

Universidad Nacional de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**“ Estudio Técnico - Económico para Seleccionar el
Método de Protección de Estructura Petrolera
de Acero Sumergidas en el Mar ”**

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECANICO

CESAR AUGUSTO CHAPARRO ARAUJO

PROMOCION: 1979 - I

LIMA • PERU • 1990

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
<u>PROLOGO</u>	10
1.- INTRODUCCION	13
1.1) Fundamentos de la Corrosión	13
1.1.1) Descripción de la Corrosión	13
1.1.2) Mecanismos de la Corrosión	15
1.1.3) Concepto de Oxidación-reducción	16
1.1.4) Concepto de pila galvánica (ánodo y cátodo)	21
1.1.5) Concepto de Polarización	33
1.1.6) Concepto de la Pasividad	35
1.1.7) Corrosión en Instalaciones	36
1.2) Formas de la Corrosión	39
1.2.1) Distintas formas de Corrosión	39
1.2.2) Corrosión por Picaduras (Pittings)	41
1.2.3) Corrosión Bimetálica	43
1.2.4) Corrosión Intergranular	45
1.2.5) Corrosión-erosión	47
1.2.6) Corrosión-fatiga	49
1.2.7) Fallas inducidas por Hidrógeno	51
1.3) Prevención de la Corrosión	54
1.3.1) Selección de Materiales	54
1.3.2) Modificación del Medio Ambiente	57
1.3.3) Inhibidores de Corrosión	61
1.3.4) Pinturas y Recubrimientos	66
1.3.5) Protección Catódica	73
1.4) Costos de la Corrosión	73
1.4.1) Importancia Económica de la Corrosión	73
1.4.2) Análisis Económico en Corrosión	78

	<u>Página</u>
2.- PROBLEMAS DE CORROSION EN ESTRUCTURAS DE ACERO SUMERGIDAS EN EL MAR	93
2.1) Antecedentes de la Protección Contra la Corrosión en PETROMAR S.A.	93
2.2) Descripción del Problema	97
2.3) Parámetros que tienen influencia en la Corrosión de Estructuras Submarinas	102
2.3.1) Corrosividad de la Aguas Saladas	102
2.3.2) Acción del Oxígeno Disuelto	103
2.3.3) Acción de la Temperatura	104
2.3.4) Acción del PH	105
2.3.5) Acción de las Sales Disueltas	106
2.3.6) Acción de la Velocidad del Agua	107
3.- ALTERNATIVAS DE SOLUCION A LOS PROBLEMAS DE CORROSION DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS	108
3.1) <u>Protección Anódica</u>	108
3.2) <u>Protección Catódica</u>	110
3.2.1) Fundamentos de la Protección Catódica	110
3.2.2) Criterios de la Protección Catódica	112
3.2.3) Sistema de Anodos de Sacrificio	112
3.2.4) Sistema de Corriente Impresa	116
3.2.5) Ventajas y Desventajas de Ambos Sistemas	117
3.2.6) Parámetros para el Cálculo de la Protección Catódica	118
3.2.7) Pautas para el Diseño de un Sistema de Anodos de Sacrificio	119
3.2.8) Pautas para el Diseño de un Sistema de Corriente Impresa	124
3.3) <u>Pinturas y Recubrimientos</u>	140

	<u>Página</u>
3.3.1) Recubrimientos - Generalidades	140
-Definición del Recubrimiento	
-Importancia de los Recubrimientos	
3.3.2) Tipos de Recubrimientos	
-De acuerdo con el espesor de Película	
-De acuerdo a su composición Físico-Química	
a) Recubrimientos Orgánicos	
b) Recubrimientos Inorgánicos	
c) Otros Sistemas	
3.3.3) Pinturas - Generalidades	150
-Definición de la Pintura	
-Composición de las Pinturas	
-Importancia y Funciones de una Pintura	
-Preparación de las Superficies Metálicas	
-Sistemas de Pinturas más Empleadas	
-Método de Aplicación de Pinturas	
3.3.4) Tipos de Pinturas	180
-Pinturas Domésticas	
-Pinturas de Mantenimiento Industrial	
-Pinturas para Acabados Industriales	
-Pinturas para Acabados Automotrices	
-Pinturas Marinas	
3.3.5) Sistemas de Pinturas Empleadas en la Protección de Estructuras Sumergidas en Agua de Mar	183
 4.- INSTALACION, MONITOREO Y CONTROL DE LA PROTECCION CONTRA LA CORROSION	 190
4.1) Instalación de la Protección Catódica	190
4.1.1) Sistemas de Anodos de Sacrificio	190
4.1.2) Sistema de Corriente Impresa	191
4.2) Monitoreo <u>Control de la Protección Contra</u> <u>a Corrosión</u>	195
4.2.1) Técnicas y Métodos de Inspección y Monitoreo de la Protección Catódica	195

	<u>Página</u>
4.2.2) Técnicas más Comunes para Monitorear la Protección Catódica	199
4.3) Técnicas de Corrección y Mantenimiento de la Protección Catódica	206
4.4) Fallas más Frecuentes en un Sistema de Protección Catódica	209
4.4.1) Fallas relacionadas al Anodo	210
4.4.2) Fallas relacionadas al Cátodo	212
4.4.3) Fallas relacionadas al Electrólito	214
4.4.4) Otras Fallas comunes en Protección Catódica	215
5.- <u>COMPARACION ECONOMICA DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS</u>	218
5.1) Costos del Sistema de Anodos de Sacrificio	218
5.2) Costos del Sistema de Corriente Impresa	220
5.3) <u>Comparación de Costos</u>	221
CONCLUSIONES	223
RECOMENDACIONES	226
BIBLIOGRAFIA	229
ANEXOS	

ANEXOS

- ANEXO-A Planos Estructurales de la Plataforma PN1 (Lado Típico y Elevaciones)
- ANEXO-B Requerimiento de Anodos de Sacrificio en la Plataforma PN1.
- ANEXO-C Ubicación de Anodos Dobles en la Estructura (Lado Típico y Elevaciones)
- ANEXO-D Dimensiones del Anodo de Sacrificio Seleccionado
- ANEXO-E Ensamble de los Anodos Dobles con las Grapas de Fijación a la Estructura
- ANEXO-F Posición de los Cables Tensionados y de los Anodos en la Estructura
- ANEXO-G Formación Típica para el Cable Tensionado de Tipo "A"
- ANEXO-H Formación Típica para el Cable Tensionado de Tipo "B".
- ANEXO-I Ensamble de un Cable Tensionado del Tipo "A" con Detalle de Fijación de un Anodo Típico
- ANEXO-J Circuito Básico de un Rectificador Monofásico de Protección Catódica

PROLOGO

El objeto de esta tesis es el de analizar las diferentes alternativas que nos brinda la Ingeniería de Corrosión para proteger una estructura de acero sumergida en agua de mar y determinar la manera más económica dependiendo de los diferentes parámetros que influyen en este problema. Como parte de este objetivo se incluye un análisis de las formas más adecuadas de instalar y controlar dicha protección.

Este trabajo trata de recopilar las experiencias adquiridas durante varios años de trabajar en el programa de diseño, instalación y control de la protección contra la corrosión de las estructuras de acero (plataformas) sumergidas en el mar del norte Peruano. La zona de estudio en mención comprende las áreas asignadas en concesión por Petróleos del Perú a la ex-compañía contratista BELCO PETROLEUM CORPORATION OF PERU en las costas de los Departamentos de Piura y Tumbes (Zócalo Z1-A, Z2-A y Z-28). Zona que desde Diciembre de 1985 viene siendo operada por PETROLEOS DEL MAR-PETROMAR S.A.

Para el análisis de este problema se procederá a dar una idea clara del fenómeno de la corrosión, de las diversas formas en que se presenta, las maneras de prevenirla y los grandes costos que ocasiona y que en muchos casos son difíciles de determinar. Luego haremos una breve resena histórica de la evolución de la protección contra la

corrosión por agua de mar de las estructuras de acero (plataformas), inicialmente en BELCO PETROLEUM CORP. OF PERU y posteriormente en PETROMAR S.A. Después procederemos a analizar los diferentes parámetros que influyen en la corrosión de las estructuras submarinas, como son la influencia de la profundidad de agua, de la temperatura, del PH, de la velocidad del agua, etc. Seguidamente estudiaremos las diversas alternativas que nos brinda la Ingeniería de Corrosión para la solución de este problema, haciendo una comparación económica de dichas alternativas para determinar la forma más eficiente de proteger una estructura de acero sumergida en agua de mar. Se incluirán pautas para el diseño de un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio y de un diseño con corriente impresa. Asimismo desarrollaremos un capítulo dedicado a la instalación, monitoreo y control de la protección contra la corrosión, señalando los problemas específicos encontrados durante la implementación del programa de protección en la compañía. Para terminar se hará una comparación económica de los costos involucrados en ambos sistemas para arribar a la solución más conveniente.

Los alcances de este estudio, son los de mostrar al lector la forma de analizar económicamente las diferentes alternativas que nos brinda la industria del control de la corrosión para la protección de estructuras de acero sumergidas en agua de mar. Se incide más en la parte práctica o de procedimientos que muestran la forma de utilizar toda la información que la Ingeniería de Corrosión brinda a la industria

en general para prevenir y controlar la corrosión. No se trata de hacer un estudio teórico detallado sobre un problema específico de corrosión que pudiera no ser aplicable en nuestra industria, sino más bien de recopilar y analizar las diferentes técnicas y experiencias obtenidas por la Ingeniería de Corrosión en otros países mas adelantados en cuanto a materiales y procedimientos usados en la protección contra la corrosión. Luego se vuelcan todas estas técnicas y experiencias en la solución práctica de un problema de nuestra industria petrolera como es el de la protección contra la corrosión de estructuras de acero sumergidas en agua de mar.

Todos los procedimientos y formas de cálculos presentados en este estudio están de acuerdo con los estándares internacionales señalados por la National Association of Corrosion Engineers (NACE), principal organismo internacional dedicado a la protección contra la corrosión

1) INTRODUCCION

1.1) Fundamentos de la Corrosión

1.1.1) Descripción de la Corrosión

En un sentido más amplio, la corrosión puede ser definida como el deterioro de una sustancia (usualmente un metal) o de sus propiedades debido a una reacción con su medio ambiente. En las operaciones de producción de petróleo es posible ser un poco más específico y decir que la corrosión es la destrucción de un metal debido a una reacción química o electroquímica con su medio ambiente.

La mayoría de los metales se encuentran en su estado natural en la forma de minerales los cuales son óxidos metálicos o sales. El mineral de hierro que se encuentra en su estado natural tiene una apariencia muy similar al óxido. Esto no es extraño ya que la forma más común del mineral de hierro es un óxido de hierro llamado hematites el cual tiene la misma composición química que el óxido (Fe_2O_3). Este óxido es convertido en metal hierro por medio de la adición de energía durante el proceso de refinación y es esta misma energía la que se desprende cuando el hierro se convierte de nuevo en óxido debido a la corrosión. De hecho, es la energía almacenada en el metal durante el proceso de refinación la que hace posible la corrosión. Esta energía proporciona el potencial necesario para que se lleve a cabo el proceso de corrosión.

El ciclo refinación-corrosión es algo como el llevar rodando una bola a la parte más alta de una colina y después observarla cuando rueda hacia abajo a partir del instante en que se la suelta. El control de la corrosión consiste en prevenir que la bola ruede a la parte más baja de la colina o por lo menos reducir la velocidad con la cual rueda.

La cantidad de energía requerida y almacenada varía de metal a metal. Es relativamente alta para metales como el magnesio, aluminio y hierro y relativamente baja para metales como el cobre y la plata. La Tabla I muestra alguno de los metales más comúnmente usados de acuerdo a la cantidad de energía que requieren para ser convertidos de minerales a metales mediante el proceso de refinación.

La diferencia de energía entre los metales y sus minerales pueden ser expresados en términos eléctricos los cuales están relacionados con los calores de formación de los componentes.

TABLA I Posición de algunos metales según la energía para convertir sus minerales en metales.

Mas energía requerida	Potasio
▲	Magnesio
	Berilio
	Aluminio
	Zinc
	Cromo
	Hierro
	Niquel
	Estaño
	Cobre
	Plata
▼	Platino
Menos energía requerida	Oro

1.1.2) Mecanismos de la Corrosión

Un metal tiene la apariencia de un sólido homogéneo. Sin embargo si se examina con 100X de aumento, se aprecia claramente que el metal no es homogéneo. Más bien, está formado de muchos granos individuales. Una examinación mas cercana de cada grano mostrará que los átomos dentro de un grano están unidos en un arreglo muy ordenado. Un sólido con un arreglo ordenado de átomos es llamado un cristal. La más pequeña unidad representativa es llamada la celda unitaria.

Un examen aún más cercano mostraría que cada átomo del metal está formado por una masa central llamada núcleo y por partículas que se mueven en órbitas alrededor del núcleo llamadas electrones. El núcleo está formado de partículas positivas (protones) y partículas neutras llamadas neutrones. Los electrones tienen cargas negativas que giran en órbitas alrededor del núcleo. Un átomo que tiene el mismo número de cargas positivas y cargas negativas es llamado un átomo neutro. Un átomo con diferente número de cargas positivas y negativas es llamado un ión. Un ión positivo (más protones que electrones) es llamado un catión. Un ión negativo (más electrones que protones) es llamado un anión. Las fuerzas que mantienen a los átomos o iones juntos son llamadas fuerzas de adherencia. Las propiedades de los materiales son largamente determinadas por las fuerzas de adherencia más bien que por los átomos mismos. Por ejemplo, ambos el grafito y el diamante

contienen sólo átomos de carbono. Las propiedades (y costo) del grafito y del diamante son bastante diferentes desde que las fuerzas de adherencia son diferentes. El agua y el hielo contienen sólo moléculas de H₂O. Sin embargo, la fuerza de adherencia entre las partículas del hielo son más fuertes que entre las partículas de agua.

La adherencia en los metales ocurre a través de interacciones de los electrones. Los electrones mantienen a los átomos del metal juntos en el sólido. El proceso de corrosión es causado por la pérdida de electrones que son los que mantienen juntos a los átomos del metal. El átomo neutro del metal es convertido por medio de la corrosión de un átomo neutro a un ion cargado. El núcleo del átomo permanece inalterable por el proceso de corrosión.

Las reacciones químicas en general y la corrosión en particular son cambios en las fuerzas de adherencia entre los átomos más bien que un cambio en los átomos mismos. La electroquímica es una de las ciencias que más nos ayuda en el conocimiento de los mecanismos de la corrosión así como, en los procedimientos para combatirla. Por este motivo, expondremos primeramente, las causas que motivan la corrosión de los metales sumergidos o enterrados con ayuda de la electroquímica y la solución que electroquímicamente tiene esta corrosión.

1.1.3) Conceptos de Oxidación-reducción

La corrosión es un fenómeno electroquímico que

comprende tres etapas principales:

- a) Ocurre una pérdida de parte del metal llamada área anódica (ánodo). En el caso de la corrosión del hierro, éste (Fe) entra al agua en forma oxidada de ion Fe^{++} .
- b) Como resultado de la formación de Fe^{++} , se liberan dos electrones que fluyen a través del metal al área catódica (cátodo).
- c) El oxígeno presente en el agua se mueve hacia el cátodo y completa el circuito eléctrico usando los dos electrones que también fluyen al cátodo, para formar $(\text{OH})^-$ en la superficie del metal.

Todas las reacciones electroquímicas tienen lugar con una transferencia de electrones, verificándose por tanto de forma simultánea una oxidación y una reducción.

Todos los elementos (átomos, moléculas o iones) que son capaces de ceder electrones son reductores y a su vez se oxidan dando lugar a una reacción parcial de oxidación. Así por ejemplo tenemos:



El hierro es reductor y a su vez se oxida, siendo estas reacciones parciales de oxidación.

Aquellos otros elementos (átomos, moléculas o iones) que son capaces de captar electrones son oxidantes que a su vez se reducen, dando lugar a una reacción parcial de reducción. Así por ejemplo, tenemos:



En este caso el (Fe^{+++}) es oxidante y a su vez se reduce, siendo ésta una reacción parcial de reducción.

El conjunto de estas dos reacciones parciales constituye un proceso global llamado "REDOX". Por ejemplo la oxidación de hierro será:



La facilidad con que cada metal pasa a formar parte de la disolución, como iones positivos en un electrólito, la explica en una forma sencilla el científico Nernst. Según él, dicha tendencia está controlada por la "presión de disolución", que para cada metal tiene un valor determinado. Esta tendencia es grande para algunos metales y pequeña para otros.

Debido al proceso de oxidación $(\text{Fe} \dots \dots \text{Fe}^{++} + 2e^{-})$ el metal queda cargado negativamente. A esta presión de disolución, la solución opone la tendencia contraria, ésto es, depositar iones sobre el metal en forma de átomos neutros. Esta tendencia es debida a la presión osmótica de la solución. Debido a este proceso de reducción $(\text{Fe}^{++} + 2e^{-} \dots \dots \text{Fe})$ el metal queda cargado

positivamente. Cuando el metal se sumerge en una solución de sus iones, ambos procesos se realizan en forma simultánea, hasta llegar a un equilibrio dinámico en que ambos procesos se realizan a igual velocidad. En este momento se dice que se ha llegado al equilibrio de la "doble capa". Esta capa tiene un espesor muy pequeño, del orden de los 10 Å, pero en ella el gradiente del potencial llega hasta 10^7 voltios/cm.

Según el metal y la concentración de sus iones en la disolución se distinguen tres casos:

a) PRESION DE DISOLUCION MAYOR QUE LA PRESION OSMOTICA

La velocidad de oxidación es mayor que la velocidad de reducción. Este proceso continúa hasta que la concentración de iones positivos en la doble capa adquiere un valor en que la presión osmótica igual a la presión de disolución.

En este caso el metal se carga negativamente frente a la solución positiva, ya que tiene más cationes que aniones. Cuando se consigue el equilibrio se dice que el metal ha adquirido su potencial frente a la disolución.

b) PRESION DE DISOLUCION IGUAL A LA PRESION OSMOTICA

Las velocidades de los procesos de oxidación y reducción son iguales. No se establece diferencia de potenciales.

c) PRESION DE DISOLUCION MENOR QUE LA PRESION OSMOTICA

La velocidad de oxidación es menor que la de reducción, depositándose mas iones que los que se disuelven. La concentración de iones positivos en la doble capa disminuye hasta que las dos presiones se igualen. En este caso el metal se carga positivamente frente a la solución ya que tiene mas aniones que cationes. Cuando se consigue el equilibrio, el metal ha adquirido su potencial frente a la disolución.

La medida de la diferencia de potencial que se establece en la doble capa es prácticamente imposible de medir directamente. Es por eso que en lugar de operar con potenciales absolutos se miden potenciales relativos entre el metal sumergido y un electrodo de referencia. El electrodo tipo elegido es el electrodo normal de hidrógeno, constituido por un electrodo de platino platinado (inerte) el cual lleva adsorbido hidrógeno gas a 1 atmósfera de presión y está sumergido en una solución 1M de iones H^+ ; por convenio el potencial de éste es igual a cero. Estas medidas de potencial se hacen en circuito abierto, es decir, sin paso de corriente. El valor de este potencial a 25°C se calcula por la ecuación de Nernst:

$$E = E_0 + \frac{0.059}{n} \log (Me^{n+})$$

donde E_0 = Potencial Normal

n = Valencia de ion metálico

Me^{n+} = Concentración en moles/litro del ion metálico

1.1.4 Concepto de Pila Galvánica (Anodo y Cátodo)

Cuando conectamos entre sí dos electrodos de diferente potencial y establecemos al mismo tiempo una conexión entre los electrolitos que bañan a ambos electrodos o utilizamos un único electrodo, obtenemos una pila galvánica (Ver Fig. 1).

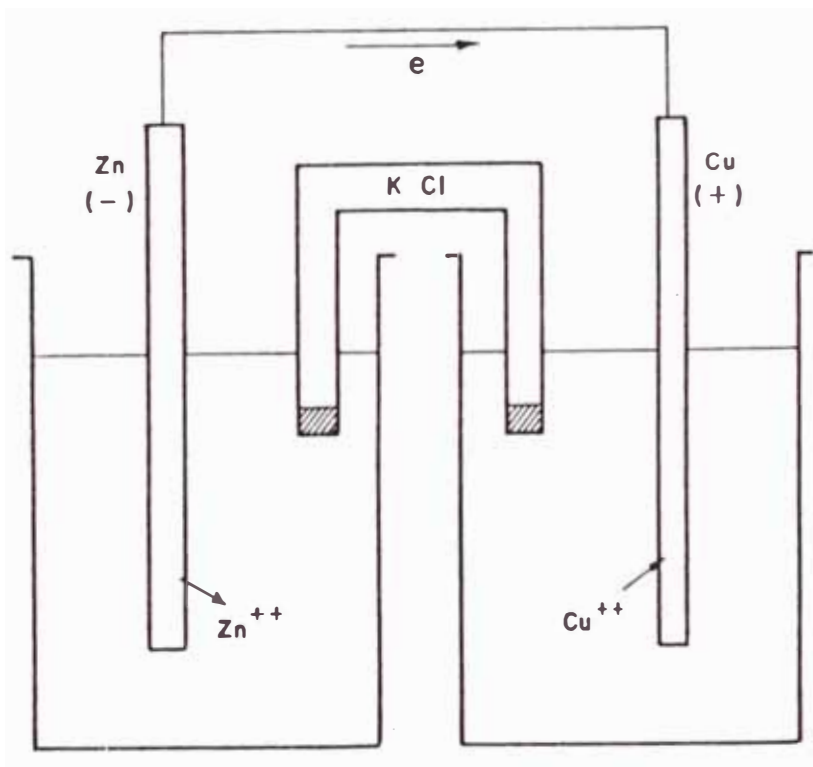


FIGURA 1

PILA GALVANICA

Si por ejemplo tenemos un electrodo de zinc (potencial negativo frente al electrodo de referencia de hidrógeno) sumergido en una solución cualquiera de sus sales y un electrodo de cobre (potencial positivo con respecto al electrodo de hidrógeno) sumergido en una solución de sus sales y por medio de un puente salino (generalmente de KCl) establecemos comunicación entre las dos soluciones. Al conectar, mediante un conductor, los dos electrodos se establecerá un flujo de electrones del metal más activo al metal más noble, a través de este conductor. El zinc (metal activo) tiene una gran tendencia a pasar a la forma iónica, quedando el electrodo con un exceso de electrones.



Estos electrones fluirán por el conductor hasta el electrodo de cobre (deficiente en electrones) donde serán aceptados por los iones Cu^{++} , que pasarán a Cu metálico.

El electrodo donde se verifica la oxidación se denomina ánodo, mientras en el que tiene efecto la reducción, se llama cátodo.

En el caso de que el electrólito no contenga iones del electrodo más noble, o sea del que hace de cátodo, las reacciones que normalmente tienen lugar en este electrodo serán las de reducción de los oxidantes presentes en la solución. Generalmente el oxígeno disuelto o los iones de hidrógeno presentes en la solución.



Como regla general, si se conectan dos electrodos de potenciales diferentes, el de potencial más negativo hará de ánodo y sufrirá corrosión, mientras que el de potencial menos negativo será el cátodo y estará protegido.

Serie Galvánica

La Serie Galvánica es una tabulación de acuerdo a los potenciales de corrosión de varios metales y aleaciones expuestas a medio ambientes específicos.

Estos potenciales de corrosión son medidos usando los aparatos y procedimientos que son previamente descritos para un número de metales y los resultados son tabulados de acuerdo a los potenciales de corrosión medidos. Esta tabulación es mostrada en la TABLA II para los metales y aleaciones expuestas en agua de mar. Debido a que los potenciales de corrosión de un metal dado a menudo muestra considerable variación, los valores de los potenciales de corrosión no se dan en esta tabla, la cual es presentada sólo como una lista. Los metales con potenciales de corrosión positivos son usualmente llamados nobles o catódicos y los que tienen potenciales de corrosión negativos son usualmente referidos como metales y aleaciones activas o anódicas.

SERIE GALVANICA DE VARIOS

METALES EXPUESTOS AL AGUA DE MAR

ACTIVO

Magnesio
 Aleaciones de Magnesio
 Zinc
 Acero Galvanizado
 Aluminio 1100
 Aluminio 6053
 Alclad
 Cadmio
 Aluminio 2024 (4.5Cu, 1.5 Mg.0.6 Mn)
 Acero Dulce
 Hierro Forjado
 Hierro Fundido
 Acero Inoxidable con 13% Cr
 Tipo 410 (Activo)
 Acero Inoxidable 18-8
 Tipo 304 (Activo)
 Acero Inoxidable 18-12-3
 Tipo 316 (Activo)
 Plomo
 Estaño
 Metal Muntz
 Bronce Manganeseo
 Bronce Naval
 Niquel (Activo)
 Bronce Amarillo
 Bronce Admiralty
 Bronce Aluminio
 Bronce Rojo
 Cobre
 Bronce Silicon
 Niquel (Pasivo)
 Acero Inoxidable con 13% Cromo
 Tipo 410 (Pasivo)
 Titanio
 Acero Inoxidable 18-8
 Tipo 304 (Pasivo)
 Acero Inoxidable 18-12-3
 Tipo 316 (Pasivo)
 Plata
 Grafito
 Oro
 Platino

NOBLE O
 PASIVO

Pilas de Concentración .

Cuando dos electrodos unidos entre sí son de un mismo material, pueden constituir una pila, con tal de que estén en contacto con concentraciones diferentes de un mismo ion.

Un ejemplo sería una pila con dos electrodos de cobre , siendo las concentraciones del ion cuproso distintas en las dos semipilas (Ver Figura 2).

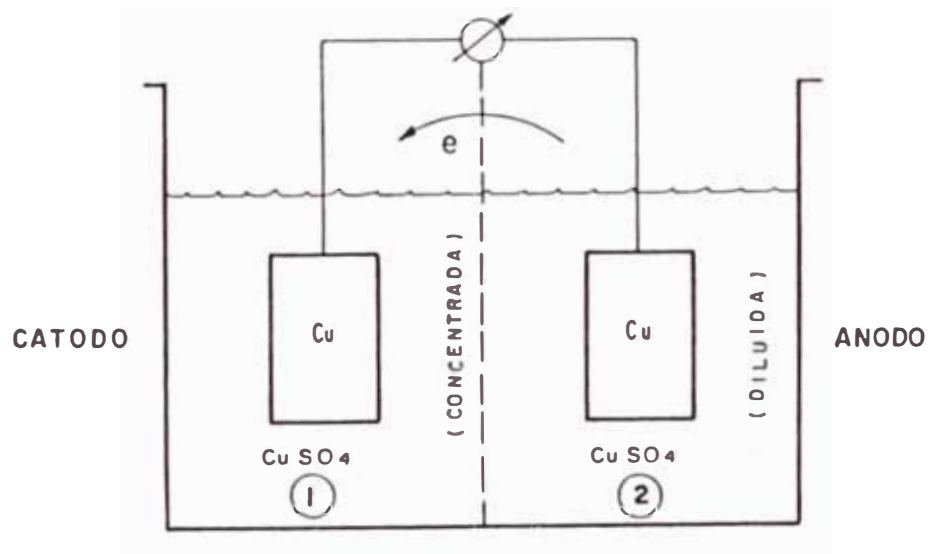


FIGURA 2

La pila funcionará en el sentido de igualar las concentraciones. La semipila con la concentración de iones cuprosos menor hará de ánodo por lo cual el electrodo sumergido en ella sufrirá corrosión, mientras que la semipila con concentración de iones cuprosos mayor, hará de cátodo.

La reacción dura hasta que la concentración sea igual en ambas semipilas.

Los iones cuya concentración varia, no tienen porque ser necesariamente los correspondientes al metal de los electrodos, sino que pueden ser cualquier tipo de iones oxidantes con tal de que su potencial de reducción sea mas positivo que el potencial de oxidación del metal de los electrodos.

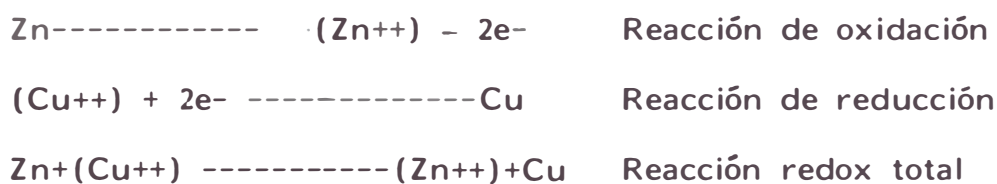
Así, por ejemplo, si el oxígeno disuelto en el agua se encuentra en concentraciones distintas en las dos semipilas, habrá una diferencia de potencial que pondrá en marcha una reacción de oxidación en la semipila de menor concentración de oxígeno (ánodo) y una reacción de reducción de oxígeno en la semipila de mayor concentración de oxígeno (cátodo). Igualmente en este caso, la reacción durará hasta que las concentraciones de ambas semipilas se igualen. Los procesos de corrosión electroquímica de los metales sufren el funcionamiento de pilas con zonas anódicas y catódicas perfectamente determinadas. Estas pilas pueden ser pilas galvánicas (siempre que se ponen en contacto dos metales de distinto potencial), pilas de concentración o una combinación de ambos tipos

de pilas. Entre las posibles pilas de concentración, la más importante es la pila de aireación diferencial, que tiene lugar cuando un metal en contacto con un electrólito posee zonas superficiales de más difícil acceso al oxígeno que otras. La corrosión se produce entonces, en las partes poco aireadas, permaneciendo intactas las partes más aireadas.

Concepto de Anodo y Cátodo

Cuando dos metales distintos se ponen en contacto entre sí, a través de un electrolito, se obtiene una pila galvánica.

Consideremos un electrodo de zinc, que posee un potencial negativo frente al potencial de referencia de hidrógeno y un electrodo de cobre, con potencial positivo frente al mismo electrodo de hidrógeno. El zinc presenta una presión de disolución superior a la del cobre y en él prevalece el proceso de disolución cargándose el electrodo negativamente, sin embargo, en la semipila de cobre la presión osmótica de los iones cúpricos supera a la presión de disolución del metal, depositándose cobre metal sobre el electrodo, cargándose positivamente. Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



El electrodo donde se verifica la oxidación se llama ANODO y el

electrodo donde se realiza la reducción se denomina CATODO.

En general, si se conectan dos electrodos de potenciales diferentes, el de potencial más negativo hará de ánodo y el de potencial menos negativo (o más positivo) hará de cátodo.

Cuando la solución que contiene el electrodo no contiene iones de ese metal, se reducirán otros iones que tengan carácter oxidante, es decir, que sean capaces de captar electrones. Los más normales son los iones H^+ y el O_2 disuelto en el agua.

Potenciales Estandard

Puesto que es inconveniente el relacionar los potenciales de diferentes metales a cada otro por medio de la medición de una serie de combinaciones, como si se tratara de comparar las alturas relativas de montañas por un método similar. La práctica ha desarrollado lo que se podría llamar "marcas de referencia" para mediciones de potencial al cual, cualquier otro potencial medido puede ser relacionado en igual forma como las elevaciones están referidas al nivel medio del mar.

Hay varias "marcas de referencia" para los potenciales de uso común pero todas ellas están relacionadas a un estandard básico que es el electrodo normal de hidrógeno, constituido por un electrodo de platino platinado (inerte) el cual lleva adsorbido hidrógeno gas a una atmósfera de presión y está sumergido en una solución 1 Molar de iones H^+ , por convención el potencial de este hidrógeno es cero.

Estas medidas de potencial se hacen en circuito abierto, es decir, sin paso de corriente. Unos metales adquieren un potencial positivo (se cargan positivamente) frente al electrodo de referencia de hidrógeno, éste es el caso del cobre. Otros como el zinc, adquieren un potencial negativo. El potencial de los electrodos depende no sólo del metal del que están constituidos, sino también de la solución en que están sumergidos. Esta solución puede o no contener cationes del mismo metal del electrodo, ya que puede ser también agua de mar, de suelos, etc., en cada caso el potencial del electrodo varía.

El potencial que adquiere un metal frente al electrodo de referencia de hidrógeno, en contacto con una solución 1 Molar de sus iones se llama "potencial Normal".

Si se ordenan los metales conforme a sus potenciales normales, empezando con el de potencial más negativo y terminando con el potencial más positivo, se obtiene la serie electroquímica (TABLA III). Los primeros metales de la serie son los más activos y se oxidan fácilmente al descender en la serie, disminuye esta tendencia a oxidarse y los últimos ya son metales nobles que se oxidan difícilmente.

Electrodos de Referencia

La media celda standard de hidrógeno es más bien dificultosa de usar bajo muchas circunstancias en las cuales se necesita hacer

SERIE ELECTROQUIMICA DE LOS METALES

(Electrodo de referencia el del Hidrógeno Normal)

IONES	POTENCIAL (VOLT.)
Li+	-3,022
Rb+	-2,924
K+	-2,925
Na+	-2,715
Mg+	-1,866
Al+++	-1,67
Zn++	-0,762
Cr++	-0,71
Fe++	-0,441
Cd++	-0,397
Ti+	-0,336
Co++	-0,29
Ni++	-0,22
Sn++	-0,136
Pb++	-0,129
H+	±0,000
Bi+++	+0,226
Cu++	+0,344
Te++++	+0,558
Hg++	+0,798
Ag+	+0,799
Pt++	+1,2
Au+++	+1,12

TABLA III

mediciones de potenciales. Cualquier otra combinación de un electrodo metálico y una solución conteniendo una concentración específica de sus iones podría ser usada, si primero, el potencial de esa media celda es obtenida midiendola en una celda en la cual la otra media celda es el electrodo standard de hidrógeno. Cuando se ha hecho esto, una medición obtenida con cualquier media celda puede ser relacionada a la media celda de hidrógeno por simple aritmética.

Las otras medias celdas más frecuentemente usadas en estudios de corrosión, junto con sus principales relativos a la media celda standard de hidrógeno se muestran en la TABLA IV .

MEDIA CELDA	POTENCIAL (voltios)
Calomel Saturado	+0.2415
Calomel Normal	+0.2800
Calomel 1/10 Normal	+0.3337
Plata/Cloruro de plata	+0.2222
Cobre/Sulfato de cobre (saturado)	+0.3160
Hidrógeno	0.0000

TABLA IV .- Potenciales de electrodos de referencia (medias celdas) referidos al electrodo standard de hidrógeno

Para ilustrar la conversión de valores de potenciales medidos con alguna de esas medias celdas a valores en la escala del electrodo de hidrógeno, podemos tomar el caso de una tubería enterrada en el suelo, usando una media celda de referencia de cobre/sulfato de cobre. Esta podría mostrar un potencial de -0.700 voltios medidos

disminuir como resultado de los efectos de los productos de las reacciones anódica y catódica. La reacción catódica y con ella la reacción total de corrosión disminuiría si el hidrógeno producto de la reacción catódica no fuera removido por desprendimiento como gas o por alguna reacción que envuelve oxígeno. Esta disminución es el resultado de la "polarización catódica".

Es posible medir este efecto en términos de potencial del metal en el cual la reacción está ocurriendo: por ejemplo, si el potencial de la superficie del metal más noble, el cátodo, fuera medido antes de que fluya cualquier corriente galvánica y después de que el flujo de corriente ha ocurrido por algún tiempo, se encontrará que el potencial medido ha cambiado a un valor más cercano al potencial del metal menos noble en la cupla. De igual forma, mediciones del potencial del miembro anódico de la dupla, mostrarán un aumento en su potencial alcanzando un valor más cercano al potencial del miembro catódico de la cupla. Esto podría ser el resultado de un aumento de la concentración de iones del metal anódico en la inmediata vecinidad de la superficie del metal que está corroyendo. Los efectos de corrosión producidos por el flujo de corriente en el fenómeno de la polarización está relacionado no sólo al total de la corriente que fluye sino a la densidad de corriente o flujo de corriente por unidad de área. Es fácil entender que el efecto de una cierta cantidad de corriente concentrada en una pequeña área de la superficie de un metal será mucho mayor que cuando el efecto de la misma cantidad de corriente es disipada sobre un área

de esta forma. Para convertir este potencial a una escala en la cual el electrodo de hidrógeno tiene un potencial igual a cero, será necesario agregar +0.316 voltios al potencial que fué medido, para así obtener -0.384 voltios. Las medias celdas de calomel, son de hecho, electrodos de mercurio con concentraciones específicas de iones mercurio controlados por la concentración de cloruro de potasio (1/10 Normal) en una solución saturada de cloruro mercurioso. Las medias celdas de calomel son mayormente usadas en experimentos de laboratorios.

Las medias celdas de plata/cloruro de plata, las cuales son más resistentes al manipuleo que las medias celdas de calomel, son las más frecuentemente usadas para mediciones en agua de mar. Las medias celdas de cobre/sulfato de cobre son mayormente usadas en medición de potenciales de tuberías de acero enterradas. Lo que a menudo se refiere como un potencial entre la tubería y el suelo, es realmente el potencial medido entre la tubería y la media celda (electrodo de referencia) usado para hacer la medición. El suelo por si mismo no tiene potencial contra el cual pueda ser medido el potencial de una tubería independientemente del potencial del electrodo de referencia que sea usado en la medición.

1.1.5) Concepto de Polarización

En forma similar al caso de otras reacciones químicas que tienden a alcanzar una velocidad de corrosión en el equilibrio menor que en la etapa inicial, la acción galvánica tiende a

mucho mayor. Este efecto de área en término de densidad de corriente es ilustrado en forma práctica por medio de la combinación de acero-cobre, ya sea como plancha o remache usados para juntarlos, inmersos en una solución corrosiva. Si remaches de acero son usados para juntar planchas de cobre, la densidad de corriente sobre la plancha de cobre relativamente grande (cátodo) será baja, la polarización catódica del cobre será ligera y el voltaje de la cupla galvánica mantendrá un valor cercano al potencial de circuito abierto. Al mismo tiempo, la densidad de corriente sobre los pequeños remaches (anodos) será muy alta y consecuentemente la corrosión será muy severa.

Con el arreglo opuesto de remaches de cobre juntando planchas de acero, la densidad de corriente sobre los cátodos de cobre será alta con considerable polarización catódica del cobre reduciendo el potencial de circuito abierto por debajo de su valor inicial. La disminuida corriente anódica será esparcida sobre las planchas de acero relativamente grandes y el indeseable efecto de corrosión apenas será notado.

Las mediciones de potenciales de circuito abierto son inadecuadas para predecir la magnitud de los efectos galvánicos, ya que ellos, no toman en cuenta el área y los efectos de polarización. Estas mediciones son confiables sólo para predecir la dirección de tales efectos.

1.1.6) Conceptos de Pasividad

La pasividad puede ser definida como pérdida de reactividad química exhibida por ciertos metales y aleaciones bajo condiciones específicas de medio ambiente.

Metales como el cromo, hierro, níquel, titanio y aleaciones conteniendo estos elementos se hacen esencialmente inertes y actúan como si fueran metales nobles, tales como el platino y el oro. Aunque los potenciales de oxidación-reducción (serie galvánica) indican que estos metales deberían corroerse por soluciones ácidas, éste no es siempre el caso. Aunque el fenómeno de la pasividad ha sido estudiado por más de cien años, la naturaleza exacta o causa de esos efectos todavía no es completamente entendida. Sin embargo, se concuerda en que esos efectos son debido a la formación de una película superficial. Algunos científicos creen que es una capa muy delgada de óxido la cual tiende a aislar el metal del electrolito, como la película que forma el aluminio cuando es expuesto al aire y al agua. Si no fuera por esta película el aluminio se corroería rápidamente en aire y en agua ordinarios. Otros investigadores creen que es una capa adsorbida, que es simplemente una película molecular de una sustancia tal como el oxígeno o algunas especies iónicas de la solución. La razón de la confusión sobre la naturaleza de la película pasiva es que es extremadamente delgada y frágil. La película mide 30 Armstrong o menos de espesor y contiene considerables cantidades de agua. Entonces, cuando se remueve o

aisla esta película de la superficie metálica para propósitos de estudio, a menudo se deshidrata y sufre daño físico y mecánico. Otras películas formadas por productos de la corrosión son también protectoras. Por ejemplo,, películas insolubles de sulfato de plomo son responsables de la resistencia del plomo a la corrosión por ácido sulfúrico.

La película básica que se forma sobre las aleaciones de cobre en agua de mar, contribuye grandemente a su durabilidad. La forma en la cual estas películas son capaces de adherirse, resistir la remoción por efectos de turbulencia a ser restablecidas rápidamente si se rompen, determina los méritos de las aleaciones de cobre en resistir los efectos de la velocidad.

1.1.7) Corrosión en Instalaciones

La configuración geométrica de los sistemas metal-electrolito o metal-materias sólidas-electrolito puede motivar que las sustancias responsables de la reacción catódica alcancen con dificultad determinadas zonas de la superficie metálica en tanto llega fácilmente el resto de ella. Esta circunstancia se da en los resquicios presentes en piezas o estructuras metálicas, por ejemplo en uniones traslapadas, ranuras, grietas y en las zonas de contacto con otros cuerpos no metálicos, etc. Dentro de este tipo de corrosión es fundamental establecer una diferencia entre la posibilidad de la formación de "micropilas" y la formación de "macropilas".

Las micropilas se originan al estar el ánodo y el cátodo de la pila muy cercanos el uno del otro. La formación de macropilas requiere la existencia de grandes distancias de separación entre las zonas anódicas y catódicas. Los efectos de este tipo de pilas por circunstancias de forma intensiva a determinadas zonas, suelen ser muy peligrosas.

Las macropilas son probables en grandes estructuras metálicas, mientras que las micropilas desempeñan un papel preponderante en la corrosión de pequeñas piezas.

Estructuras Enterradas

Teniendo en cuenta que, por lo general, el PH de los terrenos se encuentra comprendido entre 6 y 9.5, la reacción catódica fundamental es la reducción de oxígeno.

En este caso, una piedra o un trazo de madera en contacto con el acero en una zona de terreno aireado, es suficiente para originar una vigorosa pila de aireación diferencial en la que el área del acero bajo el objeto extraño actúa de ánodo. La misma forma de corrosión se produce por la presencia de cuerpos extraños adheridos, como partículas de óxido, arena, burbujas de aire, gotas, etc.

La falta de uniformidad del suelo en cuanto a su nivel de humedad y permeabilidad, hacen que en la zona inferior de la tubería enterrada, el terreno retenga más la humedad que en la zona superior, mejor ventilada, localizándose la corrosión en la parte

inferior de la tubería. En los terrenos muy poco conductores, los problemas de corrosión, debido a la actuación de las macropilas de "larga distancia" son mucho menos graves que tratándose de terrenos de alta conductividad. A medida que aumenta la conductividad iónica más probables son las macropilas de larga distancia e intensa su actividad.

Una vez que se ha establecido una fuerza impulsora de aireación diferencial entre zonas alejadas, correspondientes a una misma superficie metálica, el flujo de corriente viene restringido por la resistencia del camino electrolítico. Esta resistencia limita, a la vez, la máxima separación entre zonas anódicas y catódicas compatible con una acción corrosiva inquietante.

Las medidas de resistividad efectuadas en el terreno por el que se efectuará el tendido de la tubería pueden dar una idea bastante exacta de los peligros de corrosión a los que estará sometida.

Estructuras Sumergidas

La corrosión se mantiene a profundidades apreciables, puesto que la agitación y la convección proveen al agua de oxígeno hasta casi niveles de saturación. Por otro lado, la corrosión desciende de modo considerable sobre los objetos enterrados en el fondo, ya que la falta de convección reduce extremadamente el suministro de oxígeno. Sin embargo, si la estructura se prolonga fuera del suelo del fondo y dentro del agua, la aireación diferencial podrá

reflejarse en una fuerte corrosión localizada, sobre la porción enterrada del metal. De forma general e independiente del tipo de electrolito en que se encuentre la estructura metálica, siempre que exista una diferencia de concentración de oxígeno entre dos zonas distintas de la estructura; se producirá una pila de corrosión por aireación diferencial cuyos efectos se podrán mitigar por la aplicación conjunta de protecciones activas y pasivas.

La corrosión en estructuras sumergidas en agua de mar puede ser dividida en cuatro zonas de ataque. Estas zonas se traslapan un poco y pueden esperarse algunas diferencias en la velocidad de corrosión dentro de la misma zona. Estas cuatro zonas son:

- a) La zona de lodo, es la porción de la estructura que se encuentra debajo del fondo del mar.
- b) La zona sumergida o zona debajo del nivel del agua, donde el metal es siempre cubierto por agua.
- c) La zona de salpicadura, arriba del nivel de agua donde la acción de las olas y marea mantienen siempre el metal húmedo.
- d) La zona atmosférica, donde el metal está seco la mayor parte del tiempo.

1.2) Formas de la Corrosión

1.2.1) Distintas Formas de Corrosión

Una pregunta natural podría ser: "¿En qué medio ambiente ocurre la corrosión?", La respuesta correcta sería: "En cualquier medio ambiente, dependiendo de que material estemos considerando". La siguiente pregunta que se podría hacer es: "¿Cuántas formas diferentes de corrosión existen?". La respuesta correcta que podría ser nuevamente inesperada sería: "Tantas como 57 variedades o tan pocas como una, dependiendo de que es lo que entendemos por una forma diferente". Algunas autoridades en corrosión consideran sólo dos o tres, otras consideran sólo las variedades más frecuentemente encontradas en la industria petrolera y especialmente las producidas en la corrosión de estructuras sumergidas.

En general la destrucción por corrosión toma muchas formas dependiendo de la naturaleza del metal o aleación, la presencia de incrustaciones u otra materia extraña en la superficie, la homogeneidad de su estructura, la naturaleza del medio corrosivo, factores incidentales del medio ambiente tales como la presencia de oxígeno y su uniformidad, temperatura, velocidad y otros factores como esfuerzo (residual o aplicado, fijo a cíclico), depósitos porosos en la superficie, hendiduras, efectos galvánicos entre metales distintos y la ocasional presencia de corrientes eléctricas parasitas de fuentes externas. Excepto en casos muy raros en que se cometen gruesos errores al escoger un material para un servicio particular o un imprevisto cambio drástico en la naturaleza del medio ambiente corrosivo o un completo desentendimiento de su

naturaleza, fallas de metales por un ataque general o desgaste muy rápido no son a menudo encontrados. Las fallas por corrosión pueden ser localizadas en forma de picaduras, corrosión intergranular, corrosión con rajaduras, corrosión bimetalica, corrosión-erosión, corrosión-fatiga, etc.

1.2.2) Corrosión por Picaduras (pittings)

La corrosión por picaduras ocurre cuando el metal que está corroyéndose sufre pérdida de metal en áreas localizadas más bien que sobre la superficie entera y toda la fuerza de la reacción de corrosión está concentrada en esas áreas localizadas. La velocidad de corrosión en las áreas bajo ataque serán muchas veces mayor que la velocidad de corrosión promedio sobre la superficie entera.

Las picaduras son en sí, una forma de corrosión localizada que se produce debido a la acción de una celda local la cual produce cavidades que comienzan en la superficie del metal. Estas cavidades pueden o no llenarse con productos de la corrosión. Los productos de la corrosión pueden formar cubiertas sobre las cavidades de las picaduras, las cuales son conocidas como "nódulos" o "tubérculos". Las formas de las picaduras varían mucho generalmente son hendiduras irregulares cónicas o hemisféricas. Las paredes de las picaduras son muy irregulares cuando son examinadas al microscopio. Su forma distingue a las picaduras de otras formas de corrosión localizada. Las picaduras ocurren cuando un metal es

protegido por una película que no es completamente resistente a la corrosión. Sólo una pequeña parte de la superficie metálica se corroe, pero las perforaciones pueden obligar a costosas reparaciones o reemplazos de equipos muy caros. Es un hecho que las picaduras (pittings) han causado la mayor cantidad de pérdidas inesperadas que cualquier otro tipo de corrosión. Las picaduras usualmente ocurren sobre una superficie metálica inmersa en una solución o medio ambiente húmedo (tal como el suelo). También puede ocurrir sobre una superficie expuesta a la atmósfera si hay gotas de humedad o películas de humedad condensada sobre la superficie metálica.

Las picaduras suelen ocurrir en los metales que son cubiertos por películas protectoras muy delgadas que pueden formarse durante la fabricación y ser producidas por una reacción con el medio ambiente. Las picaduras se desarrollan en los puntos débiles de las películas protectoras y en sitios donde la película es dañada mecánicamente bajo condiciones donde la reparación de esta película no es posible. La importancia práctica de las picaduras dependen del espesor del metal y de la velocidad de penetración de la picadura. La velocidad de penetración usualmente disminuye con el tiempo. En secciones delgadas, las picaduras pueden ser algo serio, mientras que en secciones gruesas pueden ser algo sin importancia. Una medida de la severidad de las picaduras es la relación entre la penetración más profunda y el promedio de las penetraciones en el metal calculada por la pérdida total de peso.

En general la velocidad de penetración disminuye si el número de picaduras aumenta. Esto es porque las picaduras adyacentes tienen que compartir las áreas de cátodo adyacentes que están disponibles, lo cual controla la corriente de corrosión que puede fluir.

1.2.3) Corrosión Bimetálica

Cuando dos metales diferentes son colocados en contacto en un electrolito conteniendo agentes oxidantes, el metal más reactivo se corroerá y el otro permanecerá inalterable. Esta cupla de metales diferentes es conocida como una cupla bimetálica, la cual puede ser muy destructiva ya que acelera grandemente la velocidad de corrosión del más activo de los dos metales. Este principio es usado de una manera beneficiosa en la protección catódica. Cuando el acero es conectado a un metal más reactivo, tal como el magnesio o el aluminio, es protegido (no se corroe), el acero se convierte en un cátodo y el metal más reactivo en un ánodo.

Una regla general que indica la aceleración del daño en una cupla bimetálica, es el "principio de área". Esta regla establece que la corrosión total es proporcional al total del área del cátodo expuesta al electrolito corrosivo. Si hay una marcada tendencia de un metal a corroerse cuando forma una cupla con otro metal menos activo, tal como el hierro en contacto con el cobre y ambos expuestos en agua de mar aireada, el metal más activo sufrirá toda la corrosión.

Así, remaches de acero en planchas de cobre o Monel (32Cu-66Ni-1Fe-1Mn) se corroerán rápidamente mientras que en el caso inverso de remaches de Monel en planchas de acero causarán muy poco daño. La corrosión total en término de pérdida de peso del metal es proporcional al área catódica expuesta al electrólito.

Cuando aleaciones de acero resistentes a la corrosión fueron usadas por primera vez en pozos de petróleo con presencia de condensado, sus efectos en la aceleración de la corrosión fueron estudiados. Se temía que coples de acero-niquel o acero-cromo en contacto con los forros de acero del pozo ("casing" N-80), resultaría en una severa corrosión del forro. Sin embargo, la experiencia en el campo, demostró que había muy poco daño por corrosión en el forro. El punto más importante a ser aprendido de este ejemplo es que una cupla de distintos metales en un electrólito neutral no aireado, no necesariamente causará corrosión. Un oxidante, tal como el oxígeno es requerido para continuar la reacción. El electrólito tiene que ser corrosivo al menos a un miembro de la cupla de metales diferentes para que se produzca corrosión bimetálica.

El principio de área puede ser aplicado a picaduras de tuberías de acero. Las tuberías nuevas cuando salen de las fábricas, vienen cubiertas por una cascarilla protectora que es muy buena conductora de la electricidad y al mismo tiempo es insoluble en agua y en ácidos débiles. Esto hace que las áreas cubiertas con la cascarilla sean protegidas y la corrosión se concentre en las áreas

donde no hay cascarilla. Después de un tiempo esta cascarilla se pierde, consecuentemente la aceleración del ataque es importante sólo en los primeros meses de vida de la tubería.

Secciones nuevas de tubería en una línea vieja son algunas veces atacadas por la corrosión porque la tubería vieja está cubierta con gruesas capas de óxido que la hacen catódica a la nueva tubería. Cuando un metal es soldado, el proceso de soldadura origina un tratamiento térmico, creando una microestructura cerca de la soldadura que difiere del metal base. Las dos áreas tienen diferentes tendencias a corroerse y se puede producir la "corrosión en la línea de soldadura". Un problema similar puede resultar de una impropia elección de las varillas de soldadura. Este problema es evitado utilizando prácticas correctas de soldadura.

1.2.4) Corrosión Intergranular

Como su nombre lo implica, la corrosión intergranular es el ataque preferencial a las fronteras de los granos de un metal. La corrosión intergranular a menudo es confundida con la corrosión con rajaduras debido a esfuerzos mecánicos. Sin embargo la corrosión intergranular puede ocurrir con ausencia de esfuerzos. La corrosión intergranular se ha presentado en muchas aleaciones incluyendo aceros inoxidables, austeníticos, aleaciones de cobre, aleaciones de aluminio y aleaciones de níquel. En la mayoría de los casos, la corrosión intergranular es el resultado de una estructura metalúrgica que causa que las fronteras del grano sean más

susceptibles al ataque corrosivo que los granos mismos. Un adecuado tratamiento térmico o un control de la composición química del acero generalmente puede eliminar la susceptibilidad del constituyente de la frontera del grano y hacer a la aleación resistente al ataque intergranular. La más seria ocurrencia de corrosión intergranular se produce en los aceros inoxidable austeníticos. Cuando estos aceros son mantenidos o enfriados lentamente hasta temperaturas entre 800 a 1600°F (427 a 871°C) el carburo de cromo precipita en las fronteras del grano produciéndose la sensibilización del acero. La exposición del acero sensibilizado a soluciones no agresivas tales como, ácidos débiles, da como resultado la corrosión intergranular.

Hay varias teorías que tratan de explicar la sensibilización de los aceros inoxidable austeníticos. La más popular es que la precipitación del carbono de cromo vacía o disipa áreas inmediatamente adyacentes a la frontera de los granos de cromo. Las zonas disipadas se convierten en anódicas a los granos y se corroen preferencialmente. La sensibilización se convierte en un problema cuando los aceros inoxidable son soldados o cuando ellos son expuestos a temperaturas de 800 a 1600°F (427 a 871°C).

Para prevenir la corrosión intergranular, dos métodos son usados: Tratamiento térmico y control de la composición química del acero.

La sensibilidad del acero se puede solucionar recociéndolo a temperaturas entre 1950 a 2050°F (1066 a 1121°C) y enfriándolo

rápidamente para evitar la precipitación del carburo de cromo. Otro tratamiento consiste en mantener el acero de 1600 a 1650°F (871 a 899°C) por varias horas, ésto permite al cromo difundirse de las fronteras del grano hacia las zonas disipadas o vaciadas.

1.2.5) Corrosión-erosión

Desde que la mayoría de los metales deben su resistencia a la corrosión a la formación y permanencia de una película o cascarilla protectora, la remoción de ésta puede originar una aceleración del ataque por corrosión.

La alta velocidad de los fluidos o la turbulencia frecuente erosionan la película o cascarilla protectora hasta exponer el metal desnudo y originarán la corrosión. Esta combinación de la erosión de la cascarilla protectora y la corrosión del metal debajo de ella es llamada corrosión-erosión y es la causa común de la falla de muchas estructuras sumergidas en agua de mar.

Los aceros al carbono y los aceros de bajo contenido de carbono son particularmente susceptibles de corroerse en medio ambientes en los cuales forman cascarillas de carbonato de hierro que son fácilmente removidas. El ataque normalmente ocurre sólo en ciertas áreas, tales como cambios de secciones, conexiones, doblados y codos donde se produce turbulencia en el fluido.

El movimiento relativo de partes metálicas con respecto a su medio ambiente líquido pueden originar la corrosión-erosión que viene a

ser una corrosión acelerada mecánicamente. El factor mecánico se puede dar como resultado de la abrasión, impacto, turbulencia, cavitación, etc. La corrosión-erosión es encontrada mas frecuentemente en bombas, válvulas, codos, impelentes, centrífugas, etc.

Un tipo de corrosión-erosión mas localizada es la conocida como corrosión-erosión por impacto. Esto ocurre cuando un flujo impacta sobre una superficie metálica y rompe la película o cascarilla en áreas muy pequeñas. El resultado del ataque se manifiesta en forma de picaduras (pittings) que son característicamente alargadas. La corrosión-erosión por impacto a menudo se produce como resultado de la turbulencia alrededor de pequeñas partículas adheridas a la superficie metálica. Es particularmente un problema en cobre y aleaciones de cobre. Los aceros inoxidables austeníticos tienen gran resistencia a la corrosión-erosión por impacto.

Otro tipo de corrosión-erosión es la ocasionada por la cavitación que es la formación y colapso de burbujas de vapor en fluidos. Esto se produce por un rápido cambio de presión y puede ocurrir cuando la presión absoluta en un punto dado de la corriente líquida es reducida hasta alcanzar la presión de vapor del fluido formándose burbujas. Esto es seguido de un rápido incremento de la presión lo que origina el colapso de la burbuja.

La corrosión-erosión por cavitación es el desgaste de un metal debido a repetidos impactos producidos por colapso de burbujas

dentro de un fluido. La corrosión usualmente juega un papel menor en el daño por la cavitación.

1.2.6) Corrosión-fatiga

La corrosión-fatiga es la disminución de la resistencia a la fatiga de un metal bajo esfuerzo cíclico. Cualquier corrosión de un metal sometido a esfuerzo por fatiga causará una reducción de la vida útil del metal en la fatiga.

La corrosión produce picaduras, hendiduras u otros puntos sobre la superficie metálica donde habrá concentración de esfuerzos y se iniciarán las rajaduras por fatiga.

El caso usual envuelve esfuerzos fluctuantes muy rápidos que pueden estar por debajo del esfuerzo de tensión. Cuando se aumenta el esfuerzo, el número de ciclos requeridos para causar fractura disminuye. Hay usualmente un nivel de esfuerzo debajo del cual no se producirá ninguna falla, aún con un número infinito de ciclos y éste es llamado el "límite de aguante" o "límite de resistencia". En forma práctica se define este límite como el esfuerzo debajo del cual no ocurren fallas en un millón de ciclos.

Una "curva de fatiga" conocida como la curva de esfuerzo vs. número de ciclos, se obtiene ploteando el número de ciclos requeridos para causar la falla contra el esfuerzo máximo aplicado cíclicamente. Cuando un metal está sometido a esfuerzos cíclicos en un medio ambiente corrosivo, el número de ciclos requeridos para

causar la falla contra el esfuerzo máximo aplicado cíclicamente. Cuando un metal está sometido a esfuerzos cíclicos en un medio ambiente corrosivo, el número de ciclos requeridos para causar falla, a un esfuerzo dado, se encuentra por debajo del número de ciclos de una curva ordinaria de fatiga. Como ejemplo se muestra en la FIGURA 3, las curvas de fatiga (en aire) y de corrosión-fatiga (en agua dulce) para una aleación de aluminio.

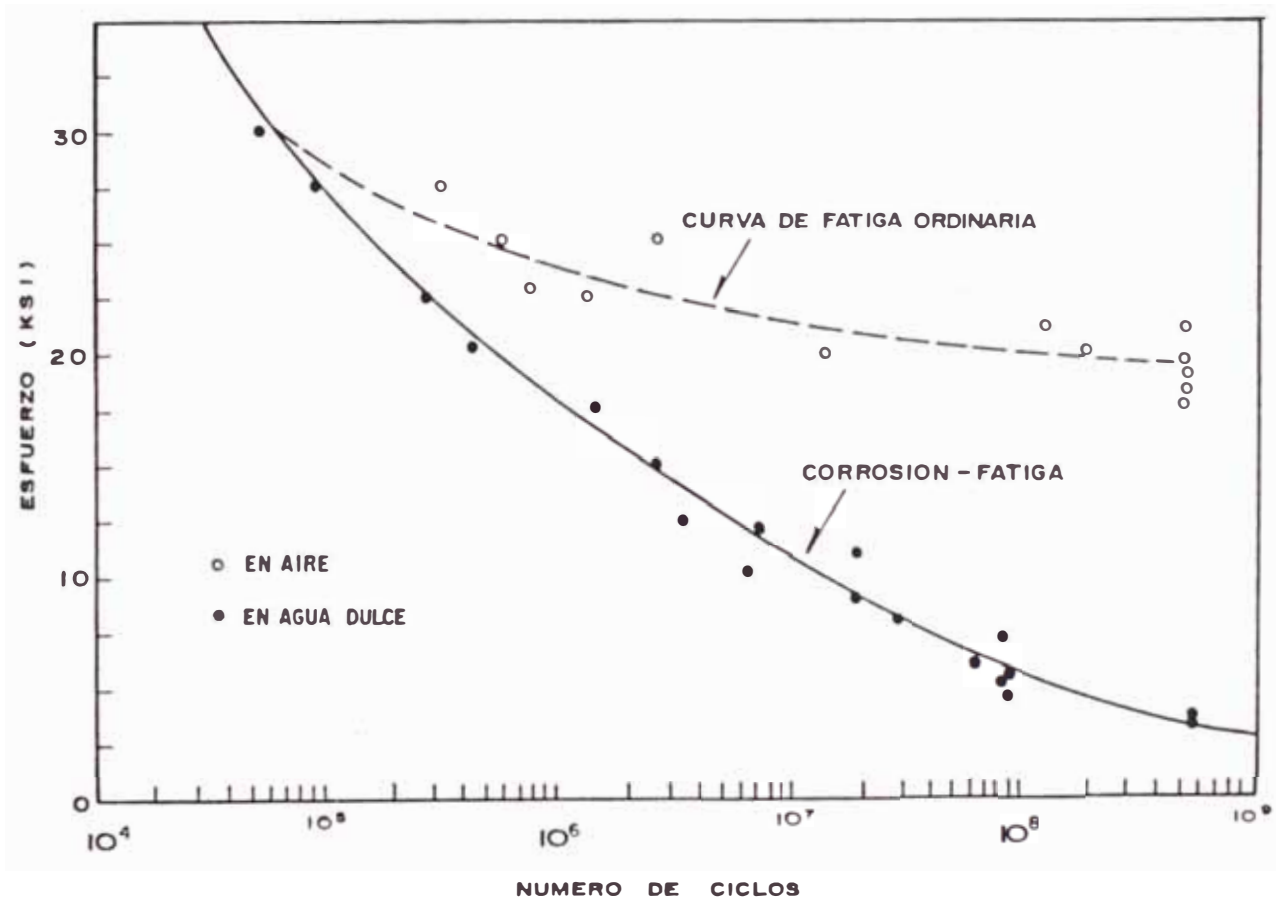


FIGURA 3

CURVAS DE FATIGA Y CORROSION-FATIGA PARA UNA ALEACION DE ALUMINIO EN AIRE Y EN AGUA DULCE.

En cualquier momento dado antes de la falla, el daño debido a la corrosión-fatiga será mayor que la suma de los daños por corrosión más los daños por fatiga. La corrosión localizada, tal como en las picaduras o la corrosión intergranular producen una mayor aceleración del daño por corrosión que en una superficie uniforme. En la fatiga ordinaria, hay raramente más de una rajadura mayor que empieza en la superficie y origina la falla. En corrosión-fatiga hay usualmente muchas rajaduras que se producen en los sitios de daño local.

Hay varios procedimientos efectuados para reducir o prevenir la corrosión-fatiga. La protección catódica es útil en soluciones acuosas y bajo condiciones ideales puede incrementarse el límite de fatiga hasta igualar los límites de fatiga en vacío. Los inhibidores también son efectivos si son adecuadamente aplicados. El suministro del inhibidor debe ser ininterrumpido, de otra forma se estaría estimulando ataques localizados los que formarían puntos focales para la falla por corrosión-fatiga.

1.2.7) Fallas Inducidas por Hidrógeno

Átomos de hidrógeno pueden ser producidos sobre una superficie metálica en un medio ambiente acuoso como resultado de una reacción de corrosión, de protección catódica, de electrodeposición, etc. Algunos de los átomos de hidrógeno se combinan para formar hidrógeno gaseoso molecular (H_2) sobre la superficie del metal que luego se desprenden al medio ambiente.

Una porción de los átomos son absorbidos por el metal. Esta entrada de átomos de hidrógeno puede tener algunos defectos muy indeseables, tales como ampollas de hidrógeno, rajaduras, formación de metano sobre 400°F (204°C) y fragilidad del metal producida por hidrógeno.

Ciertas sustancias, tales como iones sulfuro, compuestos fosforosos y de arsénico, catalizan la entrada de hidrógeno dentro del metal. En presencia de tales sustancias, hay una gran concentración de hidrógeno atómico en el metal y la probabilidad de fallas debido al hidrógeno se incrementa marcadamente.

Las ampollas de hidrógeno son causadas por la entrada de átomos de hidrógeno dentro de aceros de baja resistencia cuando hay defectos macroscópicos producidos por inclusiones o defectos de laminación. Cualquier vacío en el acero proporciona un lugar para que los átomos de hidrógeno se combinen, formen hidrógeno gas y cuando aumenta el número de moléculas de gas hidrógeno se crea presión suficiente para causar ampollamiento.

La fragilidad producida por hidrógeno es causada por la entrada de átomos de hidrógeno dentro de aceros de alta resistencia. En tal estado, un metal puede fallar por fragilidad a esfuerzos considerablemente más bajos que su límite de fluencia. La limitación de este fenómeno a materiales de alta resistencia puede deberse al hecho de que sólo en tales materiales pueden lograrse esfuerzos de tensión lo suficientemente altos para iniciar los mecanismos

involucrados. El hidrógeno que produce la fragilidad de un metal puede ser atrapado durante la colada del metal fundido, absorbido durante la electrodeposición del metal, limpieza química del metal o generado por acción corrosiva.

Si el metal está bajo un esfuerzo de tensión alto, puede ocurrir fallas de fragilidad. El camino para la falla puede ser intergranular o transgranular y es a menudo extremadamente difícil de distinguir las fallas de fragilidad causadas por hidrógeno de las rajaduras producidas por una combinación de esfuerzos y medio ambiente corrosivo.

Las fallas por fragilidad producidas por hidrógeno usualmente ocurren sólo en los aceros de alta resistencia, generalmente en aquellos que tienen límites de fluencia de 90,000 psi. o más altos. La susceptibilidad de las fallas producidas por hidrógeno aumentan cuando aumentan la resistencia y la dureza. Estas fallas no siempre ocurren inmediatamente después de aplicada la carga o la exposición en el medio ambiente productor de hidrógeno. Usualmente hay un período durante el cual ningún daño es observado, seguido por una repentina falla. A este fenómeno se le conoce como falla retardada. El tiempo para fallar disminuye cuando la cantidad de hidrógeno absorbido, esfuerzo aplicado y nivel de resistencia del material aumentan.

Hasta que un acero conteniendo hidrógeno no se raje, no hay daño permanente. En muchos casos el hidrógeno puede ser eliminado con

un adecuado tratamiento térmico y las propiedades originales del acero pueden ser restauradas. Esto se hace frecuentemente después de un proceso de electrodeposición de partes de acero de alta resistencia.

1.3) Prevención de la Corrosión

Cinco métodos de prevención de la corrosión son disponibles para reducir la transferencia de electrones que mantienen juntos a los átomos del metal:

- 1.3.1) Selección de materiales.
- 1.3.2) Modificación del medio ambiente.
- 1.3.3) Inhibidores de corrosión.
- 1.3.4) Pinturas y recubrimientos.
- 1.3.5) Protección catódica.

1.3.1) Selección de Materiales

Una gran variedad de materiales, que van desde el platino al concreto, son usados por el ingeniero para construir estructuras diversas, automóviles, equipos de procesos, tuberías, plantas de energía, etc. El ingeniero de corrosión está primeramente interesado en las propiedades químicas (resistencia a la corrosión) de los materiales, pero también debe tener conocimientos sobre las propiedades mecánicas, físicas y otras para asegurar un rendimiento deseado. Las propiedades de los materiales

de ingeniería dependen de su estructura física y de su composición química. Estas propiedades están relacionadas al comportamiento bajo carga o esfuerzo en tensión, compresión o corte. Las propiedades son determinadas por pruebas de ingeniería bajo condiciones apropiadas. Las propiedades mecánicas comunmente determinadas son el esfuerzo a la tensión, el punto de fluencia, el límite elástico, la fatiga, la elongación, esfuerzo de ruptura, dureza, módulo de elasticidad, etc. Estas propiedades son valiosas para determinar si una pieza puede ser producida o no en la forma deseada y también resistir las fuerzas mecánicas a las que serán sometidas.

El costo no es una propiedad de un material, pero puede ser un factor determinante en la selección de un material para uso de ingeniería, basado en consideraciones económicas.

La aleación de un metal con un metal noble puede reducir su tendencia a la corrosión. Las aleaciones de oro, plata y platino son ejemplos (aunque costosos) de aleaciones resistentes a la corrosión. Aleaciones de metales con metales activos pueden reducir la corrosión a través del fenómeno de la pasivación. Un metal es considerado que se encuentra en estado de pasivación cuando la fuerza motriz de la corrosión es grande pero la velocidad de corrosión es pequeña. La pasividad está asociada con una delgada capa protectora formada en la superficie del metal. Las aleaciones de titanio, níquel y cromo son ejemplos de las aleaciones en las

cuales se produce el fenómeno de la pasivación. Si el costo y la disponibilidad no fueran factores, nosotros podríamos seleccionar el mejor de los materiales y sencillamente olvidarnos del problema. Pero vamos a tomar en consideración, materiales como el oro y el platino y pensemos en términos de sustancias prácticas para ser usadas en nuestros hogares, industrias, automóviles, etc. Materiales prácticos como el hierro y el acero, aleaciones de aluminio y cobre, plásticos, cerámicos, madera, materiales refractarios, acero inoxidable y muchas otras aleaciones modernas y super-aleaciones, todos tienen ciertas ventajas y desventajas. La selección de una de estas alternativas o clases de aleaciones puede ser "la mejor alternativa" para una cierta aplicación. Aprender cuando escoger un determinado material, es algo que se gana con la experiencia y el conocimiento.

Desde que el ingeniero o técnico de corrosión debe encontrar materiales adecuados para una gran variedad de medio ambientes corrosivos y rangos de temperatura, debe estar familiarizado con el comportamiento de numerosas aleaciones, tanto como con posibles materiales sustitutos como los plásticos, la madera, cerámica, caucho, vidrio, cuero o grafito. Así, el significado del término corrosión recientemente ha sido expandido para incluir el deterioro de materiales no metálicos, tanto como el de los metálicos.

De los 105 elementos conocidos por el hombre, 80 son metales. Cada uno tiene diferentes propiedades mecánicas, físicas y químicas y aunque todos pueden corroerse, cada uno de ellos puede

corroerse en una situación dada, a un diferente grado y de una diferente manera. Más aún, cerca de la mitad de estos metales han sido aleados para hacer más de 40,000 aleaciones.

Debido a otros factores además de la corrosión, para una aplicación específica, una cierta aleación puede ser superior a otra aunque muchas compitan por la misma aplicación. El costo es el principal factor y ya ha sido mencionado. Otros factores pueden incluir uno o una combinación de los siguientes factores:

- a) Costo.
- b) Comportamiento a la corrosión.
- c) Soldabilidad
- d) Características de formabilidad (doblado, estirado, moldeado, etc).
- e) Adecuadas propiedades mecánicas.
- f) Ductibilidad.
- g) Disponibilidad de material en forma adecuada.
- h) Compatibilidad con otros materiales en el sistema.
- i) Características térmicas y eléctricas.
- j) Características individuales tales como baja densidad, magnetismo, etc.

1.3.2) Modificación del medio ambiente

La modificación de un medio ambiente corrosivo es un método común de controlar la corrosión. El medio ambiente corrosivo puede ser transformado en un medio ambiente menos dañino mediante la remoción de materiales activos (oxígeno o iones). También el medio ambiente corrosivo puede ser convertido en uno menos dañino mediante la remoción de materiales que reducen la velocidad de formación de capas protectoras.

Ejemplos de esta forma de prevención de la corrosión es la remoción de oxígeno de un caldero y el ajuste del PH de soluciones corrosivas para reducir el potencial de corrosión y para facilitar la formación de capas protectoras. La FIGURA 4 muestra el efecto del O₂ y la temperatura sobre la corrosión del acero de bajo contenido de carbono en agua potable.

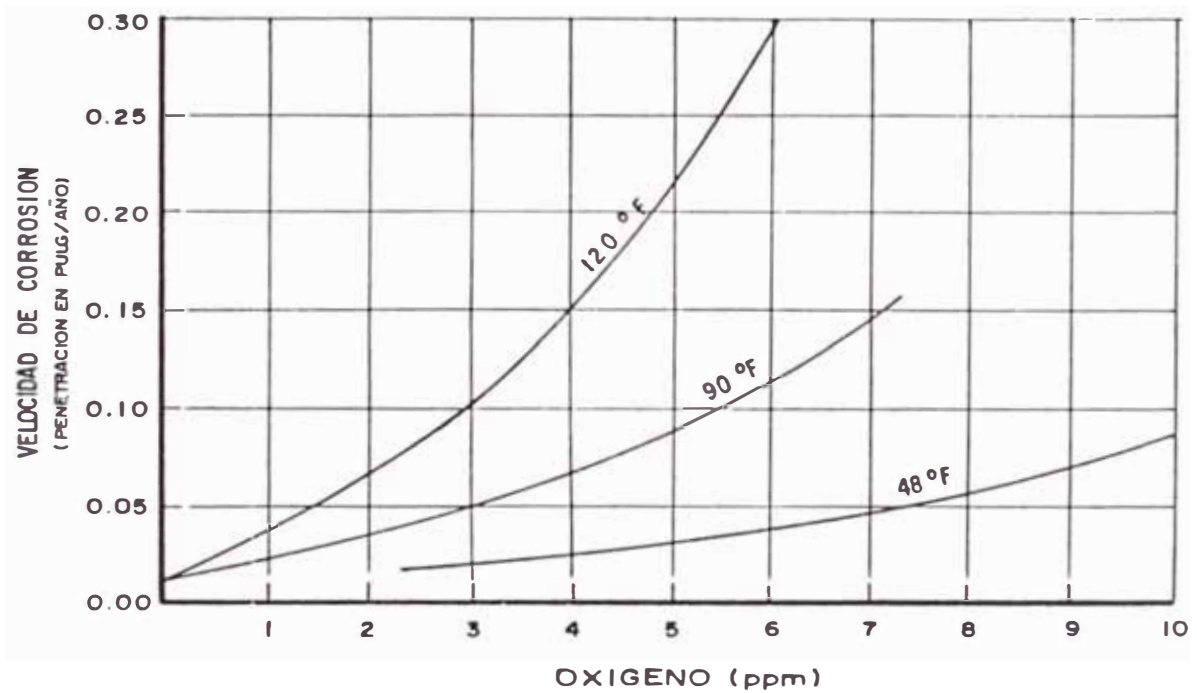


FIGURA 4

EFEECTO DEL OXIGENO Y LA TEMPERATURA SOBRE LA CORROSION DEL ACERO DULCE EN AGUA POTABLE.

Una pregunta natural podría ser: ¿ En qué medio ambientes ocurre la corrosión? La respuesta correcta sería: Puede ocurrir en cualquier medio ambiente dependiendo de que material estemos considerando. Algunos medio ambientes son más corrosivos que otros. Hay excepciones pero generalmente se acepta como un hecho que:

- a) El aire humedo es más corrosivo que el aire seco.
- b) El aire caliente es más corrosivo que el aire frio.
- c) El agua caliente es más corrosiva que el agua fria.
- d) El aire contaminado (poluido) es más corrosivo que el aire limpio.
- e) Los ácidos son más corrosivos que las sales.
- f) El agua salada es más corrosiva que el agua dulce.
- g) Ninguna corrosión ocurrirá en vacío, aún a temperaturas muy altas.

Películas de óxidos, las cuales se forman naturalmente sobre la mayoría de los metales cuando ellos son expuestos al aire, pueden proporcionar una sustancial protección contra posteriores ataques de muchos medio ambientes.

Si no fuera por tales películas, muchos de nuestros metales más comunes situados en la parte superior de la serie electromotriz se corroerían rápidamente en aire y agua comunes. Este sería el caso por ejemplo del magnesio y aluminio.

Otras películas o escamas, productos de la corrosión son también protectoras. Por ejemplo, películas insolubles de sulfato de plomo son responsables de la resistencia del plomo a corroerse por ácido sulfúrico.

Las películas básicas que se forman sobre las aleaciones de cobre en agua de mar, contribuyen grandemente a su durabilidad. El grado con el cual estas películas son capaces de adherirse, resistir la remoción por efectos de turbulencia o ser restaurados rápidamente si se rompen, determinan los méritos de las aleaciones de cobre en resistir los efectos de la velocidad del agua de mar.

La formación de una capa superficial, sea de óxido, carbonato, sulfato o cualquier otro compuesto es la mayor causa de la resistencia a la corrosión, particularmente si la capa separa efectivamente la superficie metálica de su medio ambiente. Tal revestimiento formado naturalmente debe ser resistente a la difusión y a la humedad. Ordinariamente el hierro no forma naturalmente una barrera efectiva, su óxido permite al oxígeno y a la humedad penetrar la barrera y continuar oxidando la superficie metálica.

Otra de las formas de modificar el medio ambiente para prevenir o retardar la corrosión es mediante el uso de inhibidores de corrosión que son sustancias cuando son agregadas a un medio ambiente, disminuye la velocidad de ataque del medio corrosivo sobre un metal. Los inhibidores de corrosión son comúnmente agregados en pequeñas cantidades a los ácidos, aguas de refrigeración, vapor de agua y a otros medio ambientes, en forma continua o intermitente para prevenir una corrosión más seria.

1.3.3) Inhibidores de Corrosión

Un inhibidor es una sustancia que retarda o disminuye una reacción química y cuando es agregado a un medio-ambiente, disminuye la velocidad de ataque de dicho medio-ambiente corrosivo sobre un metal.

La inhibición es realizada por uno o más de varios mecanismos de inhibición. Algunos inhibidores retardan la corrosión por adsorción para formar una película invisible de sólo unas pocas moléculas de espesor; otros forman visibles precipitados los cuales recubren el metal y lo protegen del ataque de la corrosión. Otro mecanismo común consiste en hacer que el metal se corroa de tal forma que una combinación de adsorción y producto de la corrosión formen una capa pasiva.

También se define como inhibidores a aquellas sustancias las cuales cuando agregadas a un medio-ambiente, retardan la corrosión pero no interactúan directamente con la superficie del metal. Este tipo de inhibidores origina condiciones mas favorables en el medio-ambiente para la formación de precipitados protectores o remueve algún agresivo contituyente del medio-ambiente.

Teorías de la Inhibición Química

- a) **Adsorción Química** La mayoría de inhibidores forman algún tipo de película sobre la superficie del metal protegido. La primera capa molecular formada puede estar fuertemente

adherida quizás por un intercambio eléctrico de cargas análogo a una reacción química. Tal fuerza de adherencia es llamada adsorción química. Fuerzas físicas de adherencia más débiles, están también envueltas, especialmente durante la deposición de subsecuentes capas de la película.

b) Humedecimiento Preferencial de Aceite Algunos inhibidores orgánicos pueden formar películas que son lo suficientemente gruesas para ser visibles. Estas películas a menudo son aceitosas y repelentes al agua. Los hidrocarburos contenidos en la fórmula del inhibidor o en los fluidos del sistema que están siendo tratados son capaces de humedecer el inhibidor adsorbido debido a la naturaleza lipofílica de los grandes grupos de hidrocarburos sobre las moléculas del inhibidor. Repeliendo el agua de la superficie de los metales, las películas de aceite son capaces de evitar la corrosión en forma muy similar a otras barreras físicas como las producidas por las pinturas. Otra acción de estas películas aceitosas, que incluso puede ser medida, es la reducción del flujo de corriente eléctrica de y a la superficie del metal causada por la resistencia óhmica de la película adsorbida.

c) Pasivación de la Superficie Aunque otros efectos pueden estar implicados, el más importante es la pasivación. La pasivación ocurre cuando bajo condiciones de oxidación se forma una delgada película meta-estable, reduciendo

marcadamente la velocidad de la reacción anódica de corrosión. La resistencia a la corrosión resultante, imparte un carácter similar a un metal noble, al metal pasivado. Inhibidores anódicos inorgánicos, tales como los cromatos, usualmente son más capaces de producir la pasivación que los inhibidores catódicos. Inhibidores pasivantes tales como los cromatos forman películas o precipitados complejos de espesores muy delgados, los cuales blanquean la superficie metálica.

Indirectamente, los removedores de oxígeno, biocidas, detergentes y desincrustantes son inhibidores de corrosión. Los removedores de oxígeno, como su nombre lo implica, químicamente ata las moléculas de oxígeno, evitando su contacto con las superficies metálicas, lo que ocasionaría la corrosión. Los biocidas matan las bacterias, eliminando la formación de sus subproductos corrosivos. Los detergentes limpian las superficies metálicas de sedimentos y partículas que favorecen a la corrosión. También el limpiar las superficies metálicas, permite obtener mejor adherencia de las películas formadas por los inhibidores de corrosión. Los desincrustantes eliminan la formación de incrustaciones debajo de las cuales, las bacterias crecen ocasionando posteriormente la corrosión con sus subproductos (H_2S).

Clasificación de los Inhibidores de Corrosión

Todos los inhibidores de corrosión líquidos pueden ser clasificados

según sus características de solubilidad y dispersabilidad en el agua y en el aceite. Esas características son importantes por varias razones. Muchas técnicas de tratamiento requieren que el inhibidor sea diluido en un solvente apropiado (agua, petróleo crudo, kerosene, etc) antes de su aplicación. Un inhibidor es generalmente considerado soluble en un solvente, si la mezcla inhibidor-solvente permanece clara. Un inhibidor es dispersado en un solvente si puede dispersarse con un movimiento moderado. Si la dispersión del inhibidor en el solvente termina rápidamente (ejem. en pocos minutos), es llamado una "dispersión temporal".

Dependiendo de la base química del inhibidor, las propiedades pueden ser una combinación de las arriba mencionadas.

Los tipos de inhibidores comunmente usados en la industria petrolera son: soluble en aceite, soluble en aceite y dispersable en agua, soluble en agua, soluble en agua y dispersable en aceite, volátil, inorgánico, removedor de oxígeno, biocida, detergente y desincrustantes. Los inhibidores inorgánicos, tales como los cromatos y nitratos son raramente usados en los pozos de petróleo hoy en día; sin embargo, los cromatos son todavía encontrados útiles en los lodos de perforación.

Uso de los Inhibidores de Corrosión

Hay varias maneras de introducir los inhibidores químicos dentro de los pozos y sistemas que requieren ser protegidos, dependiendo

del tipo de pozo y del equipo de superficie. Los principales son los siguientes:

- 1) **Tratamiento Continuo** Es cuando un inhibidor de corrosión es bombeado a un pozo o equipo de superficie en forma continua usando una bomba de balancín, una bomba eléctricamente impulsada o una bomba operada a gas. La bomba puede entregar directamente dentro de un tubo de pequeño diámetro hasta el fondo del pozo o puede ser inyectado en la cabeza del pozo junto con un poco de producción hasta el fondo del pozo o inyectado directamente dentro del equipo de superficie. El propósito es mantener el nivel del inhibidor químico lo suficiente para prevenir o marcadamente reducir la corrosión.

- 2) **Tratamiento Intermitente** Hay dos tipos: el "tratamiento intermitente por desplazamiento tubular" y el "tratamiento intermitente estandard".
 - a) Desplazamiento tubular Este método involucra la preparación de una solución del inhibidor al 10%-20% usando agua a un hidrocarburo como detergente, la mezcla es desplazada o empujada hacia abajo con el petróleo producido. El pozo es entonces cerrado por varias horas y después regresado a producción. Este tratamiento proporciona protección desde una semana

hasta varios meses dependiendo del sistema y del inhibidor.

- b) **Intermitente Estandar** Es cuando el inhibidor concentrado o diluido es bombeado dentro del anillo formado por la tubería de producción y el forro. Parte o toda la producción de pozo es inyectada dentro del anillo para desplazar el inhibidor hacia el fondo del pozo. Algunas veces los pozos son recirculados una vez para dejar actuar al inhibidor.
- 3) **Tratamiento en Bloque** Consiste en que una gran cantidad de inhibidor es inyectado en grandes concentraciones (100-200ppm) durante un período de varias horas para recubrir las superficies metálicas con una gruesa película del inhibidor. Este tratamiento es generalmente seguido por una inyección continua a 10-20ppm para facilitar la reparación de la película del inhibidor arenado o desgastado.

1.3.4) Pinturas y Recubrimientos

Todos los procedimientos de protección anticorrosión tienden, o bien, a evitar la formación de elementos galvánicos, o bien a impedir el ataque de sustancias que descompongan químicamente a los materiales de construcción. Las sales son promotores activos de la formación de elementos galvánicos, de allí que debido a que la brisa marina y el agua de mar contienen sales,

la prevención de la corrosión en las estructuras de acero en estas zonas demanda un mayor cuidado en la planificación y realización de la protección contra la corrosión.

- a) **Pinturas** Este es el método más extensamente empleado como medio de protección contra la corrosión. Se define como pintura a una mezcla de productos naturales y sintéticos, uniformemente dispersada y que tiene un intervalo de viscosidad que varía desde el líquido delgado a la pasta semi-sólida.

La consideración más importante en la selección de una pintura es el contenido de "Sólidos por Volumen". Dicho de otra forma, lo sólido de un galón de pintura es la cantidad de película que queda sobre la superficie después que los otros materiales, los volátiles, se hayan evaporado durante el proceso de aplicación y secado. Por ejemplo, en una pintura que contenga 100% de sólidos, no hay solventes que se evaporen, tendremos el mismo espesor de capa o película después que haya secado. Si se usa una pintura que contenga un 50% de sólidos, la mitad se evaporará dejando una capa o película de la mitad de espesor que la que contenía 100% de sólidos.

El valor protector de una pintura depende de su espesor de película seca. Los sistemas modernos de protección de corrosión por pinturas, requieren de espesores de película

que varían de 3 milésimos de pulgada (0.0762m.m) hasta más de 10 milésimos de pulgada (0.254m.m.). Existen varios tipos de medidores para determinar el espesor seco de la película de pintura, lo que permite conocer en todo momento el espesor aplicado. Debido a que son los elementos sólidos los que hacen todo el trabajo de protección contra el medio ambiente, le corresponde al usuario estudiar el producto cuidadosamente para determinar la clase y porcentaje de pigmentos y resinas que constituyen los sólidos de la pintura. Pigmentos que no son adecuados o de baja calidad, poseen poca resistencia a la luz ultra-violeta, lo cual se refleja en la decoloración y cambio de color de la pintura al cabo de poco tiempo de aplicada. Un porcentaje bajo de resina y/o una resina de mala calidad dan como resultado, una película no resistente y que no cumple con sus funciones de protección.

Composición de las Pinturas Toda pintura está formada por cuatro elementos principales:

-Vehículo.- Es un constituyente resinoso, llamado también aglutinante y/o ligante. Es el elemento formador de película. Estos aglutinantes pueden considerarse como líquidos adhesivos muy viscosos y vienen a constituirse en la parte líquida de la pintura. Además de ser los responsables de la adhesión de la pintura a la superficie, tiene ingerencia

directa en la resistencia a las condiciones climáticas y en la resistencia mecánica y química de una pintura.

-Solventes.- Son por lo general líquidos orgánicos que regulan la fluidez de la mezcla y ayudan tanto en la fabricación como en la aplicación de la pintura. Además de regular la fluidez es responsable del tiempo de secado y de mantener húmeda la superficie .

-Pigmentos.- Son aquellas partículas blancas o coloreadas, encargadas de proteger y/o decorar una superficie recubierta por una pintura, otorga a las pinturas las propiedades de opacidad y de color, pero también existen los pigmentos de carga, extendedores o de relleno que fundamentalmente sirven para darle cuerpo a una pintura.

-Aditivos.- Son auxiliares modificadores que se utilizan para conferir características especiales a una pintura. Existen aditivos plastificantes, secantes, antisedimentantes, antichorreado, anti-espumantes, anticrustantes, etc.

b) Recubrimientos Los recubrimientos o revestimientos protectivos son diversas composiciones a base de cuerpos metálicos, inorgánicos y orgánicos y son por lo general películas o capas delgadas aplicadas a un material base llamado sustrato y se aplican por electrólisis, deposición de vapor o medios mecánicos tales como aplicaciones con brocha o pulverización con pistola. El concepto de colocar una

barrera protectora entre los materiales y su medio ambiente es tan antiguo que su origen se ha perdido en la historia. Como puede esperarse de un concepto tan antiguo, sus materiales, métodos y limitaciones son numerosos y diversos. Más aún, algunos revestimientos o barreras que originalmente fueron satisfactorios, son ahora obsoletos a la luz de nuevos descubrimientos acerca de las propiedades de los materiales.

Hay tres clases principales o composición de barreras o revestimientos: Inertes o esencialmente inertes, inhibidores y sacrificantes. Varias combinaciones de estos tipos son encontrados en sistemas de revestimientos diseñados para utilizar alguna o todas las varias ventajas protectoras proporcionadas. Sin embargo debe tenerse presente que no hay un revestimiento perfecto en un sentido práctico, así que ninguno de esos tipos o cualquiera de sus combinaciones puede esperarse que de una protección perfecta. Así, los revestimientos prácticos son un compromiso entre la protección máxima que puede lograrse con un sistema y de cuanto se dispone para pagar por él. Con respecto a lo económico, probablemente sería demasiado caro lograr un revestimiento perfecto si hubiera que lograrlo. Cuando la vida efectiva de un sistema de recubrimiento aumenta, su costo también aumenta.

De otra parte los revestimientos protegen por uno o más de

los siguientes mecanismos:

- 1) Previene el contacto entre el medio ambiente y el material base.
- 2) Restringen el contacto entre el medio ambiente y el material base.
- 3) Liberan sustancias, las cuales inhiben el ataque del medio ambiente sobre el material base.
- 4) Producen una corriente eléctrica la cual es protectora del material base.

Los revestimientos pueden ser aplicados para mejorar la apariencia, aumentar la vida operativa de un equipo, prevenir la deposición, prevenir la contaminación de los productos o prevenir la corrosión. Los revestimientos aplicados para protección contra la corrosión son más efectivos que las pinturas, las cuales son aplicadas principalmente para mejorar la apariencia. Sin embargo, los revestimientos para el control de la corrosión pueden también mejorar la apariencia.

Para proteger contra la corrosión durante un tiempo que sea práctico, es necesario que el revestimiento posea flexibilidad, resistencia al impacto, resistencia química al medio ambiente al que es expuesto, que sea impermeable, que tenga buena

adhesión y cohesión y resistencia a la temperatura a la que es expuesto.

La efectividad de un sistema de revestimiento está directamente relacionada al grado al cual efectivamente el revestimiento se interpone entre el medio ambiente y el material base o reduce el ataque del medio ambiente. Este concepto se aplica igualmente bien para la protección catódica y la protección anódica, las cuales en un sentido absoluto son revestimientos desde que ellas interponen barreras entre el medio ambiente y el material base.

Selección de los Recubrimientos Las propiedades físicas a ser consideradas en la selección de un recubrimiento para una aplicación dada incluyen el espesor de película seca, adhesión y cohesión resistencia a altas o bajas temperaturas, su permeabilidad a líquidos y gases. La resistencia química requerida, obviamente depende del medio ambiente. La importancia de seleccionar el revestimiento apropiado no debe ser magnificado. No hay ningún revestimiento universal que sea adecuado para todas las aplicaciones. Uno puede tener excelente resistencia a los ácidos pero pobre resistencia a los solventes o a los cáusticos (tales como el petróleo crudo o el alcohol). Otro puede exhibir resistencia a la abrasión pero no tener resistencia a los ácidos. Otro puede tener limitada resistencia química pero gran adhesión y flexibilidad. Los

fabricantes de revestimientos y de sistemas de aplicación han probado cientos de fórmulas para llegar a sistemas económicos y prácticos. Para seleccionar un revestimiento para un problema específico, es a menudo necesario seleccionar fabricantes de revestimientos y de sistemas de aplicación que sean experimentados.

Para lograr una recomendación razonablemente económica, es necesario conocer el tipo de servicio y la vida que debe tener el revestimiento.

1.3.5) Protección Catódica

La protección catódica puede ser definida como una técnica para reducir la corrosión de una superficie metálica por medio del suministro de corriente continua de una fuente externa a la superficie metálica para oponerse a la descarga de corriente producida por la corrosión de las zonas anódicas de dicha superficie sumergida en un electrólito. Cuando un sistema de protección catódica es instalada apropiadamente, todas las partes de la estructura protegida recogen la corriente del medio circundante y toda la superficie expuesta se convierte en una zona catódica, de aquí el nombre de esta técnica.

El término protección catódica es aplicable sólo al control de la corrosión resultante del flujo de corriente continua de una parte de la estructura (área anódica) a otra parte de la estructura (área

catódica) a través de un electrólito. Esta corrosión es de naturaleza electroquímica y el área anódica donde la corriente es descargada al electrólito se corroe. Contrariamente el área catódica recoge la corriente y no se corroe y se dice que está catódicamente protegida.

Las corrientes electroquímicas de corrosión pueden ser revertidas por la aplicación adecuada de la protección catódica, lo cual hace que toda la estructura se haga catódica, anulando las áreas anódicas que se forman de manera natural. Esto se logra por medio de corriente continua producida por una fuente externa y aplicada sobre la estructura.

La protección catódica no necesariamente elimina la corrosión, lo que realmente hace es transferir la corrosión de la estructura que se desea proteger a los ánodos de descarga de corriente (ánodos auxiliares) los que son diseñados para una larga vida y un fácil reemplazo. La protección catódica es aplicable sólo a la superficie del metal expuesto al mismo electrólito que el ánodo auxiliar. Por ejemplo si la protección catódica es aplicada a la superficie exterior del fondo de un tanque de agua salada, esta protección no tiene efecto sobre el lado interno del fondo del tanque y viceversa.

Este método de prevención de la corrosión será tratado con mayor detalle en el Capítulo 3 ya que es el método más empleado en la protección contra la corrosión de estructuras sumergidas.

1.4) Costos de la Corrosión

1.4.1) Importancia Económica de la Corrosión

El costo de la corrosión y de su prevención es mucho mayor que el de cualquier otro desastre natural. Cifras disponibles señalan que en los Estados Unidos de Norteamérica los costos anuales (1975) debido a la corrosión fueron estimados en 15,000 millones de dólares. Este costo se puede comparar con los daños producidos por el fuego (10,000 millones de dólares) y por accidentes de autos (20,000 millones de dólares).

No todos los costos ocasionados por la corrosión son gastos directos. Las mayores pérdidas pueden ser ocasionadas con costos indirectos tales como: muerte y daños personales, daños materiales, pérdida de producción, paradas de planta, sobredimensionamiento en el diseño etc. El costo real de una falla por corrosión puede ser de millones de dólares, asociados generalmente a muertes, daños personales y daños materiales.

Las pérdidas de producción pueden ser consideraciones mayores en grandes volúmenes o en sistemas de alta presión. Esto es particularmente cierto en situaciones de daño ecológico. El costo de paradas de planta es particularmente importante en operaciones en serie. La inesperada pérdida de producción de una planta dada puede causar la parada de otras plantas que dependen de ésta como fuente de alimentación.

El sobredimensionamiento en el diseño es un factor inherente a la seguridad en todos los diseños de ingeniería. En muchos casos la corrosión requiere de coeficientes de seguridad más altos. La importancia de la prevención de la corrosión aumentará conforme la disponibilidad de materiales sea más restringida y su costo aumente. Los países desarrollados consumen cada vez más metales y los requerimientos de las naciones en desarrollo aumentan constantemente. El consumo de una lata de acero por semana por cada persona en India y China representan 2 millones de toneladas de acero por año. Todo lo anterior refleja la necesidad cada vez mayor que se tiene de que los materiales (especialmente metales) permanezcan el mayor tiempo sin deteriorarse ya que su costo irá en aumento conforme sea mayor su demanda. Desafortunadamente mucha gente tanto en la vida diaria como en la industria a menudo observan la corrosión y la aceptan como inevitable. Realmente algo puede y debería hacerse para prolongar la vida de muchos metales expuestos a ambientes corrosivos.

Un buen programa de prevención de la corrosión usualmente no está diseñado para detener la corrosión. El óptimo programa reduce ésta hasta el punto de obtener el mínimo costo total por año de servicio. Este costo total incluye el costo de equipos, instalación, transporte, pérdida de la producción, etc.

El costo por año de protección contra la corrosión aumenta según aumenta la vida deseada del equipo. El costo anual del equipo se reduce según aumente el tiempo de vida del equipo.

El costo total por año de servicio generalmente alcanza el valor mínimo para una velocidad de corrosión diferente de cero. Extendiendo el tiempo de vida mediante la prevención de la corrosión más allá de ese mínimo costo total es generalmente desperdiciar el dinero (Ver FIGURA 5)

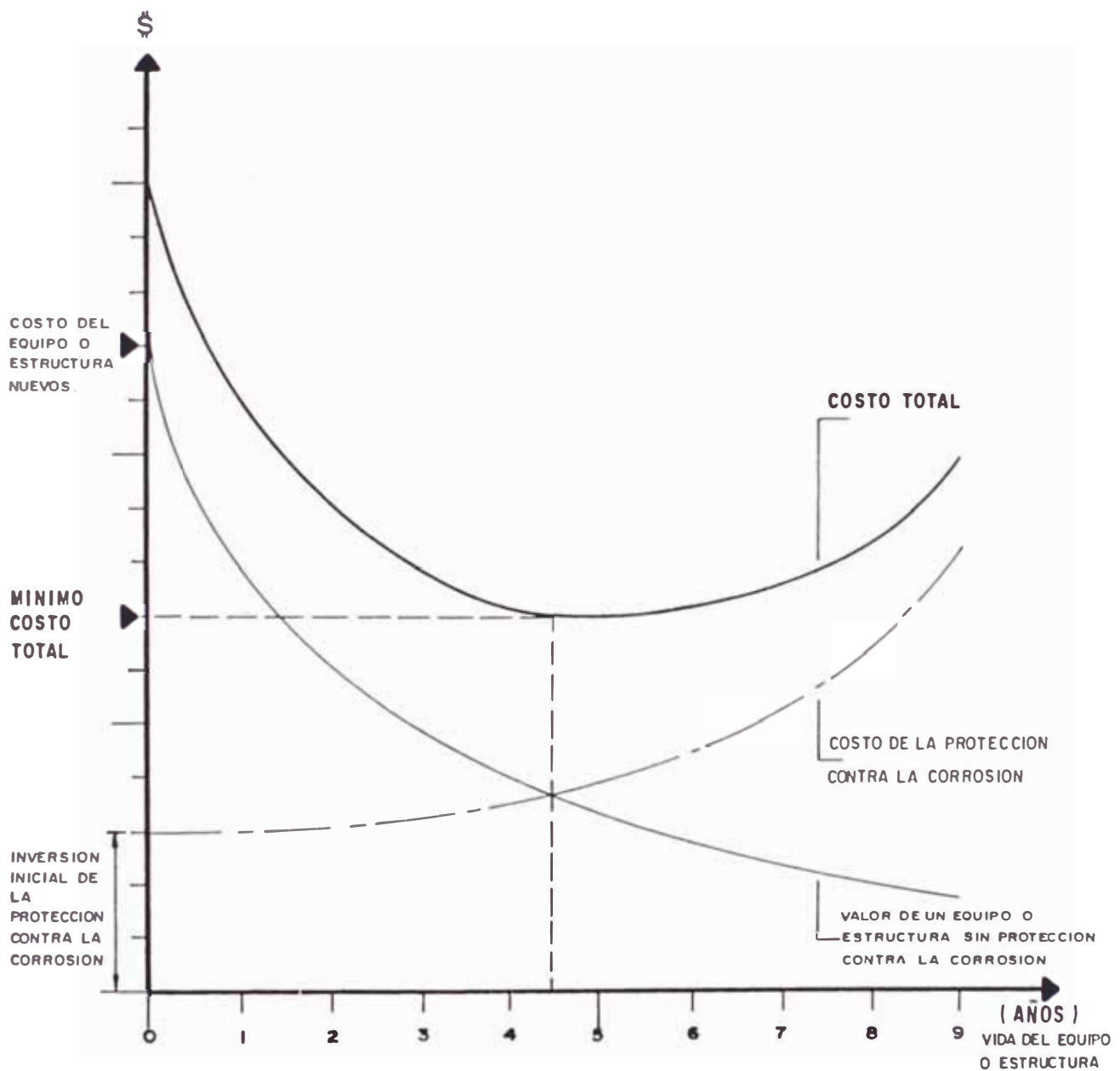


FIGURA 5

Las plataformas marinas usadas para la perforación y la producción del zócalo continental representan grandes inversiones de capital. Estas plataformas están siendo colocadas en áreas marinas de todo el mundo y están siendo diseñadas para soportar fuerzas resultantes de huracanes, tormentas árticas, corrientes producidas por las mareas, terremotos, masas flotantes de hielo. Más aún, las plataformas están siendo colocadas en aguas más profundas y por lo tanto se tienen que construir más largas, más complicadas y más costosas.

1.4.2.) Análisis Económico en Corrosión

La corrosión es básicamente un problema económico. Es el deber de un ingeniero de corrosión el obtener una solución económicamente óptima para cada problema específico. La selección de una solución óptima entre una variedad de posibles medidas de control de corrosión, requiere el reconocimiento y valorización inteligente de los factores económicos pertinentes, tanto como un buen entendimiento de la tecnología de la corrosión. Habiendo seleccionado su posible solución para el problema presentado, el ingeniero de corrosión deberá estar preparado para presentar su argumento a la Gerencia en términos que sean fácilmente comprensibles. Esto quiere decir que se haya arribado a la solución propuesta luego de haber examinado todas las posibles soluciones en términos de equipos y gastos, resaltando la solución escogida por ser la que ofrece las mayores ventajas económicas para la compañía. La habilidad de presentar propuestas de control de corrosión fáciles de comprender pueden tener dos efectos distintos y esclarecedores. Primero, el ingeniero de corrosión mismo será más consciente del importante rol económico que su posición abarca. Segundo, la Gerencia, se dará cuenta que el ingeniero de corrosión es más que sólo un técnico y que sus soluciones pueden ayudar a incrementar las ganancias de la compañía.

Las compañías productoras de petróleo y gas; y en general las grandes industrias han tendido a diversificarse grandemente en los últimos años. En muchas compañías la diversificación de procesos ha avanzado hasta convertir la Gerencia en una "gerencia por el dinero" donde las personas encargadas de la toma de decisiones pueden no estar familiarizadas con las operaciones de producción. Esta situación requiere que todas las propuestas sean hechas en "lenguaje de dinero" para su consideración. Es ventajoso para el personal de operación que la conversión del "lenguaje de operación" al "lenguaje de dinero" sea hecho en el punto de origen de la propuesta. En este sub-capítulo presentaremos varios métodos para hacer esta conversión. En una compañía diversificada las operaciones compiten con muchas oportunidades diversas de negocios para invertir dinero. Este elemento de competición, que pasa frecuentemente inadvertido, crea decisiones misteriosas y algunas veces causa desmedido desconcierto porque una compañía "x" y una compañía "y" no seleccionan programas similares ante aparentemente similares circunstancias. Esta es otra razón para que la conversión a "lenguaje de dinero" deba ser hecha en el momento de origen de la propuesta, si fuera posible. Es en extremo importante que todos los costos de un proyecto dado sean tomados en consideración. En cualquier proyecto dado, la base de decisión incluirá muchos costos estimados, estimados de vida esperada, frecuencia de reemplazos, etc. Se considera una pobre práctica el ignorar alguna consideración importante ya que el estimado final puede ser incorrecto. Las decisiones sobre control de corrosión deberán estar basadas en toda la información disponible, usando el mejor estimado de costo, vida, etc. que pueda ser hecho en ese momento.

La tecnología actual es usualmente capaz de ofrecer una o más soluciones a esos problemas y es frecuentemente difícil escoger la mejor solución. A veces, la mejor solución para resolver un

problema de corrosión es aquella que nos mantendrá alejado del problema por el mayor tiempo posible. Esto nos podrá llevar a pensar que la mejor solución sería la que nos ofrece la última o más reciente tecnología, tal como la más cara aleación disponible. Rápidamente nos damos cuenta que el costo de la más cara medida preventiva puede hacer que nuestras operaciones cambien de un estado de ganancias a un estado de pérdidas. Esta es, pues, la primera aplicación del análisis económico en corrosión. Nosotros debemos seleccionar el método que permitirá conseguir la más grande reducción de todos los costos de operación, por lo que deberemos conocer los costos de efectuar un mantenimiento; o, los costos de no hacer nada pero estar dispuestos a parchar o reemplazar el equipo existente. Si hubiera otros costos posibles, además de los de materiales y mano de obra para efectuar las reparaciones, también deberán ser tomados en cuenta. La pérdida de vidas humanas o daños personales, tienen una primera consideración. Después debemos determinar las posibles pérdidas causadas por el daño al medio ambiente. Pérdidas de producción diferida, las cuales no podrán ser recuperadas inmediatamente, es otro costo importante.

Una vez que hayamos determinado el costo total de mantenimiento, estaremos en capacidad de comparar los costos de las soluciones tecnológicas disponibles. Sin embargo, los costos son expresados en muchas bases diferentes que no son directamente comparables. El análisis económico en corrosión deberá contemplar métodos para convertir las diferentes bases en una base común para su comparación. Intis/año o dólares/año es la mejor base común para la mayoría de las comparaciones, pero otras pueden ser usadas en circunstancias especiales.

A continuación se darán métodos de cálculos para estandarizar la valorización económica de medidas alternativas de control de

corrosión. Entre éstas, están los conceptos de "Retorno de Inversión", "Período de Pago" y "Flujo de Caja Descontado". Algunas de estas técnicas de valorización adolecen de falta de sofisticación; otras son inadecuadamente complejas dificultando su comprensión y uso. Seguidamente se ofrecerá una forma estandarizada de cálculo, que comprende una expresión matemática de un análisis de "Flujo de Caja Descontado". Este permite un cálculo rápido del "Valor Presente después de Impuestos" y del uniforme y equivalente "Costo Anual". Estas formulas también facilitan la determinación de parámetros desconocidos. Los cálculos de factores específicos para los efectos de tasa de impuestos, depreciación y programas de contabilidad permiten la correlación de esas formulas con los requerimientos de industrias particulares.

Para el mejor entendimiento de las fórmulas y cálculos se definirán previamente los términos a emplearse en éstos.

DEFINICIONES:

-Flujo de Caja - Un flujo de caja (a) es designado como mas o menos (\pm), por las siguientes razones:

Flujo de Caja Negativo o egreso, es el costo real de cualquier propuesta, la cual puede incluir: componentes o materiales; mano de obra requerida para la fabricación, instalación y mantenimiento; gastos periódicos, regulares o irregulares; capital de trabajo y gastos generales fijos (alquiler, energía eléctrica, seguros, impuestos, etc).

Flujo de Caja Positivo o ingreso, es el ingreso que puede ser obtenido de las ventas, valor de rescate, depreciación y otras reducciones de impuestos.

-Vida - Es la duración anticipada de un flujo de caja, expresado

en años. La vida puede constituir la duración real de la propuesta (n), o un período artificial de depreciación calculado para propósitos de contabilidad (n').

-Interés (i) - Es la tasa o relación de pago de dinero por el uso del dinero, expresado como un porcentaje decimal por unidad de tiempo. La "Tasa de Interés de Retorno después de Impuestos (r)" se relaciona con (i) como sigue: $r=i(1-t)$, donde t es la tasa de impuestos, también expresada como un decimal.

-Tasa de Impuestos - La tasa de impuestos (t), expresada como un decimal, es la tasa de impuestos a la renta decretada por el Gobierno.

-Depreciación - Es la disminución sistemática "en libros" del valor de una propiedad. Es un método de contabilidad que contempla el uso, deterioro u obsolescencia de las propiedades. Los procedimientos de contabilidad reconocen una variedad de métodos para la depreciación de inversiones, pero en este análisis sólo se contemplarán 3 de ellos: a) Depreciación en Línea Recta (SL); b) Depreciación por Suma de Dígitos (SOD); c) Depreciación por Porcentaje Constante.

-Concepto de Año Cero - El año en curso, o "ahora", o el año considerado el punto de comienzo en la evaluación es considerada como el "año cero" y los flujos de caja que ocurren durante ese año no son descontados. Por ejemplo, si 1988 es el año cero, entonces los flujos de caja que se realizan en 1988 no son descontados y los flujos de caja realizados en 1989 son descontados con 1 año de interés. Esto es equivalente a considerar que todos los flujos de caja durante un año, ocurren en el comienzo de ese año.

-Valor Futuro (FW) - Debido a que el dinero puede ganar intereses, su valor actual hoy es diferente a su valor futuro. Calculando el interés que puede generar una cantidad de dinero "hoy", se puede determinar su "valor futuro". En forma similar, el valor hoy de un inti o de un dolar gastado o ganado en el futuro, puede ser determinado reduciéndolo de acuerdo con la tasa de interés existente. Esto no debe confundirse con inflación.

-Valor Presente (PW) - Es el valor "ahora" de cualquier flujo de caja ($\pm a$), o de cualquier suma de flujos de caja "ahora" o en el futuro.

-Valor Presente después de Impuestos (PWAT) - Es el valor "ahora" de cualquier flujo o flujos de caja realizados "ahora" o en el futuro a los que se les ha corregido, por todos los impuestos u otras deducciones.

Descripción de Símbolos:

a	:	Flujo de caja, en intis (dólares).
n	:	Vida del proyecto, en años.
n'	:	Período de depreciación, en años.
n''	:	Tiempo de ocurrencia del flujo de caja, en años.
i	:	Tasa de interés, en decimales.
r	:	Tasa de retorno después de impuestos, en decimales.
t	:	Tasa impositiva, en decimales.
F	:	Forma variante del Factor de recuperación de capital.
d	:	Factor de impuesto y depreciación igual al PWAT de 1.00 inti (dólar) depreciado y deducido de impuestos, expresado en centavos de inti (dolar) o decimales.
N	:	Denominador para la depreciación por Suma de Dígitos= $(n'^2+n')/2$.
P	:	Tasa de depreciación para depreciación por porcentaje constante.
PW	:	Valor presente.
FW	:	Valor futuro.
A	:	Costo anual. Este es el costo anual uniforme equivalente al final el año. "A" puede relacionar al PW o al PWAT.

PWAT :	Valor presente después de impuestos (algunas veces llamado Valor presente neto; NPV).
DCF :	Flujo de caja descontado. En la formulación de PWAT de todos los flujos de caja en un proyecto.
C :	Egreso en forma de capital.
X :	Egreso en forma de gasto.
S :	Ventas anuales o ingresos.
K :	Gastos anuales.
m :	Años entre flujos de caja regulares repetitivos (Ejem: en un bienio m=2).
m' :	Número total de años sobre los cuales ocurre la repetición de los flujos de año (Ejem: por 3 bienios m'=6).
WC :	Capital de trabajo.
V :	Valor de rescate.
Y :	Crédito de impuestos en items de capital, en decimales.

Relaciones Más Usadas en la Comparación Económica de Proyectos Alternativos

a) Relaciones entre Valor Presente y Valor Futuro

Valor presente (PW) es el valor "ahora" de cualquier flujo de caja ($\pm a$), o de cualquier suma de flujos de caja. Las relaciones entre el valor presente (PW) y el valor futuro (FW) está gobernado por la fórmula del interés compuesto:

$$PW = FW / (1+i) \dots\dots\dots(1)$$

$$FW = PW (1+i) \dots\dots\dots(2)$$

La relación (1) define el término "descontado", y establece que cualquier valor futuro puede ser descontado al valor presente simplemente dividiendo el valor futuro entre el factor de interés compuesto para una tasa de interés "i" en "n" años.

El valor futuro puede ser obtenido "componiendo" un valor presente dado para "n" años a una tasa de interés "i", según (2), o capitalizando una serie uniforme de pagos anuales (A) hechos al final de cada año. Esta es la fórmula llamada "anualidad" (3):

$$FW = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \dots \dots \dots (3)$$

b) Relaciones del Costo Anual

El "costo anual (A)" o costo anual uniforme y equivalente que se da al final del año puede ser expresado como:

$$A = (PW \cdot i) F_n \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{donde: } F_n = \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Para cualquier flujo de caja "ahora" (también llamado "comienzo del año" o "año cero"), el primer "A" ocurre al final del año ó en el año uno. Así, el factor "Fn" convierte el producto del Valor Presente (PW) para la tasa de interés (i) en una serie equivalente de "N" flujos de caja anuales llamados "costo anual (A)", que comienzan de aquí a un año.

"Fn" es una variante del Factor de Recuperación del Capital (CR), que puede ser encontrado en las Tablas Financieras comunes. "Fn" es derivado de la tasa de interés (i) si los impuestos no son considerados y de la tasa de retorno (r) si los impuestos son considerados. Por lo tanto se tienen las siguientes relaciones:

$$A \text{ (antes de impuestos)} = PW \cdot i \cdot F_n \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{donde: } F_n = \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

$$A \text{ (después de impuestos)} = PW \cdot T \cdot r \cdot F_n$$

$$\text{donde: } F_n = \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Métodos Para la Comparación Económica de Proyectos Alternativos de Control de Corrosión

a) Comparación de Desembolsos de Dinero

La aplicación más común del análisis económico en corrosión es la selección de la operación o alternativa menos cara. Es decir el método de control que ocasionará el menor desembolso de dinero.

Este método de comparación es válido si:

- Todos los flujos de dinero son tratados en la misma forma para propósitos de impuestos.
- Todos los flujos de dinero ocurren en un período relativamente corto. Por ejem: un año, o menos.
- Todos los items que sean comprados deberán tener una expectativa de vida no mucho mayor al año.

En este caso, todos los flujos de dinero para cada posible alternativa son sumados para un mismo período, por ejem: un año y se selecciona el menos caro.

b) Tiempo de Pago ("Payout Period")

El tiempo de pago es el costo de un item dividido entre los ingresos o ahorros producidos por año. No se considera el valor del dinero (interés) ni las diferencias en impuestos.

Ejemplo: Una instalación de protección catódica cuesta I/.3'500,000; los ahorros menos los gastos de operación se estiman en I/.1'000,000 por año.

$$\text{Tiempo de pago} = \frac{3'500,000 \text{ I/.}}{1'000,000 \text{ I/./año}} = 3.5 \text{ años}$$

Este método no es un medio muy definitivo de describir un proyecto en términos de maximización de beneficios debido a las limitaciones que se pueden ver arriba. Se necesitan métodos más sofisticados para evaluar completamente un proyecto.

c) Costo Anual

Algunas decisiones económicas son más complicadas y no es posible seleccionar simplemente la alternativa que represente el menor desembolso de dinero. El "Costo Anual" es un método simple de hacer muchas de estas comparaciones. Este método será con frecuencia el medio más fácil de comparar dos o más items de diferente vida de servicio ó para comparar un gasto mayor con gastos periódicos.

COSTO ANUAL "A" = PW x Factor de Recuperación de Capital

donde : Factor de Recuperación de capital = $\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

Los factores de Recuperación de Capital (CR) están dados en las Tablas Financieras, para diferentes tasas de interés (i%) y varios años de servicio. Estos factores convierten el costo a un Costo Anual equivalente sobre la vida de servicio.

La alternativa o item preferido es aquella con el menor Costo Anual. También es posible igualar el Costo Anual de dos propuestas y resolver cualquier incógnita:

Costo Anual (propuesta a) = Costo Anual (propuesta b)

Costo (a) x Factor CR (a) = Costo (b) x Factor CR (b)

La tasa de interés debe ser conocida o asumida. Desde que este tipo de comparación es más frecuentemente usado en proyectos de bajo riesgo, de 1.25 a 2 veces la tasa de interés cargada por los bancos locales ("prime interest rate") será una buena estimación si la compañía no la ha establecido. El método del Costo Anual incluye la consideración del valor del dinero en el tiempo, pero de

de preferencia es usado para comparar proyectos alternativos que son tratados igual o muy similar para propósitos de impuestos.

d) Valor Presente Después de Impuestos (PWAT)

En los proyectos mayores, las comparaciones de costos deben de incluir la consideración de las formas de depreciación, impuestos locales y estatales y el valor del dinero en el tiempo. Uno de los métodos más sofisticados del análisis económico, capaz de tomar en consideración todos los tipos de flujo de caja presentes o futuros de ingresos o egresos, es el conocido como Valor Presente Después de Impuestos. Muchas compañías tienen su propia versión de este concepto el cual varía ligeramente de la que será presentada aquí. Pero, en todo caso, los métodos presentados aquí serán adecuados para analizar económicamente desde los proyectos más simples hasta los más complejos.

Forma General:

$$PWAT = Costo \times d^n \dots \dots \dots (1)$$

Los valores de d^n se encuentran en las tablas financieras para varios períodos de inversión. Este factor es numéricamente igual a $1/(1+i)^n$ cuando se ha aplicado los impuestos, los intereses y la depreciación. De la forma general, se puede derivar a las siguientes variaciones:

1. Conversión a gastos equivalentes de operaciones en intis/año.
2. Aplicación de probabilidades a evaluaciones.
3. Cálculo de la relación P/I (relación ganancia a inversión) o del DPI (índice de rentabilidad descontada)

4. Cálculo de una aproximación cercana a la Tasa de Retorno.

Selección de Factores de Impuestos y Depreciación

La Tasa de Retorno después de Impuestos (r) debe ser conocida o asumida de acuerdo con las políticas y expectativas de cada compañía. La mayoría de los proyectos de corrosión caen dentro de la categoría de bajo riesgo y una Tasa de Retorno después de impuestos de 1.1 a 1.25 veces el interés cargado por los bancos locales, será aceptable si no se tienen instrucciones de la compañía. Nótese que esta tasa es menor que la tasa de interés de 1.25 a 2.0 veces usada en el método del Costo Anual, debido a que en este último caso los impuestos no están aplicados. Las tasas de impuestos, así como, la tasa de interés de los bancos locales pueden variar según las leyes sean modificadas. Mas aún, diferentes compañías pueden estimar sus tasas de impuestos en valores que difieren de los máximos señalados por las leyes. En este trabajo utilizaremos una Tasa impositiva del 35% que es la que rige en el Perú para la industria petrolera.

Una gran variedad de procedimientos de depreciación son utilizados en las operaciones de las diferentes industrias; su selección depende del tipo de cada negocio y su análisis va más allá del alcance de este trabajo. Existen tablas que nos dan los valores del factor "d" (factor de impuesto y depreciación) que es un factor que involucra el método de depreciación utilizado y la tasa de impuestos de cada industria y que se utiliza para convertir un Valor Presente en un Valor Presente Después de Impuestos.

Expresiones de Valor Presente Después de Impuestos

1. Capital, Inversión o items tangibles
 $PWAT = -C \times dn'$
 donde: C es el costo y
 dn' es el factor de impuestos y depreciación

2. Gastos o items intangibles
 $PWAT = -X \times d1$
 donde: X es el costo y $d1 = 0.35$ (35% de impuesto)

3. Valor de Rescate
 $PWAT = V \times d1 \times Rn$
 donde: V = valor de rescate
 $d1 = 0.35$
 $Rn = 1/(1+r)^n$
 n = la vida del proyecto
 r = tasa de retorno después de impuestos

4. Items Anuales o Regularmente Recurrentes

Los factores "F" convierten una serie de items anuales al valor presente y los suma en una operación. Por ejem: $S \times F1/F10$ nos dará la suma de los valores presentes de todos los ingresos de 10 años. Acá se deberá tener cuidado de que el factor "d1" no sea aplicado a ningún ingreso que no esté sujeto a impuestos.

$$PWAT = (S-K) \times d1 \times Rn" (F1/Fn)$$

donde: (S-K) = ingresos o ahorros anuales menos los costos anuales de operación

$$d1 = 0.35$$

$$F1 = (1+r)^1 / ((1+r)^1 - 1)$$

$$F_n = (1+r)^n / ((1+r)^n - 1)$$

n = número de años consecutivos en que ocurre este ingreso neto o gasto

$$R_n = 1 / (1+r)^n$$

Los factores "d" que se pueden encontrar en Tablas, son derivados del Análisis de Flujo de Caja Descontado. Este análisis está basado en I/.1.00 y sólo se necesita multiplicar este factor por el número de Intis respectivo para obtener el Valor Presente después de Impuestos de un Flujo de Caja descontado.

A continuación se ilustrará el cálculo del factor "d" mediante el cálculo del PWAT utilizando una tabulación conocida como Flujo de Caja Descontado para un flujo de caja = I/.1.00. De similar manera se podrá calcular el factor "d" para cualquier duración del proyecto, método de depreciación utilizado, tasa impositiva y tasa de retorno.

Se ilustrará este cálculo mediante un ejemplo simple de desembolso de capital de I/.1.00 para un proyecto cuya vida es de 3 años, comenzando en el año "cero" (no descontando el primer año). Se utilizará el método de Depreciación por Suma de Dígitos, una tasa impositiva de 48% y una tasa de retorno después de impuestos de 10%.

1.	Año	0	1	2
2.	Capital	-1.00	±0	±0
3.	Depreciación (suma de dígitos)	+0.50	+0.333	+0.167

4.	Crédito por impuestos (48%)	+0.240	+0.160	+0.080
5.	Flujo de caja	-0.760	+0.160	+0.080
6.	Flujo de caja descontado (10%)	-0.760	+0.145	+0.066
7.	PWAT = 1/.0.549			

En este caso de Flujo de Caja = 1/.1.00, el PWAT es numéricamente igual al factor "d" para una vida de n=3 años.

2) PROBLEMAS DE CORROSION EN ESTRUCTURAS DE ACERO SUMERGIDAS EN EL MAR

2.1) Antecedentes de la Protección contra la Corrosión en PETROMAR S.A.

Entre los años 1959 y 1961, las empresas concesionarias del Zócalo Continental en el Noroeste Peruano trajeron un barco perforador llamado "El Rincón" con el objeto de perforar pozos estratigráficos en sus respectivas áreas. Belco, la contratista de entonces, tenía en concesión los lotes llamados Litoral 1, Litoral 3, Litoral 4 y Litoral 7.

Entre los pozos que el barco perforó para Belco, los que tuvieron mayor importancia fueron el L3X1 y el L4X1. Estos dos pozos fueron completados con cabezales submarinos y comunicados con tierra por medio de líneas submarinas. El primero en Setiembre de 1960 y el segundo en Abril de 1961, tuvieron buena producción hasta que las líneas submarinas se taponearon con parafina y se perdieron.

Simultáneamente se habían perforado varios pozos desde la playa y dirigidos hacia el Zócalo Continental en las zonas de Litoral 3 y 4. Estos pozos confirmaron la presencia de producción comercial en la zona. Esta razón aunada a la pérdida de las líneas submarinas hicieron palpable el hecho de que la única manera de explotar las reservas probadas en el Litoral 3 y 4 sería con la implantación de una plataforma marina fija. Por razones financieras, Belco dentro

de las limitaciones de su organización, diseño, construyó y sentó en el mar una plataforma cerca del pozo exitoso L3X1. Esta plataforma que recibió el nombre de "3A" fue instalada en Mayo de 1965 sin contar con algún tipo de protección contra la corrosión. Su ejecución estuvo revestida de sucesos épicos y anecdóticos por la falta de experiencia y tecnología en un proyecto de tamaño envergadura. En esta plataforma se perforaron 4 pozos, uno a través de cada pata y los resultados fueron tan sorprendentes y positivos que a fines de 1965 se tomó la decisión de contratar a una firma especializada para que diseñara, construyera e instalara las futuras plataformas.

La construcción de las plataformas se hace sobre la base de diseños prototipo, los cuales sufren pequeños cambios para ser acondicionados para cubrir las necesidades específicas de cada una de ellas.

Después de la plataforma "3A" en Mayo de 1965, se instalaron 12 plataformas más hasta Mayo de 1969. Esta vez, estas 12 plataformas sí contaban con un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio. Algunas llevaron ánodos de zinc de 250 lbs. y otros ánodos de aluminio de 250 lbs. A partir de Marzo de 1969 y debido a razones financieras, se instalaron 45 plataformas mas sin protección catódica pero cubiertas totalmente por pintura de base epóxica. Se esperaba que estas pinturas de base epóxica fuesen suficiente para soportar los relativamente bajos niveles de corrosión observados hasta ese entonces.

En Enero de 1970, se inició la inspección submarina de las primeras 17 plataformas instaladas por Belco a cargo de una compañía internacional especializada. En esta inspección se encontró que 6 plataformas tenían buena Protección Catódica y que las otras 11 variaban de Protección Catódica Parcial a absolutamente ninguna protección.

La principal conclusión de esta inspección fue la de establecer la conveniencia de usar ánodos de aluminio en vez de ánodos de zinc, principalmente debido a razones de peso del ánodo. Con esta inspección se había creado la inquietud de que se debían corregir métodos usados para la protección de las plataformas contra la corrosión. En 1977 se inició un nuevo programa de inspección, esta vez llevado a cabo por buzos peruanos. Debido a la falta de instrumentos y equipos adecuados, esta nueva inspección fue sólo visual pero reveló que la mayoría de las plataformas se encontraban variando de corrosión ligera a corrosión avanzada.

En Julio de 1979 la plataforma "3A", la primera instalada por Belco y sin ninguna protección contra la corrosión, tuvo que ser abandonada debido a su condición insegura y posteriormente recuperada como chatarra. Este hecho aunado al de que las condiciones en el mar habían variado debido al aumento significativo de plataformas y líneas submarinas, aumentando los niveles de corrosión observados en los inicios, hicieron patente la necesidad de mejorar los métodos de protección contra la corrosión.

Si bien el uso de pinturas de base epóxica dieron una protección temporal a las plataformas, estas sólo duraban un máximo de 4 a 5 años y requerían de un sistema adicional de protección catódica para cubrir las áreas donde fallaba la pintura y evitar una corrosión acelerada. A raíz de estos sucesos, se creó un Departamento en Belco para que se encargue entre otras funciones de preparar recomendaciones tendientes a incrementar la vida operativa de las estructuras marinas.

En ese entonces se contempló el uso de un Sistema de Corriente Impresa y el uso de un Sistema de Anodos de Sacrificio para proteger las estructuras que fueron instaladas sin Protección Catódica. Se decidió por la segunda de las alternativas debido principalmente a que no requería gastos de mantenimiento ni de operación.

Paralelamente en Abril de 1979 y Octubre del mismo año se instalaron las plataformas PN1 y LO1 provistas de ánodos de zinc de 330 Kg. (725 lbs.) debido a la urgencia de instalarlas ya que la compra de ánodos de aluminio iba a demorar algún tiempo. A partir de estas plataformas, las subsiguientes son instaladas con ánodos de aluminio, brindando una protección que ha probado ser totalmente efectiva.

A partir de Diciembre de 1985, el Gobierno Peruano canceló los contratos de operaciones de Belco y asumió la explotación de sus concesiones por intermedio de la empresa estatal de derecho

privado, denominada PETROMAR S.A.

2.2.) Descripción del Problema

Corrosión en Estructuras Sumergidas

La configuración geométrica de los sistemas metal-electrólito o metal-materias sólidas-electrólito, pueden motivar que las sustancias responsables de la reacción catódica alcancen con dificultad determinadas zonas de la superficie metálica en tanto llega fácilmente el resto de ella. Esta circunstancia se da en los resquicios presentes en piezas o estructuras metálicas, por ejemplo en uniones traslapadas, ranuras, grietas y en las zonas de contacto con otros cuerpos no metálicos. Dentro de este tipo de corrosión es fundamental establecer una diferencia entre la posibilidad de la formación de "micropilas" y la formación de "macropilas".

Las micropilas se originan al estar el ánodo y el cátodo de la pila muy cercanos el uno del otro. La formación de macropilas requiere la existencia de grandes distancias de separación entre las zonas anódicas y catódicas.

Los efectos de este tipo de pilas por circunscribirse de forma intensiva a determinadas zonas, suelen ser muy peligrosas. Las macropilas son probables en grandes estructuras metálicas, mientras que las micropilas desempeñan un papel preponderante en la corrosión de pequeñas piezas.

En las estructuras sumergidas, la corrosión se mantiene a un nivel constante hasta profundidades apreciables puesto que la agitación y la convección proveen de oxígeno al agua hasta casi niveles de saturación. Por otro lado, la corrosión desciende de modo considerable sobre los objetos enterrados en el fondo, ya que la falta de convección reduce extremadamente el suministro de oxígeno. Sin embargo, si la estructura se prolonga fuera del suelo del fondo y dentro del agua, la aireación diferencial podrá reflejarse en una fuerte corrosión localizada, sobre la porción enterrada del metal.

De forma general e independientemente del tipo de electrólito en que se encuentre la estructura metálica, siempre que exista una diferencia de concentración de oxígeno entre dos zonas distintas de la estructura, se producirá una pila de corrosión por aireación diferencial cuyos efectos se podrán mitigar por la aplicación conjunta de protecciones activas y pasivas. La corrosión en estructuras sumergidas en agua de mar puede ser dividida en cuatro zonas de ataque (Ver Fig. 6). Estas zonas se traslapan un poco y pueden esperarse algunas diferencias en la velocidad de corrosión dentro de la misma zona. Estas cuatro zonas son:

- a. La zona de lodo, es la porción de la estructura que se encuentra debajo del fondo del mar.
- b. La zona sumergida o zona debajo del nivel de agua, donde el metal es siempre cubierto por agua.

- c. La zona de salpicadura, arriba del nivel de agua donde la acción de las olas y marea mantienen siempre el metal húmedo.
- d. La zona atmosférica, donde el metal está seco la mayor parte del tiempo.

En la zona sumergida, la corrosión tiende más bien a ser uniforme. Comúnmente la corrosión se manifiesta con picaduras (pittings) poco profundas en forma generalizada. Donde las olas rompen contra la estructura en la zona de playa, ocurre la erosión en la línea de arena debido a la acción abrasiva de la arena impulsada por las olas. Este es primeramente un problema de erosión, sin embargo, la corrosión es un factor que contribuye grandemente al daño de esta zona.

El daño de las estructuras sumergidas es más severo en la zona de salpicaduras. Aquí, la acción de lavado de agua salada y muy bien aireada, remueve los productos de la corrosión antes de que pueda formarse un recubrimiento protector, resultante en picaduras profundas. En la zona atmosférica, sobre todo en la más cercana al nivel del mar donde el metal usualmente parece estar seco, se forma una capa delgada de sal en la superficie. Cuando la estructura se enfría en las noches y la humedad se incrementa, la sal absorbe agua del aire formando una película salina de humedad sobre la superficie. El sol seca esta película de humedad y reduce

la velocidad de corrosión. Los productos de la corrosión tienden a formar escamas y desprenderse de la superficie metálica. Este desescamado irregular del oxígeno incrementa la formación de picaduras. En general, las picaduras son más profundas en el lado oculto del metal que sobre el lado expuesto al sol.

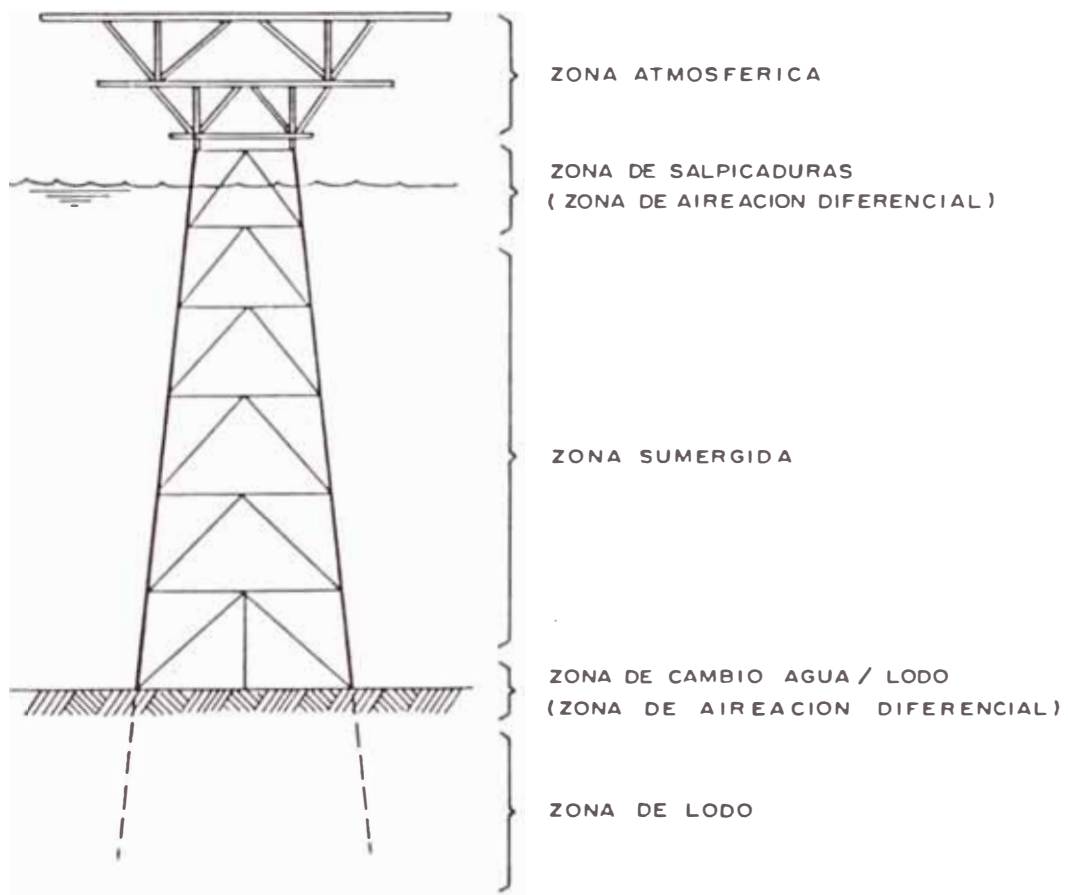


FIGURA 6

Problema Específico de la Plataforma PN1

La plataforma PN1, una estructura de 114m. (376') de profundidad de agua, fué instalada en Abril de 1979 en el área de Peña Negra frente a las costas del Dpto. de Piura (Zócalo Z2-A). Es una de las más profundas instaladas por Belco hasta la fecha, fué provista de un sistema de Protección Catódica con ánodos de sacrificio. Dicho sistema constaba de 96 ánodos de zinc de 330 kg. (725 lbs.) cada uno. Posteriormente al tomar lecturas de potenciales para el control de la protección catódica, se descubrió que los valores eran muy bajos y cercanos a los del acero sin protección sumergido en agua de mar. Esto significa que el sistema de protección catódica no estaba trabajando. Posteriores análisis demostraron que la causa de esta falla radicaba en la mala calidad de la aleación de zinc usada en los ánodos. La inspección de esta estructura y su toma de potenciales fué realizada hasta 62m (200') de profundidad de agua debido a limitaciones de buceo. A fines del año 1983 con la ayuda de un vehículo a control remoto, fué inspeccionada la totalidad de la estructura y fueron tomadas lecturas de potenciales de todos sus miembros determinándose que la totalidad de la estructura se encontraba variando de muy poco a ninguna protección.

Lo anteriormente expuesto hizo necesario considerar la instalación de un nuevo sistema de protección catódica para evitar que la estructura se siga deteriorando y que después de algunos años más obligara a costosas reparaciones. El principal problema que se

presentaba era el de la gran profundidad de la estructura lo que obligaba a la utilización del muy costoso buceo profundo. Para la solución de este problema se consideró dos sistemas alternativos de protección catódica:

- a. Sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio.
- b. Sistema de protección catódica con corriente impresa.

Seguidamente se hará un análisis técnico-económico de las dos alternativas para decidir cual de las dos es la más adecuada para la solución de este problema.

2.3) Parámetros que Influyen en la Corrosión de Estructuras Submarinas

2.3.1) Corrosividad de las Aguas Saladas

Para que la corrosión pueda existir, es completamente necesaria la existencia de tres elementos fundamentales: ánodo, cátodo y electrólito. Si alguno de estos tres elementos deja de existir, la corrosión se detiene. El electrólito principal en cualquier proceso de corrosión, es el agua, en su gran variedad de composiciones, constituyendo el medio agresivo más importante para la mayoría de los metales.

Un agua será tanto más agresiva cuanto mayor su capacidad para conducir la corriente eléctrica. En el agua de mar, cuya conductividad es muy alta, la actividad de los procesos de

corrosión es tal que en un espacio corto de tiempo se pueden originar fenómenos muy graves.

El agua de mar se caracteriza por la gran estabilidad de sus propiedades físico-químicas y en particular por su salinidad que varía entre 30 y 37 gramos por litro de agua de mar. De manera aproximada, se puede estimar que las diversas sales contenidas en un litro de agua de mar se reparten en la siguiente forma:

<u>Compuesto</u>	Contenido (Gr/Lt.)
Cloruro de sodio	27.0
Cloruro de magnesio	3.2
Sulfato de magnesio	1.6
Sulfato de calcio	1.4
Sulfato de potasio	0.8
Cloruro de potasio	0.5
Carbonato de calcio	0.1
Otros (bromuros, fosfatos)	0.5
TOTAL	35.0

La agresividad del agua de mar frente a los metales varía en función de su composición y factores tales como el oxígeno molecular disuelto, la temperatura, el PH, las concentraciones de sales disueltas, la agitación y velocidad del medio, etc.

2.3.2) Acción de Oxígeno Disuelto

Para que el hierro y el acero sufran una corrosión apreciable en un agua neutra, se necesita la presencia del oxígeno disuelto. En agua saturada de aire, la velocidad inicial de

corrosión puede ser del orden de 100 mg/dm²/día. Esta velocidad disminuye con el tiempo debido a la formación de una película de óxido de hierro que actúa como barrera para la difusión del oxígeno. La velocidad media de corrosión suele ser del orden de 10-20 mg/dm²/día, tendiendo a elevarse cuanto mayor sea la velocidad del agua. La velocidad de difusión del oxígeno es proporcional a su concentración en el medio acuoso, por tanto, la corrosión será también proporcional a dicha concentración.

La corrosión tiene un crecimiento lineal con la concentración de O₂ disuelto a temperatura constante. En ausencia de O₂ disuelto, la corrosión es prácticamente despreciable. El aumento de la concentración de O₂ acelera en principio la corrosión del hierro, pero por encima de una concentración crítica la corrosión disminuye de nuevo a un valor bajo. Esta disminución se produce a causa de la pasivación del hierro producida por el O₂.

2.3.3) Acción de la Temperatura

Es bien conocido que la velocidad de las reacciones químicas aumenta con la temperatura en forma exponencial. Cuando la temperatura aumenta, las propiedades del electrolito y del metal sufren numerosas modificaciones entre las que se tiene:

- Disminución de la solubilidad del gas disuelto y en particular del oxígeno.
- La viscosidad se hace más difícil y las corrientes de convección y

de difusión son más intensas.

-La disociación del agua aumenta, lo que motiva una mayor actividad de los iones H^+ y OH^- .

-Modificación de la solubilidad de los productos de la corrosión.

-Disminución de la resistividad del electrólito.

-Disminución de la sobretensión de descomposición del agua.

Lo que confiere a los H^+ una actividad oxidante más fuerte sobre el metal.

Toda elevación de temperatura, lleva consigo una elevación de la velocidad de corrosión, hasta que aproximadamente a los $70^\circ C$ hay un punto de inflexión en el que la corrosión comienza a decrecer. Esta disminución está asociada con el marcado decrecimiento de la solubilidad del oxígeno en el agua a medida que la temperatura aumenta.

2.3.4) Acción del PH

a) Zona PH de 4 a 10

En este intervalo la corrosión es independiente del PH dependiendo sólo de la velocidad de difusión del oxígeno a la superficie del metal. La barrera de hidróxido ferroso se renueva de forma continua por el proceso de corrosión. La velocidad de corrosión la determina la temperatura, la salinidad, la velocidad del medio y la concentración de oxígeno disuelto. Es pues, independiente del metal.

b) Zona PH Menor de 4

La película de óxido ferroso se disuelve, el PH de la superficie del metal desciende y el hierro queda en mayor o menor grado en contacto con el electrólito. La velocidad de corrosión depende de la de desprendimiento de hidrógeno.

c) Zona PH Mayor de 10

En estas condiciones se eleva el PH de la superficie de hierro, la velocidad de corrosión disminuye, ya que se sitúa en el dominio de la pasividad. Si se eleva mucho la alcalinidad, se destruye la pasividad, por disolución del óxido pasivante y comienza de nuevo la corrosión.

2.3.5) Acción de las Sales Disueltas

a) Efecto del Cloruro de Sodio

La velocidad de corrosión en un principio aumenta con la concentración de NaCl y luego decrece, alcanzando el valor máximo de corrosión para una concentración del 3% NaCl y el mínimo cuando se alcanza la saturación a 26% de NaCl.

La velocidad de corrosión está controlada por el proceso de despolarización catódica en el que interviene el oxígeno. La solubilidad del oxígeno a una temperatura dada se mantiene prácticamente constante en un intervalo de concentración de NaCl comprendido entre 0 y 1%. Si se sigue aumentando la concentración

de NaCl, la solubilidad del oxígeno comienza a decrecer, llegándose a alcanzar valores muy bajos en la saturación, lo que explica la disminución de la velocidad de la corrosión.

b) Efecto del Cloruro de Magnesio

El cloruro de magnesio tiene una acción neta inhibidora de la corrosión y es, gracias a la presencia de esta sal, por lo que el agua de mar teniendo aproximadamente 27% de NaCl es menos corrosiva que una solución acuosa de NaCl al 3%.

2.3.6) Acción de la Velocidad del Agua

La velocidad o agitación del medio corrosivo (electrolito) se manifiesta de distintas maneras a efectos de la corrosión:

- a) Facilitan la difusión del Oxígeno (O_2) a la superficie catódica (despolarización por oxígeno).
- b) Despolarización catódica por efectos mecánicos.
- c) Al alcanzar la velocidad ciertos valores, puede ser la causa de corrosión-erosión.

Al ser la velocidad un despolarizante catódico nos indica que este factor actúa enérgicamente acelerando la corrosión. La corrosión del acero al carbono, con respecto al agua estancada, se triplica al alcanzar una velocidad de 1.5m/seg.

3. ALTERNATIVAS DE SOLUCION A LOS PROBLEMAS DE CORROSION DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS

Para proteger a las estructuras sumergidas en general y a la plataforma PN1 en particular, se consideró dos sistemas alternativos que serán discutidos extensamente en este capítulo y son:

- a) Sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio.
- b) Sistema de protección catódica con corriente impresa.

En este capítulo se dará una idea breve a manera de ilustración de lo que es la protección anódica. Se discutirá las dos alternativas mencionadas, incluyendo un diseño de cada una de ellas para el caso real de la plataforma PN1, cuyo problema se describió en el Capítulo 2, Sub-capítulo 2.2) Descripción del Problema.

3.1) Protección Anódica

El término protección catódica describe la condición en la cual una estructura es convertida totalmente en un cátodo y por lo tanto es protegida. En la protección anódica, la superficie a ser protegida es convertida en un ánodo y forzada a descargar corriente a un cátodo. Esto parece ser un procedimiento errado; sin embargo ciertas soluciones (usualmente ácidos) pueden permitir el desarrollo de condiciones de pasivación en una superficie metálica sometida a una descarga de corriente. Usualmente esto ocurre sólo cuando el potencial entre la estructura y el medio

ambiente presenta valores que están dentro de rangos relativamente estrechos. La estructura se corroerá libremente a potenciales por encima o por debajo de este rango. Por esta razón, los potenciales de protección deben ser controlados muy cuidadosamente. Para lograr esto es necesario utilizar un aparato especial llamado potencióstato el cual es capaz de mantener el potencial del electrodo constante controlando de esta manera la corriente anódica.

Aún cuando la estructura protegida anódicamente esté en el rango pasivo, la descarga de una cierta corriente es necesaria para mantener la pasividad. Por esta razón la protección no es absoluta, pero la velocidad de corrosión es mucho menor que la que existía sin el sistema de protección anódica.

Las principales ventajas de la protección anódica son: Requerimientos de corriente muy bajos, grandes reducciones de la velocidad de corrosión (típicamente se pueden alcanzar reducciones de 10,000 veces ó más) y su aplicabilidad a ciertos ácidos muy fuertes y a otros medios altamente corrosivos. Es importante recalcar que esta protección puede ser aplicada sólo a metales y aleaciones que posean características activo-pasivas, tales como el titanio, acero inoxidable y aleaciones con base de acero y níquel. Más aun sólo puede ser utilizado en ciertos medio ambientes desde que la composición del electrólito influyen la pasividad. Generalmente este sistema es aplicado a tanques y recipientes de procesos donde el medio ambiente corrosivo contiene oxígeno y es

de naturaleza ácida, haciendo los sistemas de protección catódica imprácticos debido a la dificultad de polarizar catódicamente la superficie a proteger. La protección anódica ha sido exitosamente usada para reducir la velocidad de corrosión del acero inoxidable 18-8 y algunas otras aleaciones en medios altamente corrosivos como el ácido sulfúrico, ácido fosfórico, hidróxido de sodio y sales corrosivas como el sulfato de aluminio y el nitrato de amonio

3.2) Protección Catódica

3.2.1) Fundamentos de la Protección Catódica

Se ha señalado que para que exista corrosión electroquímica, es fundamental que se ponga en funcionamiento una pila galvánica que denota la existencia de un ánodo, un cátodo, y un electrólito. En el momento en que uno de estos tres elementos base de la pila falla, ésta deja de funcionar y por lo tanto, la corrosión se detiene. Es lógico pensar que los sistemas de protección han de estar basados en eliminar alguno de estos elementos o en hacerlos inoperantes.

El procedimiento que elimina todos los ánodos de la superficie metálica, haciéndolo todo catódica, se le conoce con el nombre de protección catódica.

Una superficie metálica se puede lograr hacer catódica por dos procedimientos diferentes:

- a. Conectando el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, es decir, que esté situado por encima en la serie electroquímica de los metales. Este sistema se conoce con el nombre de protección catódica con ánodos de sacrificio. Los metales más corrientemente utilizados para este fin son: el zinc, aluminio, magnesio y sus respectivas aleaciones.

- b. Conectando el metal a proteger al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua, pura o rectificada y el polo positivo a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro, ferro-silicio, grafito, titanio-platinado, plomo-plata, etc. Este sistema se conoce con el nombre de protección catódica con corriente impresa.

Durante el proceso de corrosión, se produce una corriente continua que fluye de las zonas anódicas al electrólito y del electrólito a las zonas catódicas, completándose el circuito a través de la superficie metálica. Para una diferencia de voltaje dado (el potencial galvánico entre el ánodo y el cátodo) la cantidad de corriente que fluye está limitada por factores tales como la resistividad del medio ambiente (expresada en ohm-cm.) y el grado de polarización en las zonas anódica y catódica. La corrosión ocurre donde la corriente descarga del metal al electrólito en las zonas anódicas; donde la corriente fluye del electrólito a la superficie metálica (zona

catódica) no se produce corrosión. Aplicando protección catódica a la superficie metálica a proteger, se desea forzar a toda la superficie metálica a recibir corriente del electrólito. Cuando esta condición ha sido lograda, toda la superficie metálica se convertirá en un cátodo y la corrosión será exitosamente mitigada en la superficie a proteger. Por medio de la protección catódica, la corrosión no es eliminada de todo el sistema, lo que se hace es transferirla de la superficie a proteger a otra parte conocida del sistema la cual es diseñada para descargar la corriente de protección catódica. Esta otra parte es el ánodo de sacrificio o ánodo auxiliar, el cual se consumirá en un tiempo razonable brindando la protección deseada a la superficie metálica a proteger.

3.2.2) Criterios para la Protección Catódica

Un criterio de protección catódica es un estandar usado para estimar el logro de la protección catódica. Los criterios son requeridos desde que el potencial estático de los ánodos de acción local (que sería el verdadero criterio) no pueden ser fácilmente obtenidos. Aunque el rango aproximado del potencial estático es conocido para los metales mas comunes, la fuerza electromotriz exacta en un electrólito dado es muy difícil de obtener. Los criterios son usualmente usados en lugar de la observación directa de la estructura protegida, principalmente debido a su menor costo. En casos especiales una protección catódica total es posible de ser lograda aun sín cumplir con ningún

criterio. De manera similar, se puede tener corrosión aún cumpliendo con todos los criterios y el más usado comúnmente en protección catódica es el criterio del potencial o criterio del potencial entre la estructura y el medio ambiente. La base para este criterio es de que si una corriente eléctrica está fluyendo a la estructura protegida, deberá haber un cambio en el potencial de la estructura con respecto al medio ambiente. Esto sucede porque el flujo de corriente causa un cambio de potencial el cual es una combinación de la caída de voltaje a través de la resistencia entre la estructura protegida, el medio ambiente y el potencial de polarización desarrollado en la superficie de la estructura. La resistencia entre la estructura protegida y el medio ambiente incluye la resistencia de cualquier pintura o recubrimiento sobre la estructura. El resultado neto de este flujo de corriente es que la estructura que está siendo protegida se volverá más negativa con respecto a su medio ambiente.

La protección catódica requiere de la polarización de la reacción catódica en la estructura al potencial estático de los ánodos de acción local. Cuando la protección catódica es exitosa, la estructura protegida deja de tener zonas anódicas. Toda la estructura se convierte en una superficie donde sólo ocurre la reacción catódica. Cuando se alcanzan los -850mV (Cu/CuSO₄) equivalente a -800mV . (Ag/AgCl), se asume que la protección catódica del acero se ha alcanzado. Esta asunción básica es que el potencial estático de los ánodos en la superficie a ser protegida no

es más activo que el estándar aceptado. Desde que el potencial estático es una variable que depende del metal y de las condiciones del electrólito, el verdadero potencial para alcanzar la protección catódica es variable. Un rango típico para el acero en medio ambientes normales es de -600 a -800mV (Cu/CuSO₄). Un potencial más o menos activo que este rango es raramente encontrado.

El criterio del potencial generalmente representa sobre protección ya que el potencial de protección escogido, deberá satisfacer la peor de las condiciones posibles. Otra desventaja de este criterio es que no detecta el caso en que el potencial estático es más negativo que el potencial escogido. Su mayor ventaja es la facilidad de aplicación, ya que con una simple lectura se puede medir el nivel de protección en ese punto.

3.2.3) Sistema de Anodos de Sacrificio

El británico Davy en 1824 fué el primero en emplear bloques de zinc para proteger la envoltura de cobre que usaban los buques de guerra británicos, iniciándose de esta manera la protección catódica con ánodos de sacrificio. Esta técnica se desarrolló lentamente al principio, pero en los últimos 25 años lo hizo con gran rapidez. Con el desarrollo de la protección catódica, la demanda de los materiales anódicos se incrementó notablemente. El término "Anodo de Sacrificio" o "Anodo Galvánico", se refiere al miembro que se corroe de los dos metales diferentes que forman

una cupla o par galvánico. Este par de metales, al estar sumergidos en un electrólito y entrar en contacto entre sí, crean un potencial electroquímico capaz de generar una corriente que fluye del ánodo al cátodo.

El proceso de corrosión es causado por la pérdida de los electrones que mantienen juntos los átomos de un metal. La protección catódica por ánodos de sacrificio se vale de la corriente generada por la cupla ánodo-cátodo para restituir los electrones que el metal pierde por el proceso de corrosión.

El zinc ha sido siempre el material anódico clásico y recientemente su uso se ha incrementado a causa de un mayor conocimiento y control de los factores que son el origen de su pasivación. Los ánodos de aleación de magnesio han sido también utilizados con éxito.

Generalmente el magnesio es más utilizado en instalaciones donde se requiere un potencial elevado, para conseguir una polarización rápida de estructura sumergidas alternativamente. Por sus características electroquímicas, el aluminio es también un material anódico de gran interés. Sin embargo el desarrollo de aleaciones de aluminio adecuadas para ánodos de sacrificio ha sido más lento que para los otros dos metales. Sólo recientemente han comenzado a tener estos ánodos un uso más amplio.

3.2.4) Sistema de Corriente Impresa

El sistema de corriente impresa se desarrolló aproximadamente cien años después que el de ánodos de sacrificio. Este sistema consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo a un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Como electrodos auxiliares se pueden utilizar la chatarra de hierro, aleaciones de ferrosilicio, carbón, titanio-platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrólito (medio agresivo), que completa el conjunto para la realización del proceso electrolítico.

Fuentes de Corriente El sistema de corriente impresa requiere una fuente de corriente continua que no importa de donde provenga, a condición de que se mantenga con el tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar durante, al menos, diez años.

Rectificadores Son los aparatos que permiten el paso de corriente continua en un solo sentido. Estos van alimentados con corriente alterna a 220V, 380V, 440V, 50/60Hz. La tensión de salida puede ser regulada según las necesidades. (Ver Anexo J).

Anodos Auxiliares Todos estos ánodos con el paso de la corriente van consumiéndose a mayor o menor velocidad,

así por ejemplo, la chatarra de hierro se consume muy rápidamente y el titanio-platinado a un ritmo muy lento.

3.2.5) Ventajas y Desventajas de Ambos Sistemas

1. Anodos de Sacrificio

Ventajas

- Bajo costo de mantenimiento.
- Protección tan pronto como la estructura esté en el mar.
- Gran confiabilidad si un buen diseño es usado.
- No requiere de supervisión o control permanente, salvo una inspección cada 1 ó 2 años.
- No requiere de fuente externa de energía.

Desventajas

- Alto costo inicial.
- Carga adicional a la estructura.
- Dificultad de corregir un diseño una vez instalada la estructura. Sobretudo en estructuras profundas.
- Problemas de control de calidad en los ánodos y falta de rendimiento garantizado.
- Alto costo de re-instalación.

2. Corriente Impresa

Ventajas

- Bajo costo inicial.
- Bajo costo de re-instalación.
- No produce carga adicional a la estructura.
- Bajo costo de reparación y/o corrección del diseño.

Desventajas

- Relativamente alto costo de mantenimiento.
-
- La protección no puede ser lograda hasta que se instale la fuente de energía.
- Requiere de una fuente externa de energía.

3.2.6) Parámetros para el Cálculo de la Protección Catódica

1.	Profundidad de agua	376 pies
2.	Resistividad del agua	200HM-CM
3.	Densidad de corriente requerida para la polarización:	
	-Zona de agua	0.010AMPS/pie ²
	-Zona de lodo	0.002AMPS/pie ²
4.	Drenaje de corriente requerida por pozo	3AMPS/pozo
5.	Potencial de protección (Ref. Electrodo Ag/AgCl)	-0.80V
6.	Potencial entre los ánodos de aluminio y el acero (a niveles de protección)	0.25V

a) Información Estructural

Basado en los planos estructurales de la plataforma PN1 (Ver Anexos A y B) se obtuvo la siguiente información:

Elevación	De	A	<u>Area(pies²)</u>
1-2	0'	-26'	9,395
2-3	-26'	-60'	10,100
3-4	-60'	-113'	18,196
4-5	-113'	-165'	19,550
5-6	-165'	-215'	22,505
6-7	-215'	-265'	23,118
7-8	-265'	-315'	24,845
8-9	-315'	-376'	27,974
Zona de lodo	-376'	-426'	6,854

b) Requerimientos de Corriente

Agua:	Area (pie ²) x 0.01	$\frac{\text{AMP}}{\text{Pie}^2}$
Lodo:	Area (pie ²) x 0.002	$\frac{\text{AMP}}{\text{Pie}^2}$

<u>Elevación</u>	<u>Amperios</u>	
1-2	94,0	
2-3	101.0	
3-4	182.0	
4-5	195.9	
5-6	225.1	
6-7	231.2	
7-8	248.5	279.7 Amps. (Elev. 8-9)
8-9	347.4	54.0 Amps. (18 pozos)
		13.7 Amps. (Zona de lodo)

Total de amperios requeridos : 1,627

Total de amperios para el diseño : 1,650

3.2.7) Pautas para el Diseño de un Sistema de Anodos de Sacrificio

Dentro de las alternativas de solución al problema real de la plataforma PN1 descrito en el Capítulo 2 , sección 2.2) Descripción del Problema, se consideró el diseño de un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio. Para efecto de los cálculos involucrados en este diseño, se utilizará información mostrada en el Capítulo 3 , Sección 3.2), sub-sección 3.2.6) Parámetros para el Cálculo de la Protección Catódica.

La salida de corriente por ánodo sera determinada por la ley de Ohm:

$$I = E/R, \text{ donde:}$$

I = Salida de corriente del ánodo (amperios)

$E = 0.25v.$ = diferencia de potencial entre el ánodo de aluminio escogido y la estructura de acero.

R = Resistencia del ánodo al flujo de la corriente (ohmios).

La resistencia (R) se calculará usando la ecuación de Dwight:

$$R = \rho(0.0627) / L[\ln(4L/re) - 1], \text{ donde:}$$

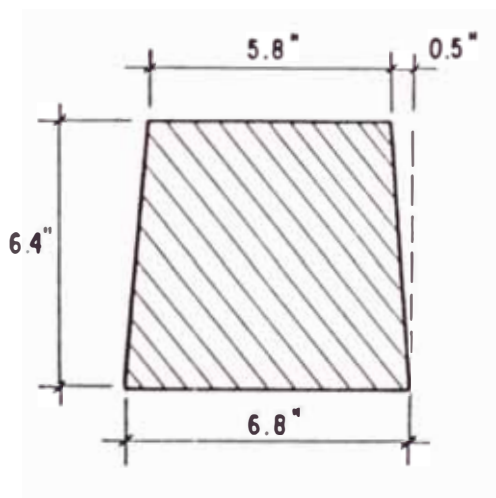
$\rho = 20 \text{ ohm-cm} = \text{Resistividad del agua de mar.}$

$L = 8 \text{ pies} = 96 \text{ pulgadas.}$

$re = \text{Radio equivalente} = C / 2\pi$, donde $C = \text{perímetro de la sección recta del ánodo (pulgadas).}$

Para diseños prácticos, re , debe tomarse como un radio promedio entre el radio inicial y el radio final del ánodo después de un cierto consumo (por ejem: un consumo del 70% en área).

El ánodo seleccionado para este diseño es un ánodo de aluminio (aleación GALVALUM 1) de 325 lb., las dimensiones de su sección recta se especifican seguidamente:



$$C = \text{perímetro} = 25.4 \text{ Pulg}$$

$$\text{AREA} = 40.32 \text{ Pulg}^2$$

$$30 \% \text{ AREA} = 12.09 \text{ Pulg}^2$$

$$C' = 13.91 \text{ Pulg}$$

FIGURA 7

SECCION RECTA DEL ANODO SELECCIONADO

$$r_e = (r_i + r_f) / 2$$

$$r_i = C / 2n = 25.4 / 2\pi = 4.04 \text{ pulg.}$$

$$r_f = C' / 2n = 13.91 / 2\pi = 2.21 \text{ pulg. (estimado)}$$

$$r_e = (4.04 + 2.21) / 2 = 3.12 \text{ pulg.}$$

La resistencia sera:

$$R = 20 (0.0627) / 96 \times (\ln(4 \times 96 / 3.12) - 1)$$

$$R = 0.0498 \text{ ohm.}$$

La salida de corriente será:

$$I = 0.25 / 0.0498 = 5.02 \text{ amperios/ánodo}$$

La salida de corriente por ánodo sera reducida en aproximadamente 15% debido al efecto de interferencia causado por el arreglo de ánodos duales que se usarán para reducir los costos de instalación. Este arreglo será descrito al final de este diseño:

La salida real de corriente por ánodo será:

$$I = 5.02 \times 0.85 = 4.26 \text{ amperios/ánodo}$$

El número de ánodos requeridos será:

$$1,650 \text{ amperios} \div 4.26 \text{ amperios/ánodo} = 387$$

$$N^\circ \text{ de ánodos} = 392 \text{ (Por simetría)}$$

Cálculo de la Vida del Anodo

De datos del fabricante del ánodo seleccionado (aleación GALVALUM I):

$$\begin{aligned} \text{-Capacidad de corriente} &= 1,280 \text{ Amp-hr/lb.} \\ & (2,877 \text{ Amp-hr/Kg}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{-Consumo del ánodo} &= 6.8 \text{ lb/Amp-año} \\ & (3.1 \text{ kg/Amp-año}) \end{aligned}$$

El consumo anual por ánodo será:

$$\begin{aligned} 6.8 \text{ lb/Amp-año} \times 4.26 \text{ Amp/ánodo} &= 28.96 \text{ lb/año - ánodo} \\ & (13.21 \text{ kg/año - ánodo}) \end{aligned}$$

Desde que el peso de cada ánodo es 325 lbs. (147.5 kg)

$$\text{Vida del ánodo} = 325 \text{ lbs} \div 28.96 \text{ lbs/año} = 11.2 \text{ años}$$

Considerando una eficiencia del ánodo del 90%, la vida real del ánodo será: 10.1 años.

Descripción del Sistema de Anodos de Sacrificio

a) Arreglo General del Sistema

Los ánodos serán instalados en ensambles dobles (ánodos duales) mediante grapas que serán empernadas en los miembros de la estructura y soldados en algunos puntos para asegurar la continuidad eléctrica. Este arreglo permitirá reducir sustancialmente los costos de instalación al disminuir casi a la mitad el costo del buceo. Los 400 ánodos requeridos (200 duales) serán instalados en número proporcional a la superficie metálica en contacto con el agua de mar. Para lograr esto se calculó el número de ánodos requeridos entre elevaciones (Ver Anexo B) cuyo resumen se muestra a

continuación:

Número de Anodos Requeridos entre Elevaciones

Elevación	<u>Nº de Anodos</u>	<u>Nº de Anodos Dobles</u>
1-2	22	11
2-3	24	12
3-4	44	22
4-5	46	23
5-6	56	28
6-7	56	28
7-8	60	30
8-9	84	42

Total de ánodos requeridos : 392
 Total de ánodos dobles requeridos 196

NOTA : La ubicación de estos ánodos dobles en la estructura se muestran en el Anexo C.

b) Descripción y Datos Técnicos de los Anodos

Los ánodos seleccionados serán de una aleación de aluminio de por lo menos 99.85% de pureza con muy pequeños porcentajes de zinc (0.45%) y mercurio (0.045%).

Los nombres comerciales de estos ánodos pueden ser: KAISER KA-95, GALVALUM I, REYNODE II ó equivalentes de otras marcas.

Otros datos técnicos de los ánodos seleccionados son:

-Peso neto del ánodo : 325 lbs. (147.5 kg.)
 -Peso total del ánodo : 368 lbs. (167.0 Kg.)
 -Capacidad de corriente : 1280 Amps-hr/lb. (2,877 Amps-hr/kg.)
 -Consumo del ánodo : 6.8 lb/Amp-año (3.1kg/Amp-año)

- Potencial entre ánodo y acero de la estructura a un nivel de protección de $-0.80V$. (Ag/AgCl) : $0.25V$.
- Eficiencia del ánodo : 90%

Las dimensiones del ánodo seleccionado y del ensamble de los ánodos dobles con las grapas de fijación a la estructura se muestran en los Anexos D y E respectivamente.

3.2.8) Pautas para el Diseño de un Sistema de Corriente impresa

La alternativa a un sistema de ánodos de sacrificio, para proteger a una estructura en general y a la plataforma PN1 en particular, es un sistema de corriente impresa. La descripción de ambos sistemas, así como sus ventajas y desventajas se discutió al inicio de este capítulo en la sección 3.2), subsecciones 3.2.3), 3.2.4) y 3.2.5).

En esta sección se mostrará el método para el diseño de un sistema de corriente impresa para proteger una estructura submarina de acero. Para mayor aplicabilidad del diseño, se tratará el caso real de la plataforma PN1 cuyo problema...fué...descrito anteriormente. Para efectos de los cálculos involucrados en este diseño, se utilizará información mostrada en el capítulo 3 , sección 3.2), subsección 3.2.6) Parámetros para el Cálculo de la Protección Catódica.

a) Concepto del Diseño

El modelo seleccionado para la instalación de un sistema de corriente impresa para proteger a la plataforma PN1 está basado en el concepto de "cable tensionado" ("tensioned string"). Se escogió este concepto para reducir los costos de instalación ya que debido a que la plataforma a proteger se encuentra sumergida y piloteada en el fondo de mar, se requeriría del costoso buceo profundo para instalar los ánodos directamente a los miembros de la estructura.

Este concepto consiste de varios ánodos de corriente impresa soportados por un cable de acero recubierto con polyuretano. Este cable es tensionado entre un peso muerto, en el fondo del mar, o un punto fijo en la estructura de la plataforma, y un elemento tensionador instalado en la parte superior de la estructura. Varios cables eléctricos, cada uno alimentando dos ánodos, son enrollados en forma de espiral alrededor del cable de acero de soporte. Los ánodos son fijados al cable de acero por medio de espaciadores, los cuales previenen el contacto directo entre el ánodo y el sistema de soporte.

El sello entre el cable eléctrico y el ánodo es completamente mecánico, evitando el uso de resinas o selladores que pueden fallar con el tiempo debido a las condiciones de operaciones muy duras. Cada cable eléctrico tiene su propio aislamiento a prueba de agua y todos los cables eléctricos son

fijados al cable de acero de soporte por medio de grapas no metálicas. De acuerdo con la geometría de la plataforma y los requerimientos de corriente para la protección, así como para lograr una distribución uniforme de esta corriente, se ha visto la necesidad de utilizar cinco (5) cables tensionados con sus respectivos elementos: Cuatro (4) externos, alrededor de la plataforma y uno (1) en el centro que cubrirá la parte superior de la plataforma. El cable tensionado central se escogió para evitar riesgos de daño de éste en la zona de mareas y será tensionado entre un elemento tensionador instalado en la superficie y un punto fijo en la estructura. Este punto fijo estará ubicado aproximadamente a 66 pies (20m) debajo del nivel de agua, para evitar el buceo profundo.

Número y Ubicación de los Anodos en la Estructura

Como se puede apreciar en el Anexo B los requerimientos de corriente entre elevaciones para proteger la plataforma PN1, son basados sólo en la superficie de metal en contacto con el agua de mar. Estos valores se muestran en la Tabla V. Según recomendaciones de la NACE (National Association of Corrosion Engineers), los sistemas de protección catódica con corriente impresa deben ser diseñados usando de 1.25 a 1.5 veces los requerimientos totales de corriente calculados usando la superficie de metal en contacto con el electrólito.

Esto se hace con la finalidad de compensar una reducción de la eficiencia de distribución de corriente que se produce al usar ánodos con alta salida de corriente (de 30 a 200 amperios). Esto no se produce en el caso de los ánodos de sacrificio porque estos tienen salidas de corriente pequeñas (de 3 a 6 amperios) y su eficiencia de distribución de corriente es muy cercana al 100%. En nuestro diseño usaremos 1.5 como factor de compensación y los nuevos requerimientos de corriente se muestran en la siguiente Tabla:

TABLA V

Elevación	<u>Corriente Requerida</u>	<u>Corriente Requerida x 1.5</u>
1-2	94 amperios	141 amperios
2-3	101 "	151 "
3-4	182 "	273 "
4-5	196 "	294 "
5-6	226 "	339 "
6-7	232 "	348 "
7-8	249 "	374 "
8-9	348 "	522 "

Para este diseño se ha seleccionado como ánodo de corriente impresa al ánodo LIDA (Linear Distributed Anode). Este es un ánodo tubular que tiene titanio como metal base y una mezcla de óxidos de metales nobles como revestimiento activado. Una descripción más detallada se mostrará en la parte final de esta subsección.

Para el cálculo del número de ánodos requeridos se deberá

tener en cuenta que cada uno de los ánodos LIDA seleccionados han sido diseñados para una salida de corriente de 50 amperios.

Según los requerimientos de corriente mostrados en la Tabla V el número de ánodos de 50 amperios requeridos entre elevaciones serán:

TABLA VI

Elevación	<u>Corriente Requerida</u>	Número de Anodos (50A)
1-2	141A	3
2-3	151	3
3-4	273	6
4-5	294	6
5-6	339	8
6-7	348	8
7-8	374	8
8-9	522	12
Total:	2,442	54

La ubicación de cada uno de los cuatro (4) cables tensionados externos y uno (1) interno, así como la ubicación de cada uno de los ánodos es mostrado en el Anexo F

Esta instalación consiste básicamente de cinco (5) cables tensionados, cuatro (4) externos: A1, A2, A3 y A4 con una capacidad de corriente de 600 amperios cada uno y uno (1) interno, instalado en la parte central de la plataforma con una salida de corriente de 300 amperios.

En cada uno de los cuatro (4) cables tensionados del tipo "A", son ensamblados 12 ánodos LIDA, con una salida de corriente de 50A cada uno, alimentados por 6 cables eléctricos: C1, C2, C3, C4, C5 y C6. Cada cable eléctrico alimenta 2 de los ánodos de corriente impresa.

Los pesos muertos, serán colocados en el fondo marino, a una distancia aproximada de 15m alejados de la plataforma, mientras que el elemento tensionador será instalado, mediante grapas en los brazos de la plataforma en la elevación +105 a aproximadamente 8m de profundidad. Los cables tensionados del tipo "A" tendrán aproximadamente 108m de longitud. El cable tensionado del tipo "B", con 6 ánodos LIDA de 50A cada uno, alimentado por 3 cables eléctricos: C'1, C'2 y C'3, es tensionado del centro de la plataforma, entre un elemento tensionador en el piso de cabezas de pozo y un punto fijo en la elevación +93 a aproximadamente 20m de profundidad. Este cable tensionado, el cual es mecánicamente protegido por la misma plataforma, proporciona la corriente de protección sólo para el acero comprendido entre el nivel de agua y la elevación +93. El cable tensionado del tipo "B" tendrá aproximadamente 30m de longitud. Una carga aplicada máxima de 5Tn es prevista para templar ambos tipos de cables tensionados.

La elevación detallada de los ánodos de cada uno de los

cables tensionados de los tipos "A" y "B" se muestran en los Anexos G y H respectivamente.

El Anexo I muestra el ensamble de un cable tensionado del tipo "A" y asimismo muestra el detalle de la fijación de un ánodo típico.

c) Diseño de Circuito Eléctrico

1. Datos para el Diseño

- Resistividad del agua de mar (P) : 20 ohm-cm.
- Dimensiones del Anodo:
 - longitud : 1000 mm.
 - diámetro : 25.4 mm.
- Cable eléctrico:
 - sección : 50 mm²
 - resistencia linear : 0.388 x 10⁻³ ohm/m
- Salida de corriente por ánodo : 50A
- Distancia asumida entre el elemento tensionador y la caja colectora de los cables eléctricos:
 - cable tensionador Tipo "A" : 30m
 - cable tensionador Tipo "B" : 10m.

2. Composición de los Cables Tensionadores

Cable Tipo "A".- Son 4 cables (A1, A2, A3 y A4) que serán instalados en la parte exterior de la plataforma. Cada uno de estos cables tensionadores contará con 6 cables eléctricos (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) que irán enrollados en espiral alrededor del cable de acero tensionador y sujetos a éste por medio de espaciadores.

Cable C1: longitud : 131 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C2 longitud : 123 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C3 longitud : 111 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C4 longitud : 95 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C5 longitud : 77 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C6 longitud : 53 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable tipo "B". - Un solo cable tensionador de este tipo será instalado en el centro de la plataforma. Este consistirá de 3 cables eléctricos (C'1, C'2 y C'3) que irán enrollados en espiral alrededor del cable de acero tensionador y sujetos a éste por medio de espaciadores.

Cable C'1 longitud : 43 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C'2 longitud : 38 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

Cable C'3 longitud : 33 m.
 n° de ánodos : 2
 salida de corriente : 100A

2.- Resistencias de los Cables Eléctricos (Rc):

-Cable Tensionado Tipo "A"

$$R_{c1} = R_{\text{cable cobre}} + R_{\text{ánodos}} + R_{\text{catódica}}$$

$$R_{\text{cable cobre}} = 0.388 \times 10^{-3} (\text{ohm/m}) \times 131 (\text{m}) = 0.0508 \text{ ohm}$$

$$R_{\text{ánodos}} = 0.1513 \text{ ohm-ánodo} / 2 \text{ ánodos} = 0.0757 \text{ ohm}$$

$$R_{\text{catódica}} = \text{Se estima en } 5\% \text{ de la resistencia de los ánodos (Ránodos)} = 0.0038 \text{ ohm}$$

$$R_{c1} = 0.0508 \text{ ohm} + 0.0757 \text{ ohm} + 0.0038 \text{ ohm} = 0.1303 \text{ ohm}$$

Con el mismo procedimiento se calcula las demás resistencias.

$$R_{c2} = 0.1273 \text{ ohm}$$

$$R_{c3} = 0.1226 \text{ "}$$

$$R_{c4} = 0.1164 \text{ "}$$

$$R_{c5} = 0.1094 \text{ "}$$

$$R_{c6} = 0.1001 \text{ "}$$

-Cable Tensionado Tipo "B"

$$R_{c'1} = 0.1001 \text{ ohm}$$

$$R_{c'2} = 0.0943 \text{ "}$$

$$R_{c'3} = 0.0923 \text{ "}$$

3.- Cálculo del Voltaje del Transformador-Rectificador

La capacidad total de corriente del sistema de corriente impresa es de 2,700A (4 cables tensionados "A" de 600A cada uno y 1 cable tensionado "B" de 300A). Para obtener una distribución uniforme de corriente en todo el sistema, se utilizará las siguientes fuentes de alimentación:

TRANSFORMADOR-RECTIFICADOR (T/R1): Con una capacidad de corriente de 300A y un voltaje a determinar. Será utilizado para el cable tensionado tipo "B" (cables eléctricos C'1, C'2 y C'3).

T/R2 : 800A para los cables tensionados A1, A2, A3 y A4 (cables eléctricos C1 y C2). Voltaje a determinar.

T/R3 : 800A para los cables tensionados A1, A2, A3 y A4 (cables eléctricos C3 y C4). Voltaje a determinar.

T/R4 : 800A para los cables tensionados A1, A2, A3 y A4 (cables eléctricos C5 y C6). Voltaje a determinar.

Cálculo del Voltaje del T/R1:

$$V_{T/R1} = I_{T/R1} \times R_{c'1, c'2, c'3} + Y^*$$

donde: Y^* = caída de potencial en el cátodo=2V
(para agua de mar)

Como los cables eléctricos C'1, C'2 y C'3 se encuentran en paralelo:

$$R_{c'1, c'2, c'3} = (1/0.1001 + 1/0.0943 + 1/0.0923)^{-1} = 0.0319 \text{ ohm}$$

El voltaje requerido para T/R1 será:

$$V_{T/R1} = 300A \times 0.0319 \text{ ohm} + 2.0V = 11.6V$$

∴ Utilizar un Rectificador-Transformador T/R1 de 300A, 20V.

Cálculo del Voltaje del T/R2:

$$R_{c1, c2} = (1/0.1303 + 1/0.1273)^{-1} = 0.0644 \text{ ohm.}$$

Como se utilizan 4 cables tensionados (A1, A2, A3 y A4) la resistencia de los 4 cables serán:

$$= \frac{1}{4} R_{c1, c2} = \frac{1}{4} \times (0.0644) = 0.0161 \text{ ohm.}$$

$$V_{T/R2} = 800A \times 0.0161 \text{ ohm} + 2.0V = 14.9V$$

∴ Utilizar T/R2 de 800A, 20V

Cálculo de VT/R3

$$R_{c3, c4} = (1/0.1226 + 1/0.1164)^{-1} = 0.0598 \text{ ohm}$$

Como son 4 cables:

$$= \frac{1}{4} (0.0598) = 0.0150 \text{ ohm}$$

$$VT/R3 = 800A \times 0.0150 \text{ ohm} + 2.0V = 14.0$$

∴ Utilizar T/R3 de 800A, 20V

Cálculo de VT/R4

$$Rc5, c6 = (1/0.1094 + 1/0.1001)^{-1} = 0.0523 \text{ ohm}$$

Como son 4 cables:

$$= \frac{1}{4}(0.0523) = 0.0131 \text{ ohm}$$

$$VT/R4 = 800A \times 0.0131 \text{ ohm} + 2.0V = 12.5V$$

∴ Utilizar T/R4 de 800A, 20V

4. Resumen de las Condiciones de Trabajo de los Transformadores Rectificadores

Alimentador	Cable Tensionado	Cables Eléctricos	Corriente Nominal	Voltaje de Salida
T/R 1	B	c'1, c'2, c'3	300A	11.6V
T/R 2	A1, A2, A3 A4	c1, c2	800A	14.9V
T/R 3	A1, A2, A3 A4	c3, c4	800A	14.0V
T/R 4	A1, A2, A3 A4	c5, c6	800A	12.5V

NOTA: En el Anexo J se muestra el circuito básico de un rectificador monofásico de protección catódica.

e) Descripción Técnica de las Partes del Sistema

Anodos Son utilizados los LIDA (Linear Distributed Anodes).

Estos ánodos no son consumibles y dimensionalmente estables y pueden ser utilizados en cualquier medio ambiente. Su estructura tubular está formada de titanio como metal base y una mezcla de óxidos metálicos como revestimiento activado. Pertenecen a la clasificación de ánodos compuestos donde el titanio como metal base es responsable de toda la rigidez del sistema. Este metal es adecuado como base, ya que presenta una gran resistencia a la corrosión aún bajo las más agresivas condiciones que se producen cuando fluye una corriente eléctrica por el sistema. Sin embargo este metal sólo no podría ser utilizado como ánodo ya que al fluir una corriente se forma una película de óxido que tiene grandes propiedades aislantes. Para evitar la formación de esta película, se debe aplicar a la superficie del titanio una película electroconductiva que permita el paso de la corriente. Esta es la película formada por una mezcla de óxidos metálicos que tiene el ánodo LIDA.

Las características más importantes de este ánodo son:

1. La conexión entre el cable eléctrico y el ánodo es obtenida sin el rompimiento de la continuidad del cable eléctrico y con una resistencia al contacto de menos de 5 miliohm.
2. La conexión eléctrica se realiza en la mitad del ánodo, lo que garantiza una uniforme distribución de corriente

a lo largo del ánodo.

3. El sello cable eléctrico-ánodo es obtenido por medio de deformación plástica del tubo de titanio sobre el aislamiento del cable eléctrico, lo que lo hace totalmente a prueba de agua.
4. El consumo del ánodo LIDA es aproximadamente de 0.5×10^{-3} gr/A-año en agua de mar.
5. Dimensiones:
 - Longitud del ánodo : 1,000 mm.
 - Diámetro del ánodo : 25.4 mm.
 - Salida de corriente : 50A

Cables Eléctricos Son cables diseñados para resistir las más duras condiciones del medio ambiente y para garantizar el sellado cable eléctrico-ánodo sobre el aislamiento del cable.

Las principales características de este cable son:

1. Material del conductor: cobre trefilado y recocido.
2. Máximo diámetro por hilo : 0.41 mm.
3. Diámetro del conductor : 8.9 mm.
4. Peso del conductor : 0.412 kg/m.
5. Sección recta nominal : 50 mm
6. Resistencia del conductor (25°C) : 0.388×10^{-3} ohm/m
7. Temperatura de operación : 90°C (195°F).
8. Resistencia del aislamiento (25°C): 3.97 mohm/m.
9. Aislamiento : 1ra. capa : Etileno-Propileno (4.7mm)
2da. capa : Clorosulfonato PE (2.0mm)

Cables de Acero de Soporte

Las principales características de este cable son:

1. Acero galvanizado en caliente.
2. Diámetro nominal : 22-24 mm.
3. Resistencia a la tensión : 160-180 kg/mm
4. Peso : 2.0 kg/m
5. Carga de rotura : 35 Tons. max.
6. Carga de trabajo : 5 Tons. max.
7. Aislamiento protector : Polyuretano

Espaciadores La función de los espaciadores es la de sostener a los ánodos y mantenerlos unos centímetros alejados del cable de acero de soporte. Esto se realiza para evitar los efectos de escudamiento "shielding effects" del cable de acero sobre los ánodos, lo que originaría un incremento de la resistencia anódica y también para prevenir el contacto directo del cable de acero con el cloro liberado durante la protección catódica. Los espaciadores serán fabricados de PVDF (Polyvinylidene fluoride) el cual es completamente resistente al cloro.

Peso Muerto El peso muerto representa el punto fijo del cable tensionado en el fondo del mar. Basado en una carga aplicada de 5 toneladas, el peso muerto deberá tener aproximadamente 12 toneladas

3.3) Pinturas y Recubrimientos

3.3.1) Recubrimientos - Generalidades

Definición.- Un recubrimiento o revestimiento protector es cualquier material delgado, aplicado como líquido, sólido o polvo, que al solidificarse se adhiere firme y continuamente a la estructura que se desea proteger evitando el contacto con su medio ambiente. Estos recubrimientos son diversas composiciones a base de cuerpos metálicos, inorgánicos y orgánicos y son por lo general películas o capas finas aplicadas a un material base llamado sustrato. Se aplican por electrólisis, deposición de vapor o medios mecánicos tales como aplicaciones con brocha o pulverizado con pistola. Los recubrimientos pueden ser aplicados para mejorar la apariencia, aumentar la vida operativa de un equipo, prevenir la deposición, prevenir la contaminación de los productos o prevenir la corrosión.

Los revestimientos aplicados para protección contra la corrosión son más efectivos que las pinturas, las cuales son aplicadas principalmente para mejorar la apariencia. Sin embargo, los recubrimientos para el control de la corrosión pueden también mejorar la apariencia.

El concepto de colocar una barrera protectora entre los materiales y su medio ambiente es tan antiguo que su origen se ha perdido en la historia. Como puede esperarse de un concepto tan antiguo,

sus materiales, métodos y limitaciones son numerosas y diversas. Más aun, algunos revestimientos o barreras que originalmente fueron satisfactorios, son ahora obsoletos a la luz de nuevos descubrimientos acerca de las propiedades de los materiales.

Hay tres clases principales o composiciones de recubrimientos: Inertes o esencialmente inertes, inhibidores y sacrificantes. Varias combinaciones de estos tipos son encontrados en sistemas de recubrimientos diseñados para utilizar alguna o todas de las varias ventajas proporcionadas. Sin embargo debe tenerse presente que no hay un revestimiento perfecto en un sentido práctico, así que ninguno de los tipos de recubrimientos o cualquiera de sus combinaciones puede esperarse que brinden una protección perfecta. Así, los recubrimientos prácticos son un equilibrio entre la protección máxima que puede lograrse con un sistema y el dinero de que se esté dispuesto a pagar por él. Con respecto a lo económico, probablemente sería demasiado caro lograr un revestimiento perfecto si hubiera que lograrlo. Cuando la vida efectiva de un sistema de recubrimiento aumenta, su costo también aumenta. Para proteger contra la corrosión durante un tiempo que sea práctico, es necesario que el revestimiento posea flexibilidad, resistencia al impacto, resistencia química al medio ambiente al que es expuesto, que sea impermeable, que tenga buena adhesión, y cohesión y resistencia a la temperatura a la que es expuesto.

Los recubrimientos deberían ser seleccionados considerando las

razones económicas. Por ejemplo, será más económico aplicar un recubrimiento para una duración de cinco años si es que el equipo tiene una vida operativa de sólo cinco años, en vez de aplicar un recubrimiento que brinde una protección por 10 años. Es necesario hacer una evaluación económica de un material que requiere ser recubierto contra un material que no requiere recubrimiento sobre un determinado número de años de servicio. También debe considerarse la alternativa de no recubrir el material y permitir que éste falle por corrosión y reemplazarlo periódicamente. Es necesario la recolección de información antes y después de aplicar el recubrimiento, para juzgar la necesidad del recubrimiento, así como el rendimiento y operación del equipo revestido.

Importancia de los Recubrimientos

La importancia de los recubrimientos radica en el hecho de aplicar una barrera física sobre la superficie a proteger para de esta manera protegerla del ataque destructivo del medio ambiente. Este ataque puede ser producido por la humedad, agentes químicos, corrosión, abrasión, temperatura, etc.

Tanto los revestimientos metálicos, orgánicos como inorgánicos se aplican con fines protectivos y con una composición acorde con el medio a que va a ser expuesto. Existen también los recubrimientos puramente decorativos, donde lo que

importa es embellecer las superficies y aquellos funcionales donde se busca aparte de la protección, un fin de señalización.

Los revestimientos protectivos protegen las superficies por uno o más de los siguientes mecanismos:

1. Previenen el contacto entre el medio ambiente y el material base.
2. Restringen el contacto entre el medio ambiente y el material base.
3. Liberan sustancias, las cuales inhiben el ataque del medio ambiente sobre el material base.
4. Producen una corriente eléctrica, la cual es protectora del material base.

La efectividad de un sistema de recubrimiento está directamente relacionado al grado al cual efectivamente el recubrimiento se interpone entre el medio ambiente y el material base o reduce el ataque del medio ambiente. Este concepto se aplica igualmente bien para la protección catódica y la protección anódica, las cuales en un sentido absoluto son recubrimientos desde que ellas interponen barreras entre el medio ambiente y el material base.

3.3.2) Tipos de Recubrimientos

Los recubrimientos pueden ser clasificados de

acuerdo a su espesor de película seca, a su composición química o a su composición físico-química.

1. De Acuerdo a su Espesor de Película Seca

Los recubrimientos de película delgada, normalmente tienen un espesor seco máximo de 5 a 8 milésimas de pulgada (0.13 a 0.20 mm). Los recubrimientos de películas gruesas tienen espesores secos de 12 a 20 milésimos de pulgada (0.31 a 0.51 mm).

Los espesores máximos de la mayoría de recubrimientos de películas delgadas están limitados por la probabilidad que películas más gruesas del mismo material se rajaron debido a cambios de temperatura y a esfuerzos a los que los espesores máximos de un recubrimiento de película gruesa puede estar limitado por la misma razón, es frecuentemente gobernado por razones económicas.

2. De Acuerdo a su Composición Química

Los recubrimientos pueden ser orgánicos (esto es que átomos de carbono ~~sean~~ incorporados dentro de la estructura molecular del vehículo, que es el elemento aglutinante formado de películas); o inorgánicos. Los vehículos de la mayoría de revestimientos inorgánicos tienen estructuras moleculares basadas en siliconas, aunque el uso de otros elementos es también posible. Pigmentos para dar

la coloración deseada pueden ser mezclados con el vehículo, tanto en los recubrimientos orgánicos como en los inorgánicos.

- a) Recubrimientos Orgánicos Los recubrimientos orgánicos más frecuentemente usados por el control de corrosión de equipos relacionados con el manejo de petróleo y gas son el esmalte asfáltico, el esmalte de alquitrán de hulla (coaltar), resinas epóxicas y fenólicas, poliuretanos, poliéster, cauchos clorados y cloruros polivinílicos. En el caso de la protección externa de tuberías frecuentemente se utilizan cintas adhesivas hechas de polietileno o de otros materiales. Para servicios más especializados se emplean recubrimientos de fluorocarbono (ejem. el "Teflón" y sulfuros de fenilamina (ejem. el "Ryton") y muchos otros más.

La apropiada aplicación de cada tipo de recubrimiento es un arte logrado por medio de un estudio de las características del material y por el método de prueba y error. Los esmaltes asfálticos y de alquitrán de hulla ("coaltar") son usualmente usados para proteger superficies metálicas enterradas, tal como las tuberías y la parte externa del fondo de tanques. Debido a que el esmalte asfáltico es soluble en los hidrocarburos, éste no debe ser usado en suelos embebidos en petróleo.

Las resinas epóxicas, fenólicas, los poliuretanos, los poliéster y los cloruros polivinílicos son más empleados en el recubrimiento de partes internas de líneas, tanques, etc., pero también pueden ser usados en superficies externas, incluyendo las tuberías enterradas.

Los cloruros polivinílicos no son adecuados cuando hay presencia de hidrocarburos líquidos aunque ellos toleran el agua que contiene una espuma de petróleo siempre y cuando el petróleo no se junte en una fase continua. Las resinas fenólicas, epóxicas y los poliuretanos están usualmente limitados a cerca de 8 milésimas de pulgada (0.20 mm) de espesor seco debido a la fragilidad de películas más gruesas. Los límites de control de estos materiales requieren como mínimo 5 milésimas de pulgada (0.13mm).

Recubrimientos de refuerzo con fibra de vidrio, o fibras de asbesto son algunas veces usados para permitir espesores de recubrimientos más gruesos y dar resistencia adicional a la abrasión y al esfuerzo. Las resinas epóxicas y los poliéster son usualmente usados en sistemas de fibra de vidrio reforzado, aunque otros plásticos también pueden ser usados.

- b) **Recubrimientos Inorgánicos** Los recubrimientos inorgánicos incluyen los recubrimientos de sacrificio, los cuales brindan protección catódica a la superficie metálica en pequeñas zonas donde falla el recubrimiento y los recubrimientos no sacrificiales los cuales sólo protegen la superficie metálica bien recubierta.

Los recubrimientos de sacrificio incluyen el galvanizado o el recubrimiento con otros metales anódicos a la superficie metálica a proteger y también incluyen suspensiones pesadas de partículas de zinc en silicatos o vehículos orgánicos. Debido a la naturaleza no conductiva de los vehículos orgánicos, los recubrimientos de zinc-orgánicos son menos efectivos en proteger la superficie metálica en los lugares donde falla el recubrimiento que los recubrimientos de zinc-silicatos o los galvanizados. El valor del PH del medio ambiente es muy importante ya que medio ambientes altamente ácidos o altamente básicos rápidamente removerán los recubrimientos anódicos.

Los recubrimientos de zinc o imprimantes no deberían ser usados para servicio de inmersión sobre la temperatura ambiente a menos que pruebas bajo condiciones de servicio muestren que el uso del zinc será satisfactorio. El zinc invertirá su polaridad con el

acero a elevadas temperaturas en muchos electrólitos y se convertirá en corrosivo para el acero. Los revestimientos inorgánicos no sacrificiales incluyen los recubrimientos metálicos catódicos a la superficie a proteger, tales como el níquel y revestimientos no metálicos, tales como los cerámicos.

Para que cualquier revestimiento catódico sea completamente protector, debe ser lo suficientemente grueso para proporcionar una cobertura metálica no permeable. El níquel puede ser aplicado electrolíticamente o por un proceso netamente químico sin la aplicación de electricidad. Los revestimientos metálicos pueden también ser aplicados por medio de la metalización por rociado, el cual emplea una pistola que al mismo tiempo que funde el metal, lo proyecta en pequeñas gotitas de metal. Sin embargo es casi imposible lograr revestimientos impermeables por medio del metalizado, los metales catódicos empleados por este proceso tienen uso limitado para la protección contra la corrosión.

Los revestimientos cerámicos, cuando son adecuadamente aplicados, son efectivos contra la corrosión, pero debido al costo y fragilidad, su uso ha estado generalmente limitado a equipos relativamente pequeños. Dentro de

este tipo de recubrimientos se encuentran los esmaltes vitrios, revestimientos de vidrio y los esmaltes de porcelana, que son en esencia recubrimientos de vidrio. Además de su utilidad decorativa, éstos poseen eficaz protección contra la corrosión cuando son aplicados sobre superficies bien preparadas. Su principal inconveniente es su deterioro mecánico y agrietamiento por choque térmico.

- c) Otros Sistemas Otros sistemas, los cuales, aunque no son recubrimientos en el sentido estricto, realizan la misma función. Entre estos se pueden mencionar el cemento Portland y los materiales plásticos.

El cemento preparado con una mezcla de cemento Portland y arena, ha sido usado en forma efectiva para la protección de tuberías tanto en su parte interna como externa. Externamente otros tipos de recubrimientos o envolturas con cintas adhesivas son más económicos. Donde el peso es también necesario, un revestimiento de cemento es algunas veces preferible. El recubrimiento con cemento de algunos recipientes, tales como filtros, ha sido efectivo. En tanques, recubrimiento de cemento es a menudo aplicado sólo a los pisos.

Las ventajas del uso del cemento es su bajo costo y la

acero a elevadas temperaturas en muchos electrólitos y se convertirá en corrosivo para el acero. Los revestimientos inorgánicos no sacrificiales incluyen los recubrimientos metálicos catódicos a la superficie a proteger, tales como el níquel y revestimientos no metálicos, tales como los cerámicos.

Para que cualquier revestimiento catódico sea completamente protector, debe ser lo suficientemente grueso para proporcionar una cobertura metálica no permeable. El níquel puede ser aplicado electrolíticamente o por un proceso netamente químico sin la aplicación de electricidad. Los revestimientos metálicos pueden también ser aplicados por medio de la metalización por rociado, el cual emplea una pistola que al mismo tiempo que funde el metal, lo proyecta en pequeñas gotitas de metal. Sin embargo es casi imposible lograr revestimientos impermeables por medio del metalizado, los metales catódicos empleados por este proceso tienen uso limitado para la protección contra la corrosión.

Los revestimientos cerámicos, cuando son adecuadamente aplicados, son efectivos contra la corrosión, pero debido al costo y fragilidad, su uso ha estado generalmente limitado a equipos relativamente pequeños. Dentro de

facilidad de aplicación y reparación; y pueden ser usados para resistir agua bien fría, agua caliente, petróleo y productos químicos. Su desventaja es su poca resistencia a los choques mecánicos y térmicos.

Existen también los recubrimientos obtenidos por transformación química como por ejemplo a base de fosfatos, si bien estos recubrimientos no dan mucha protección por sí solos ante la corrosión, son útiles como base para las pinturas ya que proporcionan buena adherencia.

3.3.3) Pinturas - Generalidades

Definición Se define como pintura a una mezcla de productos naturales y sintéticos, uniformemente dispersada y que tiene un intervalo de viscosidad que varía desde el líquido delgado a la pasta semi-sólida. Las pinturas por su función caen dentro de la clasificación de recubrimientos orgánicos y son por lo general películas o capas delgadas aplicadas a un material base llamado substrato y que se aplica por inmersión, por medios mecánicos, tales como la aplicación con brocha, rodillo o pulverización con pistola con o sin aire y por medio de aerosoles. La consideración más importante en la selección de una pintura es el "contenido de sólidos por volumen". Dicho de otra forma, lo sólido de un galón de pintura es la cantidad de película que queda sobre la superficie

después que los otros materiales, los volátiles, se hayan evaporado durante el proceso de aplicación y secado. El valor protector de una pintura depende de su espesor de película seca. Los sistemas modernos de protección de corrosión por pinturas, requieren de espesores de película que varían de 3 milésimas de pulgada (0.076mm) hasta 10 milésimas de pulgada (0.254mm).

Composición de las Pinturas Las pinturas están formadas por una parte líquida (vehículo) y una parte sólida (pigmentos y extendedores). El vehículo (parte líquida), generalmente esta formado por:

a) Ligantes Pueden ser aceites, resinas naturales y sintéticas. Entre las resinas sintéticas más usada, cabe mencionar, por las cualidades y resistencia especial que confieren: las alquídicas, las epóxicas, las fenólicas, las a base de caucho clorado y los copolimeros vinílicos entre otros.

b) Plastificantes Son sustancias que tienen la propiedad de dar elasticidad y flexibilidad a la película.

c) Solventes y Diluyentes Son compuestos orgánicos volátiles, cuya finalidad es la de solubilizar a los ligantes y dar a la pintura las características óptimas para facilitar su aplicación. Entre los principales

tenemos: hidrocarburos alifáticos (aguarrás mineral) y aromáticos (Xilol, Foluol, etc), los alcoholes (propanol, butanol), las cetonas (metil, etil, cetona, acetona, etc).

d) Aditivos o Auxiliares Permiten dar a la pintura particulares características para optimizar su servicio. Entre los principales aditivos tenemos: Los secantes, los emulsionantes, los agentes que favorecen la humectación del soporte metálico, los antioxidantes, los estabilizadores de las resinas, los antiespesantes, etc. Los pigmentos y extendedores (parte sólida), están constituidos por determinadas sustancias que son finamente dispersadas en el vehículo. Los pigmentos, por sus propiedades, se subdividen en:

1) Activos Con la función principal de evitar y detener el proceso de la corrosión. Los pigmentos activos se diferencian según el tipo de mecanismo mediante el cual llevan a cabo su acción anticorrosiva.

1.1 Protección Catódica Dada por el zinc, plomo, etc. pulverizados. Estos metales se "sacrifican" ya que ocupan un lugar más bajo que el fierro en la escala de tensiones, en favor del fierro, brindando

una protección electroquímica al hierro mismo. El polvo de zinc se incorpora generalmente junto con óxido de zinc u óxido de hierro para mejorar las características de la pintura. Se ha encontrado que la proporción de polvo de zinc versus el óxido de hierro o zinc, debe ser 80 partes de polvo de zinc por 20 del óxido.

1.2 Acción Pasivante Dada por pigmentos a base de fosfatos metálicos, los cuales liberan iones (elementos o moléculas con carga eléctrica) que reaccionan con el metal, reduciéndole la tendencia a la corrosión. Se tiene por ejemplo, el fosfato de zinc y al fosfato de hierro, siendo el fosfato de zinc el más usado. Las pinturas con estos pigmentos se adhieren perfectamente a la superficie metálica ya que reaccionan con ella y el metal mismo viene a formar parte de la capa de pintura.

1.3 Acción Oxidante Ejercida por pigmentos que pueden oxidar los iones ferrosos (Fe^{++}) a férricos (Fe^{+++}), dando lugar a productos insolubles de hierro que forman una película protectora firmemente adherida a la superficie del metal. Entre estos pigmentos tenemos diferentes

variedades de cromatos y minios. El minio llamado azarcón, es óxido de plomo pulverizado de color rojo anaranjado cuya fórmula es Pb_3O_4 . El minio inhibe la corrosión del acero debido a su naturaleza alcalina, la cual neutraliza a los agentes corrosivos de carácter ácido. El minio viene en diferentes grados de pureza, según el porcentaje de pureza de Pb_3O_4 presente. El grado comercial del 98% contiene del 98 al 99% de Pb_3O_4 , siendo este grado el más puro y el más bajo es el de 85% con un contenido de Pb_3O_4 del 85%, siendo el porcentaje restante óxido de plomo (PbO). El PbO disminuye el tiempo de secado de la pintura. En cuanto a los cromatos, la combinación más efectiva está dada por un 60% de $PbCrO_4$, con un 40% de PbO. Por otro lado adicionado en cantidad suficiente, es también muy efectivo en superficies que no tienen contacto con medios fuertemente ácidos.

- 2) Pasivos Se caracterizan por su elevada resistencia química a los agentes atmosféricos y tienen como función la de dar poder cubridor y color a las pinturas. Son pigmentos inertes muchos óxidos metálicos, tales como el dióxido de

titanio, el óxido de fierro, óxido de cromo, etc; algunas sales inorgánicas, la mayor parte de los pigmentos orgánicos, negros de humo y grafitos.

Extendedores Tienen la función de dar a las pinturas determinadas características físicas y mecánicas, tales como, resistencia a la interperie, resistencia a la humedad, mejoran la viscosidad y evitan el asentamiento de la pintura dentro de su envase, etc. Los extendedores son silicatos complejos (mica, talco, caolín, asbesto, etc), óxidos metálicos (de cuarzo y de aluminio), carbonatos, naturales y precipitados.

Importancia y Funciones de una Pintura El uso de las pinturas, es el método más extensamente empleado como medio de protección contra la corrosión. Es además el más práctico de aplicar y el más económico para proteger y/o decorar superficies. El valor protector de una pintura depende de su espesor de película seca, por esto la consideración más importante en la selección de una pintura es el "contenido de sólidos por volumen". Por esto, para comparar los costos y rendimientos de un mismo sistema de pinturas de dos diferentes fabricantes, se deberá tener como base el mismo contenido de sólidos por volumen.

La importancia de las pinturas es la misma de los recubrimientos en general, ésta radica en el hecho de aplicar una barrera física sobre la superficie a proteger para de esta manera resguardarlo del ataque destructivo del medio ambiente. Este ataque puede ser producido por la humedad, agentes químicos, corrosión, abrasión, temperatura, etc. Las pinturas protectivas protegen las superficies por uno o más de los siguientes mecanismos:

1. Restringen el contacto entre el material base y su medio ambiente.
2. Liberan sustancias, las cuales inhiben el ataque del medio ambiente sobre el material base.
3. Producen una corriente eléctrica, la cual brinda protección al material base.

La efectividad de un sistema de pinturas está directamente relacionado al grado al cual efectivamente la pintura se interpone entre el medio ambiente y el material base o reduce el ataque del medio ambiente. Un sistema es un conjunto de dos o más capas de pintura aplicadas sobre una determinada superficie para protegerla. Las características de un sistema eficiente se pueden resumir en:

- a) Excelente adhesión a las superficies a proteger.
- b) Excelente poder anticorrosivo.
- c) Limitada porosidad y reducida permeabilidad con respecto a gases y líquidos.

- d) Resistencia en el transcurso del tiempo a los agentes atmosféricos y químicos.

Funciones de una Pintura

- a) Decorar Esta función de la pintura fué la principal en la antigüedad, su meta era dar acabados más atractivos y embellecer las superficies.
- b) Proteger Es la función principal de una pintura en la actualidad, pues el propósito de recubrir superficies es darle protección contra el medio ambiente, contra agentes oxidantes, químicos, abrasión y otros.
- c) Funcional Facilitar la señalización de zonas rígidas, diferenciar productos envasados o tuberías de transporte y delinear los códigos de seguridad a través de colores.

Preparación de las Superficies Metálicas

Independientemente de la calidad de la pintura a usarse en la protección de las diferentes superficies, la vida efectiva de cualquier pintura o sistema a emplearse, puede ser acortada sensiblemente por una deficiente o inefectiva preparación de la superficie. Para obtener el máximo de una pintura o sistema de pintura, la superficie deberá ser preparada adecuadamente con el fin de preveer una perfecta adhesión de la capa con el sustrato.

Este resultado sólo se consigue cuando los elementos de contaminación, tales como: el "Mill scale," o escama de laminación, escamas de oxidación, óxido, sustancias químicas, grasa aceite, polvo, suciedad, escoria de soldadura y pintura antigua en mal estado, que afectan sensiblemente la adhesión de cualquier pintura, son eliminados. El procedimiento a usarse para este efecto, depende en todo caso del tipo y concentración de las sustancias contaminantes y de los requerimientos específicos del sistema escogido.

Algunos tipos de recubrimiento, sólo tienen buena adhesión, cuando la superficie a pintarse es arenada. Para una óptima adhesión, es necesario un patrón de anclaje de 1 a 2 mils. de profundidad (Patrón de anclaje es la profundidad de picadura en el metal obtenida al arenarse el mismo).

El patrón de anclaje es controlado principalmente con la selección del grano de abrasivo a usarse y la presión de expulsión usada. Muchos de los sistemas de pintura, con satisfactorios resultados, requieren de un menor patrón de anclaje, pero existen sistemas de pintura, como el zinc inorgánico que tienen una pobre adhesión sobre superficies con un patrón de anclaje menor de 1 mils de profundidad.

Es necesario hacer hincapié en el mayor cuidado que se debe poner en la limpieza de zonas de difícil acceso (juntas, ángulos y rivetes) y remover previamente la escoria de soldadura y sales

solubles depositadas con el flux de la soldadura. Entre los métodos de limpieza más conocidos se encuentran:

- 1) Arenado al Metal Blanco: (especificaciones SSPC-SP5-63). Este método incluye la eliminación por medio de arena de todo vestigio de óxido, escamas de óxido de fábrica, pintura antigua, etc., dejando la superficie con una apariencia blanca grisacea. Podemos considerar a este sistema de limpieza, como óptimo y con el que mejores resultados se van a conseguir con la aplicación de cualquier sistema de pintura.

Esta operación consiste en el sopleteado a presión, de material abrasivo, generalmente arena o minerales, sobre la superficie por limpiarse. Para este efecto, son necesarios los siguientes elementos: Aire comprimido a aproximadamente 100 lbs. por pulgada cuadrada, máquina de arenado con manguera y boquilla de expulsión. Cada boquilla debe ser alimentada con aproximadamente 200 pies cúbicos de aire por minuto y arena cernida entre mallas 40 y 80.

Después del arenado, hay que limpiar el polvillo depositado, preferentemente con escobillas y aire comprimido extento de humedad, inmediatamente después se procede con el pintado.

- 2) Arenado Comercial: (SSPC-SP6-63). Esta operación es similar

a la descrita en el párrafo anterior. Este tipo de limpieza contempla la eliminación de impurezas, óxido, escamas de óxido, escamas de óxido de fábrica y pintura antigua presente en la superficie. El aspecto final del fierro es algo vetado entre gris claro y color negruzco; esto se debe a que el arenado comercial no elimina completamente la capa de óxido.

- 3) Limpieza al Fuego: (SSPC-SP4-63). Para esta operación, se utiliza un soplete de llama, generalmente de acetileno que elimina el óxido, escamas de óxido o de fábrica, aceites, grasas, pintura anterior y otras impurezas. Debido a la propiedad del metal de mantener el calor, si se aplica la pintura cuando la temperatura oscila entre los 100°F y 150°F, el efecto puede ser similar al del horneado de la pintura, aumentando sus propiedades de adhesión y duración. Esta cualidad sólo se puede aprovechar cuando se utiliza determinado tipo de pintura.

La limpieza al fuego tiene el grave inconveniente que atenta contra la seguridad. En general, todas las pinturas son altamente combustibles y algunas de ellas tienen solventes de muy bajo punto de inflamación.

- 4) Limpieza con Equipo Mecánico: (SSPC-SP3-63). Esta operación requiere de equipo accionado por alguna fuente de

energía, como electricidad, vapor, aire comprimido o combustible. Entre los más usados, se encuentran la lijadora eléctrica, cepillos de acero, martillo neumático, etc. La limpieza que se puede lograr con este equipo, se limita a eliminar la oxidación debidamente adherida y pintura anterior floja.

- 5) Limpieza con Instrumentos Manuales: (SSPC-SP2-63). Se considera éste, como el más deficiente y tedioso método de limpieza, cuyo resultado es bastante inestable y no puede eliminar más que las escamas de óxido y pintura floja. Las herramientas que se utilizan para este efecto son: la lija, escobilla de acero, martillo, picota, etc. y no se pueden esperar óptimos resultados con los sistemas de pintura a usarse.

- 6) Limpieza con Acido: (SSPC-SP8-63). Se entiende por esta operación, el tratamiento de la superficie de fierro con una solución de ácido, generalmente sulfúrico, clorhídrico o fosfórico seguido de un minucioso enjuague con el objeto de eliminar el óxido, escamas de óxido y de fábrica.

A la limpieza por ácido, se le llama también decapado (pickling) y es usado con mucho éxito en Industrias Manufactureras, mediante inmersión de objetos pequeños o medios. No dan tan buen resultado en el caso de superficies

grandes, como el de una embarcación, debido a las dificultades de un eficiente enjuague, que pueden dar origen a posterior falla de la pintura.

Solo el ácido fosfórico o ciertas combinaciones del mismo, ofrece ventajosas propiedades, debido a que no sólo es un desoxidante, sino también un acondicionador de metal, ya que reacciona con este, aumentando la adhesión de la pintura. Este último tratamiento se combina en muchos casos con la limpieza mecánica o manual de superestructuras, teniendo en cuenta que la superficie antes de recibir solución fosfatizante, debe contener muy pequeña cantidad de óxido para que el tratamiento sea efectivo.

- 7) Limpieza con Solventes: (SSPC-SP1-63). Este tratamiento se debe realizar antes de aplicar los otros métodos de limpieza (Inclusive el arenado). Para este efecto, se usa solvente de alto punto de inflamación, como el Aguarrás Mineral, que acompañado de trapos y escobillas, disuelven las grasas y aceites adheridos a la superficie por pintar. Es muy importante tener presente que, aunque la superficie aparentemente esté ya limpia, es necesario un último tratamiento con trapo o brocha limpia.

Sistema de Pinturas más Empleadas: Un sistema es un conjunto de dos o más capas de pintura aplicadas sobre una

determinada superficie para protegerla. Generalmente un sistema consta de las siguientes capas:

- 1) Capa primaria, imprimante o fondo anticorrosivo.
- 2) Capa intermedia o ligante.
- 3) Capa final o de acabado.

Estas capas del SISTEMA son generalmente aplicadas en la siguiente forma:

- 1) Una o dos capas de fondo, con específica función anticorrosiva y de sólido anclaje entre la superficie metálica a cubrir y las capas siguientes de pintura.
- 2) Una o más capas intermedias con la función principal de completar el espesor necesario para aislar las capas de acabado del metal y en caso que sea necesario por su composición, la capa intermedia puede brindar protección anticorrosiva.
- 3) Una o más capas de acabado, con la función específica de proteger la superficie recubierta con las capas de fondo y la capa intermedia, contra los agentes exteriores, según el uso de dicha superficie.

Por ejemplo, en el caso de buques, yates o embarcaciones marinas en general, el acabado de la obra viva deberá brindar protección contra las cientos de especies, ya sea animales o vegetales presentes en las

aguas de mar. Un tercio de las especies son plantas y los dos tercios restantes, animales. El agua de mar contiene innumerables bacterias y diatomeas, las cuales aseguran una capa de apariencia gelatinosa conocida comunmente como "babaza." Estas especies tienden a adherirse e incrustarse sobre la superficie de la embarcación, formando gruesas capas, las cuales presentan numerosos inconvenientes: Aceleran el proceso de la corrosión, aumentan el peso y la resistencia de la embarcación, reduciendo por ende su velocidad y aumentando el consumo de combustible y los costos generales de operación.

Las pinturas "Anti-incrustantes" contienen en su composición, cobre en polvo, el cual deberá ser disuelto lentamente por el agua de mar, formando sales de cobre solubles, las cuales ya sea envenenan a las especies marinas o previenen su adhesión a la superficie de la embarcación.

El cobre deberá disolverse de la capa de pintura a una velocidad determinada, la cual es de 10 mgr/cm^2 (miligramo/cm²) de cobre metálico por día. La "incrustación" podría ocurrir si el cobre se desprende a una velocidad menor mientras que si es desprendido a una velocidad mayor, la pintura perdería su contenido de

cobre, o sea su efectividad demasiado rápido.

El cobre empleado en pinturas anti-incrustantes, está casi siempre bajo la forma de óxido cuproso Cu_2O porque se disuelve en el agua de mar a la velocidad deseada.

El empleo de pinturas anti-incrustantes ha cobrado una gran importancia en la industria naval moderna por los ahorros sustanciales que origina. El empleo de estas pinturas condiciona la elección y espesor de las capas anteriores. El cobre, contenido en las pinturas anti-incrustantes, tiene una tensión más alta que el hierro en la escala de tensiones (Ver TABLA III) y si se permite el contacto entre ambos metales se formaría un elemento galvánico en el cual el hierro sería corroído. Es por lo tanto, necesario aislar estos metales para impedir la corrosión galvánica que se produciría, por lo que es necesario conseguir con las capas anteriores, un espesor de 6-7 mils de película seca, siendo esta la función importantísima de la capa intermedia en este caso específico.

Clases, Características y Usos de los SISTEMAS mas empleados:

- SISTEMAS Alquídicos y sus modificaciones.
- SISTEMAS Epóxicos y sus modificaciones.
- SISTEMAS Vinílicos y sus modificaciones.

SISTEMAS ALQUIDICOS

- 1) Características Los SISTEMAS Alquídicos están conformados por pinturas a base de resinas alquídicas puras y modificadas. Las resinas alquídicas son resinas sintéticas obtenidas por reacción entre ácidos grasos secantes no saturados, anhídrido ftálico y alcoholes. Estas resinas se caracterizan en base al porcentaje de ácidos grasos presentes, y debido a ésto se distinguen resinas alquídicas largas, medianas y cortas en aceite. Para la protección del acero se recomiendan las resinas largas y medianas. La calidad de un SISTEMA depende de la calidad de la resina usada en la formulación de las pinturas y del contenido de anhídrido ftálico de las mismas. Se considera que una buena formulación es aquella que contiene un porcentaje de resina del orden del 60 al 70% en la pintura, con un contenido de anhídrido ftálico no menor del 23 al 30%.

Los SISTEMAS Alquídicos ofrecen:

- 1) Buena durabilidad y protección.
- 2) Rápido secamiento.
- 3) Buena retención del brillo.
- 4) Buena elasticidad.

5) Excelente acabado.

6) Resistencia a la inmersión alternada y humedad.

Existe una gran variedad de resinas alquídicas modificadas, dichas modificaciones tienen la finalidad de acentuar determinadas características útiles para un fin específico. Entre ellas tenemos:

-Resinas alquídico-siliciónicas: Dan lugar a películas especialmente resistentes a los agentes exteriores, también en ambiente húmedo, con excelente retención y conservación del color.

-Resinas alquídico fenólicas: Particularmente resistentes a la acción combinada del agua de mar y la brisa marina.

-Resinas alquídico-vinílicas: De secamiento rapidísimo y muy buena resistencia al ambiente marino, dependiendo de la relación cuantitativa entre las dos resinas.

-Resinas alquídico-estirenadas y vinil-toluenadas: Cuyas características son: velocidad de secamiento, excelente brillo, buena inercia química y al agua (Para inmersión alternada).

-Resina alquídico-uretánicas: Dan lugar a pinturas

más duras y flexibles que aquellas obtenidas con resinas alquídicas puras de igual longitud y tipo de aceite.

- 2) Usos Los sistemas alquídicos son usados extensivamente en la protección de plantas industriales, sujetas a la acción de los agentes atmosféricos, de atmósferas industriales normales; de estructuras expuestas a no muy frecuentes lluvias y de estructuras en atmósfera marina.

Las resinas alquídicas generalmente se emplean para las formulaciones de las pinturas de camouflage. El camouflage es usado para mimetizar o "esconder" material y evitar así una no deseada observación; es empleado también para confundir y engañar al observador, acerca de la identidad, tamaño, número, etc. del material. El camouflage, con determinados dibujos y colores es aplicado sobre la superficie de barcos para disminuir su probabilidad de ser detectados, ya sea visual o fotográficamente. Los dibujos y los colores son escogidos en base a principios ópticos que determinan que algunos colores no reflejen la luz y que pasen desapercibidos en el medio que rodea al material.

SISTEMAS EPOXICOS

- 1) Características Existen resinas epóxicas de bajo peso molecular, cuyo estado físico es el líquido y resinas epóxicas de elevado peso molecular en estado sólido y de alto punto de fusión.

Las resinas epóxicas en sí, son de poco interés, porque no son de secamiento al aire, pero, mediante reacciones con determinados productos orgánicos (agentes endurecedores o catalizadores), su estructura se ramifica tridimensionalmente formando una película seca a temperatura ambiente o a temperaturas más elevadas, transformándose en resinas termoendurecibles, infusibles, insolubles, con excelentes propiedades mecánicas y resistentes a la mayor parte de los agentes químicos. Es por esto que la elección del agente endurecedor que entrará a formar parte de la macro-molécula, tiene un papel determinante, con respecto a las propiedades finales del sistema. Las resinas epóxicas sólidas son disueltas en solventes adecuados y el agente endurecedor es agregado momentos antes de la aplicación (tiempo de inducción).

Las resinas epóxicas líquidas con 100% de sólidos,

generalmente no necesitan de solventes que faciliten su aplicación y el espesor final de la película seca, es el mismo que el de la película aplicada

Las resinas epóxicas de elevado espesor molecular, pueden reaccionar con aceites secantes. Se obtienen resinas (Esteres-Epóxicos) que endurecen al aire por oxidación sin necesidad de agentes endurecedores. Hay diferentes tipos de endurecedores y con ellos se pueden obtener características finales diversas.

Algunos tipos de endurecedores (Poliamídicos) dan por ejemplo películas muy elásticas y con excelente adhesión a los mas diversos soportes: otros (Amínicos y Aductos) dan películas muy duras. Otras todavía (los isocianatos), dan lugar a acabados caracterizados por su elevada dureza y valor estético. Algunos se caracterizan por su rapidez de endurecimiento; otros ofrecen en cambio un "Tiempo Abierto" para trabajarlos durante un tiempo muy largo.

También las características de resistencia química pueden estar influenciadas por los diferentes tipos de endurecedores. Algunos dan películas extremadamente resistentes a los solventes; otros en cambio, películas resistentes al agua, los ácidos o los

álcalis. A menudo se realiza un ciclo "Universal" de protección, en el cual, a las primeras capas se les da la necesaria flexibilidad y máxima capacidad de adhesión, usando endurecedores poliamídicos, mientras que a las capas finales, se les da la máxima dureza y resistencia química, con endurecedores del tipo aductos epoxiamínicos.

SISTEMAS EPOXICOS MODIFICADOS

Características: A veces, para conseguir propiedades particulares, las resinas epóxicas se combinan con otras resinas o se las hace reaccionar con productos o resinas que entran como constituyentes fundamentales de otros sistemas. Los sistemas mixtos más conocidos son los siguientes:

- 1) Sistema Epoxi-Coal-Tar Teniendo estos dos productos, se pueden obtener pinturas con características anticorrosivas y de resistencia química excelentes. Entre las resinas, el Coal-Tar y el Endurecedor, se producen durante el endurecimiento, reacciones químicas complejas que llevan a la formación de un revestimiento en el cual el Coal-Tar queda parcialmente unido a la resina.
- 2) Sistema Epoxi-Fenólico Los sistemas a base de resinas

epoxi-fenólicas presentan generalmente una excelente resistencia al agua.

- 3) Otras Pinturas La excelente adhesión de las resinas epóxicas, es usado muy a menudo para las capas de Imprimación. Un ejemplo típico de Imprimación Universal es el constituido por pinturas epóxicas "Ricas en Zinc", sobre una superficie metálica así imprimida, pueden aplicarse diferentes tipos de pintura, aún después de muchos meses de haber sido aplicado el imprimante. En caso de que el imprimante no sea a base de Zinc, es indispensable fijar ligeramente para mejorar la adhesión de la nueva pintura.

Usos Los campos de aplicación de los sistemas epóxicos de secamiento al aire, son innumerables; sólo mencionaremos algunos: Industria química, Industria Petroquímica, Industria para la Energía Nuclear, Industria Alimenticia, Construcción, Industria Naval y de Transportes.

En cuanto a la última aplicación mencionada, los sistemas epóxicos, especialmente los sistemas epoxi-coal-tar, son aplicados con mucho éxito sobre las partes sumergidas en el agua. La protección interna de tanques para el transporte de hidrocarburos y agua, ha sido confiada con éxito

a sistemas epóxicos, ya sea con solventes o sin ellos.

SISTEMAS VINILICOS

Características Las resinas vinílicas son copolímeros a base de cloruro y acetato de vinilo disueltas en solventes adecuados. La resistencia química y la solubilidad dependen del porcentaje del cloruro de vinilo presente en el copolímero, con respecto al acetato de vinilo y del peso molecular. Las resinas, por lo general, contienen del 86-97% de cloruro y del 3-14% de acetato de vinilo.

Los recubrimientos vinílicos se secan por simple evaporación del solvente, aunque pueden ser secados en hornos. La película seca es muy flexible, no alimenta la combustión, es inoxidable, eléctricamente neutra, inodora, no tóxica y no favorece al moho.

Sistemas Vinílicos Modificados Las modificaciones más usadas, son pinturas vinil-alquídicas. Tienen mayor duración y resistencia química que las pinturas alquídicas, y son de un costo menor que las vinílicas.

Usos Los campos de aplicación de los sistemas vinílicos son muchos y muy variados. Cabe resaltar que gracias a su resistencia a la corrosión, los agentes químicos, a la acción destructiva de las especies marinas, el agua de

mar y las más rigurosas variaciones climáticas, son muy apropiadas en la protección de superficies de contacto, ya sea con el agua salada o dulce, tales como embarcaciones, puentes, represas, plataformas petroleras, etc.

Métodos de Aplicación de las Pinturas

Existen varios métodos para aplicar pinturas y frecuentemente se tienen ideas erróneas respecto a las ventajas y desventajas de cada uno. Esto puede causar la selección de un tipo de aplicación que en realidad es completamente inadecuado para el trabajo a efectuarse.

Aplicación con Brocha Se estima que el 60% de toda la pintura es aplicada con brocha especialmente en lugares como edificios grandes, viviendas, oficinas públicas, residencias particulares, etc. El empleo de brochas de buena calidad es indispensable si se desea lograr resultados satisfactorios. La diferencia de calidad entre una brocha regular, mala o buena, depende de la cerda.

El valor de las cerdas de buena calidad reside en que su extremo se subdivide en dos o más ramificaciones. Esto se conoce con el nombre de "Cola de la Cerda" o también como "Ramitas de la Cerda" y tienen varias ventajas sobre las cerdas de forma cilíndrica que no lo poseen.

-Aumenta en dos o más veces el número de puntos de contacto con la superficie, dejando la brocha sólo huellas muy finas.

-Tienen gran poder para mantener el exceso de pintura en la brocha por la atracción capilar de sus cerdas y cuando se pinta, retienen el sobrante de pintura, evitando que se chorree.

Antiguamente, las brochas se hacían con los pelos de la cola y patas de los animales. En la actualidad, se emplean cerdas sintéticas. Las brochas con cerdas de "nylon" son de excelente calidad.

El pintar con brocha presenta las siguientes ventajas:

- 1) El equipo necesario es poco y simple.
- 2) El trabajo es limpio y limita los vapores tóxicos de las pinturas hasta un mínimo, especialmente con pinturas que contienen pigmentos tóxicos.
- 3) Se puede pintar superficies que quedan lado a lado en diferentes tonos sin necesidad de protegerlas con papel.
- 4) Se consigue una adhesión superior en superficies que no se encuentran en condiciones impecables de limpieza y ayuda a mejorar la penetración de la pintura en superficies porosas.

Las desventajas son:

- 1) La aplicación, por medio de la brocha, no es tan rápida como la que consigue con otros tipos de aplicación.

- 2) La aplicación de algunas pinturas con brocha necesita los servicios de un pintor profesional especializado.

Aplicación con Rodillos

Este método de aplicación, tiene varias ventajas sobre el de brocha, cuando las superficies por pintarse son grandes y uniformes y se está empleando con más frecuencia en casas, edificios, tanques de almacenamiento, cascos de buques, etc.

- Ventajas:
- 1) Poco equipo
 - 2) Economía en material
 - 3) Rapidez de aplicación
 - 4) Facilidad de obtención de una película uniforme
 - 5) Es posible pintar superficies altas, sin el auxilio de escaleras o andamios.

- Desventajas:
- 1) Su uso queda limitado a la forma de la superficie, siendo ideal para superficies planas y uniformes.
 - 2) Posee falta de buena penetración en superficies muy porosas o en superficies metálicas mal preparadas y ásperas.

Aplicación con Pistola

Este método de aplicación, ya sea manual o electro-estático, es el

más empleado en el ramo industrial. Su uso también, en otros campos, va aumentando constantemente.

Ventajas: 1) Rapidez de aplicación
 2) Facilidad de obtención de una película uniforme y lisa.

Desventajas: 1) Costo del equipo necesario.
 2) Pérdida de material que se dispersa fuera de la superficie.
 3) Inadaptabilidad para ser usado en ambientes cerrados, sin circulación de aire.
 4) La necesidad de proteger del rociado las áreas vecinas que no deben ser pintadas.

a) Pintado Aerográfico o a Pistola con Aire

Los sistemas de aplicación aerográfico o a pistola, consisten en atomizar la pintura en una niebla fina y aplicarla sobre la superficie a recubrir.

Existen dos métodos para atomizar la pintura empleando aire comprimido, uno es el de la succión de la pintura de un tanque o recipiente, por lo general de capacidad limitada a 400cc; la pintura succionada es introducida a la pistola por la depresión que origina la corriente de aire que pasa por el orificio del tubo de descarga.

Con el otro método la pintura se sitúa en un tanque de presión y se aplica una presión determinada sobre él, la que fuerza a la pintura a pasar a través del orificio que la hace llegar a la pistola pulverizadora. Dentro de este tipo de pistolas existen las que mezclan el aire y la pintura en el interior de la pistola y se les denomina de mezcla interna. Y las que hacen la mezcla en el exterior al circular aire comprimido por unos orificios convenientemente situados en la salida de la pistola.

Por lo general la cabeza de la pistola, así como, las válvulas y el recipiente son recambiables, pudiendo así usarse para diferentes tipos de pinturas. La presión de aire en una pistola oscila entre $2-5\text{kg/cm}^2$ y entre $0.7-2.5\text{kg/cm}^2$ en el tanque de presión.

b) Pintado Electrostático

El principio de este método se basa en la creación de una diferencia de potencial mediante una conexión eléctrica entre la pistola y el objeto a pintarse. Se puede recubrir cualquier tipo de objetos metálicos y gran número de artículos no metálicos con casi la totalidad de los productos conocidos. El pintado se produce por la atracción electrostática entre las partículas de pintura y la superficie. El sistema electrostático consigue un considerable ahorro de pintura, pues mediante

esta pulverización casi el 99% del producto pulverizado se deposita sobre el objeto a pintar.

c) Pintado con Pistola sin Aire ("Airless")

Habíamos visto que en el pintado aerográfico con aire comprimido, parte del material de recubrimiento es esparcido en la atmósfera por el aire de la pistola, con una regular pérdida de material. El pintado "airless" presenta como característica que no necesita de aire comprimido para la atomización y que ésta depende de la elevada presión que soporta la pintura o de su combinación con el calor, desarrollándose en el equipo. El aumento de la temperatura ayuda a disminuir la viscosidad y aumenta la presión de vapor del disolvente. Se usan presiones de 1,500 a 2,500 psi. (106 a 176 kg/cm²).

Aplicación mediante Aerosoles

Se refieren a los recubrimientos en envases presurizados. Para este caso, la presión se obtiene por un hidrocarburo fluorado tal como, el tricloro-fluor-metano. Cuando la mezcla del gas impulsor y de la pintura sale del recipiente, la rápida evaporación del gas impulsor produce la atomización de la pintura.

La única ventaja es su comodidad y su principal desventaja es el elevado costo.

Aplicación por Inmersión

Es el método más simple para conseguir el recubrimiento, mediante pinturas, es usado para imprimaciones donde el espesor de película y el aspecto de la misma no son importantes. Una desventaja de este sistema es su alto costo de instalación cuando se trata de recubrir piezas grandes, asimismo la gran cantidad de pintura que se requiere para el llenado de los pozos y por último los pozos constituyen un serio riesgo de incendio. Por esta última razón se han desarrollado en los últimos años recubrimientos a base de pinturas en emulsión y solubles en agua, para este tipo de aplicaciones.

Estos dos últimos métodos así como otros: Pintura en polvo, chorreo, cortina, barriles oscilantes, máquinas a rodillos y otros, no son tratados con amplitud en el presente trabajo por no ser de mucha aplicación para recubrimientos en mantenimiento industrial. Los más empleados son los de pistolas convencionales y pistolas "airless" y electrostáticos.

3.3.4) Tipos de Pinturas

a) Pinturas Domésticas

Son aquellas formuladas principalmente para decoración de superficies y por lo general son

dispersiones resinosas en agua (como el caso de las emulsiones a base de resinas acrílicas, acetato de polivinil y estireno butadieno).

Otros grupo importante lo forman los esmaltes generalmente a base de resinas alquídicas, estos son recubrimientos de alto brillo. Dentro de esta línea doméstica también podemos mencionar los barnices que son pinturas de alto brillo, aunque las hay de acabado satinado fabricados con resinas naturales y alquídicas, que no llevan pigmentos, por lo que son transparentes, aunque en algunos casos se les puede adicionar cierta pigmentación sin dejar de ser transparentes y darles diferentes tonalidades.

b) Pinturas de Mantenimiento Industrial

Formuladas para dar protección a superficies expuestas a ambientes agresivos, con el fin de evitar su corrosión. Este punto va a ser tratado ampliamente en el título "Sistemas de Mantenimiento Industrial".

c) Pinturas para Acabados Industriales

Consideramos en este grupo a aquellos

recubrimientos usados en Industrias de la Línea Blanca. Tenemos los esmaltes horneables alquídicos y los acrílicos. También se incluyen aquí cierto tipo de esmaltes y barnices aislantes usados en recubrimiento de conductores eléctricos. Además de los acabados para madera.

d) Pinturas para Acabados Automotrices

Dentro de este grupo tenemos los recubrimientos para pintado automotriz que son esmaltes horneables a base de resina alkyd-melamina y los recubrimientos para repintado automotriz que lo constituyen las lacas de secado al aire a base de nitrocelulosa y de resinas acrílicas.

e) Pinturas Marinas

Recubrimientos para proteger contra ambientes salinos y extremadamente corrosivos. Se complementa con pinturas anticrustantes formuladas a base de polvo de óxido cuproso para evitar las incrustaciones del plankton marino, además de los esmaltes marinos y anricorrosivos.

3.3.5) Sistemas de Pinturas para la Protección de Estructuras Sumergidas en Agua de Mar

El sistema de pinturas empleado para complementar la protección catódica de estructuras petroleras sumergidas en agua de mar, es netamente una combinación de dos sistemas epóxicos. Una de las zonas más críticas de una estructura sumergida en el mar es la zona de salpicaduras o "splash zone". Aquí la acción de lavado del agua salada y muy bien aireada remueve los productos de la corrosión antes de que pudiera formarse un recubrimiento protector, resultando en picaduras profundas. A esta acción de la corrosión se suma la acción abrasiva del oleaje, por lo que esta zona requiere de una protección adicional a la protección catódica. (Ver Figura N° 8).

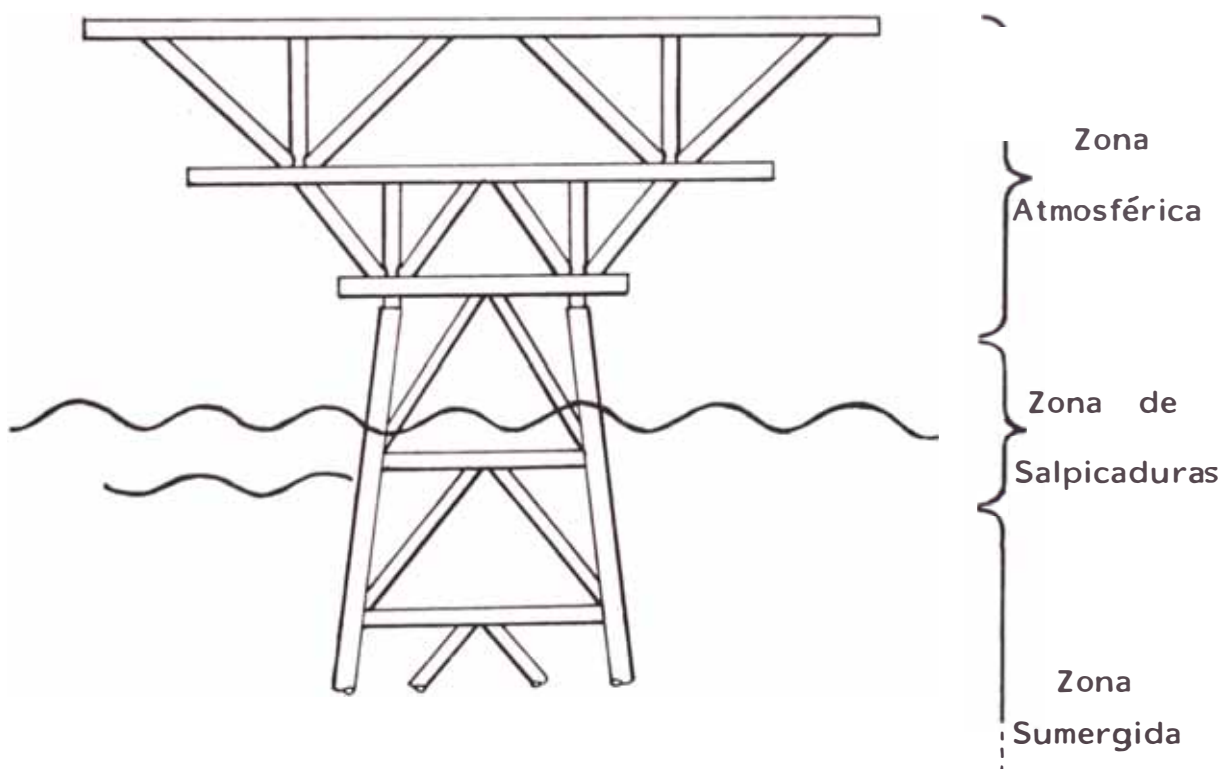


FIGURA 8

Conjuntamente con la zona de salpicaduras, la zona atmosférica sobre todo la cercana al mar, es también una zona crítica. Aquí, donde el metal usualmente parece estar seco, se forma una delgada capa de sal en la superficie. Cuando la estructura se enfría en las noches y la humedad se incrementa, la sal absorbe agua del aire formando una película salina de humedad sobre la superficie. El sol seca esta película de humedad y reduce la velocidad de corrosión. Los productos de la corrosión tienden a formar escamas y desprenderse de la superficie metálica. Este desescamado irregular del óxido incrementa la formación de picaduras. En general, las picaduras son más profundas en el lado oculto del metal que sobre el lado expuesto al sol.

Las dos zonas críticas mencionadas anteriormente, la zona de salpicaduras y la zona atmosférica cercana al mar, se encuentran comprendidas entre la primera y segunda elevación de la estructura. Por las características de las condiciones de operación que debe soportar esta parte de la estructura, que está sometida a abrasión y a corrosión acelerada, se ha seleccionado un sistema de pinturas comprendido por dos capas. La primera capa es de una pintura anticorrosiva epóxica enriquecida con zinc metálico para que actúe como ánodo de sacrificio brindando una protección catódica a las partes de la película que sufre rayaduras o daños por abrasión o por causas mecánicas. La descripción técnica de esta pintura aplicada en la primera capa es como sigue:

Pintura: Zinc Clad N°7 (B69A47) marca Sherwin Williams o equivalente.

Descripción: Es un material epóxico catalizado de tres componentes, que contiene 92-94% por peso de polvo de zinc metálico. Provee protección catódica al acero actuando inicialmente como ánodo de sacrificio que se corroe en vez del metal. La formación de sales de zinc insoluble en la película seca que actúa como una capa impermeable al paso de la humedad y así elimina la corrosión posterior. Cuando la película sufre rayaduras, el ZINC CLAD N°7 evita la corrosión en estos lugares. Esto simula la protección del acero tal como lo hace el galvanizado.

Preparación de la Superficie: Unicamente arenado al metal blanco según: SSPC-SP-5-63.

Aplicación: Brocha o pistola de aire convencional.

Reducción: Para brocha - Ninguna
Para pistola - Reducir hasta con 1/8 de galón de Reductor Epóxico N°54, R7K54/gln.

Secado: Al tacto - $\frac{1}{2}$ hora
Para recubrir - 24 horas

Color: Gris.

Brillo: Mate.

Rendimiento: Aproximadamente 25m²/gln. a 4.0 mils secos, sin considerar pérdida por aplicación y trasegado. Estimar un 25 a 30% de

pérdidas por aplicación.

Resistencia al Calor: Calor en seco : 260°C (500°F)

Calor en húmedo: 82°C (180°F)

Espesor de Película: Se recomienda aplicar una película de 6.5 a 7.0 mils. húmedos equivalente a 4.0 mils secos.

La segunda capa que se utiliza en el sistema de pinturas para la parte comprendida entre la primera y segunda elevación de la estructura es una pintura de protección a base de resinas epóxicas y catalizado de poliamidas. La descripción técnica de esta segunda capa o de acabado es como sigue:

Pintura: Esmalte KEM-CATI-HI BILD marca Sherwin Williams o equivalente.

Descripción: Esta pintura es un recubrimiento de dos componentes a base de resinas epóxicas y con catalizador de resinas de poliamidas que permite formar capas de alto espesor (High Bild).

El esmalte KEM-CATI-COAT HI BILD se recomienda en interiores y exteriores sobre bases o anticorrosivos adecuados, donde se requiera un recubrimiento resistente a los ácidos o solventes o también donde se requiera un acabado duro y resistente a la abrasión.

Preparación de la Superficie: Aplicar sobre el anticorrosivo ZINC

CLAD N° 7 o sobre otros recomendados.

Aplicación: Brocha, pistola de aire convencional o pistola "airless".

Reducción: Para brocha - Ninguna
Para pistola - Reducir con 1/16 de galón de Reductor Epóxico R7K54/gln.

Secado: Al tacto - 2 a 3 horas

Brillo: Brillante

Rendimiento: 16 m² por galón a 10 mils húmedos o 4.5 mils secos.
Sin considerar pérdidas por aplicación y dependiendo de la porosidad de la superficie.

Resistencia al Calor: Hasta 135°C (275°F)

Espesor de Película: Se recomienda aplicar una película de 10 mils. húmedos o 4.5 mils secos.

Además de las dos zonas críticas mencionadas anteriormente, existe una tercera que se encuentra inmediatamente por debajo de la zona de salpicaduras en la cual la corrosión tiene también niveles muy altos debido a que el oxígeno contenido en el agua de mar caso alcanza los niveles de saturación. Esta zona está comprendida entre la segunda y tercera elevación de la estructura y se encuentra completamente sumergida de tal forma que el efecto de abrasión o la posibilidad de daño mecánico son muy reducidos. Es por esto que para esta zona se ha seleccionado una pintura epóxica del tipo HIGH BILD

a base de alquitrán que tiene un gran rendimiento en superficies de acero y de concreto sumergidas tanto en agua salada como en agua dulce. La descripción técnica de esta pintura es como sigue:

Pintura: SHER TAR-ESMALTE EPOXICO marca Sherwin Williams o equivalente.

Descripción: Es un recubrimiento epóxico negro del tipo HIGH BILD a base de alquitrán y curado con aminas. Se recomienda su uso sobre superficies de concreto y hierro expuestas a inmersión tanto en agua salada como en agua dulce, así como para recubrir el exterior de tuberías enterradas. Su película forma una barrera contra una variedad de ambientes corrosivos. Es un excelente recubrimiento para canales de concreto, plantas de desagüe, tanques subterráneos, tuberías enterradas y plantas de tratamiento de agua.

Preparación de la Superficie: Este material deberá ser aplicado a superficies libre de mugre, óxidos, escoria, humedad y demás materiales extraños. Para el acero que va a ser expuesto a agua de mar, la superficie debe ser arenada de acuerdo con la especificación SSPC-SP-5-63 hasta el metal blanco.

Aplicación: Brocha, rodillo, pistola de aire convencional o pistola "airless".

Reducción: Ninguna

Secado: Al tacto - 6 a 12 horas
Para recubrir - 12 horas mínimo
76 horas máximo

Color: Negro

Brillo: Brillante

Rendimiento: 15 a 16 m² por galón a 11.0 mils húmedos (8.0 mils secos) sin considerar pérdidas por aplicación y dependiendo de la porosidad de la superficie.

Resistencia al Calor: Calor en seco : 120° C

Calor en húmedo: 65° C

Espesor de Película Se recomienda una película de 11.0 mils húmedos equivalentes a 8.0 mils secos.

4) INSTALACION, MONITOREO Y CONTROL DE LA PROTECCION CONTRA LA CORROSION

4.1) Instalación de los Sistemas de Protección Catódica

4.1.1) Sistemas de Anodos de Sacrificio

Los ánodos de sacrificio son instalados normalmente en tierra en el patio de construcción de las plataformas, la instalación se hace en base al diseño de la protección catódica preparado para cada estructura en el cual se especifica la ubicación de cada uno de los ánodos simples requeridos para la protección. Estos ánodos son instalados en los miembros de la estructura en un número proporcional al área de acero en contacto con el agua de mar. Esta distribución proporcional se hace calculando el número total de ánodos que se requiere entre elevaciones y distribuyéndolos entre los diferentes miembros de la estructura comprendida entre dichas elevaciones. Generalmente el número de ánodos es menor al número de miembros a proteger por lo que aquellos son instalados sobre los miembros principales (de mayor diámetro y longitud) en forma equidistante de los demás ánodos y de los miembros menores a proteger. Esto se facilita por el hecho de que la estructura es simétrica en todas sus partes. Los ánodos se instalan tanto en las caras de la estructura (plano perpendicular), en las diagonales y patas de la estructura, como en las elevaciones (plano horizontal), en los miembros principales de ésta. En ambos casos, los ánodos son instalados en los miembros siempre en el plano perpendicular para evitar que sobresalgan de la estructura y puedan ser dañados durante las maniobras

de construcción o instalación de la estructura. Los ánodos van siendo soldados a los miembros especificados en el diseño conforme éstos van siendo contruidos, esto se hace por la facilidad de soldarlos cuando el miembro está apoyado sobre el piso. Las patas tubulares de los ánodos son soldadas todo alrededor directamente sobre el miembro y reforzadas mediante cartelas para darle mayor rigidez a la unión.

En el caso de las plataformas ya instaladas en el mar, la instalación de los ánodos es hecha por el personal de buceo. En este caso la instalación también se hace en base al diseño de la protección catódica en el cual se especifica la ubicación de los ánodos. Debido al alto costo de instalación de los ánodos en el mar, se utiliza un arreglo de ánodos dobles los cuales son soldados a una grapa en la misma forma vista anteriormente. Estas grapas con los ánodos dobles son instalados en los miembros especificados en el diseño y aseguradas por medio de pernos. Para asegurar la continuidad eléctrica, se aplican algunos puntos de soldadura en la unión grapa-miembro. En este caso también los ánodos son instalados en un número proporcional al área de acero en contacto con el agua de mar. Debido al arreglo de los ánodos dobles se produce un efecto de interferencia que reduce la salida de corriente de los ánodos, es por esto que en el diseño se considera que la salida de corriente del ánodo se reduce en un 15% lo que se manifiesta en un requerimiento de ánodos un 15% mayor que en el caso de los ánodos simples.

4.1.2) Sistema de Corriente Impresa

Este sistema consiste de varios ánodos de corriente

impresa soportados por un cable de acero recubierto con polyuretano. Este cable es tensionado entre un peso muerto en el fondo del mar (o un punto fijo en la estructura) y un elemento tensionador instalado en la parte superior de la estructura.

Varios cables eléctricos, cada uno alimentando uno o más ánodos son enrollados en forma de espiral alrededor del cable de acero de soporte. Los ánodos son fijados al cable de acero por medio de espaciadores, los cuales previenen el contacto directo entre el ánodo y el sistema de soporte. El sello entre el cable eléctrico y el ánodo debe ser muy resistente al tiempo y a condiciones de operación muy duras, para evitar filtraciones de agua que ocasionen fugas de corriente al principio y que terminen dejando inoperativo el ánodo.

Cada cable eléctrico tiene su propio aislamiento a prueba de agua y todos los cables eléctricos son fijados al cable de acero de soporte por medio de grapas no metálicas.

De acuerdo con la geometría de la plataforma y los requerimientos de corriente para la protección catódica, los ánodos son distribuidos alrededor de la estructura por medio de los cables de acero de soporte antes mencionados.

Para evitar problemas de daño por las embarcaciones en la zona cercana a la superficie del agua, los cables soporte con sus respectivos ánodos que deben ir en la parte exterior de la estructura son instalados sólo

hasta una profundidad de aproximadamente 15 pies. A partir de esta profundidad, sólo los cables eléctricos son llevados hasta la superficie por la parte interna de la estructura y por dentro de tubos protectores. Para proporcionar protección a la parte superior de la estructura (30 pies), se debe instalar otro cable de acero de soporte entre un elemento tensionador en la mesa inferior de la plataforma en superficie y un punto fijo de la estructura en la parte sumergida. Generalmente se utiliza uno de los miembros de la elevación situada aproximadamente a 30 pies de profundidad. Todos los cables eléctricos que pasarán del agua a superficie atravesando la zona de oleaje y de cambios de mareas, irán por dentro de tuberías hasta la mesa de la plataforma en la que estarán instalados los rectificadores. Todos los cables eléctricos serán juntados, antes de conectarse al rectificador, por medio de una caja de conexiones a prueba de explosión. Los rectificadores deberán tener un control automático de potenciales y todas las mediciones de potenciales y salida de corriente deberán ser controladas desde un tablero de control. Para esto, electrodos de referencia permanentes deberán ser montados en los cables con ánodos para controlar automáticamente la salida de corriente según varíen los potenciales.

Provisiones para la Instalación Al efectuar la instalación de un sistema de corriente impresa se deben tomar las siguientes provisiones:

- a) Los rectificadores u otras fuentes de poder deberán ser instalados fuera del camino de tráfico

operacional y lejos de áreas de extremo calor o probable contaminación por lodo, polvo, agua, etc. Cuando dos o más rectificadores son instalados, ellos deberán ser espaciados lo suficiente para permitir su refrigeración.

- b) El cableado eléctrico de los rectificadores deberá cumplir con todos los códigos de regulación y con las especificaciones del operador. Se deberá incluir un interruptor de desconexión externo en el cable de corriente alterna al rectificador. La carcasa del rectificador deberá ser apropiadamente conectada a tierra.
- c) Los ánodos de corriente impresa deberán ser instalados de acuerdo con las especificaciones de construcción señaladas en el diseño. Se deberá tener especial cuidado para evitar dañar los ánodos y sus cables guías durante la instalación. Una cuidadosa supervisión de esta fase es lo más esencial para un apropiado rendimiento de largo término del sistema de protección catódica.
- d) Las conexiones del cable conductor al rectificador, a los ánodos y a la plataforma deberán estar mecánicamente asegurados para mantener la continuidad eléctrica. Antes de conectar la fuente de poder, verificar que el conductor negativo (-) esté conectado a la estructura que va a ser protegida (plataforma) y que el conductor positivo (+) esté conectado a los ánodos de corriente impresa y que el sistema esté libre de corto circuitos. Después que la fuente de corriente

directa ha sido energizada por autorización del supervisor especialista en corrosión, se deberán hacer mediciones adecuadas para verificar que esas conexiones están correctas en polaridad.

- e) Las conexiones entre el cable positivo y el cable guía de los ánodos deberán estar mecánicamente asegurados para mantener la conductividad eléctrica. Las conexiones deberán ser selladas para prevenir la penetración de humedad y asegurar un aislamiento eléctrico del medio ambiente. Las conexiones sumergidas requieren de sellos adecuados para soportar la presión del agua y las condiciones del medio ambiente en la cual deben operar.

4.2) Monitoreo y Control de la Protección Contra la Corrosión

4.2.1) Técnicas y Métodos de Inspección y Monitoreo de la Protección Catódica

En un sistema de protección catódica, el control de su funcionamiento y la ejecución de un adecuado mantenimiento son el complemento que garantiza el control de la corrosión. Los revestimientos anticorrosivos y los sistemas de protección catódica no eliminan las celdas de corrosión existentes en una estructura, sólo las mantiene bajo control. Si ocurre una falla en el sistema de protección catódica, esta celda de corrosión existente reanuda su ataque electrolítico y el fenómeno de corrosión ocurre. La inspección de los sistemas de control de corrosión

instalados es la mejor manera de que se dispone para asegurar una operación efectiva. Con este tipo de inspección de rutina se obtienen los siguientes propósitos:

- a) Detectar si el sistema se encuentra en operación o se encuentra apagado.
- b) Detectar las variaciones en la resistencia del circuito que pueden ser indicativos de algún daño.
- c) Ayudar a determinar la necesidad de instalar refuerzos adicionales en el sistema.
- d) Permitir controlar los costos de consumo de energía.

Las inspecciones de rutina, tanto en un sistema de corriente impresa o de ánodos de sacrificio, deberán efectuarse periódicamente y su frecuencia dependerá de algunos factores económicos tales como facilidad o costo de acceso, suministro de energía, disponibilidad de mano de obra, condiciones corrosivas del sistema, etc. Estas inspecciones de rutina se efectúan generalmente una vez cada seis (6) meses, una vez cada un (1) año, o una vez cada dos (2) años.

Se deben tener en cuenta los siguientes procedimientos para mantener la operación eficiente, continua y efectiva de un sistema de protección catódica.

-Las inspecciones y mediciones eléctricas son necesarias para determinar que la protección ha sido

establecida de acuerdo a los criterios aplicables y para asegurarse de que cada parte del sistema de protección catódica esté operando apropiadamente. Las condiciones que afectan la protección están sujetas a cambios con el tiempo, por lo que es necesario medidas correctivas correspondientes para mantener la protección. Inspecciones y mediciones periódicas son necesarias para detectar cambios en el rendimiento de la protección catódica.

- Se debe seleccionar cuidadosamente la ubicación, número y tipos de mediciones eléctricas a ser usadas en la determinación de la efectividad de un sistema de protección catódica.
- La experiencia puede indicar que las inspecciones y mediciones deban ser hechas en forma más frecuente que lo indicado anteriormente, tal como en el caso de tormentas severas.
- Una medición eléctrica deberá ser llevada a cabo cada vez que un sistema sea energizado para ver si satisface los criterios aplicables y opera efectivamente. Esta medición deberá incluir las mediciones de potenciales de la plataforma en suficiente detalle para demostrar concluyentemente que la protección ha sido alcanzada.
- Inspecciones y pruebas de los sistemas de protección catódica con corriente impresa, deberán ser llevadas a cabo para asegurar su apropiada operación y mantenimiento.

- Todas las fuentes de corriente impresa deberán ser revisadas a intervalos de 2 a 3 meses. Evidencia de un apropiado funcionamiento puede ser la salida de corriente, el consumo normal de potencia o el satisfactorio estado eléctrico de la plataforma protegida.

- Todas las facilidades de un sistema de corriente impresa deberán ser inspeccionadas anualmente como parte de un mantenimiento preventivo para minimizar las fallas en servicio. Estas inspecciones pueden incluir búsquedas de posibles cortos-circuitos, una adecuada conexión del cable de puesta a tierra y del cable de alimentación, exactitud de los medidores, eficiencia del rectificador y la revisión de la resistencia de todo el circuito.

- Los equipos de mediciones eléctricas y de otras pruebas deberán ser mantenidas en buenas condiciones de operación y su exactitud revisada anualmente. Los electrodos de referencia deberán ser revisados más frecuentemente por posible inexactitud debido a contaminación.

- Medidas correctivas deberán ser tomadas tan pronto como las inspecciones y mediciones indiquen que la protección dejó de ser la adecuada. Estas medidas pueden incluir:
 - a) Reparación, reemplazo o ajuste de los componentes del sistema de protección catódica.

 - b) Proporcionar facilidades suplementarias de

protección catódica donde sea necesaria una protección adicional.

- c) Reparación de elementos aislantes defectuosos o empalmes de continuidad eléctrica.

4.2.2) Técnicas más Comunes para Monitorear la Protección Catódica

4.2.2.1) Medición de drenaje de corriente de protección catódica.

- a. Objetivo Medir la corriente entregada por el ánodo o batería de ánodos a la estructura.

b. Equipos y Accesorios

-Amperímetro con un rango entre 2mA y 20A.

-Dos cables con terminal tipo "cocodrilo" para conectar la estructura al instrumento de medición.

-Un medidor de continuidad de corriente.

-Una resistencia de derivación "Shunt".

c. Procedimiento :

-Verificar la batería del instrumento.

-Colocar la perilla selectora de Amperaje en el máximo rango.

-Conectar el instrumento al sistema.

-Disminuir el rango del Amperaje de la perilla selectora hasta que la aguja del indicador se sitúe en la mitad superior de la escala. Si se sitúa en la mitad inferior de la escala seguir disminuyendo el amperaje.

-Leer el amperaje en el instrumento. Efectuar varias lecturas consecutivas hasta que se reporten por lo menos dos lecturas.

d. Interpretación de los Resultados Los resultados de drenaje de corriente dependen del tipo de ánodos, de la estructura y del medio corrosivo. Es necesario llevar el control de drenaje de cada ánodo o batería de ánodos y comparar su variación con el tiempo mediante gráficas.

Para sistemas con ánodos de sacrificio

1. Un aumento o disminución pequeña en el amperaje significa que el sistema está llegando a su equilibrio.
2. Un aumento considerable de Amperaje

puede significar que:

-Ha disminuido la resistividad de la tierra o del agua.

-Ha aumentado el área de la estructura que está siendo protegida ya sea por desprendimiento del recubrimiento o por conexión a otra estructura metálica sin protección.

-Por desgaste acelerado del ánodo.

3) Una disminución brusca del amperaje puede significar:

-Desgaste total o parcial del ánodo.

-Desconexión ánodo-estructura.

Para Sistemas con Corriente Impresa

Generalmente se mide la corriente suministrada por el rectificador al ánodo o batería de ánodos. La interpretación de aumento o disminución de corriente es similar al caso anterior excepto que no se considera el desgaste del ánodo ya que estos se diseñan normalmente para 20 años de operación.

e) Consideraciones Generales

1. En la práctica, para ánodos de un sistema de corriente impresa en agua de mar, se constata un buen funcionamiento cuando no se forman algas marinas alrededor de ellos.
2. Para sistemas con corriente impresa, en adición al control de drenaje de corriente, se debe controlar el voltaje de salida del transformador/rectificador; el valor máximo dependerá del tipo de ánodo que se use.
3. La frecuencia de medición de potenciales y drenaje de corriente depende del sistema. Inicialmente se puede considerar cada mes, posteriormente cada 3 ó 6 meses.

4.2.2.2) Medición de Potenciales de Protección Catódica

- a) Objetivo Medir la diferencia de potencial de la estructura/electrólito, para determinar la efectividad de la protección catódica de tuberías y estructuras metálicas, enterradas o sumergidas en agua.

b) Equipos y accesorios:

- Voltímetro con un rango entre 10mV y 10V.
- Dos cables con terminal tipo "cocodrilo" para conectar la estructura al instrumento de medición.
- Un electrodo de referencia de Cu/Cu SO₄ para suelos y para agua de río de baja conductividad, o un electrodo de Ag/AgCl para agua de mar.
- Un medidor de continuidad de corriente.
- Cristales de Cu/CuSO₄, aprox. 250 gr. Agua destilada (para mediciones en lugares alejados de la planta y en sistemas enterrados).

c) Procedimientos:

- Verificar la batería del instrumento.
- Colocar la perilla selectora de voltaje en el máximo rango.
- Conectar el borne positivo del instrumento al electrodo de referencia y el borne negativo a la estructura a medir. Esta conexión debe establecer un buen contacto para evitar lecturas erróneas

- Colocar el electrodo de referencia en el medio corrosivo, según el sistema. Para suelos el electrodo se entierra la tercera parte de su longitud. Para agua de mar se sumerge totalmente el electrodo hasta el punto donde se quiere obtener la lectura.
- Disminuir el voltaje con la perilla selectora respectiva hasta que la aguja del indicador se sitúe en la mitad superior de la escala. Si se sitúa en la mitad inferior de la escala, seguir disminuyendo el voltaje.
- Leer el voltaje en el instrumento. Efectuar varias lecturas consecutivas hasta que se repitan por lo menos dos lecturas.
- El voltaje será reportado indicando el electrodo de referencia utilizado.

d) Interpretación de los Resultados

- Los valores de potencial óptimos dependen del tipo de electrodo de referencia y son: Para Cu/CuSO₄: -850mV a -1250mV.
Para Ag/AgCl :-800mV a -1200mV.
- Valores comprendidos entre -450mV y -850mV para el Cu/CuSO₄, significa que

la estructura tiene insuficiente protección. En el caso de tener aproximadamente -450mV significa que la estructura no tiene ninguna protección. En estos casos será necesario instalar un nuevo sistema o inspeccionar el sistema instalado para verificar la continuidad del circuito.

-Valores inferiores a -450mV (Cu/CuSO₄) indican que el punto de medición (toma de potencial) está desconectado de la estructura.

-Valores mayores de -1250 (cu/CuSO₄) o mayores de -1200 (Ag/AgCl), significan que la estructura tiene "excesiva" protección que origina una mayor producción de hidrógeno en las reacciones electroquímicas, lo cual puede ocasionar ampollamiento del recubrimiento o pintura con su posterior deterioro.

e) Consideraciones Generales

-El electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, está conformado por una varilla de Cu sumergida en una solución de sulfato de cobre (de color azul).

-Es recomendable tener un medidor de continuidad de corriente sobre todo

para verificar la continuidad de los circuitos, más aún si las estructuras a medir están alejadas de la Planta.

-Las mediciones de potencial se deben realizar en el punto más cercano y más lejano de la batería de ánodos.

-Los electrodos de referencia son medidos respecto al electrodo de hidrógeno para su calibración. En la práctica, para saber si un electrodo está en buenas condiciones se debe verificar lo siguiente:

Para Cu/CuSO₄, estará en buenas condiciones si el color de la solución es azul; en cambio, si presenta una coloración verdosa, será necesario cambiar la solución. Para Ag/AgCl, se deberá medir un mismo punto con los electrodos de Cu/CuSO₄ y de Ag/AgCl. Si la diferencia de medida es de aproximadamente 50mV, el electrodo estará en buenas condiciones. De no ser así, se deberá reemplazar el electrodo.

4.3) Técnicas de Corrección y Mantenimiento de la Protección Catódica

En un sistema de protección catódica, el control de su funcionamiento y la ejecución de un adecuado mantenimiento son el complemento que garantiza el control de la corrosión. Un

exitoso programa de control de corrosión deberá incluir prácticas de mantenimiento que verifiquen que los sistemas instalados trabajen ininterrumpidamente para que la protección catódica se cumpla de manera eficiente.

Los programas de mantenimiento de corrosión pueden variar de acuerdo con la situación de un sistema, pero en general un programa de mantenimiento constará de una primera fase de inspección de los sistemas de control de corrosión y de una segunda fase de implementación de los programas para remediar los problemas encontrados.

Los factores a controlar en las operaciones de mantenimiento son generalmente: Rectificadores, revestimientos, aislamientos, estructuras adyacentes, uniones y cables. Todo esto para determinar si tienen fugas o escapes de la corriente protectora o si el sistema está suministrando suficiente corriente para la protección de la estructura. Cuando la cantidad de corriente que se suministra a una estructura que se encuentra con protección catódica cambia a un valor pequeño incapaz de brindar protección, la polarización en el sistema se dañará y podrán ocurrir fallas por corrosión. Cuando esto ocurre las principales causas son:

- a) Consumo de los ánodos.
- b) Fallas en la conexión cable-ánodo.
- c) Daños en los cables debido a imperfecciones o daños en su aislamiento.
- d) Fallas en la fuente de corriente (Rectificador), ya sea por daños en la unidad o daños en el suministro de corriente.

- e) Bloqueo de los ánodos ocasionado por gases.

Además de lo anterior, aún cuando el sistema esté operando normalmente, existen otros factores que pueden hacer que la cantidad de corriente sea insuficiente para la protección catódica. Estos son:

- a) Deterioro o daños en los revestimientos.
- b) Conexiones accidentales de la estructura que tiene protección catódica con otra que no la tiene.
- c) Fallas en las uniones aislantes.

Una práctica recomendable es el mantener una estadística semanal de las salidas del rectificador tanto en voltios como en amperios.

Los rectificadores se deberán inspeccionar por lo menos una vez al mes y se deberán mantener las estadísticas de trabajo y anotar cualquier ajuste o variación que se haga al mismo.

En los programas de inspección y mantenimiento rutinario, una práctica standard deberá ser la toma de potenciales con relación al electrodo de referencia adecuado y comparar los valores obtenidos con los valores de la inspección previa. Este hecho nos ayudará a determinar en los sistemas con corriente impresa o en los sistemas con ánodos de sacrificio cuando alguno no funciona bien.

Parte esencial del programa de mantenimiento es proveer un adecuado nivel de protección en toda la estructura a proteger. A medida que el potencial disminuya, se hace necesario tomar

las acciones requeridas para restaurarlo, lo cual generalmente se consigue mediante la reposición o reparación de las partes deterioradas o dañadas del sistema de protección instalado. A menudo la revisión y aumento de las facilidades de protección instaladas proveen la protección suplementaria con nuevos diseños y nuevos sistemas de protección catódica.

4.4) Fallas más Frecuentes en Sistemas de Protección Catódica

Un cuidadoso análisis de las medidas de la protección catódica, mejorará la probabilidad de detectar un mal funcionamiento sin necesidad de inspecciones o pruebas costosas. En el análisis de cualquier sistema, un simple dato o síntoma es rara vez suficiente para encontrar la causa de un mal funcionamiento. Conclusiones tomadas de datos insuficientes son generalmente riesgosas y pueden ocasionar costos mucho más elevados.

Un dato ó síntoma puede ser necesario, suficiente y/o concluyente. Un sintoma necesario es un síntoma que se requiere que esté presente si una falla específica ha ocurrido. La ausencia de un síntoma necesario nos permite rechazar la posibilidad de esa falla. Un síntoma suficiente es un síntoma o grupo de síntomas que son suficientes para establecer que una determinada falla existe. El rechazo de la posibilidad de una cierta falla a menudo requiere sólo una medición. La aceptación de una falla a menudo requiere un grupo de mediciones o síntomas. Es estadísticamente más fácil el rechazar una posible falla que establecer que esta existe. Un síntoma distinguible es un síntoma o medición que prueba que una falla determinada existe cuando dos o más alternativas son posibles.

Para cada falla de un sistema de protección catódica se deberá

discutir las causas, el grupo de síntomas necesarios para que esta falla ocurra, los valores típicos esperados y la revisión de la teoría empleada en el análisis.

Las fallas del sistema de protección catódica pueden ser uniformes o localizadas. Una falla uniforme es la producida sobre grandes distancias o áreas. Una falla localizada es producida sobre áreas pequeñas, aunque los efectos de una falla localizada pueden ser vistos sobre grandes distancias. Las fallas se pueden tipificar de acuerdo con que si éstas tienen relación con el ánodo de protección catódica, con la estructura catódica a proteger o con el electrólito en cuestión. Estas fallas se clasifican en:

4.4.1) Fallas Relacionadas al Anodo

a) Excesiva Polarización del Anodo

Como se vió anteriormente, la polarización es la disminución de la fuerza electromotriz de una celda o batería, cuando ésta está suministrando una corriente eléctrica. Es la disminución de la fuerza electromotriz debido al paso de la corriente. La polarización tiene un efecto inhibitor sobre la corrosión y es usualmente deseable. Esto debido a que al reducir la f.e.m. está reduciendo la fuerza corrosiva de la celda de corrosión. Una excesiva polarización del ánodo es una falla algo común en los sistemas de protección catódica. Una falla existe cuando la polarización es mucho mayor que el valor de diseño. Un límite típico de los valores

de la polarización en un sistema galvánico es +300mV. El valor de diseño en un sistema de corriente impresa puede ser mucho mayor.

b) **Disminución del Potencial Activo del Anodo**

Una segunda falla relacionada al ánodo es una inusual disminución del potencial activo del ánodo. Esta falla está relacionada directamente al potencial estático del ánodo en su relleno (ánodos instalados en tierra). La causa de esto parece ser la acción de los elementos aleantes o impurezas contenidas en el ánodo. Es virtualmente imposible predecir el efecto de los elementos aleantes e impurezas en el potencial del ánodo.

El efecto de la reducción del potencial estático del ánodo, origina una disminución del flujo de corriente eléctrica entre el ánodo de protección catódica y la estructura, reduciéndose el nivel de protección de ésta.

c) Excesiva caída de Potencial en la Superficie del Anodo

Las caídas de potencial son importantes en la operación de los sistemas de protección catódica, particularmente en los sistemas con ánodos de sacrificio. En general las caídas de potencial no son deseables, desde que ellas reducen la corriente de protección catódica y consiguientemente el nivel de protección. En los sistemas de corriente impresa, resulta en un incremento de los costos de energía.

Una tercera falla relacionada al ánodo es una excesiva caída de potencial en la capa del electrólito inmediatamente adyacente al ánodo. El volumen de electrólito inmediatamente adyacente al ánodo es particularmente importante desde que es una región con la mayor densidad de corriente, gradiente de potencial y caída de potencial.

Las causas directas de la excesiva caída de potencial en la capa de electrólito inmediatamente adyacente al ánodo son las grandes resistencias o las grandes corrientes que se producen en esta capa. Esta excesiva caída de potencial está a menudo asociada con una alta resistividad en el área inmediata a la superficie del ánodo (en agua) o por un contacto restringido entre el ánodo y su relleno circundante (en tierra).

4.4.2) Fallas Relacionadas al Cátodo

a) Despolarización de la Estructura Catódica

La falla por despolarización catódica de la estructura puede ser uniforme o localizada. En adición a la caída de potencial en la superficie del cátodo, una reacción catódica inusual sobre la estructura protegida y una baja pendiente de la curva de polarización catódica pueden causar una falla del sistema de protección catódica.

La falla más común relacionada con la estructura es una baja pendiente de la curva de polarización

catódica (reducción del O_2) en la estructura protegida. Cualquier factor que contribuya a la disminución del O_2 reducido por la protección catódica, bajará la pendiente de la curva de polarización de la estructura. Asimismo, cualquier factor que remueva el radical OH^- producido por la protección catódica (reacción de reducción), también bajará la pendiente de la curva de polarización catódica. Al bajar la pendiente de dicha curva, la estructura se despolariza, causando un incremento de la corriente y por lo tanto una disminución del potencial de protección de la estructura o cátodo.

Cualquier factor que origine la despolarización del ánodo deberá ser evitado. La despolarización del cátodo causa un incremento de la corriente, una disminución de la vida del ánodo y una simultánea disminución del nivel de protección.

b) Aumento del Potencial Pasivo del Cátodo

Una segunda falla relacionada al cátodo es el aumento inusual del potencial pasivo del cátodo. Las causas más comunes de esta falla son un gran contenido de oxígeno y un electrolito con un PH bajo.

Este incremento del potencial pasivo del cátodo, causa un incremento en la corriente (y una disminución del potencial del ánodo), mientras produce una reducción del nivel de protección.

c) Excesiva caída del Potencial en la Superficie del Cátodo

Una tercera falla relacionada con el cátodo es una excesiva caída de potencial en la superficie de la estructura protegida. Esto puede ser causado por un gran requerimiento de corriente (estructura no recubierta o electrolito oxigenado) o por una gran resistencia local. Como en el caso del ánodo, la magnitud de la densidad de corriente, gradiente de potencial y caída de potencial es mayor cerca a la estructura que en el resto del electrólito. El gradiente de potencial cerca al cátodo es a menudo menor que el gradiente de potencial cerca al ánodo desde que la densidad de corriente es menor.

En un sistema de protección catódica, si se incrementa la caída de potencial en el cátodo, la corriente disminuye, la estructura se hace mas positiva (menos protección) y el ánodo de protección catódica se hace más negativo. Los síntomas de una gran caída de potencial cerca de la estructura son similares a los de una gran caída de potencial cerca al ánodo con la excepción de que la mayor caída de potencial es la cercana a la estructura.

4.4.3) Fallas Relacionadas Al Electrólito

Los mismos factores que causan altas resistencias en el ánodo y en el cátodo causan alta resistencia en la masa del electrólito. Debido a que la densidad de corriente es

menor en la masa del electrólito, el control de la caída de potencial en la masa del electrólito no es tan común como el control en el ánodo o en el cátodo.

4.4.4) Otras Fallas Comunes en la Protección Catódica

a) Una gran caída de potencial en la conexión metálica está a menudo relacionada con un intento de reducir costos en la longitud del cable o en el área de la sección recta del conductor. Una falla por caída de potencial en el conductor metálico puede también ser el resultado de pobres conexiones en los conductores.

b) Fallas en el Suministro de Energía

El caso extremo de una gran caída de potencial en el conductor metálico es la rotura de una conexión. Esto puede ser causado por falla mecánica de una conexión o por corrosión del cable. En este caso la corriente disminuye hasta cero y el ánodo y la estructura gradualmente retornan a sus potenciales de corrosión. Un gran número de fallas de los sistemas de protección catódica están relacionadas al rectificador. Entre estas fallas tenemos:

- (1) Desconexión de la fuente de poder;
- (2) Polaridad de salida invertida;
- (3) Corto-circuito interno de la fuente de poder;
- (4) Un circuito abierto en el interior de la fuente de poder.

Más común de lo que podría esperarse es una

desconexión de la fuente de poder que origina que la corriente disminuya hasta cero y la estructura y ánodo retornen a sus potenciales de corrosión. Una segunda falla importante relacionada con la fuente de poder es la polaridad de salida invertida de un rectificador. Esta falla puede ser el resultado de un error en las marcas de la polaridad del rectificador, en el código de los cables o en la conexión. Este es un error muy serio ya que la velocidad de corrosión no se reduce sino más bien se incrementa debido a que el ánodo es protegido catódicamente a expensas de la estructura que se debería proteger.

Una fuente de poder puede quedar inoperativa como resultado del defecto de un componente interno. El más común es una sobrecarga térmica debido a un insuficiente enfriamiento o a una excesiva corriente.

c) Fallas en la Instalación del Anodo

Una serie de fallas están asociadas con la instalación de los ánodos. Un ánodo instalado muy cerca a la estructura da el beneficio de un alto nivel de protección localizado en la zona inmediatamente opuesta al ánodo. Esto trae como inconveniente un gran flujo de corriente y por consiguiente un gran consumo del ánodo. Un segundo problema de un ánodo muy cercano es la pobre distribución de corriente sobre la estructura a proteger. El nivel de protección cae muy

rápidamente con la distancia a lo largo de la estructura protegida. La separación ideal del ánodo a la estructura es una variable que depende de los requerimientos de corriente, geometría del ánodo y de la resistividad.

Al incrementar la separación del ánodo se logra mejorar la distribución de corriente que resulta en un nivel de protección más uniforme. El flujo de corriente se reduce debido al incremento de la resistencia. El nivel de protección resultante, aunque más uniforme, es más bajo. La vida del ánodo es aumentada al costo de una protección reducida. Una tercera falla en la instalación de ánodos cuando se tienen muy pocos ánodos distribuidos a lo largo de la estructura. En este caso se tendrán zonas con adecuado nivel de protección y zonas con insuficiente protección. Un sistema puede tener un adecuado número de ánodos y todavía presentar este tipo de falla. Esto es una falla en la distribución de corriente. La distancia de la separación lateral de los ánodos es una función de la separación vertical. Un incremento vertical del espaciamiento del ánodo, permitirá un incremento del espaciamiento lateral.

5. COMPARACION ECONOMICA DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

Para el caso específico de la plataforma PN1 que se está analizando en el presente trabajo, las dos únicas alternativas posibles de solución son: a) Protección catódica con ánodos de sacrificio y b) Protección catódica con corriente impresa. La alternativa del empleo de pinturas y recubrimientos como protección o suplemento de la protección, queda descartada puesto que la plataforma ya se encuentra instalada-sumergida en el mar. Cabe aclarar que existen pinturas y recubrimientos especiales que pueden ser aplicados bajo el agua, pero debido a su alto costo y aún más alto costo de aplicación, su uso está restringido (de ser necesario) a una pequeña zona de 1 a 1.5m (3 a 5 pies) por encima y por debajo del nivel medio de mareas.

Según se vió en el punto 3.2.5) existen ventajas y desventajas de ambos sistemas, pero el factor principal para la elección de uno u otro sistema es el factor económico, por lo que a continuación se presentará una comparación económica de ambas alternativas.

5.1) Costo del Sistema de Anodos de Sacrificio: U.S.\$790,000.00

	Profundidad de Agua (Pies)			TOTAL
	0-170	170-220	220-376	
-Anodos dobles	74	36	86	196
-Días Instalación	19	18	13	50
-Costo materiales (miles de U.S.\$)	74.0	36.0	86.0	196.0
-Costo instalación (miles de U.S.\$)	161.5	153.0	266.5	581.0
-Imprevistos (miles de U.S.\$)	-	-	-	13.0
<u>COSTO TOTAL (M\$):</u>				<u>790.0</u>

Base de los Costos-Costo de Materiales :

-Anodos dobles (325 lbs. c/u x 2 unid.)	\$ 800.00
-Material para grapa	120.00
-Fabricación de grapa	80.00
TOTAL	\$1,000.00

-Costo de Instalación :

a) De 0-170' (0=52m) de profundidad

-Barcaza	(24 hrs.)	3,500 \$/dia
-Remolcador	(24 hrs.)	2,000 \$/dia
-Buzos	(13 x 24 hrs.)	3,000 \$/dia

TOTAL 8,500 \$/dia

Tasa de instalación: 4 ánodos dobles/día
(estimado por el Dpto. de Buceo)

b) De 170'-220' (52m - 67m) de profundidad

-Barcaza	(24 hrs.)	3,500 \$/dia
-Remolcador	(24 hrs.)	2,000 \$/dia
-Buzos	(13 x 24 hrs.)	3,000 \$/dia

TOTAL 8,500 \$/dia

c) De 220'-376' (67m - 114m) de profundidad

Para esta profundidad se requiere del buceo de saturación ya que el buceo con mezcla de gases sólo permite unos pocos minutos efectivos de trabajo, por el gran tiempo de descompresión que requiere para bajar a estas profundidades.

-Barcaza	(24 hrs.)	3,500 \$/dia
-Remolcador	(24 hrs.)	2,000 \$/dia
-Buceo de saturación		15,000 \$/dia

TOTAL 20,500 \$/dia

Tasa de instalación: 6 ánodos dobles/día
(Estimado por el Dpto. de Buceo).

5.2) Costos del Sistema de Corriente Impresa: U.S.\$613,000.00.

-Costo de Materiales: U.S.\$414,000

a) Confeccion de 5 cables tensionados (4 del tipo "A" y 1 del tipo "B") cada uno consistente en:

-Cable de acero galvanizado recubierto con aislamiento protector de poliuretano.

-Anodos de corriente impresa, espaciadores, cables eléctricos y otros accesorios.

-Terminales mecánicas, incluyendo los tensionadores.

-Cajas de terminales eléctricos.

-4 rectificadores (1 de 300A, 20V y 3 de 800A, 20V).

-Cables eléctricos entre el generador, los rectificadores y las cajas de terminales eléctricos.

COSTO TOTAL: U.S.\$330,000.00

b) Construcción de 4 bloques de concreto relleno con chatarra de fierro de 3 Tons. de peso, para ser usados como anclaje de las cuerdas tensionadas.

COSTO TOTAL: U.S.\$4,000.00

c) Dos generadores de 100KW cada uno (uno para ser usado como reserva).

COSTO TOTAL: U.S.\$80,000

-Costo de Instalación: U.S.\$99,000

a) Supervisión y mano de obra: U.S.\$5,000.00.

b) Instalación de 5 cables tensionados con cables

eléctricos y ánodos.

-Barcaza	(24 hrs.)	3,500 \$/dia
-Remolcador	(24 hrs.)	2,000 \$/dia
-Buzos	(13 x 24 hrs.)	3,000 \$/dia

TOTAL 8,500 \$/dia

Tiempo de instalación: 6 días

Costo de Instalación : U.S.\$51,000.00

c) Instalación de Rectificadores, cables eléctricos de superficie, elementos tensionadores.

-Barcaza	(24 hrs.)	3,500 \$/dia
-Remolcador	(24 hrs.)	2,000 \$/dia

TOTAL 5,500 \$/dia

Tiempo de Instalación: 6 días

Costo de Instalación: U.S.\$33,000.00

d) Imprevistos: U.S.\$10,000.00

Costos de Operación y Mantenimiento: U.S.\$100,000.00

(Para un período de 10 años)

a) Sistema de corriente impresa (ánodos, cables, rectificadores, etc)	U.S.\$50,000
b) Fuente de energía (2 generadores)	U.S.\$50,000

5.3) Comparación de Costos

Para una mejor apreciación de los costos involucrados en ambas alternativas, éstos han sido divididos en tres tipos, que son:

- a) Costo en Dinero Efectivo: Involucra todos los costos que representan un desembolso real de dinero efectivo y que deban ser hechos al inicio del proyecto. Tiene que ver con la liquidez de la Empresa y con sus prioridades para el destino de sus recursos.
- b) Costos de los Equipos de Petromar: Involucra todos los costos que representa el utilizar los equipos de la compañía a los que se le ha asignado un costo teniendo en cuenta una tasa de retorno después de impuestos (esperada por la política de la compañía) y una tasa de depreciación (asignada por el Estado, según el tipo de equipo). Se debe incurrir en éstos al inicio del proyecto y generalmente durante la etapa de instalación. Tiene que ver con la asignación de estos equipos a otros proyectos que puedan ser más urgentes o más rentables para la compañía.
- c) Costos de Operación: Involucra todos los costos en que se incurre después de iniciado el proyecto y sirven para mantener en operación el sistema. Incluye todos los costos de mantenimiento. Tiene que ver con el cuidado o la atención que hay que brindar a un proyecto durante su vida operativa, destinando recursos de dinero y personal.

	Dinero Efectivo	Equipos de la cía.	Costos Operac.	Costo Total
	M\$	M\$	M\$	M\$
Anodos de sacrificio	515.0	275.0	-	790.0
Corriente impresa	442.0	71.0	100.00	613.0

CONCLUSIONES

1. Las plataformas marinas usadas para la perforación y la producción del zócalo continental representan grandes inversiones de capital. Estas plataformas están siendo colocadas en áreas marinas de todo el mundo y están siendo diseñadas para soportar fuerzas resultantes de huracanes, tormentas árticas, corrientes producidas por las mareas, terremotos, masas flotantes de hielo, etc. Más aún, las plataformas están siendo colocadas en aguas más profundas y por lo tanto se tienen que construir más largas, más complicadas y más costosas. El control de la corrosión en estas estructuras es necesario para el desarrollo económico de la producción de petróleo y gas, para proporcionar un soporte seguro para las áreas de trabajo y para evitar un daño potencial del medio ambiente.
2. En el presente trabajo, se han analizado las dos alternativas que nos brinda la Ingeniería de Corrosión, para la protección catódica de la plataforma "PN-1" de PETROMAR S.A. Estas dos alternativas son las de un sistema de corriente impresa y la de un sistema de ánodos de sacrificio. La conclusión principal a la que se arribó, es que resulta más conveniente, técnica y económicamente, la utilización de un sistema de corriente impresa para el caso específico de la protección catódica de la plataforma "PN-1". Según se puede apreciar en el Capítulo 5 - "Comparación Económica de las Diferentes Alternativas", la implementación de un sistema de corriente impresa para la plataforma "PN-1" tiene un costo total de U.S.\$613,000 vs U.S.\$790,000 del sistema de ánodos de sacrificio. Esto se debe principalmente a los altos costos de buceo requerido para la instalación de los ánodos de sacrificio en una plataforma profunda como lo es la "PN-1" de 114 metros (376') de profundidad de agua. Aquí se debe tener en cuenta que la elección del sistema de corriente impresa no sólo significa un ahorro de U.S.\$117,000

de los recursos de la Empresa, sino, que se obtendrá una mayor duración de la protección catódica (de 15 a 20 años con el sistema de corriente impresa vs 10 años con el sistema de ánodos de sacrificio).

3. Otro punto a favor de la elección del sistema de corriente impresa, es que al haber estado sumergida la estructura sin protección durante varios años, muchos de sus miembros se han desgastado por la corrosión. Por ésto, es preferible evitar el cargar la estructura con los pesados ánodos de sacrificio. El sistema de corriente impresa involucra ánodos mucho más pequeños y livianos.
4. Otro factor importante es que con la elección del sistema de corriente impresa, que sería la primera vez que lo utilice PETROMAR, se aprenderá una nueva tecnología que posteriormente pueda ser usada si se extienden las operaciones de la Empresa a aguas más profundas.
5. Inicialmente los sistemas de corriente impresa eran dejados de lado por la poca confiabilidad de sus componentes, como los rectificadores, ánodos de corriente impresa y principalmente las uniones cable-ánodo que deben soportar condiciones muy fuertes de trabajo bajo el mar. Todo esto se ha ido superando con el tiempo y actualmente se puede contar con sistemas de corriente impresa con componentes muy confiables que vienen siendo utilizados en todas partes del mundo, incluyendo el Perú. Con este punto, cabe mencionar a manera de conclusión, que en el presente trabajo para seleccionar el tipo de ánodo para el sistema de corriente impresa, se revisó una serie de información relativa a las principales causas de fallas de estos sistemas. Se encontró que el mayor número de

fallas se debía al rompimiento de la conexión eléctrica entre el cable y el ánodo. Al revisar la literatura de los fabricantes de ánodos se determinó que casi la totalidad de ellos utilizaban la conexión cable-ánodo aislada con un sello a base de resinas de diferentes materiales. Estos sellos pueden desarrollar, al cabo de algunos años de operación, pequeñas grietas o pueden perder adhesión al cable o al ánodo, con la consiguiente penetración de humedad que ocasionará inicialmente una fuga de corriente que disminuirá el nivel de protección y que finalmente terminará con el rompimiento de la conexión eléctrica por corrosión del contacto eléctrico. En el caso del ánodo seleccionado, marca LIDA, su conexión cable-ánodo es obtenida en la fábrica por deformación plástica de un tubo de titanio (base del ánodo que lleva un revestimiento pasivo de una mezcla de óxidos metálicos) sobre el cable, eliminando la necesidad de utilizar sellos a base de resinas. Las acciones de sellado son producidas por la presión elástica desarrollada por las dos capas de revestimientos, la interior de etileno-propileno y la exterior de polietileno cloro-sulfonado, sobre el tubo de titanio deformado plásticamente. Este tipo de conexión ha sido utilizado en diversos proyectos de protección catódica en agua de mar en el mundo, habiendo probado su vida de servicio de largo término.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda mantener la estructura siempre en buen estado utilizando cualquiera de los dos sistemas de protección catódica analizados. Esto es, para que cuando se termine la producción de petróleo de la plataforma, la estructura pueda ser recuperada y re-instalada en otra ubicación, ahorrándose los costos de construir una nueva.
2. Siempre que se vaya a instalar una plataforma nueva, está deberá llevar instalado un sistema de protección catódica con la finalidad de evitar su deterioro que obligaría a costosas reparaciones o evitar el tener que implementar un sistema retro instalado cuyo costo sería de 2 a 3 veces mayor.
3. Cuando se trate de instalar un sistema de protección catódica en una plataforma nueva, se recomienda instalar ánodos de sacrificio en plataformas de hasta aproximadamente 140m (460 pies) de profundidad. Para plataformas más profundas, se deberá hacer un análisis comparativo de costos de los dos sistemas ya que a partir de esa profundidad comienza a ser atractiva la elección de un sistema de corriente impresa.
4. Cuando se trate de instalar un sistema de protección catódica retro-instalado sea porque la plataforma fué instalada sin ésta o sea porque ésta se terminó, se recomienda:
 - a) Instalar un sistema de ánodos de sacrificio cuando la plataforma tenga menos de aproximadamente 80m (260 pies) de profundidad.

- b) Instalar un sistema de corriente impresa cuando la plataforma tenga menos de aproximadamente 80m (260 pies) de profundidad.

NOTA: En todo caso, siempre se deberá hacer un análisis comparativo de costos para elegir la mejor alternativa.

5. Para implementar un sistema retro-instalado de ánodos de sacrificio, se recomienda utilizar una configuración dual con la finalidad de reducir los altos costos de buceo. Se sacrifica un poco la distribución de corriente, logrando una distribución menos uniforme, pero que se compensa sobradamente con el menor costo de instalación. Para este caso, en el diseño de la protección catódica, se deberá reducir la salida de corriente en aproximadamente 15% debido al efecto de interferencia causado por el arreglo dual de los ánodos.
6. Para el caso de la protección catódica de plataformas petroleras o de cualquier estructura sumergida que sea muy susceptible al peso propio o a la carga, se recomienda la utilización de ánodos de sacrificio de aluminio en vez de ánodos de zinc. Esto debido a que para la misma cantidad de corriente de protección, se necesita un peso de 3.37 veces más zinc que aluminio.
7. En el caso de plataformas pequeñas menores de 36m (120 pies), se recomienda pintar la zona de salpicaduras o zona de cambio de mareas (la parte de la estructura de aproximadamente 12m, comprendida entre la primera y la segunda elevación), utilizando un sistema epóxico de 3 capas de 3 a 3.5 mils de espesor cada uno. La primera capa o base deberá ser pintura epóxica

enriquecida con zinc en polvo o similar, para brindar una protección catódica a menor escala. Las dos restantes, deberán ser pinturas de esmalte epóxico. El resto de la estructura se recomienda pintar completamente con una pintura de brea epóxica ("coal tar epoxy") que tiene buen rendimiento en la parte sumergida a un costo menor que el esmalte epóxico. El sistema de pinturas anteriormente descrito debe ir complementado con un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio. El efecto de la pintura de brea epóxica será el de retardar el inicio de la protección catódica, logrando un efecto combinado de protección más prolongado a un costo relativamente no muy alto.

8. En el caso de plataformas mayores de 36m (120 pies), se recomienda pintar sólo la zona de salpicaduras en la forma arriba descrita. Esto debido a que el costo de la pintura en una plataforma más grande se hace muy elevado y junto con el costo de la protección catódica hace que la inversión inicial de la protección conjunta sea una cifra muy alta. Las políticas de las compañías, generalmente prefieren reducir unos años la protección conjunta, si con ésto pueden reducir sustancialmente la inversión inicial.

BIBLIOGRAFIA

- CORROSION PREVENTION BY CATHODIC PROTECTION-FRANK E. RIZZO. NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS
- CORROSION CONTROL IN PETROLEUM PRODUCTION
NACE GROUP COMMITTEE T-1
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS
- CORROSION CONTROL ON STEEL, FIXED, OFFSHORE PLATFORMS
ASSOCIATES WITH PETROLEUM PRODUCTION
NACE STANDARD RP-01-76, RECOMMENDED PRACTICE
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS
- CORROSION Y PROTECCION CATODICA
WILSON WALTON INTERNACIONAL
MADRID, ESPAÑA
- DEEP WATER RETROFIT CATHODIC PROTECTION SYSTEMS
BRIAN S. WYATT
GLOBAL CATHODIC PROTECTION, TELEFORD, ENGLAND
- DIRECT CALCULATION OF ECONOMIC APPRAISALS OF CORROSION
CONTROL MEASURES
NACE STANDARD RP-02-72, RECOMMENDED PRACTICE
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS
- EXPERIENCE IN OFFSHORE STRUCTURE RETROFIT CATHODIC
PROTECTION SYSTEMS
B.S. WYATT AND R. BRITAIN
GLOBAL CATHODIC PROTECTION LIMITED, TELEFORD, SALOP,
ENGLAND G. R. JONES
CONOCO LIMITED, VIKING GAS TERMINAL, MABLETHORPE, LINCS,
ENGLAND
- NEW ASPECTS OF THE APPLICATION OF CATHODIC PROTECTION
TO OFFSHORE FACILITIES
JACK G. DAVIS, E. P. DOREMUS AND RALPH B. PASS
CATHODIC PROTECTION SERVICES, USA
NACE CORROSION-75, TORONTO, ONTARIO, CANADA
- NEW DESIGN OF ANODIC STRUCTURES FOR IMPRESSED CURRENT
CATHODIC PROTECTION IN SEA WATER
BRUNO BAZZONI, PERMELEC S. p.A. - MILAN ITALY
GIANLUIGI MUSSINELLI, ORONZIO DE NORA S.A.-LUGANO,
SWITZERLAND
JUNE 1986 VENEZIA, COLLEGIO NAVALE MOROSINI-SANT' ELENA

BIBLIOGRAFIA (Cont.)

- OFFSHORE CATHODIC PROTECTION SYMPOSIUM
APRIL 14, 1975 TORONTO, ONTARIO, CANADA
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS

- PERFORMANCE OF MIXED METAL OXIDE ACTIVATED TITANIUM
ANODES IN DEEP GROUND BEDS
J. T. READING
DOW CHEMICAL, USA
NACE CORROSION-87, SAN FRANCISCO, CALIFORNIA, USA

- UNDERWATER INSPECTION TESTING MONITORING OF OFFSHORE
STRUCTURES
NAVAL COASTAL SYSTEMS CENTER, NCSC
PANAMA CITY, FLORIDA, USA