drenada resultante para los ánodos sumergidos en el agua de mar es:

T A B L A 6

Anodos galvánicos para agua de mar.

Material del ánodo	Eficiencia Amp-Hr/lb	Rango de consumo lb/Amp-año	Potencial (volts)	
			Ref. Cu/CuSO <sub>4</sub>	Ref. Ag/AgCl
Galvalum I	1280	6.84	1.10	1.05
Galvalum II	770	11.38	1.09	1.04
Galvalum III	1150	7.62	1.15	1.10
Reynode	1213-1272	6.84-7.22	1.10	1.05
Zn (Hi-Amp)	354	34.80	1.10	1.05
Magnesium (Galvomag)	550	17.52	1.80	1.75

Ref., HARGO seawater galvanic anodes.

$$I = \frac{0.2 \text{ volt} \times 7245 \text{ cm}^2}{20 \text{ ohm-cm} \times 0.315} = 2.702 \text{ amp.}$$

Y para los ánodos que pudieran quedar en el fango:

$$I = \frac{0.2 \text{ volt} \times 7245 \text{ cm}^2}{85 \text{ ohm} \times 0.315} = 0.6358$$

Según la demanda de corriente recomendada sería necesario instalar:

$$33805.23 \text{ m}_a \times \frac{1 \text{ ánodo}}{2702 \text{ ma}} = 12.5 \text{ ánodos de } 181.6 \text{ kg.}$$

Falta ahora cotejar que la resistencia de contacto -- (0.0547 ohm) antes calculada sea lo suficientemente baja para permitir el paso de la corriente que se requiere para proteger la estructura, y obviamente dependerá del potencial que puede alcanzar el metal desgastable, en el presente caso 1.1 volts -- para el galvalum III, y del potencial de la estructura (Pe) -- una vez polarizada, como se demuestra con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{1.10 - Pe}{0.0547}$$

A continuación se hace la tabulación para algunos valores del potencial de la estructura (Pe).

Pe	V	I	
- 0.90 v	0.20 v	3.656 a	Estructura no polarizada
- 0.91 v	0.19 v	3.473 a	
- 0.92 v	0.18 v	3.291 a	
- 0.93 v	0.17 v	3.108 a	
- 0.94 v	0.16 v	2.925 a	
- 0.95 v	0.15 v	2.742 a	
- 0.96 v	0.14 v	2.559 a	Estructura polarizada

O sea, que aún con la estructura polarizada, la resisten  
cia de contacto de los ánodos del diseño y dimensiones escogi-  
das permite el paso de la corriente necesaria para la protección  
catódica de la subestructura.

En tales condiciones, de estructura polarizada y corrien  
te correspondiente a los ánodos gastados, la vida de los ánodos  
que estuviesen en contacto con el agua de mar sería; utilizando  
la fórmula:

$$L = \frac{m \times w}{8760 \times I}$$

donde: L = Vida de los ánodos (50%)

m = 2533.04 amp-hr/kg.

w = 181.6 kg/ánodo

I = 2.74 amp/ánodo (valor razonable).

8760 hr = 1 año.

$$L = \frac{2533.04 \times 181.6}{8760 \times 2.74} = 19.4 \text{ años}$$

Y la vida de los ánodos en el fango sería:

$$L = \frac{2333.04 \times 181.6}{8760 \times 0.636} = 82.3 \text{ años}$$

Por ésta última razón, se procura que los ánodos queden instalados arriba del nivel de fango y, de preferencia, para una mejor distribución de la corriente, en los elementos estructurales horizontales y en los refuerzos.

Dado que en la práctica se obtienen potenciales de polarización menores al valor considerado de  $-0.95$  v., con respecto a una celda de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , con lo cual es menor la corriente drenada por los ánodos, y considerando que el requerimiento de corriente se reduce por la incrustación calcárea que se forma sobre la subestructura, resulta que la vida real de los ánodos es superior a la calculada, por ello, dependerá del criterio del diseñador el que se instalen 12 ó 13 ánodos Galvalum III en la sección estudiada.

Con el fin de verificar la bondad de los cálculos anteriores, se revisaron varios reportes de inspección a plataformas marinas de Petróleos Mexicanos, encontrándose que en ellas, la sección analizada está protegida con 12 ánodos Galvalum de 181.6 kg. de las mismas dimensiones que las de los ánodos - -

considerados, y que los potenciales de protección varían de -  
-0.90 á -0.97 volts.

#### **IV.- ASPECTOS ECONOMICOS DE LA PROTECCION CATODICA**

#### IV.- ASPECTOS ECONOMICOS DE LA PROTECCION CATODICA.

En la misma forma que se realizan la mayoría de las actividades relacionadas con la ingeniería, en sus diversas disciplinas, que siempre deben llevarse a cabo con el menor consumo de recursos, sean éstos económicos, humanos, energéticos o materiales, en el diseño de los sistemas de protección anticorrosiva de estructuras metálicas expuestas a la acción agresiva del medio marino, se busca siempre la elección y la aplicación de aquel sistema que represente los más bajos costos anuales de operación durante la vida útil de la instalación considerada.

El control de la corrosión es fundamentalmente un problema económico. El aplicar o no un método de control se determina generalmente por el ahorro de costos involucrados. El método o métodos utilizados deben ser la elección óptima adecuada. Reducir la inversión en una plataforma, o en una estructura marina, significa menos dinero que debe ser gastado. Bajos costos de mantenimiento anual, o de costos de operación, incrementan las ganancias. Los petroleros no están en el negocio para sacar petróleo, sino para hacer dinero.

Si uno usa materiales baratos y un funcionamiento equivalente es obtenido (cosa rara), la elección es fácil. Las diferentes alternativas de sistemas de control de la corrosión -

varian en costo, y los de mayor costo deben justificarse.

Por ello, el diseñador necesita balancear por un lado - la inversión inicial por concepto de la aplicación de recubrimientos protectores, de camisas de material resistente, de los ánodos de sacrificio, de transformadores y de rectificadores - de corriente con sus respectivos ánodos, según fuera el caso, contra los costos de reposición del equipo instalado y el consumo de energía eléctrica que éstos requieren para operar.

Pero como las inversiones en equipo, materiales protectores, gastos para reposición o reparación, y el consumo de -- energía eléctrica normalmente se efectúan en fechas diferentes, según sea el sistema por utilizar, para la correcta evaluación económica de las distintas soluciones alternativas es necesario considerar los cambios en el valor del dinero con el tiempo. - Para ese fin se recomienda el empleo del método del valor presente, o bién, el de flujo de efecitivo descontado (discounted cash flow). Con cualquiera de ellos se llega a conclusiones - similares, pero para evaluar sistemas de protección catódica - se prefiere emplear el primero por dar resultados más objetivos, o de más fácil comprensión.

Las alternativas deben ser comparadas siguiendo funda-- mentos básicos del valor del dinero en el tiempo en iguales pe ríodos de tiempo. El valor presente puede ser expandido a - -

costo anual uniforme; el costo anual variable puede ser traído a valor presente. Se debe tener cuidado en asegurar que cada alternativa está expresada en igual dinero cubriendo el mismo período de tiempo.

La base para la decisión económica en la industria es - seleccionar la alternativa que minimizará los requerimientos - de renta, mientras siga produciendo el mismo retorno de la inversión inicial (Minte, 1974).

El método del valor presente, consiste en convertir cada una de las erogaciones efectuadas e ingresos percibidos a lo largo del período considerado, en valores equivalentes a -- ellos pero realizados en una misma fecha, por lo general el -- año cero de operación, mediante la aplicación del respectivo - factor de descuento a una tasa de interés igual a la máxima pagada por los bancos e instituciones financieras (para nuestro caso 60% anual).

Es una realidad que en México los sistemas de corriente impresa no han funcionado adecuadamente, y las causas son las mencionadas en el capítulo anterior. Por eso, y pensando de - una manera realista, se ha optado por utilizar protección catódica en base a ánodos de sacrificio en todas las instalaciones fuera de la costa (Ing. Isidro Lemus, 1985. Comunicación personal).

**V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

2

V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La experiencia acumulada en los últimos años en el mantenimiento de múltiples instalaciones ha demostrado el papel importante que tiene la protección anticorrosiva en la vida de las estructuras de acero sometidas a la acción continua del medio marino, y hecho evidente que su protección catódica es técnicamente factible y económicamente redituable.

Poco a poco se han venido precisando los requerimientos para incrementar la confiabilidad de la protección catódica y hacerla menos costosa, de modo que a la fecha los especialistas en ella siguen normas y principios bien definidos.

La selección de un sistema para proteger catódicamente una instalación metálica es cuestión económica, de confiabilidad en su funcionamiento bajo las condiciones más adversas, y de optimización de alternativas.

La protección anticorrosiva de una estructura metálica empieza en el diseño de ésta. Un diseño funcional y sencillo incluye siempre la correcta aplicación de un buen recubrimiento anticorrosivo que la aisle eléctricamente del medio.

La aplicación de un recubrimiento, que garantice máxima duración y eficiencia, necesariamente contemplará las siguien-

tes operaciones:

- 1) Preparación o limpieza de las superficies por proteger de acuerdo a las normas de construcción aplicables.
- 2) Aplicación del recubrimiento primario y de la capa intermedia cuando se requiera, siempre bajo los procedimientos y condiciones especificadas por los fabricantes de los productos.
- 3) Aplicación de recubrimientos para el acabado especificado, tales como una doble capa, chaquetas, neopreno, etc., y
- 4) Inspección rigurosa tanto en los pasos anteriores como en la verificación de los espesores de la película de recubrimiento aplicada.

Toda estructura metálica debe aislarse eléctricamente de otras instalaciones, bases o soportes que la energicen, o de cualquier otra fuente de energía que perturbe la protección suministrada a la estructura.

Enunciados como los antes expuestos, aunque aparentemente obvios, llaman a pensar sobre la conveniencia de que desde el diseño de una estructura o instalación metálica, que estará sumergida en un medio corrosivo, se tengan presentes los prin-

principios básicos de su protección catódica.

Dado que la gran mayoría de los productos anódicos utilizados en los sistemas de protección catódica son de origen extranjero, se procede a instalarlos sin que se verifique si sus características corresponden a las especificaciones de calidad requerida. Esta omisión de control de calidad repercute con relativa frecuencia en la operación de los sistemas de protección dando lugar a sistemas inoperantes por la pasivación de sus ánodos, sistemas ineficaces por potenciales anódicos bajos e insuficientes para dar el de protección, o a sistemas --ineficientes donde el equivalente electroquímico de la aleación es mayor al especificado produciéndose desgaste prematuro de los ánodos.

La calidad de los ánodos reside fundamentalmente en la pureza del material utilizado, o bien, si se trata de alguna aleación específica, en la precisión del contenido de sus elementos.

Para el caso de los ánodos de sacrificio, impurezas más allá de las permitidas pueden hacer que el material, al estar en contacto con el medio, se comporten como cátodo. En las siguientes tablas se muestran las composiciones químicas de algunos ánodos de sacrificio, donde las cantidades indicadas son las máximas permitidas en las aleaciones.

Es pertinente hacer la observación de que en algunas situaciones la pureza del material anódico no se recomienda. Un ejemplo específico es cuando los ánodos van a estar sumergidos en agua de mar, ya que sin la adición de algunos aleantes, - - siempre dentro de rangos bien definidos, su funcionamiento sería deficiente o nulo después de cierto tiempo de operación. Para el caso de ánodos de aluminio un aleante benéfico es el - mercurio, cuyas funciones son evitar la formación de una capa superficial de óxido que, de acumularse, impediría el desgaste del ánodo (y con ello el drenado de corriente) y como agente - tóxico que evita las incrustaciones de origen vegetal y animal.

Para una mayor confiabilidad y para la obtención de mejores resultados en la protección catódica de una estructura - metálica, se recomienda que el especialista en la materia supervise el diseño y la instalación de la estructura, así como el montaje y la puesta en marcha del sistema protector.

Los cálculos y consideraciones que se mencionan en éste trabajo, constituyen una evaluación real del material anódico necesario para proteger la subestructura de una plataforma de perforación como las que, en la actualidad, Petróleos Mexicanos utiliza en la Sonda de Campeche.

Por último, considero pertinente mencionar que a la fecha, en materia tema de la presente tesis, hace falta desarro-

llar en el país tecnología adecuada para cubrir los requeri---  
mientos particulares que demandan las condiciones oceánicas de  
nuestras costas, para las clases de aceros que se producen, y  
para los diversos requerimientos implícitos en el actual desa-  
rrollo industrial del país.

**VI.- BIBLIOGRAFIA**

VI.- BIBLIOGRAFIA.

Albaugh, E. Kurt. 1984

Cooper-nickel piping reduces costs, biofouling/corrosion  
World Oil, November 1984. USA.

Federated-Marco, 1970.

Galvalum III Aluminum offshore anodes.

The Dow Chemical Company. Metal products department.  
Mich. USA.

Fernández de la Torre, Francisco. 1975.

Procedimientos anticorrosivos de estructuras, tanques y  
tuberías. En: Curso de Ingeniería de Corrosión. Centro  
de Educación Continua. División de Estudios Superiores  
de la Facultad de Ingeniería. U.N.A.M., México.

-----, 1975.

Estudio de costeabilidad (de aplicación de recubrimien-  
tos anticorrosivos).

En: Curso de Ingeniería de Corrosión. Centro de Educa-  
ción Continua. División de Educación Continua de la Fa-  
cultad de Ingeniería. U.N.A.M., México.

Fontana, Mars G. and Norbert D. Greene. 1978

Corrosion Engineering. 2nd. Edition.

McGraw Hill. International student edition. USA. 465 pp

Gaythwaite, P. E. 1981.

The marine environment and the structural design.

Van Nostrand Reinhold Co. USA. 313pp.

Gilbert, Roger. 1984.

Titanium offers offshore advantages.

Offshore. April, 1984. Maintenance and repair. p52-54.  
USA.

Guerrero, F. Manuel, Humberto Bañuelos C. y José Fco.  
Guerra. 1968.

Protección Catódica.

Instituto Mexicano del Petróleo. División de Promoción  
Académica. Subdirección de Tecnología de la Explota---  
ción. Departamento de Corrosión. México.

Houbaert Irmén, Yvan, Dr. 1977.

Ingeniería de Corrosión: Teoría y aplicaciones.

En: Curso de Ingeniería de Corrosión. Centro de Educa--  
ción Continua. División de Estudios Superiores de la Fa  
cultad de Ingeniería. U.N.A.M., México. 1977.

Mackay, W.B. 1974.

North Sea offshore cathodic protection.

Offshore Technology Conference (OTC), May 6-8, 1974. -  
Paper No. OTC-1957. Pre-print. USA.

Mollan, Ragnar and Svein Eliassen. 1984.

Design criteria examined for cathodic protection of hot submarine pipelines.

Oil and Gas Journal. Feb. 20, 1984. Technology. p52-56. USA.

Patlán Rodríguez, Salvador. 1981.

Problemas de corrosión en las instalaciones de pozos petroleros. Tesis Profesional Ing. Petrolero. Facultad de Ingeniería. U.N.A.M. 60pp. México.

Peabody, A.W. 1967.

Control of pipeline corrosion.

National Association of Corrosion Engineer. 215pp. USA.

Petróleos Mexicanos, 1983.

Plataformas marinas en la Sonda de Campeche. 18 de marzo de 1983. PEMEX. Subdirección de Proyecto y Construcción de Obras. 35p. México.

- - - - - , 1974.

Aplicación de recubrimientos para protección anticorrosiva. Norma 3.132.01.

PEMEX. Especificaciones generales para construcción de obras. Tercera edición. 22pp. México.

U.S. Offshore Operations. 1983.

Cooper/nickel sheathing stops marine growth on platforms  
Ocean Industry. November, 1983. p55-58. USA.

Villarreal, Enrique y Silvia Bello. 1975.

Electroquímica. Parte I y II.

Asociación Nacional de Universidades e Institutos de En  
señanza Superior. Area Química. 69 y 72pp. México.

Offshore. 1984

México reduces operations to minimum.

Offshore, July 20, 1984. Exploration and production. -  
p82 USA.

World Oil. 1984

39th International outlook issue. North America. México  
World Oil. August 15, 1984. p47-48. USA.

Minter, Byrd L. 1974.

Economic evaluation of cathodic protection.

Energy Pipelines and Systems. Jan., 1974. p52-54. USA.