



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN
ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS**

Walter Omar Marroquín Raxón

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN
ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

WALTER OMAR MARROQUÍN RAXÓN

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Sergio Torres Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha julio de 2012.



Walter Omar Marroquín Raxón

Guatemala, 9 de julio de 2015

Ingeniero
Roberto Guzmán Ortiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Roberto Guzmán

Le saludo atentamente informándole que se procedió con la asesoría y revisión del trabajo de graduación titulado **PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS**, desarrollado por el estudiante universitario Walter Omar Marroquín Raxón.

Después de haber realizado todos los cambios necesarios, y siguiendo las recomendaciones de la asesoría, se ha cubierto el estudio planteado, habiendo proyectado soluciones de ingeniería; en virtud me permito recomendar su aprobación.

Sin otro particular, me despido de usted.

Atentamente,


Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Colegiado 3071
Asesor



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.194.2015

El Coordinador del Área de Materiales de Ingeniería, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS**. Del estudiante **Walter Omar Marroquín Raxón**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador del Área de Materiales de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, julio de 2015.

Ref.E.I.M.262.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales del trabajo de graduación titulado: **PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA EN ELEMENTOS METÁLICOS** del Estudiante **Walter Omar Marroquín Raxón**, Carné No. **2004-13223** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

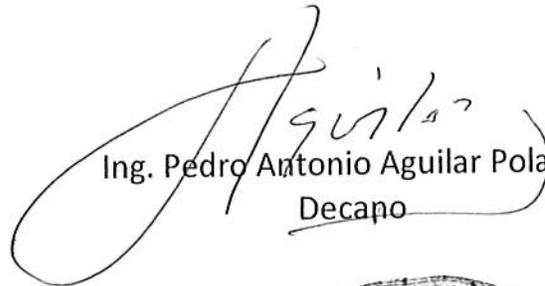


Guatemala, septiembre de 2015
/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROTECCIÓN CATÓDICA PARA PREVENIR LA CORROSIÓN ELECTRÓNICA EN ELEMENTOS METÁLICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Walter Omar Marroquín Raxón**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, septiembre de 2015



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la luz y la fuerza en todo momento, ayudándome y guiándome por el buen camino en cada etapa de mi vida.
- Virgen María** Por protegerme en toda situación e iluminar mis pensamientos para actuar bien en mi vida.
- Mi madre** Amanda Raxón Hernández de Marroquín (q. e. p. d.), porque fuiste una mujer luchadora y me brindaste tu amor, apoyo y motivación para lograr las metas que me proponga. Gracias a ti he logrado finalizar esta etapa de mi vida. Este triunfo es tuyo.
- Mi padre** Luis Felipe Marroquín Ramírez, por tu amor, apoyo, motivación e inspirarme a ser una persona de bien en la vida. Gracias a tu cariño he logrado esta realidad. Este triunfo es tuyo.
- Mis hermanos** Luis Eduardo, Byron Oswaldo, Amanda Rocío y Karen Arely Marroquín Raxón, por ser parte importante en mi vida y estar siempre juntos apoyándonos.

Mi familia

Tíos y primos, gracias por su cariño.

Mi asesor

Por su guía, las enseñanzas recibidas y atención oportuna en todo momento.

Mis amigos

Todos aquellos que participaron en esta etapa de mi vida, por su amistad, colaboración y experiencias vividas a lo largo de esta aventura.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Alma máter que me ofreció la oportunidad de formarme como profesional, orgulloso de pertenecer a esta casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos y habilidades necesarias para desempeñarme como profesional.
Escuela de Ingeniería Mecánica	Por brindarme la formación para convertirme en un profesional, al igual que los medios necesarios para concluir este proyecto.
Mis padres	Amanda Raxón de Marroquín (q. e. p. d.) y Luis Felipe Marroquín Ramírez, por su apoyo a lo largo de estos años de estudio, por alentarme a lograr este sueño y por enseñarme a ser una persona de bien en la vida.
Mis hermanos	Por estar juntos y por el apoyo recibido para finalizar este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Fundamentos de la corrosión en metales.....	1
1.1.1. Definición.....	1
1.1.2. Mecanismo básico de la corrosión.....	3
1.2. Ambientes corrosivos	8
1.2.1. Corrosión atmosférica.....	8
1.2.2. Corrosión submarina	11
1.2.3. Corrosión biológica	12
1.2.4. Corrosión terrestre.....	13
1.3. Clasificación de la corrosión	15
1.3.1. Corrosión química.....	15
1.3.2. Corrosión electroquímica.....	16
1.4. Teoría básica del mecanismo de la corrosión electroquímica	17
1.4.1. Reacción anódica	19
1.4.2. Reacción catódica	20
1.4.3. Consideraciones cinéticas	20
1.5. Tipos de corrosión electroquímica.....	22

1.5.1.	Celda galvánica.....	23
1.5.2.	Celda por concentración de oxígeno.....	25
1.5.3.	Celda por esfuerzo.....	26
1.5.4.	Celda por trabajo en frío.....	29
1.5.5.	Por corrientes vagabundas.....	30
2.	PROTECCIÓN CATÓDICA.....	33
2.1.	Criterios de protección catódica.....	36
2.2.	Requerimientos de corriente de protección.....	44
2.2.1.	Densidad de corriente mínima para la protección catódica.....	44
2.3.	Tipos de protección catódica.....	48
2.3.1.	Sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio.....	49
2.3.2.	Sistema de protección catódica por corriente impresa.....	59
2.4.	Limitaciones y efectos secundarios de la técnica de protección catódica.....	70
3.	CONTROL DE LA CORROSIÓN DE METALES EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....	73
3.1.	Efectos de la corrosión en maquinaria y estructuras metálicas.....	74
3.2.	La corrosión dentro del mantenimiento preventivo.....	75
3.2.1.	Monitoreo de la corrosión.....	76
3.2.1.1.	Técnicas de monitoreo de corrosión	78
3.2.1.1.1.	Cupones de corrosión ...	79
3.2.1.1.2.	Resistencia eléctrica	81

	3.2.1.1.3.	Resistencia de polarización lineal	82
	3.2.1.1.4.	Galvánica	83
	3.2.1.1.5.	Monitoreo especializado.....	84
	3.2.1.2.	Aplicaciones de las técnicas de monitoreo de corrosión	85
3.2.2.		Recubrimientos protectores contra la corrosión.....	88
	3.2.2.1.	Recubrimientos orgánicos, pinturas.....	89
	3.2.2.2.	Recubrimientos metálicos.....	93
	3.2.2.3.	Recubrimientos inorgánicos, no metálicos.....	96
3.2.3.		Inhibidores de corrosión	100
CONCLUSIONES			103
RECOMENDACIONES			105
BIBLIOGRAFÍA.....			107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efectos de la corrosión.....	3
2.	Celda de corrosión	5
3.	Celda de corrosión electroquímica.....	18
4.	Corrosión galvánica.....	24
5.	Esquema de corrosión por concentración de oxígeno	26
6.	Corrosión por esfuerzo de tensión	27
7.	Corrosión por esfuerzo de fatiga	28
8.	Corrosión por corrientes vagabundas	31
9.	Circuito de protección catódica	34
10.	Diagrama de polarización en la protección catódica	35
11.	Diagrama de Pourbaix, con los tres tipos fundamentales de líneas que lo constituyen	37
12.	Diagramas simples de Pourbaix, a) para el cinc y b) para el hierro; en agua a 25 °C	39
13.	Diagrama potencial-pH para el hierro (Fe).....	40
14.	Realización práctica de medida de potencial de una tubería con un electrodo de referencia (Cu/CuSO ₄ sat.).....	42
15.	Protección catódica a) ánodos de sacrificio a una tubería, b) corriente impresa a un tanque.....	49
16.	Mecanismo de protección catódica por ánodos de sacrificio	50
17.	Tubería protegida catódicamente por ánodos de sacrificio	58
18.	Tubería protegida catódicamente por corriente impresa.....	60

TABLAS

I.	Serie galvánica en agua de mar de algunos metales y aleaciones de uso frecuente	7
II.	Electrodos de referencia utilizados en la determinación experimental del potencial de protección.....	43
III.	Potencial de protecciones obtenidas de manera experimental	44
IV.	Densidades de corriente de protección para el acero.....	45
V.	Valores electroquímicos de los ánodos mas utilizados.....	56
VI.	Características de los ánodos empleados en la protección catódica por corriente impresa	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HCl	Ácido clorhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₂ SO ₃	Ácido sulfuroso
H ₂ O	Agua
NH ₃	Amonio
Fe ₂ OH ⁻	Anhídrido ferroso
cm	Centímetro
NO ₂	Cloruro de nitrógeno
CO ₂	Dióxido de carbono
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
E	Electrón
°C	Grado centígrado
H	Hidrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
Fe	Hierro
Zn ²⁺	Ion de zinc
Fe ²⁺	Ion férrico
H ⁺	Ion hidrógeno
OH ⁻	Ion hidroxilo
Kg	Kilogramo
mm	Milímetro
H ₂	Molécula de hidrógeno
O ₂	Molécula de oxígeno

FeO	Óxido de hierro
ZnO	Óxido de zinc
Fe₂O₃	Óxido férrico
ppm	Partes por millón
SO₄	Sulfato
SO₂	Sulfito
Zn	Zinc

GLOSARIO

Abrasión	Desgaste de una superficie por factores externos, como frotamiento, raspado, erosión y otras formas de contacto mecánico.
Abrasivo	Cuerpo duro que se usa, pulverizado o aglomerado, para pulimentar.
Acabado	Término genérico usado en pinturas, normalmente expresa la capa final de recubrimiento aplicado a un objeto.
Adhesión	Capacidad de un recubrimiento de unirse y permanecer finido a un al sustrato.
Aglutinante	De aglutinar, unir íntimamente dos cosas.
Aleación	Unión de dos metales por medio de la fusión.
Ánodo	Polo o electrodo positivo al que se dirige el anión o ion con carga negativa.
Anticorrosivo	Es el recubrimiento específicamente formulado para proteger un metal de la corrosión.

ASTM	Es la organización norteamericana encargada de fijar las normas en distintos campos industriales, reconocida a nivel mundial, las letras corresponden a las iniciales en inglés American Society for Testing and Materials.
Bituminoso	Que tiene betún.
Blanqueamiento	Fenómeno de aparición de manchas de color más claro que el contexto y con pérdida de brillo, ocasionado por la evaporación de solventes.
Catalizador	Acción que ejercen ciertos cuerpos en las reacciones químicas de otros sin sufrir ellos mismos modificaciones.
Cátodo	Polo negativo de un aparato eléctrico, es el electrodo de menor potencial y por el que pasa la energía eléctrica.
Catión	Ion, sea átomo o molécula con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.
Colorante	Sustancia que imparte color a un recubrimiento, se distingue de un pigmento en que es totalmente soluble.
Cubrimiento	Capacidad de tapar, encubrir u opacar una superficie.

Disolvente	Dícese del líquido que disuelve, es decir divide las moléculas de un sólido.
Dureza	Habilidad de una capa de pintura de resistir el rayado, cortaduras o penetración por un objeto duro.
Electrodo	Extremidad de cada uno de los conductores fijados en los polos de un generador eléctrico.
Electrolito	Medio que facilita la conducción eléctrica.
Electromotriz	Que desarrolla electricidad bajo la influencia de una acción química o mecánica.
Electroquímica	Parte de la química que estudia los fenómenos en que desempeña papel preponderante la electricidad.
Esmalte	Pintura de aceite de alta calidad, formulada generalmente a base de resinas sintéticas medias o modificadas. Una característica del esmalte es su alto brillo.
Fem	Fuerza electromotriz.
Flexibilidad	Capacidad de una capa de pintura de resistir deformaciones o movimientos del sustrato, sin deteriorarse.

Ion	Un átomo o molécula que perdió su neutralidad eléctrica por que ha ganado o perdido electrones.
Inhibidor	Impiden o suspenden un proceso.
Laca	Tipo de recubrimiento de secado muy rápido y alto brillo, en donde la formación de la película se lleva a cabo por evaporación del solvente. Las lacas utilizan resinas sintéticas de tipo termoplástico, siendo las más conocidas las acrílicas y de nitrocelulosa.
Pigmento	Sustancia en forma de polvo muy fino que proporciona cubrimiento y color a la pintura, también puede tener funciones como el pigmento permanece dispersado dentro del vehículo, sin solubilizarse. (colorante).
Potencial	Estado eléctrico de un conductor respecto a otro.
Primario	Mano de fondo que está en contacto directo con el material que se pinta. Los primarios tienen buena adhesión y propiedades específicas, tales como una función anticorrosiva o de relleno. El primario debe ser protegido de la intemperie con un acabado final.
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución.

Reactivo	Toda sustancia que interactúa con otra en una reacción química que da lugar a otras sustancias de propiedades, características y conformación distinta.
Rectificador	Aparato que convierte una corriente eléctrica alterna en corriente continua.
Solución	Mezcla de dos o más componentes perfectamente homogénea.
Vehículo	La parte fluida de una pintura, compuesta por la resina o aceite y los solventes, excluyendo los pigmentos.
Viscosidad	Resistencia a fluir de un líquido, se relaciona con la consistencia o dificultad de agitar una pintura.

RESUMEN

La corrosión es el proceso mediante el cual los elementos metálicos se deterioran por la acción del medio donde se encuentran. Se necesitan varios elementos para que la corrosión ocurra, un ánodo que es la zona que sufrirá corrosión; un cátodo que es el sitio al cual llega la corriente proveniente del suelo y que también se protege de la corrosión; un medio corrosivo que es el sitio donde se encuentra el elemento metálico y finalmente, una corriente eléctrica y un conductor eléctrico que generalmente es el elemento metálico.

Se pueden encontrar diferentes tipos de corrosión, en esta clasificación están la corrosión uniforme, galvánica o localizada. Además, la corrosión también puede estar combinada con otros fenómenos, como esfuerzos mecánicos, erosión y la corrosión por bacterias.

Dentro de los métodos protectores se encuentran principalmente dos: sistemas de recubrimiento y sistemas de protección catódica, estos se complementan uno con el otro. La ingeniería en esta área ha realizado grandes avances con el propósito de disminuir los daños ocasionados por la corrosión, prolongando la vida útil de los elementos metálicos.

El objetivo de este trabajo de graduación se centra en dar a conocer que en la actualidad se está utilizando el sistema de protección catódica como medio de prevención de la corrosión, logrando preservar los elementos metálicos de los efectos de la corrosión.

En cuanto a la protección catódica, existen dos clasificaciones, la protección catódica por ánodos de sacrificio y la protección catódica por corriente impresa.

El sistema de ánodos de sacrificio es un sistema donde se protegerá la estructura sacrificando otra (los ánodos), creando una pila de corrosión donde el cátodo será la estructura protegida y el ánodo un electrodo especial enterrado a cierta distancia de la estructura en contacto con el medio corrosivo. El sistema de corriente impresa funciona bajo el mismo principio con la diferencia que la corriente de protección catódica se obtiene de una fuente externa de corriente directa.

La protección catódica incluye muchos campos; como su aplicación en barcos, tuberías enterradas y sumergidas, pozos petroleros, plataformas marinas, oleoductos, pilotes metálicos de muelles, tanques de almacenamiento de hidrocarburos, tanques de agua, intercambiadores de calor, entre otros; su campo es muy amplio, ya que casi todos los materiales sufren corrosión.

En este documento se mencionarán los métodos existentes para el control de la corrosión dentro del mantenimiento industrial, ya que actualmente existen diversos métodos para medir la corrosión, ya sea para verificar que funcione el sistema de protección o para aplicar el método que mejor se adapte a las circunstancias del elemento metálico.

OBJETIVOS

General

Proponer una guía de protección catódica para prevenir la corrosión electroquímica en elementos metálicos.

Específicos

1. Investigar sobre las técnicas modernas de control de la corrosión por protección catódica.
2. Determinar los comportamientos de los metales más utilizados en la industria, en cuanto al método idóneo de protección catódica.
3. Identificar los ánodos de sacrificio adecuados para preservar los metales de la corrosión electroquímica.
4. Especificar las características de las fuentes de corriente eléctrica directa para la protección catódica de los metales.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial ha motivado la explotación de los metales para la construcción de diferentes elementos metálicos, los cuales, por factores de diseño, el medio ambiente o temperatura a la que se encuentran, sufren de corrosión. El fenómeno de la corrosión se produce debido a que los materiales constructivos, especialmente los metales, se obtienen a partir de especies minerales estables en condiciones naturales. Una vez procesados por el hombre, tienden a estabilizarse química y energéticamente.

Por lo tanto, la corrosión es la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro y pérdida de sus propiedades tanto físicas como químicas.

La característica fundamental de este fenómeno es que solo ocurre en presencia de un ambiente corrosivo, electrolito, ocasionando regiones identificadas, llamadas anódicas y catódicas. Este mecanismo, que es analizado desde un punto de vista electroquímico, indica que el metal tiende a retornar a su estado primitivo o de mínima energía, siendo la corrosión, por lo tanto, la causante de grandes pérdidas económicas, debido a elementos metálicos dañados.

Estas pérdidas no solo producen la necesidad de sustituir los elementos corroídos, sino también otros efectos derivados como interrupción en el funcionamiento de plantas industriales, contaminación de productos, daño de equipos adyacentes a aquel en el que ocurre la falla, problemas de seguridad como incendios, explosión, liberación de productos tóxicos, entre otros.

Por esta razón, es necesaria la oportuna utilización de una técnica de protección que permita alargar la vida útil de estos elementos metálicos, como la protección catódica. Esta es una técnica de control de la corrosión, que está siendo aplicada cada día con mayor éxito en las grandes empresas a nivel mundial.

La técnica de protección catódica se inició con la instalación de ánodos en el casco de los buques navales, por lo que su aplicación es utilizada en elementos metálicos que están en contacto con medios corrosivos (por ejemplo, suelo, agua o aire).

La protección catódica es un método electroquímico, el cual aprovecha el mismo principio electroquímico de la corrosión, transportando un gran cátodo a una estructura metálica. Para este fin será necesaria la utilización de fuentes de energía externa mediante el empleo de ánodos galvánicos, que difundan la corriente suministrada por un transformador-rectificador de corriente.

En el presente documento se pone de manifiesto, en diferentes capítulos, los fundamentos teóricos de la corrosión y los mecanismos de la corrosión electroquímica. Debido a que es de mucha importancia para el entendimiento de cómo se procede a aplicar la protección catódica, incluyendo los criterios de diseño utilizados y los diversos tipos de estructuras para los cuales se puede aplicar.

1. MARCO TEÓRICO

Tradicionalmente, se ha descrito la corrosión de los metales como la reacción química o electroquímica de los elementos metálicos con el ambiente, el cual se incluye la atmósfera, los fluidos, la temperatura, la presión y los esfuerzos.

En la refinación de metales, se ha visto que la mayor parte de los metales se encuentran en la naturaleza en su estado oxidado, salvo quizá, el oro y los metales nobles, como el platino. Así pues, el estado estable de un metal corresponde a un estado oxidado. Sin algún tipo de protección, la mayor parte de los metales se corroen. Por consiguiente, es necesario aprender a controlar la corrosión de los metales.

1.1. Fundamentos de la corrosión en metales

A continuación se detallarán los fundamentos de la corrosión en los metales.

1.1.1. Definición

La corrosión en los metales puede definirse como una tendencia espontánea y natural a recuperar el estado oxidado en el que se encuentran en la naturaleza, con desprendimiento de energía. Se entiende, por lo tanto, que se trata del desgaste de un material a consecuencia de un ataque electroquímico de su entorno, provocando el deterioro de sus propiedades. A causa de este fenómeno, los metales pierden su estado elemental y retornan al estado combinado de origen.

De manera más general, puede entenderse como la tendencia usual que tienen los metales de buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química, la velocidad a la que tiene lugar dependerá, en alguna medida, de la temperatura, de la concentración de reactivos en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros factores, como el esfuerzo mecánico y la erosión también pueden contribuir al deterioro.

La mayor parte de la corrosión de los elementos metálicos concierne al ataque químico de los metales, el cual ocurre principalmente por ataque electroquímico, es decir, una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra, ya que los metales tienen electrones libres que son capaces de establecer pilas electroquímicas dentro de los mismos.

Las reacciones electroquímicas exigen un electrolito conductor, cuyo soporte es habitualmente el agua, de aquí que en ocasiones se le denomine corrosión acuosa. Muchos metales sufren corrosión en mayor o menor grado por el agua y la atmósfera. Los metales también pueden ser corroídos por ataque químico directo procedente de soluciones químicas.

Otro tipo de degradación de los metales que sucede por reacción química con el medio, es lo que se conoce como corrosión seca, que constituye en ocasiones una degradación importante de los metales, especialmente cuando va acompañado de altas temperaturas.

Materiales no metálicos como los cerámicos y los polímeros no sufren el ataque electroquímico, pero pueden ser deteriorados por ataques químicos directos. Por ejemplo, los materiales cerámicos refractarios pueden ser atacados químicamente a altas temperaturas por las sales fundidas. Los

polímeros orgánicos pueden ser deteriorados por el ataque químico de disolventes orgánicos.

La reacción que se produce en el fenómeno de la corrosión depende de la naturaleza química del entorno y de la concentración efectiva de las especies reactivas. El efecto de la corrosión es una alteración de las propiedades de los materiales afectados, que puede acompañarse de una pérdida de material.

Figura 1. **Efectos de la corrosión**



Fuente: *Medidas de protección contra la corrosión.*

<http://medidasdedefensacontralacorrosion.blogspot.com/2012/06/medidas-de-proteccion-contra-la.html>. Consulta: 16 de julio de 2014.

1.1.2. Mecanismo básico de la corrosión

Lo que provoca la corrosión es un flujo eléctrico masivo generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando una especie química cede y migran electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la

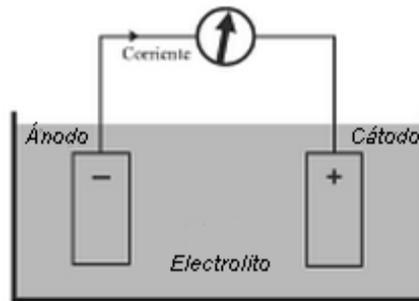
oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se verifica la reducción.

Las reacciones de corrosión electroquímica involucran reacciones de oxidación que producen electrones y reacciones de reducción que los consumen. Ambas reacciones de oxidación y reducción deben ocurrir al mismo tiempo y a la misma velocidad global, para evitar una concentración de carga eléctrica en el metal.

Para que un proceso de corrosión se presente, son necesarias algunas condiciones, tales como:

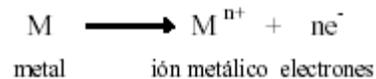
- Un ánodo, que es donde se generan electrones y es donde ocurre la corrosión, y un cátodo, que recibe electrones y está protegido de la corrosión.
- Una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, la cual puede deberse a: variación en la composición química en diferentes puntos sobre la superficie del metal, imperfecciones superficiales del metal, tensiones residuales como resultado de los procesos de fabricación o contacto entre metales diferentes.
- Una conexión eléctrica entre el cátodo y el ánodo, generalmente están en la misma estructura.
- El ánodo y el cátodo deben estar en contacto con un electrolito, la humedad atmosférica o del suelo satisfacen esta condición.

Figura 2. **Celda de corrosión**



Fuente: BILURBINA ALTER, Luis. *Corrosión y protección*. p. 22.

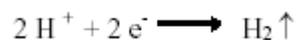
Una vez alcanzadas estas condiciones en el ánodo, el metal se corroe o disuelve, esto puede visualizarse como el paso del metal a un ión metálico o como la pérdida de uno o más electrones del átomo metálico, lo que eléctricamente puede escribirse como:



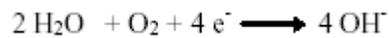
Como etapa posterior a esta reacción, el ion metálico pasa al estado mineral de menor potencial, generalmente a óxidos.

En el cátodo el metal no reacciona, pero sobre su superficie se presentan reacciones de reducción, que dependiendo del electrolito serán:

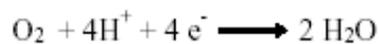
- De desprendimiento de hidrógeno en medios acuosos:



- De reducción del oxígeno si este está presente en medios neutros o alcalinos:



- De reducción del oxígeno si está presente en medios ácidos y aireados, la cual puede darse en forma simultánea con el desprendimiento de hidrógeno:



La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es la diferencia algebraica de sus potenciales individuales en relación con un mismo electrodo de referencia.

Como normalmente no se emplean metales puros sino aleaciones, es fundamental conocer el comportamiento electroquímico de dichos materiales. Por ello, se han desarrollado las series galvánicas, prácticas en diversos electrolitos, donde los metales con menores potenciales se denominan activos o anódicos y se oxidan cuando se encuentran unidos a metales de mayor potencial.

La velocidad de disolución de un metal es directamente proporcional a la cantidad de corriente que fluye y a la cantidad total de metal disuelto.

La velocidad de la corrosión disminuye como resultado de los efectos de los productos de las reacciones anódicas y catódicas; es posible medir estos efectos en términos de potencial del metal, sobre el cual están ocurriendo las reacciones, de tal forma que el potencial de la superficie del metal catódico

cambia a un valor menos noble y, de igual, forma en la superficie anódica se observa que el cambio de potencial es en sentido contrario, aumentando a un valor mas noble. Esta variación en el potencial de los electrodos, cuando circula corriente por ellos, se conoce como polarización.

Tabla I. **Serie galvánica en agua de mar de algunos metales y aleaciones de uso frecuente**

Platino	
Oro	
Grafito	
Titanio	
Plata	
Acero inoxidable (pasivo) 18-8, 3%Mo	
Inconel (pasivo) (76%Ni-16%Cr-7%Fe)	
Níquel (pasivo)	↑
Bronce	
Cobre	
Latón rojo	
Bronce al aluminio	
Latón amarillo	
Inconel (activo) (76%Ni-16%Cr-7%Cr)	
Níquel (activo)	
Bronce al manganeso	
Estaño	
Plomo	
Acero inoxidable 18-8, 3%Mo (activo)	
Soldadura 50-50 plomo-estaño	
Acero inoxidable 13%Cr	
Fundición	
Hierro forjado	
Hierro dulce	
Aleaciones de aluminio	
Cadmio	
Zinc	
Magnesio y aleaciones de magnesio	↓

Fuente: GÓMEZ DE LEÓN HIJES, Félix. *Manual básico de corrosión para ingenieros*. p. 23.

1.2. Ambientes corrosivos

Uno de los factores que limitan la vida de los elementos metálicas en servicio es el ataque fisicoquímico que sufren por el ambiente en que se encuentran. El deterioro de los elementos metálicos por exposición a ambientes corrosivos pueden ser debidos a:

- Corrosión por el ambiente atmosférico
- Corrosión por el ambiente submarino
- Corrosión por el ambiente biológico
- Corrosión por el ambiente terrestre

1.2.1. Corrosión atmosférica

Más del 50 % de las pérdidas totales por corrosión se deben a la corrosión por el ambiente atmosférico. En estas condiciones, una parte importante del proceso de corrosión se debe a factores que influyen en la velocidad de la corrosión como el aire, la condensación de humedad, la presencia de gases y la presencia de polvo.

Los dos componentes básicos del aire son el nitrógeno, con 78 %, y el oxígeno, con 21 %, ambos tienen influencia sobre los elementos metálicos. El nitrógeno apenas es activo, pero el oxígeno, es el responsable máximo de casi todos los procesos de oxidación y corrosión que se dan en los elementos metálicos expuestos a su acción. Dependiendo de la forma de actuar, el oxígeno puede hacerlo:

- En ambiente seco y cálido, así se provoca la oxidación
- En ambiente húmedo se origina la corrosión

La condensación de humedad se debe principalmente a los cambios periódicos de temperatura del aire. No obstante, también puede producirse en ambientes no saturados, donde teóricamente no es posible la condensación por cambio térmico, pero donde sí puede producirse por condensación capilar o condensación química.

La condensación capilar se produce sobre superficies rugosas, porosas o donde se ha depositado polvo. La condensación química se debe a las propiedades higroscópicas de algunos de los productos de corrosión o de determinados depósitos contaminantes. En estas condiciones, y siempre que exista humedad, el metal se corroe según el proceso catódico de reducción de oxígeno, salvo que exista un caso de alto grado de contaminación por productos ácidos.

La corrosión atmosférica, como proceso electroquímico que es, también tiene al cloruro sódico como principal agente corrosivo, siguiéndole después a cierta distancia, el dióxido de azufre. El cloruro sódico se encuentra en suspensión en el aire procedente del mar, aumentando su concentración según la cercanía al litoral marino.

Existe la referencia de que a medida que se aproxima a una costa marina, el aire se va cargando de sales de cloruros, creciendo la velocidad de corrosión, hasta el punto de que a 25 m del mar puede llegar a ser 12 veces mayor que a 250 m. En la atmósfera urbana también puede formarse ácido clorhídrico (HCl), por combustión de los cloruros que contiene el carbón y de algunos plásticos.

En las zonas industriales se encuentran cantidades abundantes de dióxido de azufre, que se originan al quemar combustibles que contienen azufre, como el: carbón, *fuel-oil* o gasolina. Además, con la presencia de oxígeno y humedad,

y por intervención de la radiación solar, el dióxido de azufre se transforma en ácido sulfúrico (reacción que es catalizada por el hierro), siendo así como ataca a los elementos metálicos. Los óxidos de nitrógeno son otro contaminante habitual de la atmósfera, procedente fundamentalmente de la combustión de los motores de automóviles.

Otro componente atmosférico existente es el polvo. Está compuesto generalmente por partículas de carbón muy fino que proceden de combustiones incompletas. En sí mismo son partículas inertes, pero con la propiedad de ser higroscópicos, por lo que pueden atraer humedad y provocar procesos de corrosión. El polvo es mucho más abundante en las zonas urbanas que en las rurales.

La lluvia también proporciona el agua necesaria para originar un proceso de corrosión electroquímico, pero, además, al lavar la atmósfera arrastra los contaminantes formados (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl y NH_3) que, al ser de pH predominantemente ácido, dan lugar a la lluvia ácida. De este modo, la lluvia, ya de por sí con un pH igual a 5,6, por efecto del equilibrio del dióxido de carbono y los ácidos carbónicos, puede bajar su pH hasta valores extremos de 3,8 y favorecer el proceso de corrosión.

No obstante, siempre habrá que tener en cuenta los distintos factores que intervienen en cada caso en particular. Por ejemplo, en zonas muy contaminadas, la lluvia intensa resulta ser menos agresiva que el rocío o la niebla. Igualmente, las superficies metálicas situadas en presencia de humedad, pero fuera del alcance de la lluvia se corroen con más rapidez que las que están expuestas directamente a la lluvia. Una explicación sería que el agua de lluvia lava y disuelve el posible ácido sulfúrico absorbido por la superficie metálica, con lo que la corrosión se hace menor.

La atmósfera puede variar mucho de unas zonas a otras, de tal forma que un metal puede ser resistente en una determinada atmósfera y corroerse fácilmente en otra distinta.

En ambientes interiores, la corrosión atmosférica también se modifica significativamente. En atmósferas interiores, la velocidad de corrosión puede ser de 100 a 2 000 veces menor que en atmósferas exteriores. En estos ambientes, disminuyen considerablemente los cambios térmicos, y además, el efecto de la calefacción o del aire acondicionado, hacen que la humedad relativa rara vez supere el 70 %.

Por su parte, la concentración de dióxido de azufre disminuye aproximadamente un 30 % de su concentración exterior. El resto de contaminantes disminuyen también de forma aproximada entre un 20–50 %.

1.2.2. Corrosión submarina

La corrosión de los metales por ambientes submarinos se debe a la presencia del oxígeno y cloro disueltos. Las variables más importantes que afectan a la corrosión por el agua de mar son: la velocidad del agua, la temperatura y el contenido de oxígeno. No se conoce con exactitud la existencia de productos intermedios inestables y de corta duración que expliquen exactamente el mecanismo completo de la corrosión submarina.

Por un lado, en 1982, North plantea que la reacción catódica predominante en la corrosión de los metales en ambiente submarino es la del desprendimiento de hidrógeno, favorecida por las bacterias sulforreductoras, y que esta cesa completamente en pH básico. Por el contrario, en 1985, Turgoose señala que la reacción catódica es la de desprendimiento de oxígeno.

En cualquier caso, ambas reacciones catódicas aumentan localmente el pH de las zonas catódicas, bien por producción de aniones de hidróxido (OH^-) o bien por la disminución de cationes de hidrógeno (H^+). En las zonas anódicas el pH disminuye por hidrólisis del ion ferroso. Por lo tanto, la corrosión submarina, y en general, cualquier proceso de corrosión se interrumpe si el pH es básico, esta condición es básica para la conservación y tratamiento de los metales.

En conclusión, la corrosión submarina aumenta con el contenido de oxígeno, la velocidad de corrosión es proporcional al contenido de oxígeno y con el aumento de la temperatura.

1.2.3. Corrosión biológica

Es característica en los ambientes donde no existe oxígeno y en donde hay presencia de organismos vivos en el medio, en donde intervienen bacterias, hongos o microalgas, con capacidad de reducción de sulfatos a sulfuros, formando los correspondientes sulfuros metálicos. Como referencia, cabe mencionar que en el agua de mar cerca del 60 % de la corrosión de los metales es de origen biológico.

La importancia de la corrosión biológica es considerable, habiéndose estimado que aproximadamente en el 50 % de los casos de corrosión en estructuras enterradas han intervenido de forma primordial los microorganismos presentes en el medio. Como consecuencia de los procesos biológicos se originan numerosos productos: dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O), dihidrógeno (H_2), dinitrógeno (N_2), amoníaco, agua oxigenada y azufre, también productos ácidos o alcalinos. Todas estas sustancias se acumulan en el medio, modificando de forma continua su composición.

No obstante, en un medio anaeróbico por sí solo no se produce corrosión, si no se dan las siguientes condiciones: ausencia de oxígeno, presencia de sulfatos, presencia y restos orgánicos, pH favorable (5-9). De esta forma, en un medio anaeróbico el pH del medio se transforma ácido, y en los metales, la semireacción de reducción catódica del oxígeno, es reemplazada por la del hidrógeno.

La degradación de los metales en un medio aeróbico se da cuando las bacterias utilizan el hidrógeno desprendido durante la corrosión de los metales para reducir sulfatos en sulfuros. Este consumo del hidrógeno despolariza las zonas catódicas, permitiendo avanzar el proceso de corrosión.

En determinados casos, cuando se dan condiciones alternas aeróbicas y anaeróbicas, la corrosión biológica puede acelerarse extraordinariamente. Es el caso, por ejemplo, de un entorno terrestre en donde sube y desciende repetidamente el nivel de la capa de agua freática.

1.2.4. Corrosión terrestre

Probablemente el suelo es el medio corrosivo más complejo que existe. La corrosión es muy variable, pudiendo ser casi despreciable en suelos porosos y secos, o ser muy importante en suelos húmedos con gran concentración salina y presencia de actividad bacteriana.

Se trata de un entorno intermedio entre el atmosférico y el submarino. Entre ambos extremos caben infinitos casos intermedios. El suelo constituye un sistema capilar y poroso, cuyos poros están llenos de aire y humedad. El suelo, con sus heterogeneidades, y el metal, con sus imperfecciones superficiales, originan sobre la superficie metálica zonas anódicas y catódicas.

El suelo que está en contacto con el material metálico actúa como electrolito, debido a la humedad y a las sales solubles que contiene. La corrosión que se produce es de tipo electroquímico y da lugar a toda la variada morfología de la corrosión electroquímica.

La mayor o menor corrosividad de un suelo depende de muchas variables, muchas de ellas interrelacionadas entre sí: humedad, porosidad, pH y salinidad.

En un suelo seco, la corrosión es despreciable, pues al no haber humedad no existe electrólito y se imposibilita el contacto eléctrico. En el extremo contrario, en un suelo saturado de agua, la corrosión, aunque mayor, también resulta escasa, ya que el agua dificulta el libre acceso del oxígeno hasta el metal, entorpeciendo la semireacción del proceso de corrosión. Es en los suelos con grado intermedio o alternativo de humedad donde se dan los valores más altos de corrosión.

La porosidad de un suelo depende de su contenido en arena, grava y arcilla. Esta controla el acceso de oxígeno y, por lo tanto, incide directamente en la semireacción del proceso catódico.

El pH de un suelo depende principalmente de su composición, pero también pueden intervenir la presencia de materia orgánica o la contaminación por el hombre. En suelos muy alcalinos, que son zonas muy calizas, un pH superior a 8,5 puede favorecer la conservación de metales como el hierro. Por el contrario, terrenos graníticos de pH más ácidos, favorecen la corrosión.

1.3. Clasificación de la corrosión

Se ha mencionado que se conoce el mecanismo general que explica el proceso de la corrosión, pero este es un fenómeno muy complejo, sin embargo, se admite que la corrosión se produce por dos clases de acciones fundamentales que son:

- Química
- Electroquímica

Mecanismos generales que pueden predominar más en un determinado entorno que en otro, pero que nunca ocurren de forma única y totalmente independientes. También se entremezclan para dar casos característicos de corrosión, como es el caso de la corrosión atmosférica o la corrosión biológica.

1.3.1. Corrosión química

También denominada corrosión seca, es la que se produce en ausencia de electrólito, se da por reacción química directa de gases secos, como pueden ser el oxígeno y el anhídrido sulfuroso.

La corrosión química produce un tipo de corrosión externa uniforme en su extensión. Es el caso de los óxidos y de los sulfuros. Este tipo de corrosión a veces se denomina oxidación, pero en realidad el término oxidación se debe reservar cuando el gas seco es el oxígeno del aire.

La corrosión química tiene lugar preferentemente en espacios abiertos contribuyendo a los procesos de corrosión que tienen lugar en un ambiente atmosférico. El proceso de la corrosión química se realiza en la interface metal-

medio corrosivo, y en ella intervienen factores como la temperatura, presión o concentración del agente corrosivo.

1.3.2. Corrosión electroquímica

También denominada corrosión húmeda, es la corrosión más común de ataque de los metales, y ocurre cuando los átomos del metal pierden electrones y se convierten en iones. Conforme se consume gradualmente el metal se forma un subproducto de este proceso.

La corrosión electroquímica se origina por la presencia de pilas electroquímicas en las que el metal actúa como ánodo, cede electrones, y los átomos del metal pasan a ser iones positivos o cationes, y por lo tanto se disuelve. Este tipo de corrosión exige la presencia de ambientes acuosos y, en general, con medios de conductividad electrolítica. Es decir, ocurre cuando los átomos de metal pierden electrones y se convierten en iones.

Un ejemplo de corrosión electroquímica es el que se presenta en tuberías de acero, con agujeros con herrumbre como subproducto. Aunque en ocasiones estas celdas pueden ser de utilidad cuando intencionalmente se crea un circuito eléctrico para efectuar electrodeposición.

En el caso de la oxidación directa, toda la superficie metálica es afectada prácticamente por igual. En cambio, en las piezas que sufren corrosión electroquímica, solamente son afectadas las áreas anódicas, pero no las catódicas.

La corrosión electroquímica se caracteriza por producirse casi siempre en una forma más pronunciada en unas zonas que en otras, siendo su forma más

característica de ponerse de manifiesto con la aparición de picaduras o corrosión intergranular, que ocasiona graves problemas técnicos, muchas veces de difícil resolución.

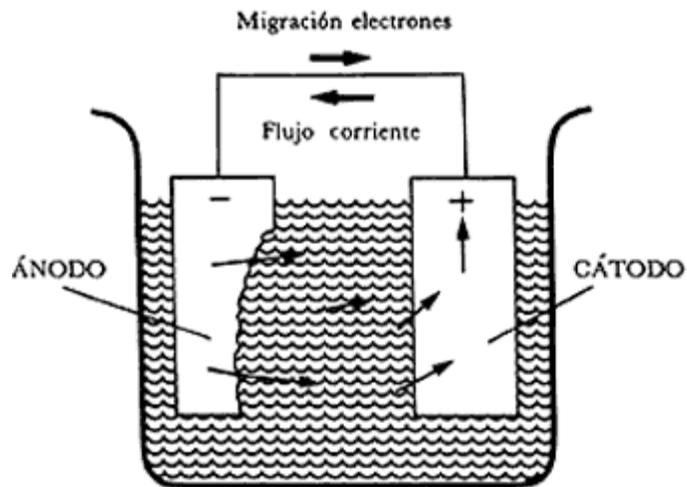
La corrosión electroquímica es la corrosión predominante en un entorno arqueológico, y por ello se ampliará acerca de su mecanismo.

1.4. Teoría básica del mecanismo de la corrosión electroquímica

Se dice teoría porque, aunque son muchos los estudios relacionados con el tema y se conocen con exactitud los productos que resultan de la corrosión, aún quedan por determinar con exactitud las etapas intermedias que ocurren durante las múltiples circunstancias en que puede producirse la corrosión.

Cuando a través de un medio líquido y conductor entran en contacto dos metales con diferente potencial electroquímico, ambos tenderán a ceder sus electrones para transformarse en catión y disolverse, pero en la práctica solo lo hará aquel que tenga mayor potencial electroquímico. Este contacto eléctrico se produce por medio de conductor eléctrico, en este caso un electrolito. Un medio marino o terrestre constituye en la práctica un electrolito y por lo tanto posibilita una corrosión de tipo electroquímica.

Figura 3. **Celda de corrosión electroquímica**



Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_7.html. Consulta:
16 de julio de 2014.

El conjunto de los dos metales y la disolución conductora constituyen lo que se denomina par galvánico o pila electrolítica. Químicamente se produce una reacción de oxidación-reducción compuesta de un proceso catódico de reducción y otro anódico de oxidación, en donde el intercambio electrónico permite a los átomos de los metales adquirir configuraciones electrónicas más estables.

Aunque independientes, estos dos procesos de oxidación y reducción deben ocurrir de forma simultánea, pues el número de electrones totales siempre ha de permanecer constante.

Según sea el potencial del metal, el pH del medio y las sustancias químicas presentes pueden producirse numerosas reacciones químicas. Cada

reacción se produce a un potencial determinado y en función de los valores termodinámicos de reactivos y productos. No obstante, del resultado de estas reacciones caben tres posibilidades:

- Inmunidad del metal: no hay corrosión.
- Corrosión.
- Pasivación: formación de un producto de corrosión estable y que tiende a ralentizar la corrosión.

Para el caso concreto de un objeto de hierro, al poseer un potencial electroquímico relativamente alto, el proceso de corrosión ocurrirá de forma más rápida comparado con otros objetos elaborados con metales más estables como bronce o plata. Si, además, este objeto de hierro es de procedencia arqueológica se iniciará un proceso de corrosión electroquímico desde el momento en que esté en contacto con tierra o mar.

1.4.1. Reacción anódica

El proceso anódico de la corrosión consiste siempre en la semireacción de oxidación del propio metal, por medio del cual determinadas partes del metal forman iones que pasan a solución acuosa y los electrones sobrantes permanecen en el núcleo metálico.

Las regiones locales en la superficie de los metales donde la reacción de oxidación tiene lugar reciben el nombre de ánodos locales. En la reacción anódica, se producen electrones, los cuales permanecen en el metal y los átomos del metal forman cationes.

1.4.2. Reacción catódica

El proceso catódico es una reacción de reducción en la cual un metal o un no metal van reduciendo su carga de valencia. Las regiones locales en la superficie del metal donde los iones metálicos o no metálicos van reduciendo su carga de valencia reciben el nombre de cátodos locales. En la reacción catódica hay un consumo de electrones.

1.4.3. Consideraciones cinéticas

Todo el planteamiento anterior se ha realizado desde un punto de vista termodinámico, teniendo en cuenta solo la formación de aquellas especies que son más estables, pero esta predisposición natural puede ocurrir con mayor o menor velocidad, es decir, el estudio hay que completarlo desde un punto de vista cinético.

La reacción anódica del proceso de corrosión solo puede darse en la superficie del metal, por debajo de los productos de corrosión, mientras que la reacción catódica tiene lugar en el exterior, estando los electrones obligados a atravesar la alta resistencia de la capa de corrosión cuando quieren ir de las zonas anódicas a las catódicas. Este contacto eléctrico se realiza a través del electrólito donde se emplean los iones de mayor movilidad.

Aparte del movimiento iónico, existe al mismo tiempo un movimiento de reactivos y productos, desde y hacia las áreas anódica y catódica. El oxígeno debe trasladarse hacia áreas catódicas para reemplazar el oxígeno consumido, y de forma similar, los iones ferrosos deben marcharse de las zonas anódicas para que continúe la reacción.

Normalmente, estos iones ferrosos precipitan a poca distancia como producto de corrosión, formando así una barrera progresiva que acabará pasivando al metal, al disminuir la velocidad de una reacción que es viable termodinámicamente. Tiene lugar el equilibrio.

Este es el equilibrio que con el tiempo llega a alcanzar un metal arqueológico con su entorno y que se rompe bruscamente durante su excavación.

No obstante, para que se produzca esta pasivación, el producto de corrosión ha de cumplir una serie de propiedades, ser muy poco soluble, ser poco poroso, tener una densidad inferior a la del metal, tener una baja conductividad iónica y adherirse con fuerza a la superficie del metal.

Una capa de corrosión no tiene porque ser obligatoriamente pasivante, sobre todo cuando los productos de corrosión son porosos. También puede suceder que zonas de un mismo metal estén pasivadas y otras no lo estén.

También ocurre que varios factores pueden provocar el agrietamiento y ruptura de la capa pasivante, provocando la disolución posterior de estos productos de corrosión, ya sea por variación del pH, por su erosión por parte de aguas subterráneas o bien por el resultado de tensiones internas provocadas por la necesidad de espacio de nuevos productos de corrosión de menor densidad.

Todo proceso que pretenda la conservación de un metal tendrá que tener como finalidad la creación en el mínimo tiempo posible de un nuevo equilibrio. Esto se conseguirá eliminando en lo posible los distintos factores de alteración y

creando un nuevo entorno del metal, que disminuya al máximo posible la velocidad de la corrosión.

1.5. Tipos de corrosión electroquímica

La localización de las zonas anódicas y catódicas sobre la superficie del metal puede ser muy variada, dando lugar a que el proceso de corrosión ocurra de formas muy diversas.

Las zonas anódicas y catódicas no tienen porque corresponder a metales distintos sino formar parte de un mismo metal. La aparición de zonas con distinto potencial electroquímico en un mismo metal es el resultado de variaciones locales en la superficie del metal, debido a su composición no homogénea o a la falta de uniformidad en su entorno inmediato.

Un metal puro tiene un potencial electroquímico único y característico, pero, en la práctica, los objetos metálicos no son puros, por lo que varias circunstancias pueden modificar localmente su composición y su potencial, pudiendo ser impurezas, defectos en la estructura atómica, porcentaje de aleación, existencia de inclusiones o segregaciones, decoraciones, porosidades y rugosidades superficiales.

En general, la morfología de la corrosión depende de estas irregularidades de la superficie metálica o del medio. Las irregularidades provocan la aparición de diferencias de potencial en la superficie que se traducen en la formación de pilas electroquímicas.

En función de su mecanismo existen los siguientes tipos de corrosión electroquímica.

1.5.1. Celda galvánica

Aparece cuando dos metales o aleaciones distintas, en contacto, se exponen en soluciones o atmósferas agresivas. El material más electronegativo aumenta su velocidad de corrosión, mientras que en el más noble la disminuye. La reacción galvánica será tanto más intensa cuanto mayor diferencia electrónica exista entre los materiales en contacto.

En cualquier caso, hay que tener presente que no se puede anticipar con seguridad la magnitud de los efectos galvánicos exclusivamente a partir de los potenciales normales del electrodo de los diferentes metales, ya que la corriente galvánica solo depende parcialmente de la diferencia de potencial entre los dos metales, pues el recorrido de las curvas de polarización anódica y catódica condicionan la intensidad de corriente disponible y por lo tanto la velocidad de funcionamiento de la pila galvánica.

La relación entre las áreas expuestas de los dos materiales tiene normalmente un papel decisivo. Al ser la velocidad de corrosión una función de la densidad de corriente existente, una pequeña área anódica frente a una gran área catódica conducirá a una rápida corrosión de aquella. En cambio, con una relación contraria el proceso de corrosión será muy lento, al repartirse una densidad de corriente limitada a lo largo de una considerable superficie anódica.

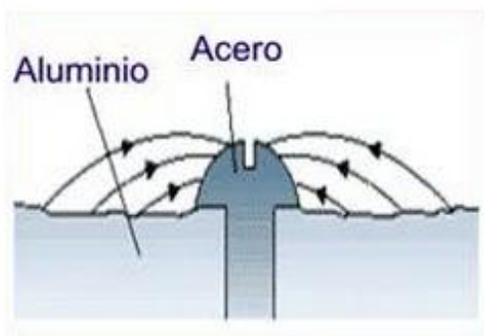
Otros factores, como la formación de una capa pasiva en la superficie metálica, pueden modificar drásticamente el proceso de ataque, al reducir el flujo de corriente, al igual que otros procesos de pasivación, como una lenta difusión del oxígeno que pueda limitar la velocidad de la reacción catódica. La posible producción catódica de hidrógeno puede, por otro lado, producir una

fragilización del material, si este es susceptible, con el consiguiente peligro de rotura de la pieza.

Como resultado del ataque de la corrosión galvánica, el elemento metálico resulta picado en zonas localizadas, quedando con grandes rugosidades, formando regiones donde queda localizado el efecto destructor, mostrando hoyos, picaduras y surcos, es difícil de prevenir y se da en la superficie de los elementos metálicos. En este caso, la capacidad de deformación del metal disminuye más rápidamente de lo que podría esperarse, por la pérdida de masa.

Para reducir este tipo de corrosión se pueden utilizar películas protectoras de óxidos, también aislando un metal de otro conociendo la serie galvánica en la que distintas aleaciones se ordenan de acuerdo con sus tendencias anódicas o catódicas en un entorno particular como agua dulce, salada, entre otros.

Figura 4. **Corrosión galvánica**



Fuente: *La maldita corrosión.*

http://www.fondear.org/infonautic/barco/Diseno_Construccion/Corrosion_Maldita/Corrosion_maldita.htm. Consulta: 10 de julio 2014.

1.5.2. Celda por concentración de oxígeno

Se pueden desarrollar pilas de concentración de oxígeno, cuando existe una diferencia de oxígeno en la superficie húmeda de un metal que puede ser oxidado.

Las pilas de concentración de oxígeno son particularmente importantes en la corrosión de metales fácilmente oxidados, como el hierro, porque no forman películas de óxido protectores.

Si se considera una pila de concentración de oxígeno formada por dos electrodos de hierro, uno en un electrolito acuoso con una baja concentración de oxígeno y otro en un electrolito con una alta concentración de oxígeno, las reacciones anódicas y catódicas para esta pila son:

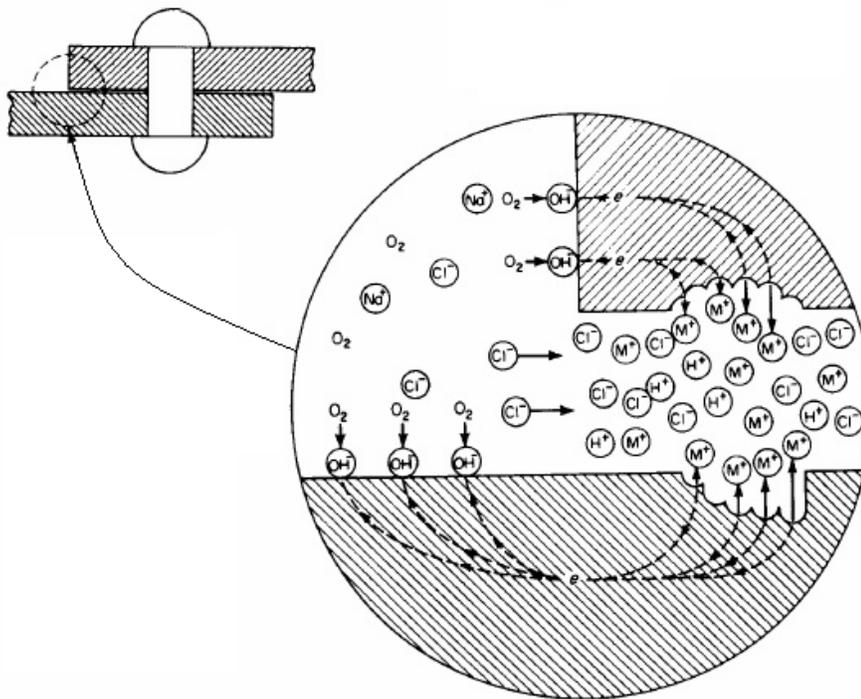
- Reacción anódica: $\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
- Reacción catódica: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{OH}^-$

¿Qué electrodo es el ánodo en esta pila? Como la reacción catódica requiere oxígeno y electrones, la concentración más alta de oxígeno se centrará en el cátodo. Asimismo, puesto que los electrones son requeridos por el cátodo, deberán ser producidos por el ánodo, que tendrá la concentración de oxígeno más baja.

Por lo tanto, y con carácter general para pilas de concentración de oxígeno, las zonas que son pobres en oxígeno serán anódicas frente a las regiones catódicas ricas en oxígeno.

En consecuencia, la corrosión se acelerará en las zonas de la superficie del metal donde el contenido de oxígeno es relativamente bajo, tal como fisuras, hendiduras y bajo las acumulaciones de depósitos en la superficie.

Figura 5. **Esquema de corrosión por concentración de oxígeno**



Fuente: FONTANA, Mars G. *Corrosion engineering*. p. 54.

1.5.3. Celda por esfuerzo

Este tipo de corrosión se presenta cuando el material está sometido a cierto esfuerzo en un ambiente corrosivo, lo que ocasiona que el material se rompa o se fracture.

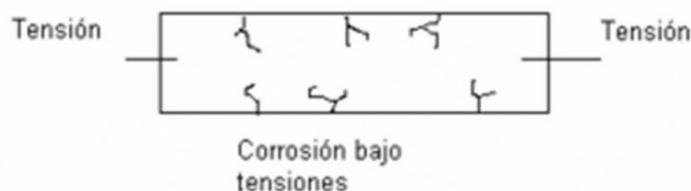
Existen dos tipos: por tensión y por fatiga. En ambos casos, el daño puede ser intergranular, entre los granos, o transgranular. Es generada por operaciones cíclicas de esfuerzos de tensión y compresión.

Una vez que aparece este tipo de corrosión las únicas formas de prevenirla es degradando los esfuerzos sobre el material, controlando las condiciones del ambiente o aplicando una protección catódica.

- Celda por esfuerzo de tensión: como en general los metales puros no son susceptibles a la corrosión por tensión en cualquier tipo de ambiente, las impurezas y los componentes de aleación son los elementos que afectan este tipo falla, debido a que la tensión tenderá a separar los granos relativamente y permitirá que más electrolito esté en contacto con ambas fases.

Por ser los bordes de grano los que se corroen, disminuirán sus propiedades mecánicas y comenzarán a deformarse plásticamente, de esta forma el material comienza a fisurarse a través de los bordes de grano y el proceso culmina en fractura del metal.

Figura 6. **Corrosión por esfuerzo de tensión**



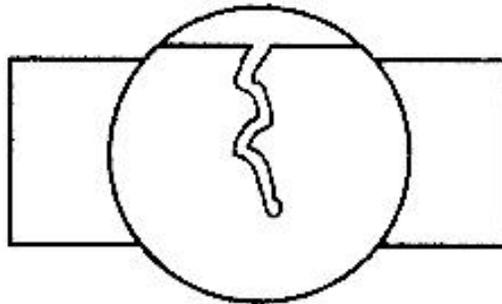
Fuente: *Corrosión localizada*. http://corrosion.mex.tl/1071435_CORROSI-N-LOCALIZADA-.html.

Consulta: 16 de julio 2014.

Pueden también presentarse casos de fallas transgranulares, que son causa de imperfecciones como dislocaciones o impurezas en el grano que generan una diferencia de potencial. La tensión actúa deformando plásticamente las regiones corroídas y favoreciendo el deslizamiento de impurezas y dislocaciones tales que al acumularse generan una mayor diferencia de potencial, siendo los planos favorecidos para la fractura, aquellos que contienen impurezas.

- Celda por esfuerzo de fatiga: se produce por la acción conjunta de la corrosión y de la tensión cíclica en el metal. En diversos ensayos de fatiga en medios corrosivos, se ha encontrado que el límite de fatiga se ve seriamente reducido respecto al de un medio no corrosivo.

Figura 7. **Corrosión por esfuerzos de fatiga**



Fuente: *Corrosión*. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>.

Consulta: 16 de julio de 2014.

Para evitar la corrosión de celda por esfuerzo, debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Si el metal se trabaja en frío, se fragilizarán los componentes de la aleación y se incrementará la posibilidad de falla frágil.
- Debido al origen intergranular debe tenerse presente el tipo de tratamiento térmico a realizar.
- Evitar que el metal posea tensiones residuales de tracción.
- Si es posible, utilizar la técnica de protección catódica, con la cual se reduce drásticamente la tasa de corrosión.

1.5.4. Celda por trabajo en frío

Cuando un metal o aleación es deformado por trabajo en frío, la dureza y el esfuerzo incrementan, pero la capacidad de seguirse deformando disminuye. Este proceso influye considerablemente en la estructura del material. La morfología del grano y la distribución de las partículas varían apreciablemente.

A medida que aumenta la deformación acumulada, los granos se hacen progresivamente más elongados y altamente distorsionados, teniendo lugar la subdivisión de los granos y produciendo numerosas bandas de deformación, las cuales ocurren a una gran variedad de ángulos, entre 20° y 40° con respecto al plano de laminación, siendo el valor promedio de aproximadamente 35°.

A escala microscópica, un gran número de heterogeneidades caracterizan el estado deformado, por ejemplo el enmarañamiento de dislocaciones, las cuales evolucionan a estructuras consistentes de celdas y subgranos a medida que aumenta la deformación, formando paredes densas de dislocaciones,

microbandas, bandas en transición, bandas de deformación y bloques de celdas.

Tanto las zonas deformadas producidas por el enmarañamiento de las dislocaciones como la alta direccionalidad en la estructura granular pueden presentar reactividades electroquímicas diferentes en ambientes agresivos, trayendo como consecuencia una disminución en las propiedades de corrosión de los metales.

En los metales con dureza series 2xxx y 7xxx, altamente deformados, la direccionalidad del grano afecta la resistencia a la corrosión bajo tensión y exfoliación. Esta dependencia ha sido interpretada con base en dos factores: el primero está relacionado al esfuerzo localizado creado por apilamiento de dislocaciones en los límites de los granos; el segundo es referido a la magnitud de la componente normal del esfuerzo aplicado en las fronteras de los granos.

1.5.5. Por corrientes vagabundas

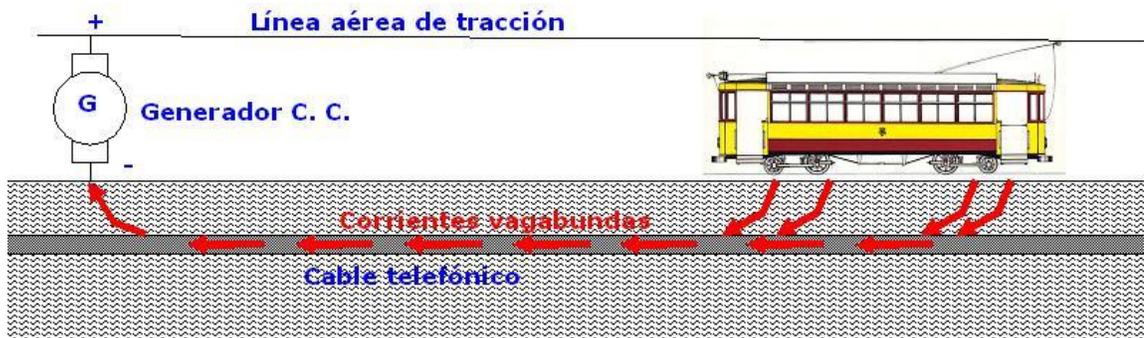
Con el término corrientes vagabundas o parásitas se designa a aquellas corrientes eléctricas que circulan en el suelo fuera de los circuitos previstos. La intensidad de estas corrientes con frecuencia es variable y depende esencialmente de la naturaleza y funcionamiento de la fuente que las emite.

La corriente eléctrica busca siempre recorridos de menor resistencia, por esta razón sigue con facilidad las canalizaciones metálicas enterradas y en particular las envolturas metálicas de los cables eléctricos y telefónicos. La corrosión se produce siempre en los lugares en donde la corriente sale de la estructura que ha recorrido, provocando una disolución anódica tanto más peligrosa cuanto más localizada esté.

Estos campos eléctricos pueden tener su origen en un conductor de corriente continua al que le falla el aislamiento, pasando la corriente al suelo y de este al elemento metálico, encontrando en esta un camino más fácil de retorno que el propio conductor.

Las fuentes de corriente continua que pueden causar problemas son los transportes electrificados tales como trenes, tranvías, metros y transportes de minas, los procesos electrolíticos industriales, equipos de soldaduras y las protecciones catódicas de terceros.

Figura 8. **Corrosión por corrientes vagabundas**



Fuente: *Corrosión por corrientes vagabundas.*

<http://plantaexternatelefonica.blogspot.com/2013/08/corrosion-por-corrientes-vagabundas.html>.

Consulta: 16 de julio de 2014.

2. PROTECCIÓN CATÓDICA

La técnica de protección catódica se aplicó por primera vez en 1824, para proteger, mediante bloques de cinc, la envoltura de cobre de los buques. La protección catódica es quizá el método más importante para conseguir el control de la corrosión, en los casos donde su aplicación es posible.

El campo de aplicación actual va desde la protección de estructuras metálicas enterradas como gasoductos, oleoductos, tanques, cables de energía y telefónicos; instalaciones marinas como cascos de buques, tuberías submarinas, boyas, pantalanés y plataformas petroleras; hasta incluso para la prevención con cierta efectividad y bajo determinadas circunstancias de fenómenos de corrosión bajo tensión y corrosión por fatiga.

La protección catódica consiste en contrarrestar las pilas de corrosión formadas por las celdas galvánicas, mediante el empleo de una corriente externa que permita un flujo iónico en el sistema.

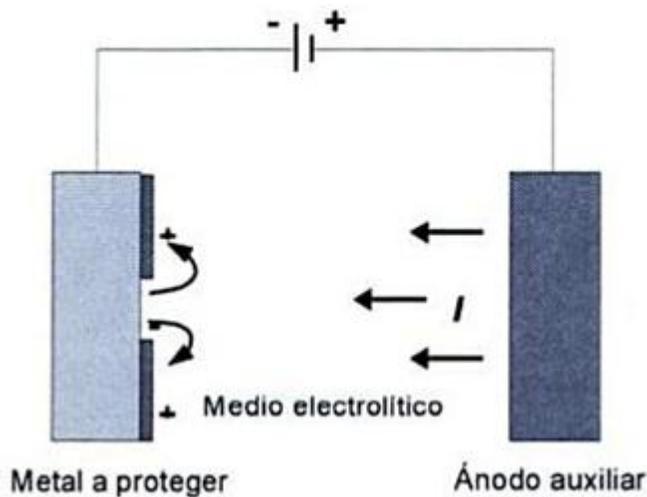
El principio básico de este método radica en alcanzar un estado de inmunidad contra la corrosión de una estructura metálica mediante la polarización catódica, que se basa en hacer que toda el área de la estructura que se requiera proteger (ya sea que se encuentre enterrada o sumergida), se convierta y actúe como un gran cátodo. Para ello, dada la reacción de oxidación:



Es preciso aportar la cantidad suficiente de carga negativa para que el equilibrio de la reacción se desplace netamente hacia la izquierda. Por lo tanto, si mediante una fuente exterior se suministra corriente eléctrica a través de un ánodo auxiliar, se conseguirá polarizar catódicamente el metal a proteger.

La corriente suministrada, partiendo del ánodo auxiliar, entra en el metal polarizando catódicamente.

Figura 9. **Circuito de protección catódica**



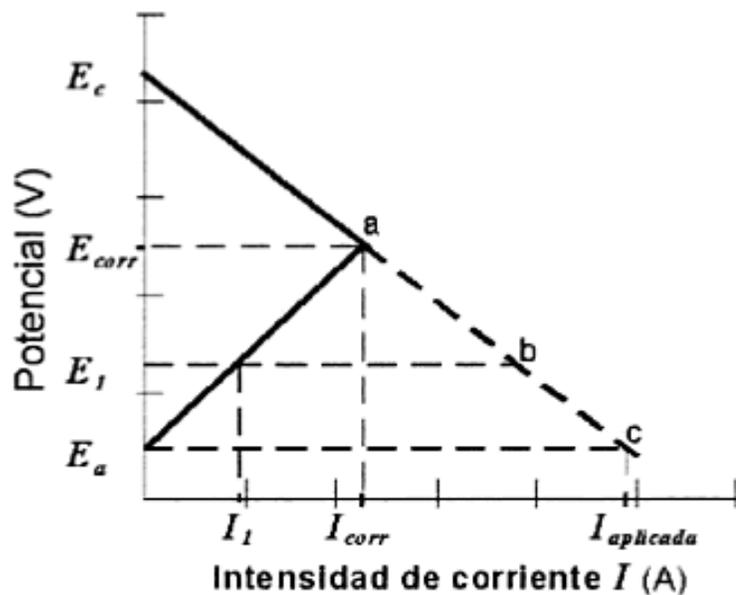
Fuente: GÓMEZ DE LEÓN HIJES, Félix. *Manual básico de corrosión para ingenieros*. p. 100.

En la figura 10 se presenta el concepto de la polarización y tanto E_c como E_a representan a los potenciales de equilibrio de las medias celdas anódica y catódica que constituyen a la reacción de corrosión. La intersección de las curvas E_c/I y E_a/I , en el punto a, proporcionan el potencial de corrosión o potencial mezclado, E_{corr} , correspondiente con I_{corr} , de la velocidad de corrosión.

La reducción en el potencial producida por la corriente catódica de magnitud I_t hasta el punto b, incrementará la velocidad del proceso catódico hasta I_b y reducirá la velocidad del proceso anódico hasta I_t .

Cuando la corriente suministrada es capaz de polarizar las áreas catódicas hasta alcanzar el valor del potencial en circuito abierto (E_a) de las áreas anódicas, entonces se consigue mantener una superficie equipotencial en todo el metal y, en consecuencia, cesa la corriente de acción local y con ello la corrosión.

Figura 10. **Diagrama de polarización en la protección catódica**



Fuente: GÓMEZ DE LEÓN HIJES, Félix. *Manual básico de corrosión para ingenieros*. p. 101.

Como se observa en la figura 10, mientras el potencial catódico alcanzado (E_t) sea distinto del potencial anódico a circuito abierto, seguirán habiendo pilas

locales de corrosión, es decir, unas zonas se comportan anódicamente respecto de otras que lo hacen catódicamente, por lo tanto, seguirá habiendo un cierto grado de corrosión.

2.1. Criterios de protección catódica

Cuando se aplica protección catódica a una estructura, es extremadamente importante saber si esta se encontrará realmente protegida contra la corrosión en toda su plenitud.

El criterio de protección se refiere exclusivamente a la aplicación de la protección catódica para eliminar o reducir, dentro de límites aceptables, la corrosión generalizada de una determinada estructura metálica.

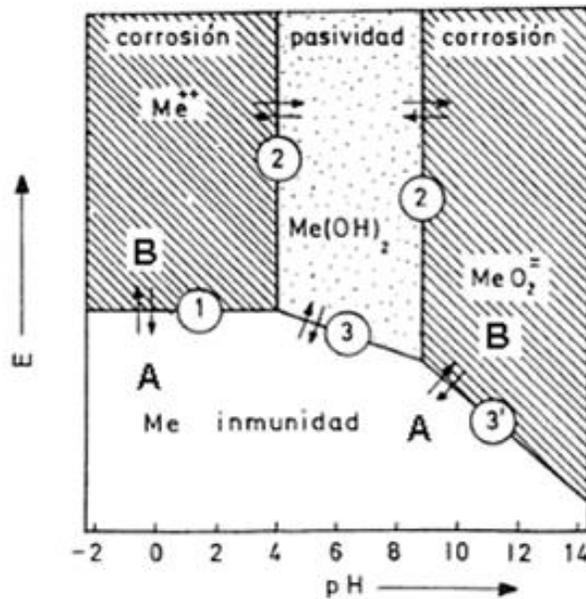
El criterio de protección fija el valor del potencial eléctrico que se debe suministrar al elemento metálico, para permanecer inmune a la corrosión.

Varios criterios pueden ser adoptados para comprobar que la estructura en mención está exenta de riesgo de corrosión.

Existen varios criterios para establecer el valor del potencial eléctrico de protección. Entre los que cuentan con mayor aceptación se hallan:

- Criterio de potencial basado en los diagramas de Pourbaix: el criterio de potencial mínimo se basa en los estudios realizados por el profesor Michael Pourbaix en 1939, quien estableció a través de un diagrama de potencial de electrodo vs. pH del medio, un potencial mínimo equivalente a -850 mv con relación al electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), observando una zona definida por la inmunidad del acero.

Figura 11. Diagrama de Pourbaix, con los tres tipos fundamentales de líneas que lo constituyen



Fuente: GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, José A. *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. p. 14.

El mecanismo de protección se basa en la polarización catódica del metal a proteger mediante la acción de una corriente continua externa, la cual lleva el potencial de la superficie del metal hasta un valor de potencial de protección, esto es, bajar el potencial del metal a proteger hasta un valor en el cual no se corroa, de acuerdo con la figura 11, es llevar el potencial del metal desde el punto B en la zona de corrosión hasta un punto A en la zona de inmunidad del diagrama de potencial-pH, comúnmente denominado diagrama de Pourbaix.

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

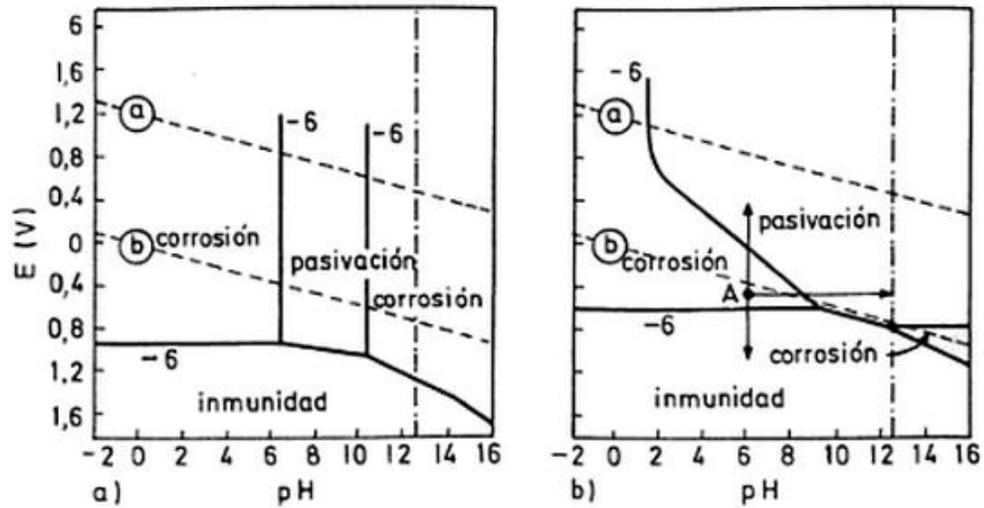
- Predecir si hay o no corrosión.
- Estimar la composición de los productos de la corrosión.
- Predecir cambios del medio ambiente que ayuden a prevenir o reducir el ataque corrosivo.

Los diagramas de Pourbaix muestran las condiciones termodinámicas de estabilidad de las distintas especies que aparecen en el medio acuoso para un pH y E determinados, lo cual permite establecer tres tipos de zonas dentro del diagrama:

- Zonas de corrosión, aquellas en que el estado estable del metal es en forma de iones o de iones complejos, por lo tanto, el metal se corroe.
- Zonas de pasividad, suponen la formación de un óxido o hidróxido que actúa como una barrera limitando el acceso de los agentes oxidantes a la superficie metálica.
- Zonas de inmunidad, donde el estado estable es el de metal no ionizado.

Actualmente se dispone de diagramas de Pourbaix para la mayoría de los metales, mostrándose en la figura 12, el diagrama para el cinc y el hierro.

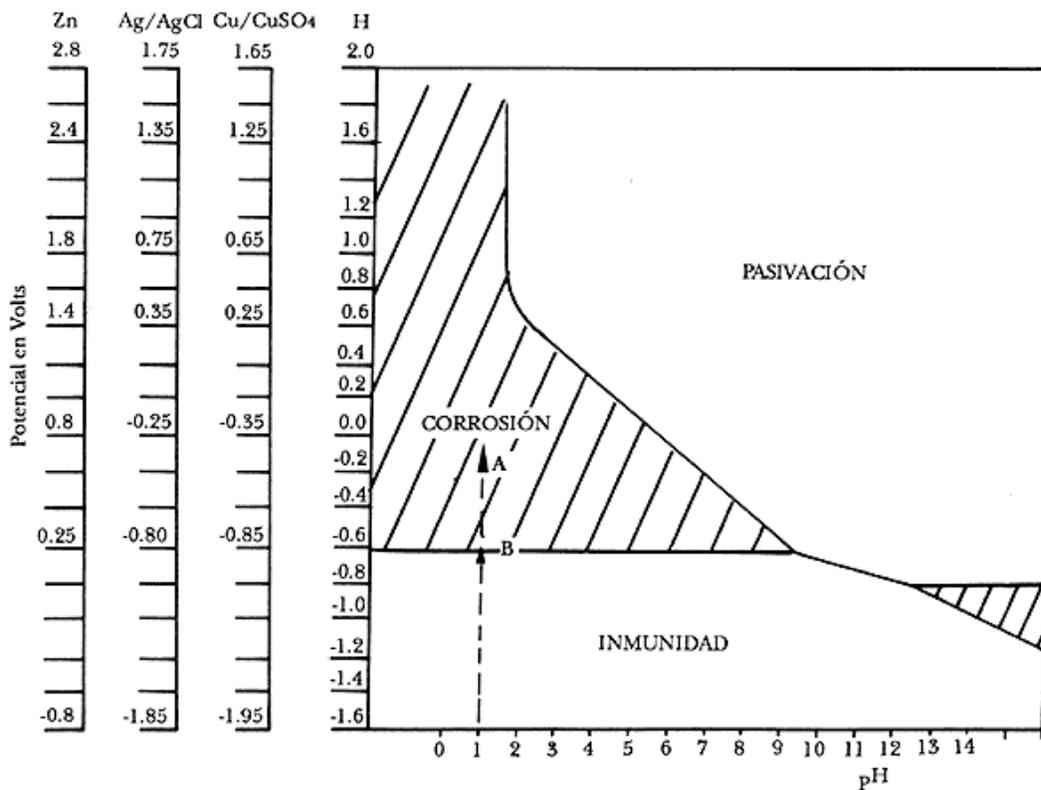
Figura 12. Diagramas simples de Pourbaix, a) para el cinc y b) para el hierro; en agua a 25 °C



Fuente: GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, José A. *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. p. 16.

Aplicando el criterio de Pourbaix, en el diagrama pH-E anterior, se deduce que, dentro de los pH habituales, se conseguiría mantener a la estructura del hierro en la zona de inmunidad si se mantiene su potencial en un valor igual o inferior a -0,6 voltios, respecto al electrodo estándar de hidrógeno. En la figura 12, se aprecia la equivalencia de este criterio expresado con referencia a otros electrodos normalmente utilizados.

Figura 13. Diagrama potencial-pH para el hierro (Fe)



Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_6.htm. Consulta:

16 de julio de 2014.

Los diagramas de Pourbaix se basan en la termodinámica, no contienen ninguna información relativa a la velocidad de las posibles reacciones, ni indican la eficacia de la película o barrera pasiva del óxido que pueda formarse. Sin olvidar estas limitaciones, los diagramas sí reflejan lo que ocurre en condiciones de equilibrio cuando se sumerge un metal en ácido, o cuando se impone cierto potencial al metal, como en la protección catódica.

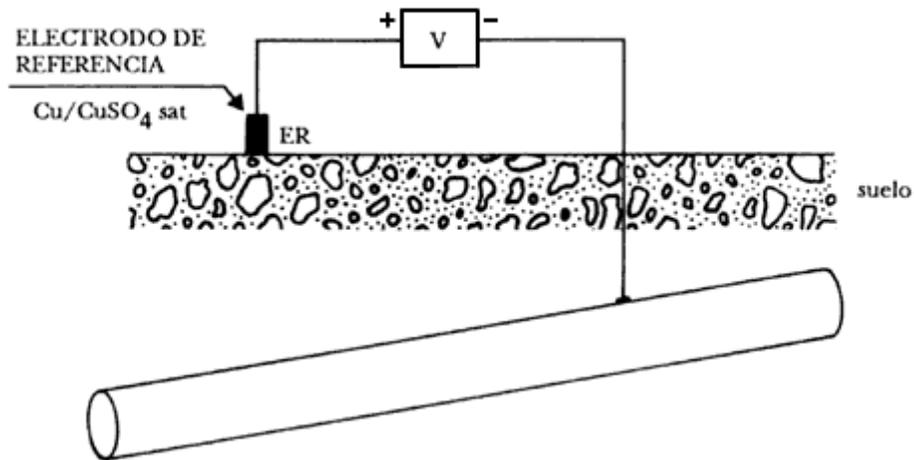
- Determinación experimental del potencial de protección: se han llevado a cabo multitud de determinaciones experimentales directas, en el laboratorio y en aplicaciones prácticas concretas, de las velocidades de corrosión de metales expuestos a medios y condiciones diversas, al imponerles diversos valores de potencial.

Cuando se trata de medir el potencial de un elemento metálico, se toma un electrodo referencia, el más común es el de cobre-sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO₄). Este electrodo consiste simplemente en una barra de cobre inmersa en una solución saturada de sulfato de cobre, introducida en un cilindro plástico con un contacto poroso en el extremo inferior, para que haga contacto por el electrólito, y la barra de cobre sobresaliendo al exterior, para conectar con el voltímetro medidor de alta resistencia o potenciómetro.

El polo positivo del aparato se une al electrodo de referencia y el negativo al elemento metálico. El valor que marque el aparato será el potencial de disolución del metal, en función del medio agresivo, suelo, agua, aire. Estas lecturas son dadas generalmente en milivoltios o en voltios.

Debido a que la tensión es realmente una diferencia de dos potenciales, el potencial, tal como es registrado, es una lectura de tensión entre la estructura investigada y un adecuado electrodo de referencia que comúnmente es una media celda de Cu/CuSO₄ ubicado en el electrólito cercano a la estructura.

Figura 14. **Realización práctica de medida de potencial de una tubería con un electrodo de referencia (Cu/CuSO₄ sat.)**



Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_9.htm. Consulta:
22 de septiembre de 2014.

Ello ha permitido estimar los potenciales mínimos para una protección adecuada, potenciales que acostumbran a diferir poco para un mismo material metálico.

Tabla II. **Electrodos de referencia utilizados en la determinación experimental del potencial de protección**

<i>Tipo de electrodo</i>	<i>Reacción electroquímica</i>	<i>Potencial a 25°C V vs. ENH</i>
Calomelanos Hg/Hg ₂ Cl ₂ , Cl ⁻	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	E = 0.276 - 0.059 log [Cl ⁻] KCL sat. E = 0.241 V coeficiente temperatura: - 0.65 mV/°C
Mercurio/sulfato mercurioso Hg/Hg ₂ SO ₄ , SO ₄ ²⁻	$\text{Hg}_2\text{SO}_4 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Hg} + \text{SO}_4^{2-}$	E = 0.6151 - 0.295 log [SO ₄ ²⁻] K ₂ SO ₄ sat. E = 0.710 V
Plata/cloruro de plata Ag/AgCl, Cl ⁻	$\text{AgCl} + 1e^- \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	E = 0.2224 - 0.0591 log [Cl ⁻] coeficiente temperatura: - 0.6mV/°C 0.1 M KCl E = 0.288 V 1 M KCl E = 0.222 V agua mar E = 0.250 V
Cobre/sulfato de cobre Cu/CuSO ₄ , Cu ²⁺	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	E = 0.340 + 0.0295 log [Cu ²⁺] CuSO ₄ sat. E = 0.318 V, coeficiente temperatura: - 0.9mV/°C
Zinc/agua de mar	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	E ≈ - 0.80 V

Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_5.htm. Consulta:

22 de septiembre de 2014.

En la tabla 3 se muestran los valores más significativos de los potenciales en voltios, para la protección catódica de diferentes metales y aleaciones en función del electrodo de referencia utilizado.

Tabla III. **Potencial de protecciones obtenidas de manera experimental**

<i>Metal o aleación</i>	<i>Suelo Cu/CuSO₄ (saturado)</i>	<i>Agua de mar Ag/AgCl/agua de mar</i>
Acero al carbón		
— condiciones normales	-850 mV	-800 mV
— condiciones anaerobias	-950 mV	-900 mV
Plomo	-600 mV	-550 mV
Cobre y sus aleaciones	-500 a -650 mV	-450 a -600 mV
Aluminio	-950 a -1200 mV	-900 a -1150 mV

Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_9.htm. Consulta:

22 de septiembre de 2014.

2.2. **Requerimientos de corriente de protección**

A continuación se detallarán los requerimientos de corriente de protección.

2.2.1. **Densidad de corriente mínima para la protección catódica**

Cuando ya se ha determinado el potencial para el cual la estructura va a estar protegida, el siguiente paso sería establecer la intensidad de corriente eléctrica que debe aplicarse al metal para llevarlo al potencial de protección. La intensidad a aplicar será uno de los parámetros fundamentales que incidirán en el diseño y el coste operativo del sistema de protección.

La intensidad necesaria para alcanzar el potencial de protección depende en gran medida de las condiciones del medio, como temperatura, agitación, aireación y composición química, y del tipo de metal o aleación. Depende también de la presencia de recubrimientos y su estado de conservación, existencia de capas calcáreas y vitrificados.

La determinación de la intensidad de protección suele realizarse experimentalmente. En la tabla 4 se recogen las densidades de corriente de protección para diversos metales en variadas condiciones del medio, lo cual solo ha de considerarse una primera aproximación sobre la corriente continua mínima que debe aplicarse, puesto que cada caso concreto requiere un estudio minucioso, para su determinación exacta.

Por ejemplo, para terrenos muy ácidos la corriente directa mínima no serán 35 mA/m², sino que se deberán alcanzar 100 a 150 mA/m², para lograr reducir la corrosión del acero a niveles aceptables.

Tabla IV. **Densidades de corriente de protección para el acero**

<i>Estado superficial</i>	<i>Medio agresivo</i>	<i>Densidad de corriente mA/m²</i>
Acero desnudo	Agua de mar (velocidad 0.5 m/s)	80–200
Acero desnudo	Agua de mar (velocidad 1-15 m/s)	150–600
Acero pintado (epoxi, vinílica, clorocaucho)	Agua de mar	25–35

Continuación de la tabla IV.

Acero pintado sujeto a roces por hielos, fondos, etcétera	Agua de mar	50-210
Acero pintado (aluminio bituminosa)	Agua de mar	35-50
Tanques de carga de lastre de petróleo	Agua de mar	100
Tanques de carga de lastre ligero	Agua de mar	170
Tanques de lastre limpio	Agua de mar	190
Acero desnudo	Agua dulce estancada	56
Acero desnudo	Agua dulce en movimiento	56-66
Acero desnudo	Agua dulce, turbulenta o caliente	56-170
Acero desnudo	Suelo neutro o estéril	5-17
Acero desnudo	Suelo aireado y seco	5-17
Acero desnudo	Suelo húmedo	28-66
Acero desnudo	Suelo muy ácido	56-170
Acero desnudo	Suelo con bacterias	450
Acero bien revestido	Suelo normal	0.1-0.2
Acero muy bien revestido	Suelo normal	0.01

Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_9.htm. Consulta:

22 de septiembre de 2014.

Se analiza a continuación la influencia de los parámetros del medio sobre la corriente de protección necesaria:

- Temperatura: incrementa la velocidad de corrosión en soluciones aireadas, en tanto no se haga lo suficientemente elevada, para que el efecto de la disminución de la concentración de oxígeno en el agua llegue a contrarrestar y superar los efectos combinados de un aumento del coeficiente de difusión y de la velocidad de la reacción electroquímica de reducción del oxígeno, además de una disminución del espesor de la película de difusión.

En las soluciones desairadas, los incrementos de temperatura motivan siempre a un aumento de la velocidad de corrosión. En estas circunstancias, la temperatura favorecerá también la despolarización de la superficie del metal, facilitando el alejamiento del hidrógeno, gas producido catódicamente sobre ella.

- Agitación: incrementa la velocidad de corrosión tal como podría esperarse de un fenómeno de difusión, a causa del adelgazamiento de la película de difusión. La agitación acelera el transporte de oxígeno a través de la masa de volumen y facilita la progresión del oxígeno a través de la capa de difusión. Como resultado, la agitación disminuye la pendiente de la curva de polarización catódica desplazando hacia la derecha el punto de corte de las curvas de polarización anódica y catódica.
- Formación de depósitos calcáreos sobre la superficie a proteger: reduce apreciablemente la superficie metálica expuesta al medio corrosivo y, a su vez, la densidad de corriente mínima para la protección. Para soluciones aireadas, esta reducción en la corriente directa, representa el 50 a 75 %; en cambio, con soluciones desairadas, es bastante menos acusada, a menudo solo del 25 a 40 %.

- El tiempo: cuando se realiza una instalación de protección catódica, no se consigue el potencial de protección desde el mismo momento en que se hacen las conexiones, sino que tiene que transcurrir un cierto tiempo que dependerá, entre otros factores, del número y calidad de los ánodos, lecho anódico y resistividad del suelo, en los casos de ánodos galvánicos; y del voltaje de salida, de la superficie de los ánodos, del lecho anódico y la resistividad del suelo, en los casos de corriente impresa.

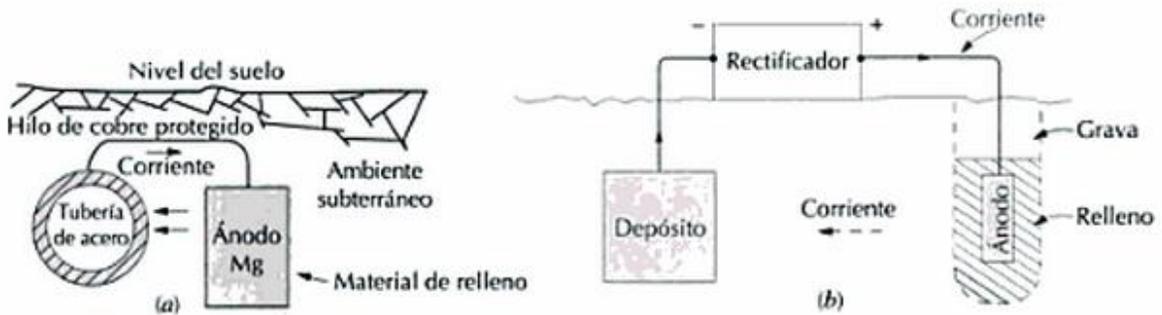
2.3. Tipos de protección catódica

Existen dos métodos bien diferenciados en la implementación del control de la corrosión por protección catódica. En ambos existe un suministro de corriente continua exterior en una cantidad tal que permite eliminar las pilas de corrosión presentes en el metal. En la práctica la aplicación de uno u otro sistema depende del análisis técnico y económico, según cada caso en particular.

La corriente necesaria para la protección catódica, pueden ser suministrados por:

- Ánodos de sacrificio
- Corriente impresa

Figura 15. **Protección catódica a) ánodos de sacrificio a una tubería, b) corriente impresa a un tanque**



Fuente: CALLISTER, William D. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. p. 394.

2.3.1. **Sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio**

El potencial y la corriente de protección para un metal determinado pueden obtenerse uniéndolo a otros metales mucho más activos, es decir, con otros metales que tengan mayor facilidad para ceder los electrones que demandan los agentes oxidantes del medio.

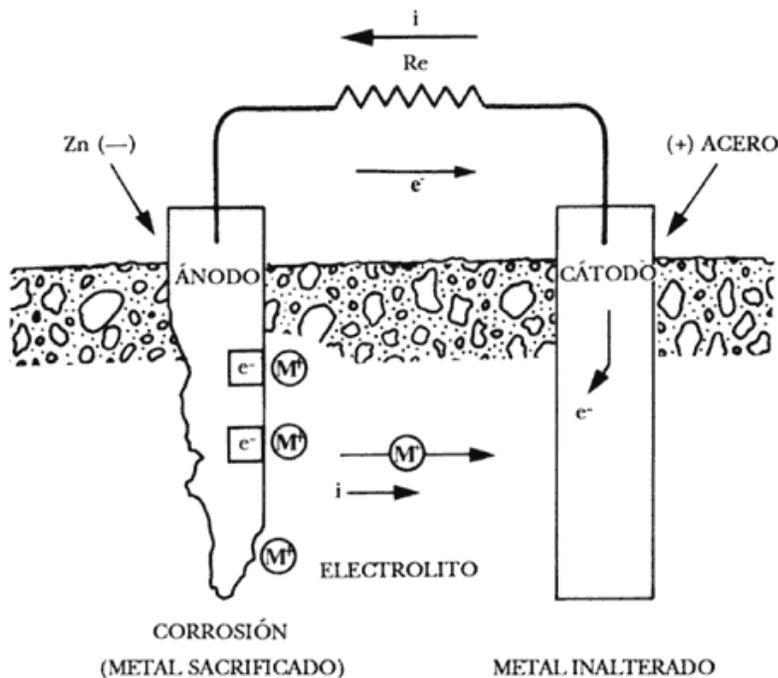
Al unir un metal más noble con otro más activo se origina una celda galvánica donde el metal más activo actúa de ánodo, sacrificándose en beneficio del metal que se desea proteger y que actúa de cátodo.

Los ánodos de sacrificio pueden ser considerados como fuentes de energía eléctrica portátiles, resultando particularmente útiles cuando no es posible disponer de una fuente de corriente continua, como es el caso de la

protección catódica por corriente impresa, o cuando el tendido de una línea para tal aplicación hace antieconómica la protección catódica.

En la figura 16 se muestra una representación esquemática de protección catódica por este método.

Figura 16. **Mecanismo de protección catódica por ánodos de sacrificio**



Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_7.htm. Consulta:

22 de septiembre de 2014.

- Selección del ánodo: las condiciones que debe reunir un metal o aleación para que resulte adecuado para su uso como ánodo de sacrificio son:

- Su potencial de reducción debe ser de magnitud suficiente para aportar la intensidad necesaria que polarice el metal a proteger hasta el potencial de inmunidad, con la limitación de que un potencial demasiado negativo originaría un excesivo paso de corriente y consumo innecesario de material anódico.
 - Debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, y no debe desarrollar películas pasivantes protectoras.
 - Debe suministrar una corriente que se mantenga constante.
 - La disolución del ánodo debe ser uniforme, repartiéndose el ataque por toda su superficie.
 - Debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperes-hora por kilogramo de material (Ah/kg), es decir, ha de ser capaz de liberar una elevada cantidad de electrones aportándosela a los materiales oxidantes del medio, en lugar de que estos oxiden al metal a proteger.
 - El metal debe ser de fácil adquisición y con un costo asumible, para los objetivos de protección buscados.
- Características de los ánodos de sacrificio más utilizados: los ánodos más utilizados según las exigencias expuestas anteriormente son el cinc, el aluminio y el magnesio, como materiales base para ánodos de sacrificio; otros posibles candidatos son los metales alcalinos: litio, sodio, potasio. Los alcalinotérreos: berilio, calcio, estroncio, quedan descartados porque son demasiado activos, el aluminio tiene el

inconveniente de formar una capa de óxido que disminuye su acción protectora.

Los cascos de los barcos se protegen contra la corrosión galvánica, producida por la acción de las hélices de bronce, colocando ánodos de cinc o de magnesio en el casco, en las proximidades de la hélice.

- Ánodos de cinc: son el sistema de protección catódica galvánica más económico en el mercado y los de mayor uso, hasta la actualidad. Como ánodo de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar: buques, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas petroleras, depósitos de agua, condensadores, entre otros. El potencial en circuito abierto del cinc frente al hierro puro en condiciones estándar es de solo $0,76 - 0,44 = 0,32$ voltios, por lo cual su empleo como ánodo de sacrificio es solo factible en medios cuya resistividad sea inferior a 1000 cm, como los suelos de baja resistividad y el agua de mar.

También debe cuidarse su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas por encima de 65 °C, ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero o en todo caso, quedar pasivado por los carbonatos precipitados. Las aleaciones de cinc para la protección catódica contienen aluminio y silicio, para evitar los efectos de las impurezas presentes en la aleación de cinc. Además, se adiciona cadmio para facilitar la corrosión uniforme con productos derivados de corrosión no adherentes.

Se puede considerar que el cinc, como material anódico, ha alcanzado prácticamente su límite de desarrollo, siendo en la actualidad desplazado gradualmente por aleaciones de aluminio de igual rendimiento de corriente (90 %), pero con la ventaja de poseer mayor suministro real de corriente y mejor equivalente electroquímico.

- Ánodos de aluminio: a pesar de sus atractivas características electroquímicas, el aluminio y sus aleaciones tienden a pasivarse en diversos electrolitos, debido a la formación de capas compactas de óxidos de aluminio sobre su superficie, por lo que su aplicación en la protección catódica ha estado más limitada que el cinc y el magnesio. Tanto a los ánodos de aluminio como a los de cinc se les denomina de bajo potencial.
- Ánodos de magnesio: el magnesio es el elemento utilizado en ánodos de sacrificio con mayor potencial de oxidación (SRP del Mg: -1,87 volts; SRP del Fe: 0,44 volts), lo que implica una capacidad de proporcionar una densidad de corriente elevada, a costa de consumirse con gran rapidez.

Su principal aplicación es en el caso de ánodos enterrados en suelos de resistividades intermedias (2 000 a 10 000 cm). Para resistividades del terreno más elevadas suele ser preferible recurrir a sistemas de protección por corriente impresa.

El magnesio presenta los siguientes inconvenientes como material anódico:

- Alto potencial de trabajo, lo que limita su empleo en medios muy conductores y donde se requiere que el potencial de protección no adquiera valores muy negativos, caso del casco de un buque. Para cumplir con tal requisito, se tendría que recurrir al control del potencial mediante tramos resistivos, lo que complica extraordinariamente el diseño de protección.
- Gran tendencia a la autocorrosión, por formación de micropilas locales, y bajo rendimiento de corriente, aproximadamente el 50 %.

Debido al primero de estos inconvenientes, ha disminuido su utilización para la protección de cadenas de buques; la alta alcalinización del entorno del ánodo y desprendimiento de gas hidrógeno, exige un reforzamiento del sistema de pintura en estas zonas.

El peligro de explosión ha hecho igualmente declinar su uso en la protección interior de tanques de combustible.

El magnesio sin alear no se puede utilizar en contacto con agua de mar ya que, por el fenómeno de autocorrosión, el consumo del ánodo progresa a gran velocidad.

El estado actual de este material anódico cabe considerarlo como lejano todavía a su límite de desarrollo. Se utiliza cada vez más y, como ha sido comentado anteriormente,

está desplazando al zinc en las aplicaciones en agua de mar.

Numerosas investigaciones realizadas, encaminadas a la búsqueda de nuevas aleaciones, han dado como resultado que en la actualidad se disponga de diversas aleaciones útiles para protección catódica en variadas condiciones de servicio, siendo los elementos aleantes principales el zinc, mercurio, estaño, indio y magnesio, por su elevado potencial de reducción se denominan ánodos de alto potencial.

- Duración de los ánodos: Los parámetros a considerar para determinar la vida o duración de un ánodo son:
 - Peso del ánodo (kg).
 - Intensidad que suministra el ánodo (A).
 - Capacidad de corriente del ánodo, en amperes hora sobre kilogramo (A-h/kg) de ánodo.
 - Rendimiento, el ánodo no está fabricado de metal activo puro. El valor de rendimiento expresa el porcentaje másico efectivo de metal activo.
 - Factor de utilización, suele adoptarse el 85 %, ya que cuando solo queda un 15 % de peso del ánodo, deja de ser eficaz para mantener la intensidad de protección necesaria, debiendo sustituirse.

Tabla V. **Valores electroquímicos de los ánodos más utilizados**

<i>Metal anódico</i>	<i>Capacidad corriente teórica (A-año/kg)</i>	<i>Rendimiento %</i>	<i>Factor utilización %</i>
Zinc (Zn)	0.094	90	85
Aluminio (Al)	0.340	90	85
Magnesio (Mg)	0.251	50	85

Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_7.htm. Consulta:

26 de septiembre de 2014.

- Instalación de los ánodos de sacrificio: si se entierran directamente los ánodos, a medida que va funcionando el sistema de protección catódica, se formarán productos de corrosión sobre el ánodo y se precipitarán hidróxidos alcalinotérreos sobre el cátodo, al sobrepasar el producto de solubilidad correspondiente.

Paralelamente, el electrolito se va empobreciendo en algunos iones conductores, con lo que la conductividad disminuye. Tanto en el ánodo como en el cátodo, existirán factores de polarización por concentración, son factores a tener en cuenta en el diseño de una instalación de protección catódica, con objeto de evitar que tras un período de funcionamiento resulte inoperante.

Para evitar los efectos anteriores sobre las zonas anódicas, se coloca alrededor del ánodo un medio químico artificial que suele denominarse activador o *backfill*, con los siguientes objetivos:

- Reducir la resistencia de contacto ánodo-suelo.
- Estabilizar el potencial del ánodo, evitar la polarización y asegurar la constancia de la corriente de protección.
- Evitar efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo.
- Adsorción de la humedad del suelo para mantener una humedad permanente en torno al ánodo.
- Mejorar el rendimiento, disminuyendo la corrosión espontánea y consiguiendo un desgaste homogéneo del ánodo.

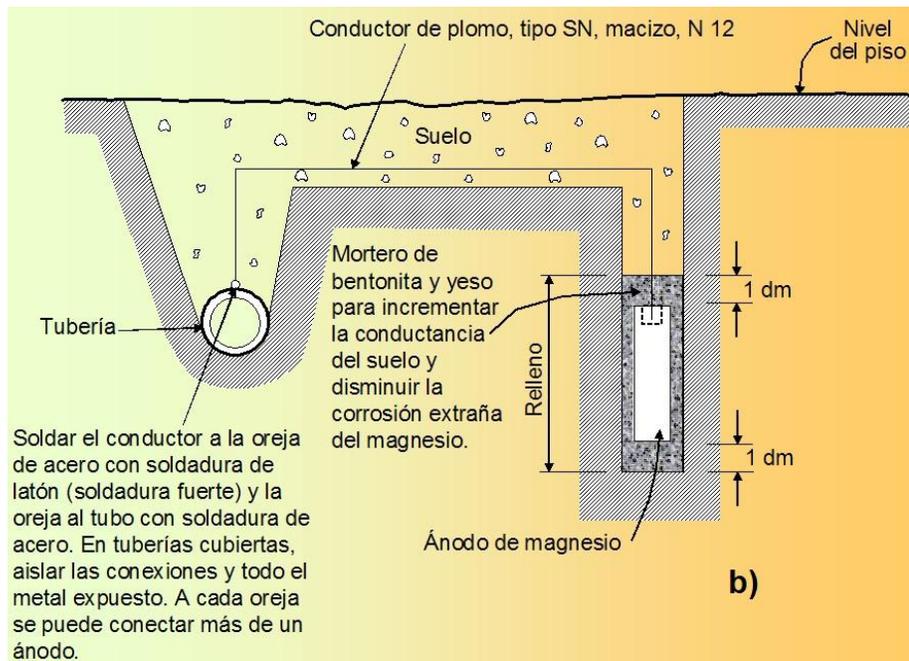
Los productos utilizados en la composición del activador o *backfill*, son normalmente la arcilla ordinaria, la bentonita, el sulfato de calcio, la cal, el hidróxido de sodio, el cloruro de sodio, el sulfato de sodio, el sulfato de magnesio, entre otros.

Entre los productos citados, el yeso y la arcilla son los de uso más corriente por su eficacia, posiblemente en virtud de su capacidad para retener el agua. En la práctica, las mezclas de yeso y arcilla se realizan en las siguientes proporciones:

- arcilla 50 % - yeso 50 %
- arcilla 25 % - yeso 75 %

La utilización de mezcla activadora es fundamental en suelos de resistividades a partir de 2 000 cm.

Figura 17. Tubería protegida catódicamente por ánodos de sacrificio



Fuente: *Curso de fundamentos de ciencia de materiales.*

http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/Im%E1genes/Fig12_21b.jpg. Consulta: 26 de septiembre 2014.

La distancia mínima entre el ánodo y la tubería debe ser de 3 metros y deben utilizarse cables de conexión de bastante grosor para evitar las caídas de tensión. Hay que cuidar también muy particularmente la unión del cable con el alma de acero del ánodo. Este cable debe estar siempre bien aislado evitando un consumo innecesario de corriente para lograr su protección.

En la práctica, los ánodos se pueden colocar en la estructura a proteger con distintos procedimientos, pero siempre con la ayuda del alma que la atraviesa, que suele ser redonda y de acero. Cuando van enterrados se

introducen en una bolsa de tela y son rodeados por la mezcla activadora o *backfill* anteriormente descrita.

2.3.2. Sistema de protección catódica por corriente impresa

Si la resistencia del electrolito, o sea, del medio en que está el metal, que puede ser tierra húmeda, es demasiado grande y la corriente que circula entre los dos metales es demasiado débil para anular las corrientes locales, debe proveerse un suministro de corriente continua exterior para establecer una corriente eléctrica de intensidad adecuada. Naturalmente, este tipo de protección exige el sacrificio del metal que hace de ánodo.

Los ánodos utilizados, cuando se emplea la protección anódica con suministro de energía eléctrica exterior, pueden ser de hierro, generalmente tubos o piezas de hierro viejas, pues ya no es necesario que el metal protector tenga distinto potencial galvánico que el metal protegido. La fuente de energía eléctrica debe dar corriente continua y generalmente se emplean rectificadores de corriente alterna o baterías de acumuladores.

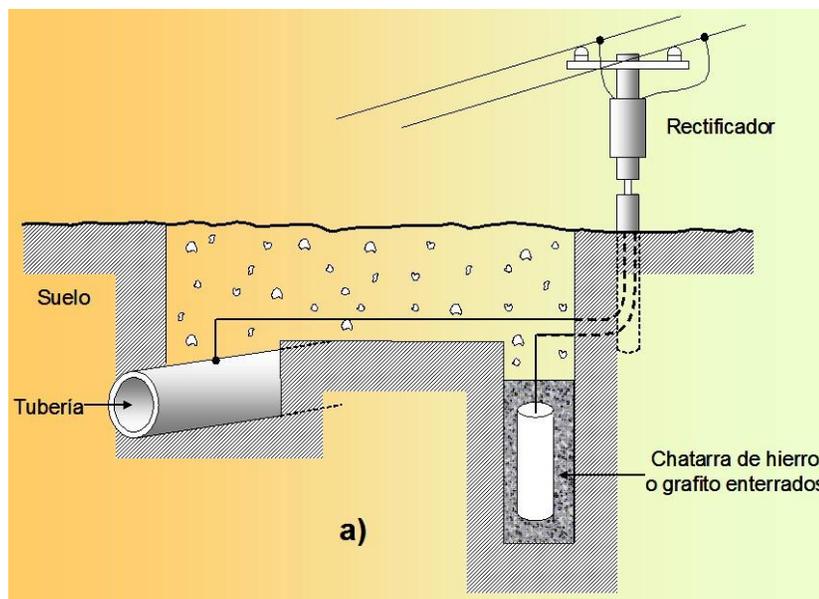
La densidad de corriente necesaria para obtener protección por cada metro cuadrado de superficie metálica podrá variar según el aislamiento de la pieza. Si las piezas, tuberías por ejemplo, tienen un buen recubrimiento protector, los gastos originados por la protección catódica se reducirán notablemente.

Por esto, en general, solo se emplea la protección catódica con suministro de energía eléctrica en los puntos más expuestos a la corrosión, que pueden determinarse midiendo la resistencia eléctrica del terreno.

Todas las zonas de menor resistencia, con respecto a las vecinas, son zonas de corrosión de intensidad apreciable. Únicamente se emplea la protección catódica con suministro de energía eléctrica externa para protección total de tuberías o juntas enterradas cuando están muy bien revestidas, porque entonces la densidad de corriente necesaria es muy pequeña.

En este método se conecta el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua, pura o rectificada, al metal a proteger y el polo positivo de dicha fuente a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro, ferro-silicio, plomo-plata y grafito, cerrándose el circuito a través del electrolito.

Figura 18. **Tubería protegida catódicamente por corriente impresa**



Fuente: *Curso de fundamentos de ciencia de materiales.*

http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/Im%E1genes/Fig12_21b.jpg. Consulta: 26 de septiembre 2014.

En los sistemas de protección catódica por corriente impresa, se crea una pila electrolítica en la cual por medio de la corriente continua (DC), suministrada a los electrodos auxiliares, se hace que la estructura a ser protegida actúe como un cátodo y en la cama de ánodos (conjunto de ánodos instalados para suministrar la corriente de protección) actúe el intercambio iónico entre ellos y el electrolito, trasladando así las zonas anódicas de la estructura metálica a proteger hacia el lugar donde se descarga la corriente, los ánodos.

Los componentes de un sistema de protección catódica por corriente impresa son:

- Fuente de corriente continua: es un dispositivo diseñado para proveer las necesidades de potencial y corriente requeridas en el sistema. Consiste fundamentalmente de un mecanismo de transformación de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Tiene como componentes un transformador de reducción del voltaje de alimentación en la línea de corriente alterna, un puente rectificador construido por diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio y sistemas de control manual o automático como voltímetros y amperímetros, con el fin de regular el voltaje y la corriente según las necesidades del sistema a proteger.

La corriente proporcionada por la fuente es suministrada al electrodo auxiliar (ánodos) mediante una interconexión eléctrica entre el terminal positivo de la fuente y los ánodos, para forzar la descarga de corriente de protección y que ocurra una migración de cargas iónicas hacia la estructura a través del electrolito del medio. El terminal negativo del rectificador se conecta a la estructura a proteger para cerrar el circuito eléctrico.

Las condiciones de diseño que se deben estimar para escoger un rectificador son:

- Características de la corriente alterna disponible en el área: voltaje, frecuencia y número de fases.
- Requerimiento máximo de salida en corriente directa: intensidad de corriente y voltaje.
- Máxima temperatura de operación.
- Instrumentación: voltímetros y amperímetros, sistema de regulación.

La selección del rectificador estará en función de los parámetros requeridos en cuanto al voltaje y corriente de salida en corriente directa (DC).

- Ánodos auxiliares: hay dos tipos de ánodos auxiliares en los sistemas de corriente impresa: ánodos consumibles y ánodos inertes o permanentes. Todos estos ánodos van consumiéndose a mayor o menor velocidad con el paso de la corriente. Así, por ejemplo, la chatarra de hierro se consume muy rápidamente y el titanio platinado a un ritmo muy lento. A continuación se describen brevemente cada uno de estos electrodos.
 - Ánodos consumibles: en este caso el material anódico se disuelve durante el proceso de protección, tal como sucedía en la protección catódica por ánodos de sacrificio, por lo que tendrán que renovarse al cabo de cierto período.

Entre los ánodos consumibles, el material más utilizado es el hierro o acero, usualmente chatarra, por ser lo más económico. Dentro de las fundiciones, la tubería. Puede ser aconsejable la utilización de este tipo de ánodos en terrenos de resistividad elevada y es recomendable también que se le rodee de un relleno artificial.

- Ánodos inertes o permanentes: son aquellos que permiten el paso de corriente sin sufrir prácticamente desgaste, por lo que tienen una gran duración. Existe una gran variedad de ánodos permanentes: grafito, fundición de hierro al silicio o ferrosilicio, plomo y sus aleaciones, platino, oro, titanio platinado o el tántalo platinado. El grafito, a pesar de considerársele como ánodo inerte, se consume lentamente debido a la formación de anhídrido carbónico.

Tanto el grafito como el ferro-silicio tienen el inconveniente de su gran fragilidad. Por otra parte, el platino y el oro tienen una utilización restringida por motivos económicos. De mayor utilización son las aleaciones de plomo, siendo sin duda el material anódico más empleado el titanio platinado. El titanio, al actuar como rectificador, dificulta el paso de corriente, por lo que se recurre, a menudo, a chapearlo con platino con 10 micrómetros de espesor. Los ánodos de titanio platinado son de gran resistencia y relativamente baratos. A continuación se mencionan algunas características de estos ánodos:

- Ferro-silicio: es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca hincado o tumbado, en el suelo, y normalmente rodeado de un relleno de carbón de coque.

A intensidades bajas de corrientes, como un amperio, su vida es prácticamente ilimitada y su capacidad máxima de salida de corriente es de unos 12 a 15 A por ánodo. Su consumo oscila, a intensidades de corrientes altas, entre 0,5 y 0,9 kg/A-año. El ferro-silicio es muy frágil en virtud de su estructura cristalina, por lo que se ha de tener mucho cuidado en su embalaje y transporte.

- Grafito: puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media, con un relleno de grafito o de carbón de coque. Este ánodo es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso. Son más ligeros de peso que los de ferro-silicio. La salida máxima de corriente que tienen estos ánodos es de 3 a 4 A por ánodo y su desgaste varía entre 0,5 y 1 kg/A-año.
- Titanio platinado: es un ánodo especialmente indicado para instalaciones en agua de mar, aunque también es perfectamente utilizable en aguas dulces o incluso en suelos. Su característica más relevante es que con pequeños voltajes, como 12 V, se pueden sacar intensidades elevadas de corriente y, además, su desgaste es apenas perceptible.

En el agua de mar tiene algunas limitaciones con respecto a la tensión a la que se puede aplicar, la cual nunca puede pasar de 12 V, ya que las tensiones más elevadas podrían ocasionar que se despegara la capa de óxido de titanio y que, por tanto, se deteriorara el ánodo.

- Tántalo platinado: es semejante al anterior, aunque tiene sobre aquel la ventaja de que en agua de mar puede trabajar a tensiones altas (50-60 V); sin embargo, su adquisición es menos fácil y su precio es más elevado. Dado que en agua de mar y a voltajes bajos se emplean grandes intensidades de corriente, el uso de este ánodo, en general, no se justifica del todo.
- Plomo-plata: la aleación plomo plata está constituida por 1 % de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que se forma al actuar anódicamente, que tiene el color del cacao, posee unas propiedades mucho más elevadas en virtud de los elementos de aleación que se traducen en un mejor funcionamiento y duración del electrodo.

Se utiliza más frecuentemente en agua de mar, en donde la corriente máxima de salida no pueda ser superior a 270 A/m^2 . Se desgasta entre 50 y 200 g/A-año. Estos ánodos deben presentar una superficie plana, con lo cual se evita, en lo posible, las aristas, pues en estas zonas la capa de peróxido de plomo se forma mal o no se forma, por lo

que en estos puntos se puede presentar una corrosión fuerte.

- Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio: estos ánodos están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y de rutenio, que se adhieren a un soporte de titanio. Su máxima capacidad de corriente ($1\ 100\ \text{A/m}^2$) lo coloca a la altura de los ánodos de titanio platinado, y su costo es, aproximadamente, 20 % menor.

La velocidad de desgaste o consumo del ánodo y la capacidad para el transporte de corriente son las dos características principales a la hora de elegir el material anódico.

En el suelo o terreno se usa principalmente la aleación hierro, cromo y silicio (Fe-Cr-Si), mientras que en el agua de mar se tiende a utilizar ánodos inertes del tipo titanio sobre platino (Ti/Pt) o titanio sobre rutenio (Ti/RuO₂), que son ánodos dimensionalmente estables.

La elección de un ánodo no se hace solamente con base en su consumo o en la densidad de corriente que puede proporcionar. Hay que tener en cuenta, además, sus propiedades de resistencia mecánica, su resistencia a la erosión, como en el caso de que sean utilizados en agua de mar y, sobre todo, sumergidos en las inmediaciones del mar o en el fondo marino, su facilidad de instalación, el tiempo de sustitución e incluso su disponibilidad en el mercado.

En el terreno, los ánodos pueden ser instalados en un lecho de bentonita o polvo de coque, lo cual crea un medio homogéneo, húmedo y

de baja resistividad alrededor del ánodo, con lo que se aumenta su diámetro aparente y las dimensiones efectivas del ánodo, disminuyendo de esta forma la resistencia ánodo-suelo. De esta forma se evitan los problemas de corrosión localizada, que pueden romper el ánodo y reducir el consumo del material anódico.

En la tabla 6 se resumen los parámetros y usos característicos de los ánodos auxiliares comúnmente utilizados.

Tabla VI. **Características de los ánodos empleados en la protección catódica por corriente impresa**

Tipo	Peso específico g/cm ³	Consumo kg/A-año	Densidad de corriente A/m ²		Utilización (medio)
			máxima	práctica	
Acero Chatarra	7.8 7.0	~9. 4.5-1	5	1	todos
Grafito	1.6	0.1-1	10-100	2.5-40	terreno, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Ferro-silicio: 0.95%C 16%Si, 0.75% Mn	~7	0.25-1	30-40	10-100	agua dulce, terreno
Fe-Cr-Si: 0.95%C, 0.75% Mn, 4.5%Cr, 14.5%Si	7	0.25-1	270		terreno, agua de mar, fondo marino
Pb-Ag (2% Ag)	11.3	~0.2	300	30-65	sólo agua de mar; excluido el fondo marino
Pb-Ag-Sb (1%Ag, 6%Sb)	11	~0.5	300	50-200	

Continuación de la tabla VI.

Titanio platinado	4.5	8.10 ⁶	400 por cada micra de pla- tino de espe- sor	500-1 000	terreno no sali- no con backfill, agua de mar; excluido el fon- do marino y el agua dulce
Niobio platinado	8.4			500-700	
Tántalo platinado	16.6			500-1 100	
Titanio-óxido de rutenio (DSA)	4.5	5.10 ⁷	1100	700-1 100	todos

Fuente: *Biblioteca Digital del ILCE.*

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm. Consulta:
26 de septiembre de 2014.

- Conductores eléctricos: la función de los conductores dentro de un sistema de protección catódica, es la de transmitir o conducir la corriente por todo el circuito eléctrico, que es suministrada por el rectificador para energizar a los ánodos, formando de esta manera el circuito positivo, y por otra parte, conectar el elemento metálico al punto negativo del rectificador, para garantizar un retorno adecuado de corriente.

Generalmente se emplean cables de cobre, con doble cubierta protectora, fabricados para enterramiento directo y con calibre que varía de acuerdo a la intensidad de corriente que pueden conducir, los que serán instalados directamente en el suelo por medio de zanjas hechas para tal fin y posteriormente enterrados en medio de una capa de arena de 12 cm de espesor, desde el elemento metálico hasta las cajas de distribución.

- Electrolito: el medio agresivo que cierra el circuito de protección, por conducción iónica.

La vida útil de un sistema de protección catódica por corriente impresa esta limitada por el elemento que se desgasta o se deteriora más rápidamente. Este elemento es el conjunto de ánodos, que aunque se denominen inertes tienen cierto desgaste a pesar de que no es visualmente apreciable. Por ello, cada fabricante determina para cada tipo de ánodo sus propios parámetros de consumo y especificaciones. Los ánodos seleccionados deberán garantizar el suministro de la cantidad de corriente nominal, por un periodo de vida útil de diseño mínimo de 20 años.

Las principales ventajas que se derivan del empleo de corriente impresa, son las siguientes:

- Es posible alcanzar, sin grandes dificultades, el potencial e intensidad de corriente de protección, aún en medios poco conductores. El sistema de protección por ánodos de sacrificio resulta viable solo cuando la resistividad del medio no supera los 10 000 cm, a partir de este valor la experiencia indica que resulta más aconsejable la protección catódica mediante corriente impresa.
- Gran flexibilidad operacional. Es fácil el ajuste del potencial de protección, frente a condiciones cambiantes del medio, particularmente en el caso de los sistemas automáticos.
- Utilización de menor número de ánodos y con larga duración.

Entre los inconvenientes de la protección por corriente impresa figuran:

- Costes de instalación más elevados, ya que se necesita una fuente externa de corriente.
- Posibilidad de causar interferencias con estructuras metálicas vecinas.
- Peligro de sobreprotección en zonas próximas a los ánodos, lo que obliga a la colocación de pantallas en estas zonas y de un posible desajuste del sistema de corriente impresa.
- Exige, tanto para su instalación como para los trabajos de inspección y mantenimiento, la presencia de técnicos especializados en este sistema de protección. Fallos en el aislamiento de los cables del polo positivo del generador de corriente, pueden conducir a su rápida corrosión, fallos en la polaridad ocasionan severas corrosiones de la estructura que se desea proteger.

En términos generales, se puede afirmar que el método de corriente impresa es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio cuando se trata de proteger estructuras muy grandes o con una gran demanda de corriente y cuando la resistividad del medio es elevada, como es el caso de protección de las estructuras enterradas.

2.4. Limitaciones y efectos secundarios de la técnica de protección catódica

Limitaciones principales de la técnica de protección catódica:

- El método de protección catódica necesita que exista un medio electrolítico continuo, entre ánodo y cátodo. Por ello, la técnica es

aplicable únicamente a superficies metálicas en contacto con un volumen de electrolito que permita una buena distribución de la corriente eléctrica de protección sobre el metal. Lógicamente, la corriente catódica debe alcanzar a toda la superficie metálica a proteger. Por este motivo, el método podrá servir para la protección de metales sumergidos, enterrados y en contacto con soluciones químicas diversas, pero no será utilizable con metales expuestos a la atmósfera, debido al insignificante volumen de electrolito depositados sobre ellos.

- En medios altamente corrosivos, que requieren corrientes de protección excesivamente altas, por consideraciones económicas, resulta inviable la aplicación del método de protección catódica. Por esta razón, siempre que resulte factible, se acude al sistema conjugado de protección: pintura más protección catódica. En este caso, la corriente de protección es solamente la necesaria para la protección de los fallos de la película de pintura, zonas sin recubrimientos.
- La distribución de corriente en muchas estructuras protegidas catódicamente no es uniforme. Este es el caso de ciertas estructuras en las que el flujo de corriente hacia determinadas zonas resulta insuficiente. En estas situaciones se consigue una mejor distribución de las líneas de corriente mediante el empleo de revestimientos aislantes, lo que obliga a la corriente protectora a fluir hacia las áreas metálicas accidentalmente desnudas. Algo similar sucede en las tuberías de conducción de aguas duras, donde, a causa de la formación de capas calcáreas (reducción de los requerimientos de corriente protectora) la distribución de corriente es más uniforme.

La aplicación de protección catódica puede dar lugar a ciertos efectos secundarios, tales como:

- Una alcalinización como consecuencia de la reacción catódica, este efecto puede minimizarse evitando la existencia de potenciales muy negativos y utilizando pinturas menos susceptibles a tal fenómeno. La alcalinidad del medio puede conducir también a la formación de depósitos calcáreos lo que, en el mejor de los casos, reduce los requerimientos de corriente de protección; sin embargo, una formación excesiva de tales depósitos puede conducir al bloqueo de una conducción. Los metales anfóteros, caso del aluminio y plomo, pueden corroerse en determinadas circunstancias como consecuencia de la alcalinización producida por la reacción catódica.
- Sobreprotección: es preciso mantener bajo control el potencial del sistema con objeto de que no sea demasiado negativo en la zona catódica, ya que, aparte de ser un gasto superfluo de material anódico, el desprendimiento de hidrógeno que se verifica a potenciales fuertemente negativos, desprende las películas de pintura de la superficie metálica, origina explosiones en recintos cerrados, crea fenómenos de fragilización del acero e, incluso en algunos casos, se podría llegar a la fragilización por el hidrógeno de las estructuras de acero sobreprotegido catódicamente.

3. CONTROL DE LA CORROSIÓN DE METALES EN EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

En empresas industriales, dependiendo de las características y ramo de la industria, la mayoría de sus componentes internos son elementos metálicos, es decir, se trata de materiales ferrosos, muy susceptibles al ataque por corrosión debido a la interacción con las diferentes atmósferas predominantes o simplemente por su tendencia a reaccionar con el oxígeno del medio ambiente. Este tipo de reacciones generan un proceso destructivo de carácter continuo y, dependiendo de las condiciones de exposición, puede ser muy acelerado.

Este fenómeno, conocido como corrosión, genera pérdidas económicas en todo el mundo. Son muy pocos los países y entidades que dedican tiempo y recursos al control del fenómeno de la corrosión, sin embargo, los desembolsos de dinero para preservar los equipos e instalaciones son muy considerables.

Tanto los ingenieros encargados de la fabricación de estos materiales constructivos, como los ingenieros de diferentes disciplinas responsables del mantenimiento y conservación de los equipos y locaciones industriales, hacen grandes esfuerzos para combatir la corrosión y minimizar el impacto económico que causa este fenómeno.

En la mayoría de los casos, no se manejan programas serios y responsables de mantenimiento contra la corrosión por desconocimiento e ignorancia de las consecuencias que presentan las maquinarias o equipos involucrados en los procesos industriales.

El control de un proceso de corrosión inicia en el diseño, ya sea de una instalación industrial o de un equipo, por más elemental que sea, sobre todo cuando se manejan materiales ferrosos. Es usual encontrar diseños constructivos para estructuras de cubierta de techos de almacenamiento o de procesos industriales, con especificaciones de recubrimientos de protección con caucho clorado o acrílico, entre otros, que no cumplen con las exigencias mínimas para contrarrestar el ataque agresivo del medio al cual puedan estar expuestos.

En la mayoría de los casos, se trata de un desconocimiento tanto del diseñador como del dueño del proyecto, generando un problema posterior que lo tendrá que asumir el ingeniero de mantenimiento.

Para combatir el proceso destructivo de la corrosión existen varios mecanismos de uso común en la industria, uno de los cuales es la protección catódica, que se mencionó anteriormente. Sin embargo, en la mayoría de los casos, un solo método no es suficiente para combatir la degradación de los elementos metálicos por el fenómeno de la corrosión y es usual que se utilicen simultáneamente dos o más procedimientos para el control de este fenómeno.

3.1. Efectos de la corrosión en maquinaria y estructuras metálicas

Como ya se ha mencionado a lo largo del tema, la peor consecuencia de la corrosión es la destrucción del metal al que afecta. Este fenómeno puede provocar desde fracturas, hasta fugas en tanques, disminución de la resistencia mecánica de las piezas, entre otros, son por tanto muchos los efectos debidos a los ataques del fenómeno de la corrosión. Aún así, lo peor de todo es que si no se previene y combate la corrosión en los elementos metálicos, la seguridad de las personas se verá afectada.

Desde el punto de vista industrial, que resulta ser el sector más afectado por la corrosión, se agrupan estos efectos de la siguiente manera:

- Efectos directos: son los que afectan de manera inmediata, cuando se produce el ataque. Estos se pueden clasificar a su vez en varios tipos, de los cuales los más importantes son el costo de las reparaciones, el reemplazo y sustitución de los equipos deteriorados y los costos derivados de las medidas de prevención.
- Efectos indirectos: son todos los derivados de los fallos debido al ataque de la corrosión. Los principales son: las paradas de la producción, provocados por los fallos producidos y las responsabilidades de posibles accidentes.

En general, muchos de estos efectos podrían evitarse con un mayor y mejor uso de los conocimientos y técnicas que están disponibles actualmente. El sector industrial es el más afectado, ya que en muchos casos se está expuesto a la intemperie o al agua.

3.2. La corrosión dentro del mantenimiento preventivo

La corrosión afecta a los elementos metálicos, muy a menudo a los que contienen componentes férricos, aunque no solo a ellos. En la corrosión atmosférica, el electrolito que lleva a cabo la reacción ánodo-cátodo lo aporta la propia agua que contiene la atmósfera, pero, además de la corrosión atmosférica, se dan juntamente los otros tipos de corrosión, que son causantes de graves fallos e importantes costos asociados.

El técnico de mantenimiento y en sí toda aquella persona involucrada en el mantenimiento que se encuentre con empresas, industrias o sistemas sujetos a este tipo de problema, debe conocer el fenómeno de la corrosión y saber que existen métodos para el prevenir y controlar la corrosión.

El control y prevención de la corrosión abarca un amplio espectro de actividades técnicas. Dentro de la esfera del control de la corrosión y su prevención, existen diferentes opciones de técnicas, como la protección catódica, la selección de materiales, la inyección química y la aplicación de recubrimientos externos e internos.

Luego de haber analizado la corrosión y sus formas, es momento de ver qué conocimientos se tienen en la actualidad para prevenirla.

3.2.1. Monitoreo de la corrosión

Es la práctica de la medición del potencial corrosivo en las condiciones en que se encuentra un elemento metálico o equipo dentro de un proceso, a través del uso de probetas, las cuales son expuestas continuamente a las condiciones del mismo. Las probetas de monitoreo de corrosión pueden ser dispositivos mecánicos, eléctricos o electroquímicos.

Típicamente, es un programa de medición de la corrosión, inspección y mantenimiento, utilizado en cualquier industria, usando una combinación de técnicas de medición en línea, directa e indirecta. Las técnicas de control de la corrosión son:

- Monitoreo de corrosión, que es una técnica directa y en línea
- Pruebas no destructivas, técnica directa

- Análisis químicos, técnica indirecta
- Datos operacionales, técnica indirecta y en línea

En un programa bien coordinado y controlado, los datos de cada fuente serán utilizados para llegar a una conclusión confiable sobre las tasas de corrosión que se dan en el elemento metálico o equipo dentro del proceso y cómo pueden ser minimizados de forma más efectiva.

La tasa de corrosión determina que tan duradera puede ser la vida útil del elemento metálico o equipo y su seguridad operacional. La medición de la corrosión y las acciones para remediar las tasas de corrosión elevadas, permiten incrementar la efectividad costo-operación, para alcanzar la reducción de los costos asociados a la renovación de las instalaciones o equipos dentro de un proceso.

Con las técnicas para el monitoreo de la corrosión se podría:

- Proveer una alarma anticipada de los daños potenciales que ocurrirían en las estructuras de producción, de mantenerse las condiciones corrosivas existentes.
- Estudiar la correlación de los cambios en los parámetros en el proceso y sus efectos en la corrosividad del sistema.
- Diagnosticar un problema de corrosión particular, identificar sus causas y los parámetros de control de la corrosión, como la presión, temperatura, pH y caudal.

- Evaluar la efectividad de una técnica de prevención/control de la corrosión que se haya aplicado al sistema, tales como la inhibición química.
- Proveer información relacionada con los requerimientos de mantenimiento y condiciones de la planta.

3.2.1.1. Técnicas de monitoreo de corrosión

Existe un gran número de técnicas para el monitoreo de la corrosión. La lista siguiente detalla las más comunes usadas en las aplicaciones industriales:

- Cupones de corrosión, medición de pérdida de peso
- Resistencia eléctrica, con probetas E/R
- Resistencia de polarización lineal, con probetas LPR
- Galvánica (ZRA)/ potencial
- Monitoreo especializado

Existen otras técnicas, pero muchas requieren la operación de expertos y otras no son adaptables a aplicaciones industriales. De las técnicas mencionadas, la de los cupones de corrosión, el método E/R y el método LPR constituyen las más importantes en el monitoreo de la corrosión industrial. Las otras dos técnicas son utilizadas en aplicaciones especiales que serán comentadas posteriormente.

Estas técnicas de monitoreo de corrosión han sido exitosamente aplicadas y han sido usadas ampliamente debido a que:

- Las técnicas son fácilmente comprendidas e implementadas.

- La efectividad de los equipos ha sido corroborada en el campo por muchos años de aplicaciones operacionales.
- Los resultados son fáciles de interpretar.
- La medición de los equipos puede ser hecha de forma segura en áreas peligrosas.
- Los usuarios han experimentado significativos beneficios económicos, reduciendo las paradas de planta y extendiendo su vida útil.

3.2.1.1.1. Cupones de corrosión

La técnica de pérdida de peso es la más simple y la más conocida de todos los métodos de monitoreo de corrosión. Esta técnica se basa en la exposición por un tiempo determinado de una muestra, llamado cupón, del mismo material de la estructura supervisada, en el mismo ambiente corrosivo al que la estructura está expuesta.

La medición obtenida de los cupones al analizarse es la pérdida de peso que ocurre en la muestra durante el período al que ha sido expuesto, expresada como tasa de corrosión.

La simplicidad de esta medición es tal, que la técnica de monitoreo con cupones es el método básico utilizado en muchos programas de inspección de la corrosión. Esta técnica es extremadamente versátil, debido a que los cupones de pérdida de peso pueden ser fabricados en cualquier aleación comercial disponible. Además, utilizando el diseño geométrico apropiado, una amplia variedad de fenómenos corrosivos pueden ser estudiados:

- Estrés causado por la corrosión
- Ataque galvánico/bimetálico
- Diferencias en la exposición al aire
- Zonas afectadas por el calor

Las ventajas de los cupones de pérdida de espesor son:

- La técnica es aplicable a todos los ambientes: gases, líquidos y flujos con partículas sólidas.
- Puede realizarse inspección visual.
- Los depósitos de incrustación pueden ser observados y analizados.
- La pérdida de peso puede ser fácilmente determinada y la tasa de corrosión puede ser fácilmente calculada.
- La corrosión localizada puede ser identificada y medida.
- La eficiencia de los inhibidores pueden ser fácilmente determinada.

En un programa típico de monitoreo, los cupones son expuestos entre unos 45 a 90 días antes de ser removidos para análisis de laboratorio. La frecuencia de extracción de los cupones para la toma de datos sería de un mínimo de 4 veces por año. Las pérdidas de peso resultantes de cualquier cupón expuesto por un período, será el valor promedio de la corrosión que ha ocurrido en ese intervalo de tiempo.

La desventaja de la técnica de cupones es que, si la tasa de corrosión varía durante el período de exposición, es decir, si se incrementa o disminuye por alguna causa, dicho evento pico no sería evidenciado en el cupón, sin poderse determinar su duración y su magnitud.

Es por ello que el monitoreo con cupones es mas útil en ambientes donde la tasa de corrosión no presenta cambios significativos en largos períodos de tiempo. Sin embargo, los cupones pueden proveer una útil correlación cuando se utilizan con otras técnicas como las mediciones ER y LPR.

3.2.1.1.2. Resistencia eléctrica

Las probetas de resistencia eléctrica (ER) pueden ser consideradas como cupones de corrosión electrónicos. Al igual que los cupones, las probetas ER proveen una medición de la pérdida del metal de un elemento expuesto a un ambiente corrosivo pero, a diferencia de los cupones, la magnitud de la pérdida de metal puede ser medido en cualquier momento, a la frecuencia que sea requerida, mientras la probeta se encuentre permanentemente expuesta a las condiciones del proceso.

La técnica ER mide el cambio en la resistencia eléctrica (Ohm) de un elemento metálico corroído, expuesto al medio ambiente del proceso. La acción de la corrosión en la superficie del elemento produce un decrecimiento en el área de la sección transversal de dicho sensor, lo cual representa un incremento en la resistencia eléctrica.

El aumento en esta resistencia puede ser relacionada directamente con la pérdida de metal y la pérdida de metal es en función del tiempo, es la definición de la tasa de corrosión. Aunque es una técnica que promedia la corrosión en el

tiempo, los intervalos entre cada medición pueden ser mucho más cortos que los de los cupones de pérdida de peso.

Las probetas ER tienen todas las ventajas del cupón, pero adicionalmente:

- Son aplicables en todos los ambientes de trabajo, líquidos, gaseosos, sólidos, flujos con partículas sólidas.
- La tasa de corrosión puede ser obtenida de forma directa.
- La probeta se puede mantener instalada y conectada en línea hasta que su vida operacional haya sido agotada.
- Responde de forma rápida a los cambios en las condiciones corrosivas, y puede ser utilizado como disparador de alarmas.

Las probetas ER se encuentran disponibles en una gran variedad geométrica, metalúrgica y sensitiva de elementos, además pueden ser configuradas para el montaje tipo rasante, para poder ejecutar operaciones en línea, sin tener que remover las probetas. El rango de sensibilidad permite que el operador seleccione la mejor respuesta dinámica, que sea consistente con los requerimientos del proceso.

3.2.1.1.3. Resistencia de polarización lineal

La técnica LPR está basada en una teoría electroquímica compleja. Para su aplicación en mediciones industriales, ha sido simplificada a un concepto básico. En términos fundamentales, un pequeño voltaje (o potencial de

polarización) es aplicado a un electrodo en solución. La corriente necesaria para mantener una tensión, típicamente 10 mV, es directamente proporcional a la corrosión en la superficie del electrodo sumergido en la solución. Por medio de la medición de la corriente, la tasa de corrosión puede ser deducida.

La ventaja de la técnica LPR es que la medición de la tasa de corrosión es hecha instantáneamente. Esta es una herramienta más poderosa que las probetas ER o los cupones, cuando la medición fundamental no es la pérdida de metal si no la tasa de corrosión y cuando no se desea esperar por un período de exposición para determinarla.

La desventaja de la técnica LPR es que esta solo puede ser ejecutada exitosamente en medios acuosos electrolíticos. Las probetas LPR no funcionan en gases o emulsiones de agua/crudo, en donde en los electrodos puedan asentarse depósitos o impurezas que les impidan actuar debidamente.

3.2.1.1.4. Galvánica

La técnica de monitoreo galvánico, también conocida como la técnica de Amperímetro de Resistencia Cero, o ZRA, es otra técnica electroquímica de medición. Con las probetas ZRA, dos electrodos de diferentes aleaciones o metales son expuestos al fluido del proceso.

Cuando son inmersas en la solución, un voltaje natural o diferencial de potencial se presentará entre los electrodos. La corriente generada por este diferencial de potencial refleja la tasa de corrosión que está ocurriendo en el electrodo más activo del par.

El monitoreo galvánico es aplicable a los siguientes casos:

- Corrosión bimetálica
- Agrietaduras y picaduras
- Corrosión asistida por resquebrajamientos
- Corrosión por especies altamente oxigenadas
- Daños de soldadura

La medición de la corriente galvánica ha conseguido una amplia gama de aplicaciones en sistemas de inyección de agua, donde las concentraciones de oxígeno disuelto son de consideración. La presencia de oxígeno dentro de dichos sistemas incrementa en gran medida la corriente galvánica y, por lo tanto, la tasa de corrosión de los componentes de acero del proceso. Los sistemas de monitoreo galvánico son usados para proveer una indicación del oxígeno que puede estar invadiendo las inyecciones de agua.

3.2.1.1.5. Monitoreo especializado

- Monitoreo biológico: a través de esta técnica, se puede identificar la presencia de bacterias sulfato reductoras (SRB). Este tipo de bacteria anaeróbica consume el sulfato presente en los procesos y genera ácido sulfúrico, un agente corrosivo que ataca los elementos metálicos de las plantas de producción.
- Monitoreo de erosión por arena: estos dispositivos son diseñados para medir la erosión causada en el flujo de un sistema. Son ampliamente aplicados en sistemas de producción donde la presencia de arena u otros elementos erosivos existan.

- Monitoreo de la penetración de hidrógeno: en procesos de ambiente ácido, el hidrógeno es un producto de la reacción corrosiva. El hidrógeno generado en dichas reacciones puede ser absorbido por el acero de forma particular cuando existen trazas de sulfuro o cianuro. La penetración de hidrógeno puede inducir la falla de muchas maneras en la estructura afectada. El concepto de las probetas de hidrógeno es la de detectar la magnitud de la permeabilidad ante el hidrógeno a través del acero por medio de mediciones mecánicas o electroquímicas, y utilizar esta información como un indicativo de la tasa de corrosión existente.

3.2.1.2. Aplicaciones de las técnicas de monitoreo de corrosión

El monitoreo de corrosión es típicamente implementado en las siguientes situaciones:

- Donde existen procesos con unos niveles muy riesgosos de presión, temperatura, toxicidad, inflamabilidad y peligros de explosión.
- Donde los procesos sean altamente corrosivos.
- Donde los cambios en las condiciones operacionales pueden causar cambios significativos en las tasas de corrosión.
- Donde se desee auditar la efectividad de un inhibidor de corrosión.
- En procesos con bacheos, donde la corrosión se presenta debido a ciclos repetitivos.

- Para evaluación de la corrosión de diferentes aleaciones.
- En estructuras donde se utilice protección catódica o anódica.
- Donde es de gran importancia supervisar los productos derivados del fenómeno corrosivo.

El monitoreo de corrosión puede ser implementado en cualquier industria donde la prevención de la corrosión es prioritaria. Algunos ejemplos de las industrias y áreas donde es de interés la implementación de estas tecnologías son:

- Producción de gas y petróleo:
 - Líneas de flujo
 - Tuberías de transporte
 - Instalaciones de inyección de agua
 - Tanques
 - Instalaciones de procesamiento
 - Sistemas de agua.
 - Sistemas de inyección de química
 - Taladros y pozos
 - Sistemas de agua de limpieza
- Refinería:
 - Pasos de crudo
 - Torres de vacío
 - Fuentes de agua
 - Sistemas de amina

- Sistemas de enfriamiento
- Calderas
- Servicios
 - Sistemas de enfriamiento
 - Sistemas efluentes
 - Sistemas de agua
 - Calderas de agua
- Industria papelera y de fruta
 - Digestores
 - Calderas
 - Sistemas de enfriamiento
- Industria petroquímica y química
 - Sistemas de proceso
 - Sistemas de enfriamiento

En cualquier sistema de monitoreo de corrosión, es una práctica común encontrar dos o más técnicas combinadas para proveer una amplia base para la obtención de datos confiables. Las técnicas ideales que pueden ser utilizadas en cada caso dependen del proceso, la aleación del sistema y los parámetros de operación.

El monitoreo de corrosión ofrece una respuesta a la interrogante de si hoy existe una mayor corrosión en el sistema que ayer. Utilizando esta información,

es posible determinar la causa de la corrosión y sus efectos. El monitoreo de corrosión se mantiene como una arma indispensable en la lucha contra la corrosión y, así, garantizar un beneficio económico al usuario.

3.2.2. Recubrimientos protectores contra la corrosión

Estos son usados para aislar las regiones anódicas y catódicas e impiden la difusión del oxígeno o del vapor de agua, los cuales son una gran fuente que inicia la corrosión o la oxidación.

La primera idea es escoger un material que no se corroa en el ambiente considerado. Se pueden utilizar aceros inoxidable, aluminios, cerámicas y polímeros. La elección también debe tomar en cuenta las restricciones de la aplicación, como masa de la pieza, resistencia a la deformación, al calor, capacidad de conducir la electricidad.

Cabe recordar que no existen materiales absolutamente inoxidables; hasta el aluminio se puede corroer. En la concepción, hay que evitar las zonas de confinamiento, los contactos entre materiales diferentes y las heterogeneidades en general. Hay que prever también la importancia de la corrosión y el tiempo en el que habrá que cambiar la pieza, como un mantenimiento preventivo.

Se impide la corrosión cubriendo al metal que se desea proteger con una película adherente de un metal que no se corroa. La película puede ser construida con materiales variados: metálicos, inorgánicos u orgánicos.

3.2.2.1. Recubrimientos orgánicos, pinturas

Aunque de formulación cada día más compleja, la pintura, en su concepción más general, es una mezcla líquida que al ser aplicada sobre una superficie tiene la propiedad de formar una capa continua, producto filmógeno, y de transformarse en película sólida. Se puede considerar que la pintura consta de tres componentes fundamentales:

- Aglutinante o resina
- Disolvente, sustancia volátil
- Pigmentos o mezcla de pigmentos

Los dos primeros componentes se hallan en fase líquida y el tercero, en fase sólida. La fluidez de la pintura permite su penetración incluso en resquicios intrincados. Se consigue disolviendo el formador de película, aglutinante, en el disolvente apropiado, o consiguiendo suspensiones coloidales del pigmento y del aglutinante en un disolvente.

La pintura contiene además otros constituyentes que se añaden con fines específicos como: diluyentes, plastificantes, materiales de relleno, colorantes, entre otros. El aglutinante, ligante o resina, es el componente formador de la película, frecuentemente de naturaleza orgánica, polímero, y determina en gran medida las propiedades físicas y químicas de la pintura.

Aunque la terminología en el campo de las pinturas es confusa, se tratará de diferenciar los términos de uso más frecuente:

- Barniz: es una solución coloidal de un aglutinante en un disolvente, pudiendo contener también diluyentes y plastificantes. Son películas

siempre transparentes y brillantes ya que no contienen pigmentos, diferencia fundamental con relación a una pintura que sí los contiene.

- Laca: se caracterizan por formar la película sólida a través del mecanismo de evaporación del disolvente.
- Esmalte: es pintura que presenta la peculiaridad de formar películas excepcionalmente lisas en tiempos de curado notablemente inferiores a las pinturas ordinarias.

Los recubrimientos de pintura tratan de impedir, o al menos frenar, el proceso corrosivo del sustrato metálico por alguno de los siguientes efectos:

- Efecto barrera o permeabilidad de los recubrimientos: consiste en frenar o impedir el acceso del agua, oxígeno e iones solubles a través del revestimiento, inhibiendo la reacción catódica.

La experimentación científica del fenómeno ha demostrado que los recubrimientos orgánicos son siempre permeables, en mayor o en menor medida, al oxígeno y al agua, por lo cual la protección anticorrosiva mediante el mecanismo barrera está seriamente limitada. Sin embargo, si se elige adecuadamente la resina, los pigmentos y el espesor de recubrimiento, se consigue reducir notablemente la velocidad de transmisión de los agentes corrosivos.

Las resinas o ligantes puros, sin pigmentos, contienen disolventes para facilitar su manejo y aplicación, los cuales se evaporan durante la fase de formación de la película seca y al hacerlo van creando o

manteniendo pequeñísimos canales o huecos desde el fondo hacia la superficie.

Pero, aún sin la acción de la evaporación de los disolventes, las capas de ligantes o resinas tienen espacios libres en su interior, que corresponden al espacio inocupado entre las moléculas de un sólido amorfo. Estos huecos poseen un tamaño, donde obviamente no podrán pasar los pigmentos ni los líquidos, pero sí los gases y vapores. En definitiva, la formación de la película seca de resina o ligante da lugar a una membrana con mayor o menor permeabilidad al paso de los gases y vapores.

- Resistencia iónica: consiste en la reducción de la conducción iónica entre los ánodos y los cátodos, provocada por la resistencia que la película de pintura ofrece al movimiento de los iones del electrolito.

Aparte de inhibir las reacciones anódica y catódica, la tercera vía para frenar la corrosión era mitigar el transporte iónico en el seno del revestimiento. Si los iones no pueden circular por la interface, entre el revestimiento y el substrato, o pueden hacerlo con dificultad, el circuito eléctrico quedará interrumpido o debilitado, de forma que el flujo de electrones en el seno del metal se verá ralentizado hasta dar lugar a una corriente tan débil que el avance de la corrosión será marginal.

En la actualidad, se acepta que la resistencia iónica es el mecanismo principal de protección anticorrosiva de los recubrimientos de pintura.

- Efecto inhibidor: este mecanismo de protección anticorrosivo, lo presentan aquellas películas de pintura que contienen pigmentos, por lo general de naturaleza inorgánica. Los inhibidores pueden actuar sobre el proceso de corrosión de dos modos:
 - Promoviendo el mantenimiento de una película de protección superficial de óxido sobre el metal.
 - Formación de compuestos insolubles por su reacción con el vehículo.

En definitiva, mediante cualquiera de las dos acciones anteriores lo que se consigue es polarizar los ánodos o los cátodos de las pilas de corrosión que se forman, una vez el electrolito ha difundido a través del recubrimiento, reduciéndose por tanto la intensidad del proceso corrosivo.

- Efecto de protección catódica: ciertas pinturas están formuladas a base de pigmentos metálicos, usualmente cinc, que actúan de ánodo en beneficio del soporte metálico que actúa de cátodo.

Es conocido, en el caso del hierro, la disolución metálica, corrosión, se produce en los ánodos mientras que los cátodos permanecen inalterados, presentándose en ellos otras reacciones químicas distintas de las de disolución metálica. Es este, el mecanismo básico de la protección catódica, en que toda la superficie metálica se protege por hacerla actuar de cátodo.

3.2.2.2. Recubrimientos metálicos

Los recubrimientos metálicos se pueden clasificar de forma general según su potencial redox, relativo al del metal que van a proteger, resultando así dos tipos de recubrimientos:

- Recubrimientos anódicos (recubrimientos con metales de sacrificio): cuando se utiliza este tipo de revestimientos no existe peligro de corrosión del hierro aunque el recubrimiento no sea perfectamente continuo; es decir, los recubrimientos catódicos siguen conservando su efecto protector sobre el metal base, aunque exista porosidad, discontinuidad o daño mecánico en alguna zona del recubrimiento.

El área del metal base, sobre la cual se extiende la protección catódica, depende de la conductividad del medio. Para los recubrimientos de zinc sobre acero, en aguas de baja conductividad, tales como agua destilada o aguas blandas, un defecto del recubrimiento de unos 3 mm de ancho, es posible que comience a formar herrumbre en el centro. Sin embargo, en agua de mar, que es un buen conductor, el zinc protege al acero en varios decímetros.

Esta diferencia de comportamiento es consecuencia de que en las aguas de alta conductividad, las densidades de corriente adecuadas para la protección catódica se extienden a considerable distancia, mientras que en las aguas de baja conductividad, las densidades de corriente de corriente catódica disminuyen con rapidez en función de la distancia.

- Recubrimientos catódicos (recubrimientos con metales nobles): Son recubrimientos catódicos el cromo, níquel, plomo, estaño, cobre, plata,

oro, rubidio y platino sobre hierro. Por ejemplo, en el caso de un recubrimiento de níquel, el hierro constituye el ánodo de la pila. La menor fisura en el revestimiento dará lugar a un ataque del hierro; en estas zonas se forma óxido, que se extiende rápidamente por debajo de la capa de recubrimiento, siendo pues necesario que el recubrimiento sea perfectamente continuo.

Es importante que los recubrimientos nobles se preparen siempre con la mínima cantidad de poros y que tales poros, cuando existan, sean tan pequeños como resulte posible, de forma que retrasen el acceso de agua al metal base. Esto, por lo general, requiere aumentar el espesor del recubrimiento. A veces se rellenan los poros con una laca orgánica, o se difunde en el recubrimiento, a temperaturas elevadas, un segundo metal de punto de fusión más bajo, por ejemplo: cinc o estaño en recubrimientos de níquel.

Así, en el caso del hierro, los recubrimientos de cinc, cadmio y aluminio son anódicos; los recubrimientos de plomo, estaño, níquel, cobre, plata, oro, rodio y platino son catódicos. Se procura que los revestimientos sean lo más estancos posibles. Si aparece una discontinuidad en los mismos, el hecho de que el recubrimiento sea anódico o catódico marcará una importante diferencia en la protección.

Los principales procedimientos para obtener un recubrimiento metálico son los siguientes:

- Inmersión en un baño fundido: el metal que se ha de proteger se sumerge en un baño del metal protector fundido. Siendo así que la operación se realiza en caliente, la capa formada es compleja, a causa

de los fenómenos de difusión que se producen. Este método se utiliza especialmente para obtener depósitos de cinc, galvanización o cincado, o de estaño, estañado.

- **Electrólisis:** esta técnica es difícil de aplicar en el caso de piezas de grandes dimensiones. Los depósitos presentan siempre cierta porosidad, debido a la presencia de partículas extrañas o de gases durante la operación de electrólisis. Esto obliga a efectuar depósitos de espesor suficiente para que no exista continuidad entre los poros.
- **Metalizado:** consiste en proyectar un metal fundido o en estado plástico pulverizado sobre la superficie de otro. Con esto se consigue dar superficialmente a un metal las características de otro, si es que son superiores por algún concepto, como, por ejemplo, por su mayor resistencia al desgaste y a la corrosión.
- **Depósito en fase gaseosa:** la pieza que debe ser recubierta es llevada a una temperatura ligeramente superior a la que corresponde la descomposición o a la reducción del compuesto metálico gaseoso.

El depósito se efectúa bajo presión reducida del compuesto. Su espesor puede ser muy grande, de varias décimas de milímetro. Este método se utiliza en anticorrosión para la protección de piezas de forma complicada: recubrimiento de níquel por descomposición de carbonato de níquel (NiCO_4) a $150\text{ }^\circ\text{C}$, recubrimiento de tungsteno por reducción del fluoruro de wolframio (WF_6) por hidrógeno a unos $400\text{ }^\circ\text{C}$.

La metalización al vacío y el depósito en fase gaseosa pueden ser utilizados para revestir piezas no metálicas, por ejemplo piezas refractarias.

- Depósito químico: este método permite el depósito en fase líquida. Por ejemplo, puede depositarse níquel sobre el hierro descomponiendo el hipofosfito sódico en medio ligeramente ácido.

3.2.2.3. Recubrimientos inorgánicos, no metálicos

Aparte de los recubrimientos orgánicos, pinturas y los recubrimientos metálicos, vistos anteriormente, se utilizan frecuentemente los siguientes recubrimientos inorgánicos:

- Recubrimientos por transformación química: se trata de recubrimientos protectores formados *in-situ* por reacción química con la superficie del metal.

Se consideran tres tipos por transformación química:

- Fosfatación: los recubrimientos de fosfato sobre acero, se obtienen extendiendo sobre la superficie limpia del acero, por medio de brocha o rociado, una solución diluida, fría o caliente, de ortofosfato ácido de cinc o de manganeso. La subsiguiente reacción produce una red de cristales porosos de fosfato metálico unidos a la superficie del acero.

Algunas veces se añaden a la solución fosfatante aceleradores, para aumentar la velocidad de reacción. Los

recubrimientos de fosfato no dan por sí mismos una protección apreciable contra la corrosión. Son útiles principalmente como base para las pinturas, ya que proporcionan buena adherencia de la pintura al acero y disminuyen la tendencia a la corrosión que socava la película de pintura en los arañazos y otros defectos. Se puede utilizar para proteger el hierro, el aluminio o el cinc.

○ Oxidación superficial:

- Recubrimientos de óxido sobre el acero: se pueden preparar por oxidación controlada en aire a alta temperatura o, por ejemplo, por inmersión en soluciones de álcalis concentrados y calientes que contengan persulfatos, nitratos o cloratos.

Estos recubrimientos de color azul, marrón o negro, se componen en su mayor parte de óxido ferroso férrico (Fe_3O_4), y, al igual que los recubrimientos de fosfatos, no son protectores contra la corrosión.

- Formación de una película protectora por oxidación anódica: la oxidación anódica es un método que se aplica principalmente al aluminio y a sus aleaciones. También recibe el nombre de anodizado.

Al exponerse a los agentes atmosféricos, el aluminio recién abrasionado forma rápidamente una película impermeable de óxido de un espesor de 0,1 micras. Al cabo de unos diez a catorce días la película de óxido ya no

aumenta. Su carácter inerte y auto cicatrizante ofrece una considerable resistencia a la oxidación atmosférica normal, con lo que la velocidad de corrosión se reduce a un valor muy bajo.

La película de alúmina (Al_2O_3) que se forma espontáneamente en el aire sobre la superficie del aluminio resulta sin embargo insuficiente para proteger el metal contra un ataque químico débil o para resistir la abrasión.

El tratamiento de oxidación anódica se realiza a temperatura ambiente en un electrolito adecuado, por ejemplo ácido sulfúrico diluido, y permite formar en la superficie del metal, por electrólisis, una película de alúmina gruesa de 0,0025 a 0,025 mm, dura y protectora.

El óxido así obtenido tiene que someterse a hidratación para mejorar sus propiedades protectoras, exponiendo los artículos anodizados al vapor o agua caliente durante varios minutos, proceso que se denomina sellado. El recubrimiento de óxido se puede teñir de diversos colores, en el baño de anodizado o después.

El anodizado mejora en cierto grado la resistencia a la corrosión, aunque la protección adicional no es espectacular y sin duda es menor que la proporcional al correspondiente espesor de óxido. Los recubrimientos obtenidos en el anodizado proporcionan una superficie base buena para el pintado del aluminio, que es un metal de otro

modo difícil de pintar, sin someter la superficie a una preparación especial.

- Cromatado: los recubrimientos de cromato se forman sobre cinc por inmersión del metal limpio durante unos pocos segundos en una solución a temperatura ambiente de dicromato potásico, por ejemplo 200 g/l, acidificada con ácido sulfúrico (H_2SO_4), 8 ml/l y después se lava y se seca.

Se forma una superficie de cromato de cinc que da un ligero color amarillo y que protege al metal de manchas y oxidación causada por la humedad condensada. Esto también aumenta la vida del cinc, en un grado modesto, expuesto a la acción de la atmósfera. Se han recomendado recubrimientos similares para el cadmio.

- Esmaltes vítreos: los esmaltes son esencialmente borosilicatos de calcio, de potasio y de plomo, que se aplican formando una capa sobre el metal previamente desengrasado y decapado. Una vez secas, se introducen las piezas en un horno donde se funde el esmalte formando una capa vítrea protectora. Los esmaltes tienen el inconveniente de que no son elásticos y saltan con facilidad si se golpean.

Los esmaltes vítreos proporcionan una protección eficaz para los metales base contra la corrosión de muchos medios agresivos. Los vidrios, que en esencia se componen de borosilicatos alcalinos, pueden formularse para resistir ácidos fuertes y álcalis suaves o ambos.

Su elevada calidad protectora se debe a su impenetrabilidad al agua, y al oxígeno aun durante tiempos de exposición relativamente largos, y por su estabilidad y duración a temperatura ambiente y superiores. Los recubrimientos de esmalte vítreo se aplican principalmente sobre acero pero también es posible aplicar algunos recubrimientos sobre cobre, bronce y aluminio.

3.2.3. Inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión son sustancias que se introducen en pequeñas proporciones en el medio corrosivo y reducen la velocidad de corrosión metálica sustancialmente, debido a la formación de una capa protectora sobre la superficie del metal que constituye una barrera entre el agua y la superficie metálica.

Los inhibidores actúan sobre la interface metal-medio, dificultando el desarrollo del proceso de corrosión a través de dos mecanismos:

- Precipitación de compuestos insolubles sobre la superficie metálica
- Formación de capas pasivantes adsorbidas

La inhibición se descubrió al observar el efecto protector de ciertas sustancias naturales, pero, más recientemente, al comprobar que varios grupos funcionales de la química orgánica poseían propiedades inhibidoras, se encontró una fuente inagotable de inhibidores potenciales, siendo posible, actualmente, recurrir a la utilización de productos químicos sintéticos y realizar un diseño específico de inhibidores.

El éxito de un inhibidor para controlar la corrosión depende de varios requisitos básicos:

- Comenzar el tratamiento a dos o tres veces la concentración de inhibidor normal, dosis de pasivación, para acumular una película protectora tan rápido como sea posible y debe ser deseable. Esto minimiza la ocasión de que el picado comience antes de que toda la superficie metálica haya sido cubierta por la capa protectora. Usualmente se requieren al menos varias semanas para que el recubrimiento se desarrolle.
- El inhibidor normalmente debe alimentarse de modo continuo y a una concentración suficientemente elevada, dosis de mantenimiento. Las interrupciones en la alimentación pueden producir pérdida de la capa protectora por disolución y las concentraciones que son demasiado bajas pueden evitar la formación de capa de protección en todas las partes de la superficie.
- Los caudales circulantes deben ser suficientes para transportar continuamente el inhibidor para que llegue a todos los puntos de la superficie metálica; de otro modo, no se formará una barrera o película protectora. Por ejemplo, los inhibidores de corrosión a menudo no pueden reducir la corrosión en depósitos de almacenamiento si el agua no fluye, y el inhibidor no se alimenta continuamente.

CONCLUSIONES

1. La corrosión se presenta a temperatura ambiente o una temperatura próxima a esta, como resultado de la reacción de los metales con el agua, el oxígeno y el hidrógeno o con soluciones acuosas de sales, ácidos o bases.
2. Conociendo cómo afecta la corrosión a los materiales de ingeniería, especialmente los elementos metálicos, es muy importante tomar en cuenta un medio que permita controlar y disminuir los efectos que causan la corrosión.
3. La protección catódica es un medio que se utiliza para contrarrestar los efectos que la corrosión causa sobre los elementos metálicos, pero no la elimina.
4. Los métodos de protección catódica aplicados conjuntamente con un sistema de recubrimiento brindan una defensa muy efectiva que preservará durante un tiempo prolongado al elemento metálico.
5. Es importante conocer otros métodos de protección de los elementos metálicos contra la corrosión, para aplicarlos donde la protección catódica no es viable o para ser aplicado conjuntamente.

RECOMENDACIONES

1. Es importante investigar y comprender el tema de la corrosión en los elementos metálicos, para integrarlo como una variable de estudio y añadirlo en el plan de mantenimiento y operación del elemento mecánico.
2. La protección catódica es una técnica de control de la corrosión de los elementos metálicos en contacto con un electrolito, comúnmente aplicado a protecciones de corrosión del suelo y de corrosión marina.
3. Los costos de la protección catódica pueden ser muy bajos si se aplican recubrimientos y el sistema está bien diseñado y aislado.
4. La protección catódica usualmente es un método de control a largo plazo, el cual se debe de monitorear para evitar fallas.
5. La corrosión debe incluirse en los planes de mantenimiento, el cual debe monitorearse continuamente, para evitar problemas operacionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASHBY, Michael; JONES, David. *Materiales para ingeniería 1*. Barcelona: Editorial Reverté, 2008. 421 p.
2. BILURBINA ALTER, Luis. *Corrosión y protección*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2003. 278 p.
3. CALLISTER JR, William. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. 2a. ed. México: Limusa Wiley, 2009. 721 p.
4. FONTANA, Mars G. *Corrosion engineering*. 3a. ed. United States: The Ohio State University, Editorial Board, 1987. 576 p.
5. GÓMEZ DE LEÓN HIJES, Félix. *Manual básico de corrosión para ingenieros*. España: Universidad de Murcia, 2004. 170 p.
6. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, José A. *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1989. 550 p.
7. PEREIRA PADILLA, Mario Vincent. Consideraciones para el diseño de la protección catódica de oleoductos y su aplicación práctica en el oleoducto, refinería Texaco. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1995. 94 p.

8. VALLEJO FIGUEROA, Julio César. *Conocimiento y prevención de la corrosión*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 118 p.