

M Á S A L L Á D E L A  
H E R R U M B R E I I .  
L a L u c h a C o n t r a l a  
C o r r o s i ó n

**Autor:** JAVIER ÁVILA / JOAN GENESCÁ

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PREFACIO](#)
- [I. FUNDAMENTOS DE LA ELECTRICIDAD](#)
- [II. ELECTRODOS DE REFERENCIA](#)
- [III. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA](#)
- [IV. PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS](#)
- [V. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA](#)
- [VI. CONDICIONES DE PROTECCIÓN CATÓDICA. CRITERIOS DE POTENCIAL Y REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE](#)
- [VII. CORROSIÓN EN SUELOS](#)
- [VIII. ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS](#)
- [APÉNDICE](#)
- [BIBLIOGRAFÍA](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)

E D I C I O N E S

Primera edición, 1989

Tercera reimpresión, 1995

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1989, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-3153-6

Impreso en México.

## P R E F A C I O

La segunda parte de *Más allá de la herrumbre* pretende introducir al lector en el conocimiento de uno de los métodos de protección contra la corrosión más utilizados en la práctica de la ingeniería, la protección catódica.

Sería recomendable que el lector abordara este libro con algún conocimiento de las bases electroquímicas del fenómeno de la corrosión, especialmente que estuviera familiarizado con los conceptos termodinámicos y cinéticos que permiten interpretar dicho fenómeno y que se manejan ampliamente en este libro. Sería recomendable, por tanto, la lectura previa del libro *Más allá de la herrumbre*, colección La Ciencia desde México, núm. 9, FCE, México, 1986 como una introducción necesaria al tema.

Los autores, en principio, al escribir este libro se dirigen hacia todas aquellas personas que participan en la lucha diaria contra la corrosión. Esperamos sus comentarios y comprensión. Sin embargo, pensando en un amplio grupo de personas que no tiene una formación química y que tiene que ver con la aplicación de sistemas de protección, es que ha sido escrita esta introducción.

No necesariamente todo lo relacionado con la protección catódica tiene cabida en estas páginas. Para subsanar lo anterior, al final del libro se incluye una amplia bibliografía para que el lector interesado profundice en el tema.

Los autores hemos pretendido presentar, de la manera lo más clara y concisa posible, los fundamentos de la protección catódica, para que la persona que se inicie con estas páginas, empiece por comprender en qué consiste la protección catódica y dé sus primeros pasos para diseñar una instalación, seleccionar el tipo de sistema más adecuado, los ánodos más convenientes, así como el control posterior de la instalación. También hemos incluido un capítulo relativo a la corrosión en los suelos, por ser un caso de especial interés, y porque existen muchas estructuras con posibilidad de sufrir los efectos devastadores de la corrosión y que están enterradas en este medio.

Amable lector, esperamos que después de leer este libro, experimente la misma satisfacción que nosotros al escribirlo y ojalá contribuyamos a la difusión de un conjunto de conocimientos muy importantes en

nuestro país, y cuya importancia simplemente podemos derivar de la magnitud de las industrias petroquímica y eléctrica.

A todo aquél que tenga la paciencia de llegar hasta la última página, le agradeceríamos que nos hiciera llegar sus críticas, comentarios y sugerencias, en la seguridad de que se tendrán en cuenta en una futura revisión del libro.

Finalmente, nos gustaría que estas páginas fuesen un pequeño homenaje a todos aquellos ingenieros que con su esfuerzo y dedicación contribuyen diariamente al mantenimiento y control de la corrosión de la planta industrial.

## I . F U N D A M E N T O S D E L A E L E C T R I C I D A D

ESTE capítulo introductorio trata de los principios y definiciones del paso de un flujo eléctrico a través de un circuito. En capítulos posteriores aplicaremos estos conocimientos fundamentales al análisis de un circuito de protección catódica para determinar los indicadores de la eficiencia de un proceso, como el voltaje de celda, las caídas óhmicas en diversas partes del circuito, la distribución de corriente, etcétera.

Para describir un circuito eléctrico simple estudiaremos un sistema de protección catódica el cual puede consistir simplemente en una fuente de poder conectada a uno o más componentes, principalmente resistores (serán descritos más adelante), por medio de un alambre hecho de un material conductor (cobre, por ejemplo), el circuito eléctrico simple constituye una fuente de poder que va a proporcionar una fuerza electromotriz estableciendo diferencias de potencial a través de los varios componentes del circuito e impulsando la corriente a través de ellos. Todos estos componentes ofrecerán varios grados de resistencia al flujo de la corriente.

En cualquier circuito eléctrico, entonces, existen varios fenómenos que tenemos que medir:

- 1) La corriente, medida en amperes (**A**);
- 2) La fuerza electromotriz y la diferencia de potencial, ambas medidas en voltios (**V**);
- 3) La resistencia, medida en ohms (**Ω**).

CONDUCTORES

La naturaleza y los tipos de materiales que participan en las reacciones electroquímicas de un sistema de protección catódica pueden tener un gran efecto sobre los resultados que se obtengan. Es, por lo tanto, necesario familiarizarse con los factores que influyen en la conducción de corriente.

La conductividad eléctrica es el movimiento de la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia.

#### *Conductores de primer orden*

Los conductores de primer orden son aquellos que poseen conductancia eléctrica, en los cuales los portadores de la carga son los electrones. Se caracterizan por tener una conducción sin transferencia substancial de masa. La mayoría de los metales, el grafito y algunos óxidos muestran este tipo de conducción. A veces, a estos materiales se les conoce como conductores metálicos y su conductividad decrece cuando aumenta la temperatura.

#### *Conductores de segundo orden*

Los conductores de segundo orden poseen conductancia iónica o electrolítica, y los portadores de la carga son los iones. En este tipo de conductores se da una transferencia de masa asociada con la conductividad. Las soluciones acuosas con sales disueltas, los suelos y las sales iónicas son algunos ejemplos de este tipo de conductores. Su conductividad aumenta cuando se incrementa la temperatura.

#### *Conductores mixtos o de tercer orden*

Algunos materiales, llamados comúnmente semiconductores, poseen tanto conductancia iónica como eléctrica. Por lo general predomina el carácter eléctrico. Su conductividad es demasiado baja en general, pero aumenta rápidamente con la temperatura. La mayoría de los óxidos metálicos (**NiO**, **ZnO**, etc.) y algunos metales (Si, Ge, etc.) se agrupan dentro de esta categoría.

### AISLANTES

Otras clases de materiales que merecen ser mencionados son los aislantes. La conductancia en ellos es muy difícil, sin importar el tipo de mecanismo que participe en la conductividad, sobre todo si se les compara con la de los conductores mencionados antes.

La influencia del proceso de conducción en la conducta electroquímica de las reacciones es muy importante. Cada reacción de corrosión, así

como las presentes en sistemas de protección catódica, tienen un origen electroquímico y se presentan en la interfase entre un conductor de primer orden (eléctrico) y uno de segundo orden (electrolítico). Por ejemplo, si un metal (conductor) tiene una película de óxido o una capa de pintura (aislantes) sobre su superficie, se estaría esperando con esto que tuviera una alta resistencia en la transferencia de electrones. Esto cambiaría la velocidad de la reacción y la energía requerida para llevarla a cabo.

## CARGA Y CORRIENTE

Ya que un electrón es una unidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada coulomb. Un coulomb corresponde a 6.24 trillones de electrones (**6.24 x10<sup>12</sup>**). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (intensidad [**I**]). En fenómenos eléctricos la carga es análoga al volumen de líquido (litros) que fluye por una tubería y la corriente es equiparable a la velocidad de flujo (cantidad de litros por minuto) en dicha tubería.

El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones (corriente eléctrica) o por iones (corriente iónica). El flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones. Un electrolito es aquella sustancia que conduce corriente por flujo iónico.

La unidad básica de la corriente eléctrica (**I**) es el ampere (**A**). Un ampere se define como la velocidad de flujo de una carga (**Q**) de un coulomb, por segundo. Así se expresa esta unidad para el consumo de algunos equipos eléctricos grandes o de celdas electrolíticas industriales a diferencia de los circuitos electrónicos transistorizados o las técnicas electroquímicas, en los cuales se emplean comúnmente dos submúltiplos de esta unidad que son el miliampere (**μA: 0.001 A**) y el microampere (**μA: 0.000001 A**).

Resumiendo, podemos decir que:

$$1 \text{ ampere} = 1 \text{ coulomb/segundo}$$
$$\mathbf{A = Q/seg.}$$

De lo anterior se deduce que la cantidad total de electricidad (**Q**), en coulombs, que pasa por cualquier punto de un circuito eléctrico es el producto de la corriente (**I**), en amperes, y el tiempo (**t**) en segundos:

coulombs = amperes x segundos

$$\mathbf{Q = It.}$$

UNIDAD DE DIFERENCIA DE POTENCIAL. EL VOLT

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (que se mide en joules), cuando un coulomb de electricidad se mueve de un punto al otro. A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama volt y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 volt cuando se realiza un trabajo de 1 joule por cada coulomb de electricidad que transita de un punto al otro; por lo tanto

$$\text{volt} = \text{joule/coulomb}$$

por lo tanto,

$$V = J/Q$$

### FUERZA ELECTROMOTRIZ

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en volts y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda.

La fem de una celda en volts se define entonces como el trabajo total efectuado en joules por los coulombs de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada.

### RESISTENCIA

Se ha dicho que los diferentes materiales pueden ser clasificados como conductores buenos o malos y como aislantes. En lo que se refiere a la corriente eléctrica, por lo general se piensa en términos de la habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor, se dice, tiene una resistencia pequeña y un mal conductor, una resistencia alta.

Se verá más adelante que la resistencia de un material depende de sus dimensiones y de la sustancia con que está hecho. Para un cable de dimensiones dadas, la plata ofrece la menor resistencia al paso de la corriente, pero como este metal es demasiado caro para un uso común, se usa el cobre para el cableado y la conexión de alambres en los circuitos eléctricos.

Cuando se requiere de una alta resistencia, se emplean casi siempre ciertas aleaciones especiales, para reducir la corriente en un circuito, como el constantan, el manganin y el nicromel.<sup>1</sup>



El constantan se emplea para uso general, mientras que el manganin se emplea más bien para manufacturar resistores estandarizados de alta calidad, ya que estas aleaciones presentan pequeños cambios en la resistencia debidos a la temperatura.

#### LEY DE OHM

En 1826 el profesor de física Simon Ohm estableció la siguiente ley como resultado de varios experimentos que efectuó para investigar la relación entre la corriente que pasa por un alambre y la diferencia de potencial establecida entre los extremos del mismo: "La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos." El conductor que siga esta relación (los conductores eléctricos) obedece a la ley de Ohm:

$$\text{(diferencia de potencial)} = \text{(constante)} \times \text{(corriente)}$$

El valor de la constante en la ecuación anterior (que es alto cuando el valor de la corriente es pequeño y bajo cuando la corriente es grande) puede ser usado como una medida de la resistencia del alambre:

$$\frac{\text{diferencia de potencial}}{\text{corriente}} = \text{resistencia}$$

En otras palabras, la resistencia de un conductor es la proporción de la diferencia de potencial a través de él y la corriente que fluye. A la unidad de resistencia eléctrica se le llama ohm y se define como: "la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 volt en sus extremos y una corriente de 1 ampere fluye por él":

$$\frac{\text{voltios}}{\text{amperes}} = \text{ohms}$$

lo que formalizado de otra manera es:

$$V = IR$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero la resistencia de otros materiales conductores, como el carbón por ejemplo, decrece con la temperatura. En otras sustancias, como los semiconductores (germanio, silicio y selenio), las disoluciones iónicas que contienen las sales y los suelos, la resistencia también disminuye cuando aumenta la temperatura.

## RESISTORES EN SERIE

Se dice que un número de resistores, ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_n$ , ..... ) están conectados en serie si su conexión es consecutiva extremo con extremo, de tal suerte que la misma corriente ( $I$ ), en amperes, fluya a través de cada una (Figura 1).

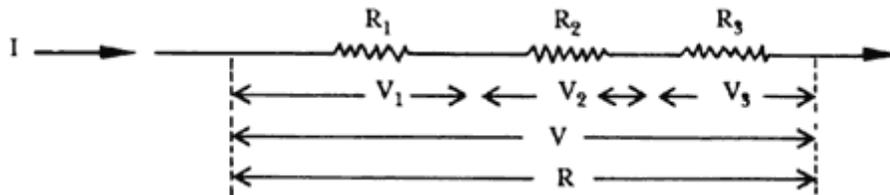


Figura 1. Parte de un circuito eléctrico.

Si  $R$  es la resistencia combinada y  $V$ , en volts, es la diferencia de potencial total a través de los resistores:

$$V = IR$$

pero como  $V$  es igual a la suma de las diferencias de potencial individuales a través de  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ :

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$
$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

por lo tanto,

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

y dividiendo todo entre  $I$ , tenemos que:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

## RESISTORES EN PARALELO

Se dice que los resistores están en paralelo cuando son colocados uno al lado del otro y sus extremos permanecen unidos (Figura 2). La misma diferencia de potencial será entonces aplicada a cada uno, pero compartirán la corriente en el circuito.

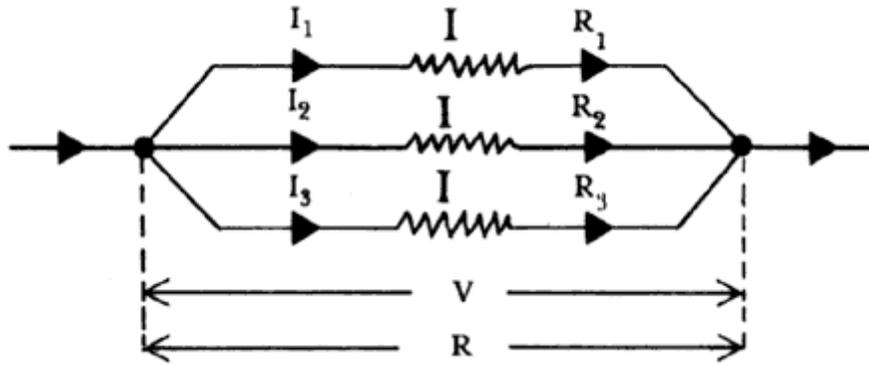


Figura 2. Parte de un circuito eléctrico

Supondremos que la corriente ( $I$ ) se divide en  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  al pasar por  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , respectivamente, y que la diferencia de potencial común es  $V$ .

Si  $R$  es la resistencia combinada, se puede reescribir:

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

la corriente total es:

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Por lo tanto,

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

y dividiendo todo entre  $V$ , tenemos que:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

IMPORTANCIA PRACTICA DE LA RESISTENCIA INTERNA DE UNA CELDA

Existen diversos tipos de celdas como, por ejemplo, las pilas secas, que pueden obtenerse de tamaños diferentes. Las fuerzas electromotrices de estas celdas serán idénticas en tanto estas últimas sean fabricadas con el mismo material exactamente y con concentraciones de electrolitos iguales. La fuerza de la corriente que se obtiene de una celda no sólo depende de su fuerza electromotriz, sino también de la resistencia interna propia. Con el fin de obtener una corriente grande, la resistencia interna debe de ser baja. En el caso de un acumulador, esto significa que las placas de plomo deben de tener una gran área y deben estar espaciadas a muy corta distancia. Asimismo, la concentración del electrolito debe ser tal que su resistencia sea la más baja posible.

De acuerdo con su tamaño y construcción, la resistencia interna de una pila seca varía de 0.5 a 1.0 ohm, y la fem es aproximadamente de 1.5 V. Por lo tanto, si las terminales de una pila seca son cortocircuitadas con un pedazo grueso de alambre de cobre cuya resistencia sea despreciable, la máxima corriente que se obtiene sería de 3 a 0.5 A.

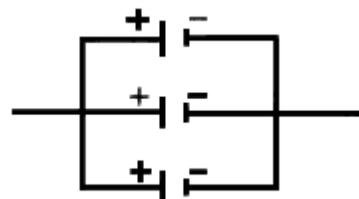
La marcha eléctrica de un motor de automóvil necesita de una corriente alta para poder operar. Por esto, las baterías o acumuladores de coches de combustión interna son fabricadas de celdas que contienen muchas placas delgadas con pequeños espaciamientos entre ellas. Ocho pilas secas en serie tendrán la misma fem que la batería de 12 V de un coche, pero serían inoperativas para arrancar la marcha en virtud de su alta resistencia interna.

### ARREGLOS DE CELDAS

Se denomina batería a un grupo de celdas conectadas entre sí. Normalmente las celdas se conectan en serie, o sea que el polo positivo de una es conectado al extremo negativo de la próxima celda, etc. (véase la figura 3). En ocasiones, sin embargo, pueden ser conectadas en paralelo, es decir, todos los extremos positivos conectados entre sí, lo mismo que los extremos negativos (Figura 4).



**Figura 3. Celdas en serie.**



**Figura 4. Celdas en paralelo.**

Cuando se requiere de la corriente máxima de un número dado de celdas, el arreglo empleado dependerá de la resistencia del circuito

externo. Hablando de manera general, se usa una conexión en serie cuando la resistencia del circuito es alta, comparada con la de las celdas, y se emplea una en paralelo cuando la resistencia es baja.

Cuando las celdas están conectadas en serie, la fem total de la batería es igual a la suma de las fems por separado y la resistencia interna es igual a la suma de las resistencias internas de las celdas por separado. Cuando celdas de igual fem y resistencia son conectadas en paralelo, la fem que resulta es la misma que la de una sola celda y la resistencia interna de la batería se calcularía de acuerdo con la fórmula de los resistores en paralelo.

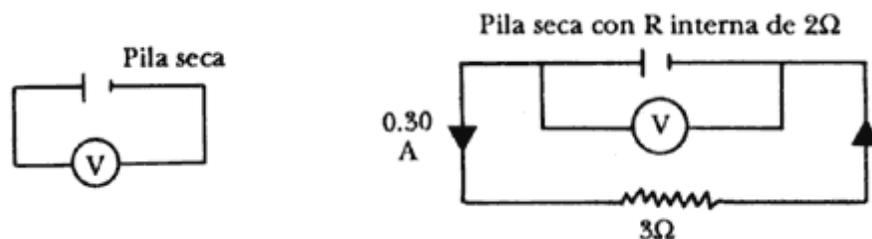
Una ventaja que se obtiene al conectar celdas en paralelo es que existe un drenaje menor de corriente en las celdas, ya que éstas comparten la corriente total, mientras que en las conexiones en serie la misma corriente principal es proporcionada por cada una de las celdas.

Las celdas nunca se deben dejar conectadas en paralelo cuando no están en uso, ya que si la fem de una es ligeramente mayor que la de la otra, comenzará a circular corriente en la batería misma y las celdas se agotarán rápidamente. Esto no sucede cuando se conectan en serie.

#### "PÉRDIDA O CAÍDA DE VOLTAJE" CUANDO UNA CELDA PRODUCE CORRIENTE EN UN CIRCUITO

Por razones prácticas, la fem de una celda puede medirse con un valor muy aproximado si tomamos la lectura de un voltímetro de alta resistencia conectado directamente a través de las terminales de la celda cuando ésta no se encuentre conectada a ningún circuito.

Supongamos que un voltímetro conectado a las terminales de una pila seca, con una resistencia interna de  $2\Omega$ , da una lectura de 1.5 V: Esta es la fem de la pila (Figura 5 a).



**Figura 5. (a) El voltímetro de alta resistencia mide una fem de 1.5 V (se desprecia el flujo de corriente). (b) El voltímetro mide sólo**

**0.90 V. Una pérdida de voltaje de 0.60 V impulsa la corriente a través de la resistencia interna.**

Cuando un resistor de  $3\Omega$  se conecta a las terminales de la celda y una corriente fluye a través de él, se observa que la lectura del voltímetro ha caído a  $0.90\text{ V}$  (Figura 5 b). La celda parece haber "perdido"  $0.6\text{ V}$  ( $1.5 - 0.9 = 0.6\text{ V}$ ). Esto puede explicarse como sigue: la corriente que circula por el circuito está dada por

$$I = \frac{\text{fem}}{\text{resistencia total}} = \frac{E}{R+B}$$

en donde

$E = \text{fem}$

$R = \text{resistencia del circuito externo}$

$B = \text{resistencia interna de la celda.}$

$$I = \frac{1.5}{3 + 2} = 0.30\text{ A.}$$

La diferencia de potencial ( $dp$ ) requerida para impulsar esta corriente a través de la resistencia externa de  $3\Omega$  es:

$$V = IR$$

$$V = 0.30 \times 3.0$$

$$V = 0.90\text{ V,}$$

que es el valor de la lectura del voltímetro.

El voltímetro está conectado a las terminales de la celda, pero en cambio si estuviera conectado a través de los extremos de la resistencia de  $3\Omega$ , no habría diferencia alguna en la lectura. Esto se debe al hecho de que los alambres que conectan la celda a la resistencia tienen una resistencia despreciable y por consiguiente su  $dp$  también es despreciable; por lo tanto, la  $dp$  en las terminales de la celda es igual a la  $dp$  en el resistor.

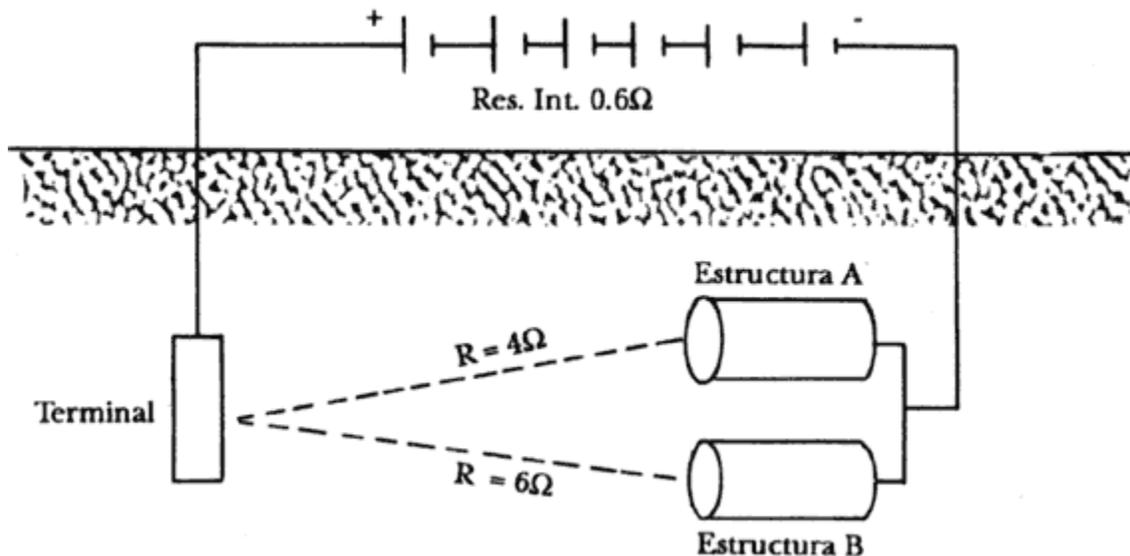
La dp requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda está dada por:

Corriente multiplicada por  $= 0.30 \times 2.0 = 0.60 \text{ V}$ , la resistencia interna valor igual al "voltaje perdido" o sea la "caída de potencial" de la celda.

Se dijo al principio de esta sección que un voltímetro daría un valor muy aproximado de la fem de la celda. Esto se debe a que incluso un voltímetro de muy alta resistencia drena algo de corriente y por esta razón una pequeña parte de la fem de la celda se "perderá" en impulsar dicha corriente a través del equipo de medición. Sin embargo, si la resistencia del voltímetro es muy alta, comparada con la resistencia de la celda, la corriente drenada será muy pequeña y en consecuencia la "caída de potencial" en este caso será numéricamente despreciable.

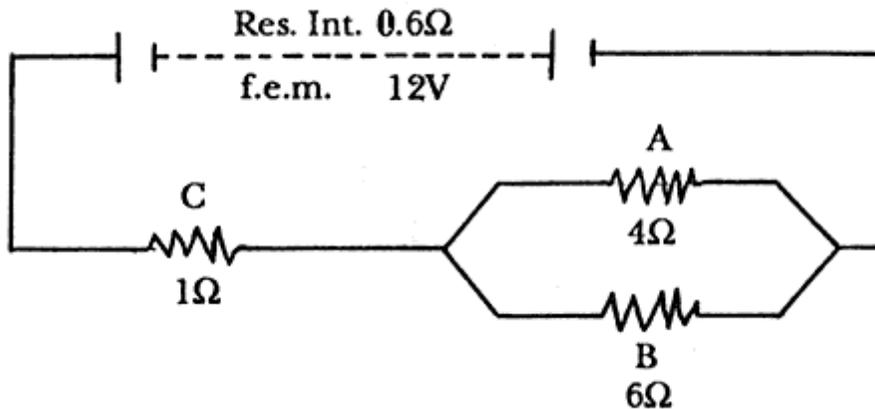
#### EJEMPLO ILUSTRATIVO

Un ejemplo ilustrará mejor lo expuesto líneas atrás: Dos estructuras metálicas enterradas, **A** y **B**, se encuentran conectadas eléctricamente en paralelo a una batería de **12 V**, cuya resistencia interna total es de  $0.6 \Omega$ , tal y como se representa en la figura 6. Las resistencias del terreno para **A** y **B** son de  $4 \Omega$  y  $6 \Omega$ , respectivamente, y la resistencia total del cable es de  $1 \Omega$ . Se trata entonces de encontrar la corriente que fluye a través del suelo entre A y B. En la figura 6 simplificada, se supone que cualquier otra caída de potencial se ignorará por el momento.



**Figura 6. Estructuras metálicas enterradas, conectadas eléctricamente a una batería.**

El primer paso para estudiar un problema eléctrico es dibujar un diagrama del circuito:



La resistencia combinada (**R**), en ohms, de **A** y **B** está dada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{6+4}{24} \quad R = 2.4$$

por tanto, la resistencia total del circuito es:

$$R = 0.6 + 1 + 2.4 = 4$$

$$\text{corriente principal} = \frac{\text{fem}}{\text{resistencia total}} = \frac{12}{4} = 3A.$$

La dp a través de **A** y **B** (la corriente multiplicada por la resistencia combinada) es igual, entonces, a:

$$3 \times 2.4 = 7.2$$

Por lo tanto, la corriente a través de **A** es igual a:

$$\frac{dp}{\text{resistencia}} = \frac{7.2}{4} = 1.8A,$$

y la corriente a través de **B** resultará como sigue:

$$3 - 1.8 = 1.2A$$

## RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Cuando se fabrica un resistor, se emplea alambre grueso y corto si se quieren obtener bajas resistencias y, al revés, alambre delgado y largo si se desean resistencias altas. Además de la longitud y del espesor, existe otro factor importante que se debe tomar en cuenta cuando se toma la decisión de seleccionar la longitud y el calibre de alambre para una resistencia en particular: el material del que está hecho el alambre.

Supongamos, por ejemplo, que la longitud de un alambre es duplicada, lo que duplica a su vez la resistencia, puesto que ahora la longitud del alambre equivale a dos resistencias iguales en serie. Si la longitud del alambre es aumentada cinco veces, la resistencia aumentará de igual manera su valor previo cinco veces. La resistencia de un alambre por lo tanto es directamente proporcional a su longitud, situación que formalizamos así:

$$R \propto l$$

Con respecto al espesor o área de sección transversal del alambre, los alambres gruesos pueden ser considerados como equivalentes a un número de alambres delgados de área transversal igual, que se encuentren unidos en paralelo. Al duplicarse el área, la resistencia del alambre disminuirá por tanto a la mitad. En otras palabras, la resistencia de un alambre es inversamente proporcional al área de su sección transversal (**A**):

/

$$R \propto \frac{1}{A};$$

si combinamos estos dos últimos resultados, tenemos:

$$R \propto \frac{1}{A}$$

**A**

Esta relación puede convertirse en una ecuación que introduzca una constante, de la siguiente manera:

$$R = \frac{\rho l}{A},$$

en donde  $\rho$  es una constante llamada resistividad del material del alambre. Si en esta ecuación damos a  $l$  un valor de  $1 \text{ cm}$  y  $A$  vale  $1 \text{ cm}^2$ , tenemos:

$$R = \rho \times \frac{1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}^2} = \frac{\rho}{1 \text{ cm}},$$

de donde:  **$\rho = R \text{ (ohm x cm)}$**

Con esta fórmula, vemos que la resistividad de un material es expresada en una unidad ohm centímetro y es numéricamente igual a la resistencia de un conductor hecho de material con una longitud de  $1 \text{ cm}$  y de sección transversal de  $1 \text{ cm}^2$ .

Se puede decir también que la resistividad es una constante del material, lo cual es independiente de la forma geométrica del resistor. Por ejemplo, la resistencia que presenta un suelo al paso de la corriente eléctrica es una variable que depende, como dijimos anteriormente, de la longitud y del área transversal al flujo de corriente. Sin embargo, la resistividad de ese suelo tiene un valor fijo, e independiente del flujo de corriente, del área transversal y de la longitud del terreno. Su valor sólo variará con la temperatura, el contenido de humedad, el de acidez y otros factores.

Lo contrario a la resistividad es la conductividad. Un material con alta conductividad tiene baja resistividad y viceversa. De esta manera se tiene que la *resistencia al flujo de corriente es mínima* cuando:

- a) el medio presenta baja resistividad (alta conductividad),
- b) existe una distancia pequeña para el flujo de corriente, y
- c) tenemos un área transversal grande para el flujo de corriente.

En cambio, la *resistencia al flujo de corriente es máxima* cuando:

- a) el medio presenta alta resistividad (baja conductividad),

- b) las distancias son grandes para el flujo de corriente, y  
 c) el área transversal es pequeña para el flujo de corriente.

Las resistividades del suelo a menudo son mayores de **10 000  $\Omega$ -cm**. Las resistencias al flujo de corriente en sistemas de protección catódica en estos suelos pueden tener a veces valores menores a 1 ohm. La resistencia puede ser baja en un medio con una alta resistividad si el área transversal al flujo de corriente es grande.

**CUADRO I. Valores de resistividad típicos para ciertos materiales.**

<i>Material</i>	<i>Resistividad (<math>\Omega</math>-cm)</i>
Aluminio	0.000003
Latón	0.000008
Hierro	0.000010
Plomo	0.000022
Mercurio	0.000094
Suelo típico	10 000
Vidrio	100 000 000 000
Agua de mar típica	30.00

**CUADRO 2. Unidades eléctricas.**

**Ampere  $\times$  segundo = coulomb**

**Volt  $\times$  coulomb = joule**

**Volt  $\times$  ampere = watt**

**Watt  $\times$  segundo = joule**

**KW = Kilowatt = 1.341 HP**

**KWh = kilowatt = 1 000 watt / hora = 3 600 000 joules**

**HP = caballo de vapor = 746 watt = 0.746 KW**

**1 joule = 0.2387 calorías / gramo (cal)**

**1 cal = 4.183 joules**

1 HPh = 1 caballo de vapor / hora = 641.7 kilocalorías

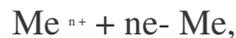
1 BTU = 1 054 joules

## I I . E L E C T R O D O S D E R E F E R E N C I A

LOS PROCESOS que tienen lugar en la interfase metal-solución de cualquier metal en contacto con un electrolito (medio agresivo), no se pueden medir de una manera absoluta (tiene que ser tan sólo relativa). El metal en contacto con el electrolito tiene, por un lado, tendencia a disolverse, con lo que queda cargado negativamente.



y, por otro lado, a que iones del electrolito se depositen sobre el metal:

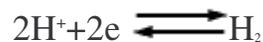


con lo que se alcanza el equilibrio en un determinado momento:



Se ha creado, pues, una diferencia de potencial entre el metal y el electrolito. Para poder medir esta diferencia de potencial se adoptó un electrodo patrón que es el electrodo normal de hidrógeno, al cual, por convención y a cualquier temperatura, se le asignó el valor cero.

Este electrodo está constituido por una lámina de platino-platinado, sobre la cual se hace burbujear hidrógeno gas a la presión de una atmósfera, sumergida en una solución ácida (electrolito), cuya actividad de iones hidrógeno a 25°C es la unidad, de acuerdo con la reacción de equilibrio:



En las condiciones mencionadas, el potencial de este electrodo es únicamente función del pH, según la siguiente expresión:

$$E = 0.059 \text{ pH}$$

Tomando como referencia el electrodo de hidrógeno, el potencial de un metal cualquiera sumergido en una solución de sus iones de actividad igual a la unidad, corresponde a la fuerza electromotriz de una pila, en

la cual el semielemento metal/solución de sus iones actúa como polo positivo, o sea de cátodo, y el electrodo de  $\text{H}_2$  como polo negativo, o ánodo, según la convención propuesta por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), universalmente aceptada. Lo anterior lo podemos representar de una manera esquemática como:



donde una barra indica la presencia de una interfase y la doble barra significa la presencia de una unión electrolítica o puente salino entre ambos semielementos de la pila. En la convención propuesta, el polo negativo o ánodo se coloca en el lado izquierdo de la pila, en la forma en que tiene lugar la reacción de oxidación:



Los electrones generados en esta reacción pasarán al otro electrodo, positivo o cátodo, a través de un conductor metálico externo, de cobre por ejemplo, donde los iones  $\text{Me}^{n+}$  serán reducidos. La reacción global del proceso será la siguiente:



El potencial de la pila propuesta se puede determinar a partir de

$$E_{\text{pila}} = E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ánodo}}$$

Basándose en lo anterior, se pueden presentar dos casos:

- a)  $E_{\text{pila}} > 0$
- b)  $E_{\text{pila}} < 0$

El primer caso supone, dado que el electrodo de  $\text{H}_2$ , por convenio, se toma con un potencial de 0 voltios, que necesariamente el semielemento que actúa como polo positivo debe de tener un potencial de reducción positivo, lo cual en términos energéticos equivale a decir que la reacción



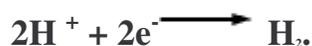
está desplazada hacia la derecha. Un voltímetro que uniera los dos semielementos que constituyen la pila debería conectarse de tal manera que el polo (-) se uniera al electrodo de hidrógeno y el polo (+) al del metal. Es decir, el polo (+), de mayor potencial siempre (cátodo), se une a ese mismo polo del voltímetro y el polo (-), de menor potencial

(ánodo), se une al negativo del voltímetro. En estas condiciones, la diferencia de potencial medida, correspondiente a la pila formada, sería numéricamente igual al potencial de reducción del semielemento derecho de la pila,  $\text{Me}^{n+}/\text{Me}$ . Si se construyen pilas de estas características, se podrían determinar los potenciales de reducción de todos aquellos semielementos cuyo potencial es positivo o mayor que 0 (el del hidrógeno).

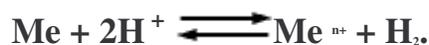
En el segundo caso, al ser el potencial de la pila menor que cero (negativo), esto implica necesariamente que el flujo de electrones irá en sentido contrario, es decir, que la producción de electrones se deberá a la oxidación (disolución) del metal del semielemento de la derecha:



lo cual implica que la reacción está desplazada hacia la derecha, favorecida energéticamente. Es tos electrones suministrados serán tomados por el otro semielemento, y tendrá lugar la siguiente reacción.



La reacción global sería:



Todos aquellos semielementos que unidos a un electrodo normal de hidrógeno den un potencial de pila negativo, con la convención propuesta, tendrán un potencial de reducción más negativo que el del hidrógeno, o sea menor que 0.

De esta forma se construye la serie electroquímica de los metales, representada en el cuadro 3.

**CUADRO 3. Serie electroquímica de los metales.**

<i>Sistema</i>	<i>Semirreacción</i>	<i>Potencial <math>E^{\circ}</math>, V A</i> <i>25°C</i>	
<b>Li + / Li</b>	<b>Li + 1e<sup>-</sup></b>	<b>Li</b>	<b>-3.045</b>
<b>K<sup>+</sup> / K</b>	<b>K<sup>+</sup> + 1e<sup>-</sup></b>	<b>K</b>	<b>-2.925</b>
<b>Cs<sup>+</sup> / Cs</b>	<b>Cs<sup>+</sup> + 1e<sup>-</sup></b>	<b>Cs</b>	<b>-2.923</b>
<b>Ba<sup>2+</sup> / Ba</b>	<b>Ba<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup></b>	<b>Ba</b>	<b>-2.90</b>
<b>Sr<sup>2+</sup> / Sr</b>	<b>Sr<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup></b>	<b>Sr</b>	<b>-2.89</b>
<b>Ca<sup>2+</sup> / Ca</b>	<b>Ca<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup></b>	<b>Ca</b>	<b>-2.87</b>
<b>Na<sup>+</sup> / Na</b>	<b>Na<sup>+</sup> + 1e<sup>-</sup></b>	<b>Na</b>	<b>-2.714</b>
<b>Mg<sup>2+</sup> / Mg</b>	<b>Mg<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup></b>	<b>Mg</b>	<b>-2.37</b>

Al <sup>3+</sup> / Al	Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	←←←←←	Al	-1.66
Mn <sup>2+</sup> / Mn	Mn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Mn	-1.18
Cr <sup>2+</sup> / Cr	Cr <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Cr	-0.913
V <sup>3+</sup> / V	V <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	←←←←←	V	-0.876
Zn <sup>2+</sup> / Zn	Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Zn	-0.762
Cr <sup>3+</sup> / Cr	Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	←←←←←	Cr	-0.74
Fe <sup>2+</sup> / Fe	Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Fe	-0.99
Cd <sup>2+</sup> / Cd	Cd <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Cd	-0.402
In <sup>3+</sup> / In	In <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	←←←←←	In	-0.342
Co <sup>2+</sup> / Co	Co <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Co	-0.277
Ni <sup>2+</sup> / Ni	Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Ni	-0.250
Sn <sup>2+</sup> / Sn	Sn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Sn	-0.136
Pb <sup>2+</sup> / Pb	Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Pb	-0.126
Fe <sup>3+</sup> / Fe	Fe <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	←←←←←	Fe	-0.036
H <sup>+</sup> / H <sub>2</sub>	2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	H <sub>2</sub>	0.000
Cu <sup>2+</sup> / Cu	Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Cu	0.337
Hg <sup>2+</sup> / Hg	Hg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	2 Hg	0.789
Ag <sup>2+</sup> / Ag	Ag <sup>2+</sup> + 1e <sup>-</sup>	←←←←←	Ag	0.799
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> / Hg	Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Hg	0.857
Pd <sup>2+</sup> / Pd	Pd <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Pd	0.987
Pt <sup>2+</sup> / Pt	Pt <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	←←←←←	Pt	1.19
Au <sup>3+</sup> / Au	Au <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	←←←←←	Au	1.50

---

Hay que resaltar que en la bibliografía norteamericana, es común que se trabaje con *potenciales de oxidación*, por lo que serán los mismos en valor absoluto, pero con el signo cambiado. Por ejemplo, el oro (Au) tiene un potencial de reducción alto y positivo porque es fuerte su tendencia a aparecer en su estado reducido; consecuentemente, su tendencia a la oxidación es pequeña y su potencial de oxidación es alto en valores absolutos, pero negativo.

Las dificultades operativas que se presentan en el manejo de un electrodo de hidrógeno, demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones prácticas, han dado lugar a la utilización de otros electrodos de referencia que lógicamente deben de reunir determinadas condiciones. Aparte de ser manejables y de construcción sencilla, la condición fundamental es que el potencial de equilibrio de la reacción de óxido-reducción (redox) que tenga lugar en ellos, permanezca constante respecto al electrodo de hidrógeno. En estas condiciones, en cualquier momento se podría referir un potencial al del electrodo de hidrógeno o viceversa.

Como electrodos de referencia se utilizan los siguientes:

1) *Electrodo de calomelanos*. Este electrodo está formado por mercurio cubierto por una capa de cloruro insoluble (calomelanos),  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , en equilibrio con una disolución de cloruro potásico,  $\text{KCl}$ , que puede ser **0.1 N**, **1 N** o saturada. El contacto eléctrico con el mercurio se realiza por medio de un hilo de platino. Un esquema de este electrodo se presenta en la figura 7(a).

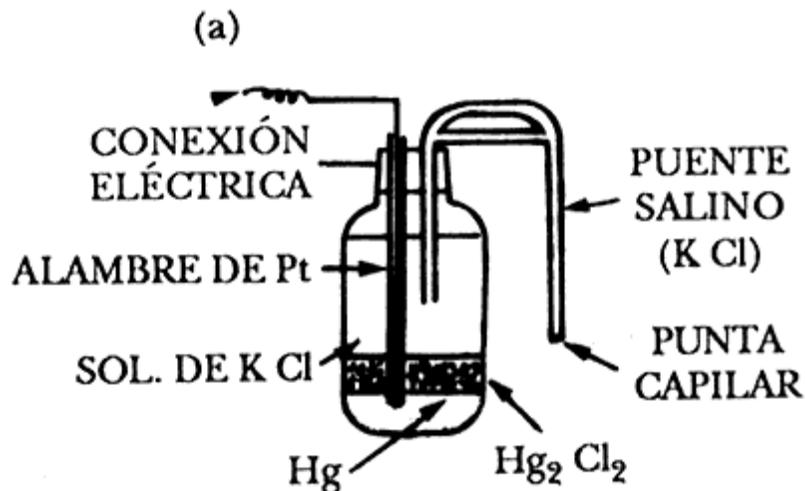
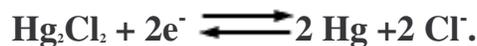


Figura 7 Electrodo de referencia: a) Calomelanos saturado, ECS

La reacción del electrodo de calomelanos es:



Así pues, si el electrodo actúa como ánodo (-) la reacción es hacia la izquierda,  $\longleftarrow$  (oxidación); si el electrodo actúa como cátodo (+), la reacción es hacia la derecha,  $\longrightarrow$  (reducción).

2) *Electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)*. Está formado por un hilo de Ag sobre el cual se deposita AgCl, generalmente por vía electroquímica, en una solución de NaCl o KCl, en la cual el hilo de Ag actúa como ánodo, como se muestra en la figura 7(b).

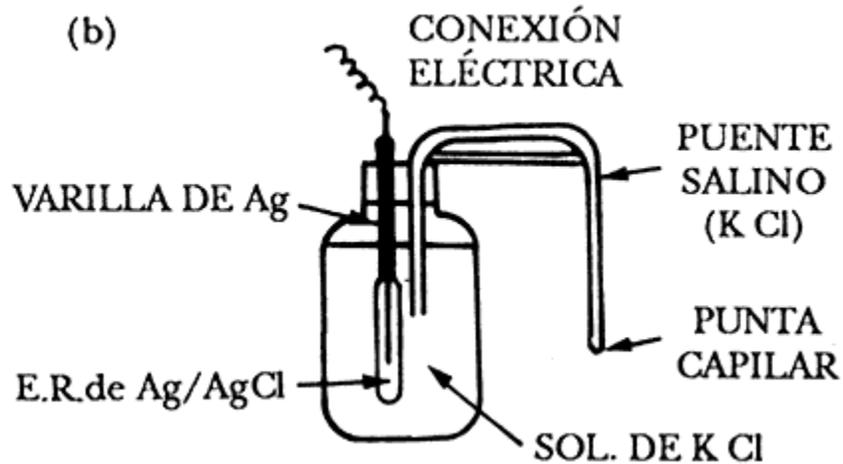
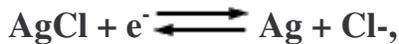


Figura 7 b) Plata /cloruro de plata, Ag/AgCl

La reacción electroquímica es la siguiente:



y su potencial de equilibrio a 25°C es:

$$E = 0.2224 - 0.059 \log [\text{Cl}^-].$$

En agua de mar, el valor del potencial es aproximadamente de + 0.25 V respecto al electrodo normal de hidrógeno (ENH) a 25°C. El potencial del electrodo depende muy especialmente de la salinidad de la solución en la cual el electrodo está sumergido.

3) *Electrodo de zinc (Zn)*. Está constituido por un bloque de Zn de alta pureza; generalmente se utiliza una aleación de Zn como la empleada para los ánodos galvánicos de Zn de composición como la especificada por la norma militar americana: MIL-A-18001 H (véase el cuadro 4).

#### CUADRO 4. Electrodo de referencia

<i>Tipo de electrodo</i>	<i>Reacción electrodoica</i>	<i>Potencial a 25°C V vs. ENH</i>
Calomelanos Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , Cl <sup>-</sup>	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> ⇌ 2Hg + 2Cl <sup>-</sup>	E = 0.276 - 0.059 log [Cl <sup>-</sup> ] KCL sat. E = 0.244 V coeficiente temperatura: - 0.65 mV/°C
Mercurio/sulfato mercurioso Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2e <sup>-</sup> ⇌ 2Hg + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	E = 0.6151 - 0.295 log [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> sat. E = 0.710 V
Plata/cloruro de plata Ag/AgCl, Cl <sup>-</sup>	AgCl + 1e <sup>-</sup> ⇌ Ag + Cl <sup>-</sup>	E = 0.2224 - 0.0591 log [Cl <sup>-</sup> ] 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 <sub>4</sub> , Cu <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Cu	E = 0.340 + 0.0295 log [Cu <sup>2+</sup> ] CuSO <sub>4</sub> sat. E = 0.318 V, coeficiente temperatura: - 0.9mV/°C
Zinc/agua de mar	Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Zn	E ≅ - 0.80 V

La reacción electrodoica es la siguiente:



y su potencial de equilibrio a 25°C es:

$$E = -0.763 + 0.0295 \log [\text{Zn}^{2+}] \text{ V vs. ENH}$$

El potencial en agua de mar es de cerca de -0.80 V vs. ENH.

Se emplea como electrodo de referencia fijo en agua de mar, como alternativa a los de Ag/ AgCl. También puede utilizarse en el suelo. Un esquema del mismo se presenta en la figura 7 (c)

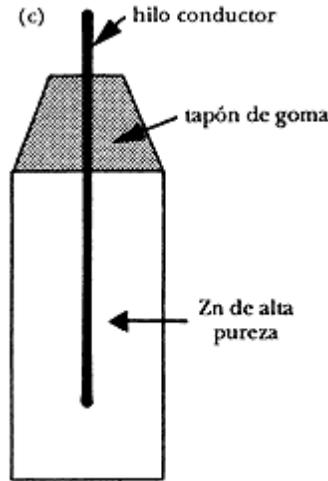


Figura 7 c). Zinc, Zn.

4) *Electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>)*. Está formado por una barra cilíndrica de Cu sumergida en una solución de CuSO<sub>4</sub> saturada. El contacto electrolítico con la solución o suelo se realiza mediante un puente salino constituido (formado) por un tapón de madera de balsa. En la figura 7(d) se ilustra este tipo de electrodo.

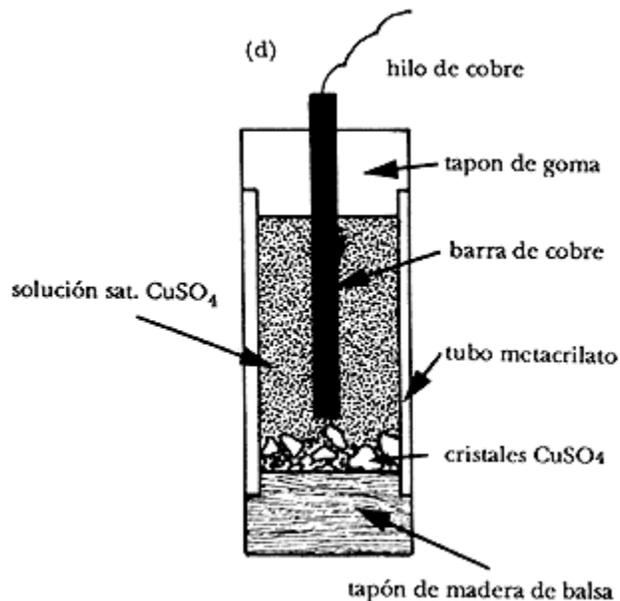


Figura 7 d) Cobre/ sulfato de cobre, Cu/CuSO<sub>4</sub>.

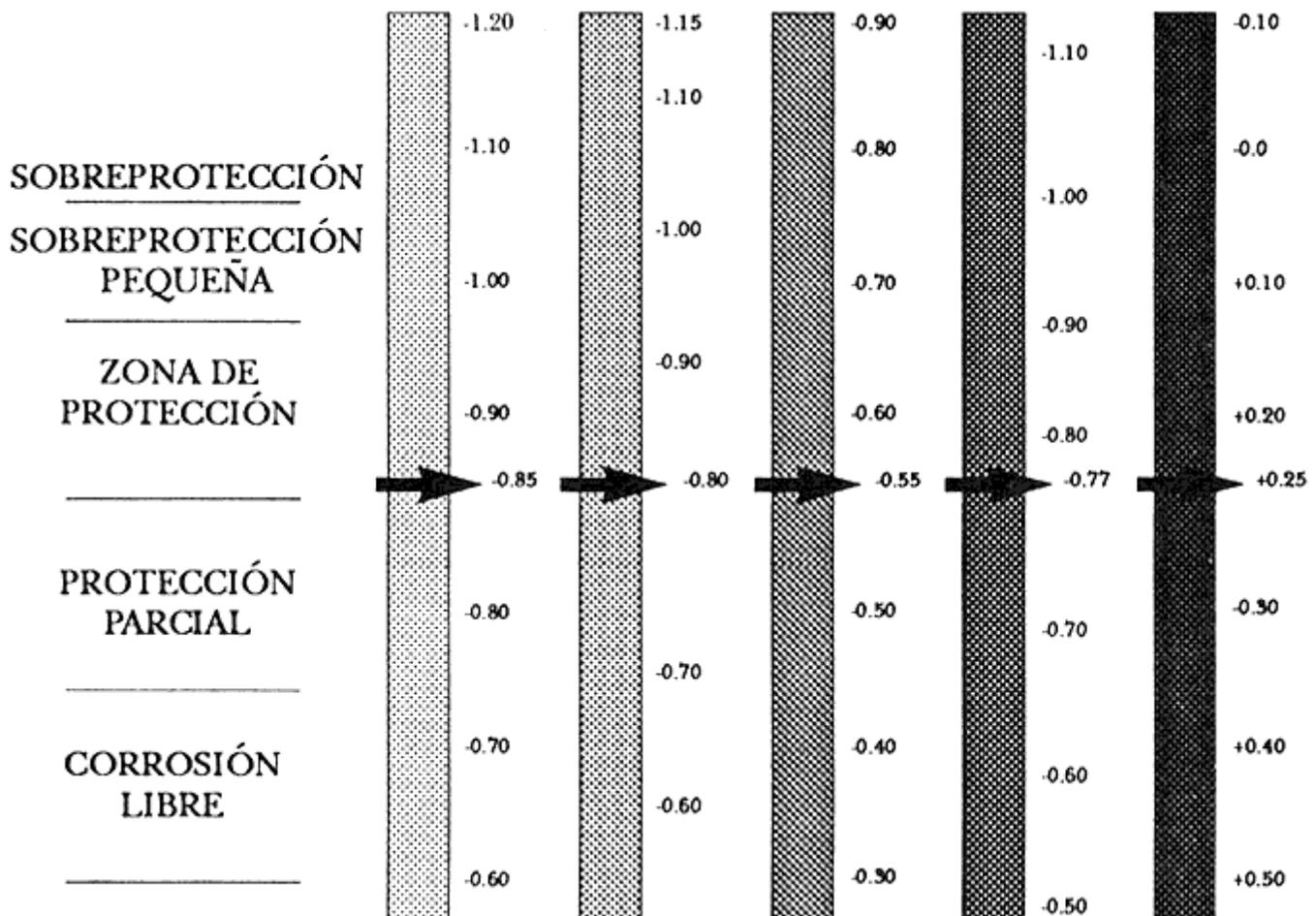
La reacción de electrodo es la siguiente:



su potencial de equilibrio a 25°C viene dado por:

$$E = 0.340 + 0.0295 \log [\text{Cu}^{2+}] \text{ V vs. ENH.}$$

Con la solución saturada de  $\text{CuSO}_4$ , se tiene  $E = + 0.318 \text{ V vs. ENH}$ , pero para uso práctico se considera un valor de  $0.30 \text{ V}$ . Este tipo de electrodo puede utilizarse en cualquier ambiente, sea en el suelo o agua de mar, aguas dulces o saladas. Entre otras ventajas, presenta la sencillez de su preparación y su gran estabilidad. Cuando se utiliza en agua de mar, puede contaminarse con cloruros, por lo cual es aconsejable más bien en el suelo, en aguas dulces y en salmueras.



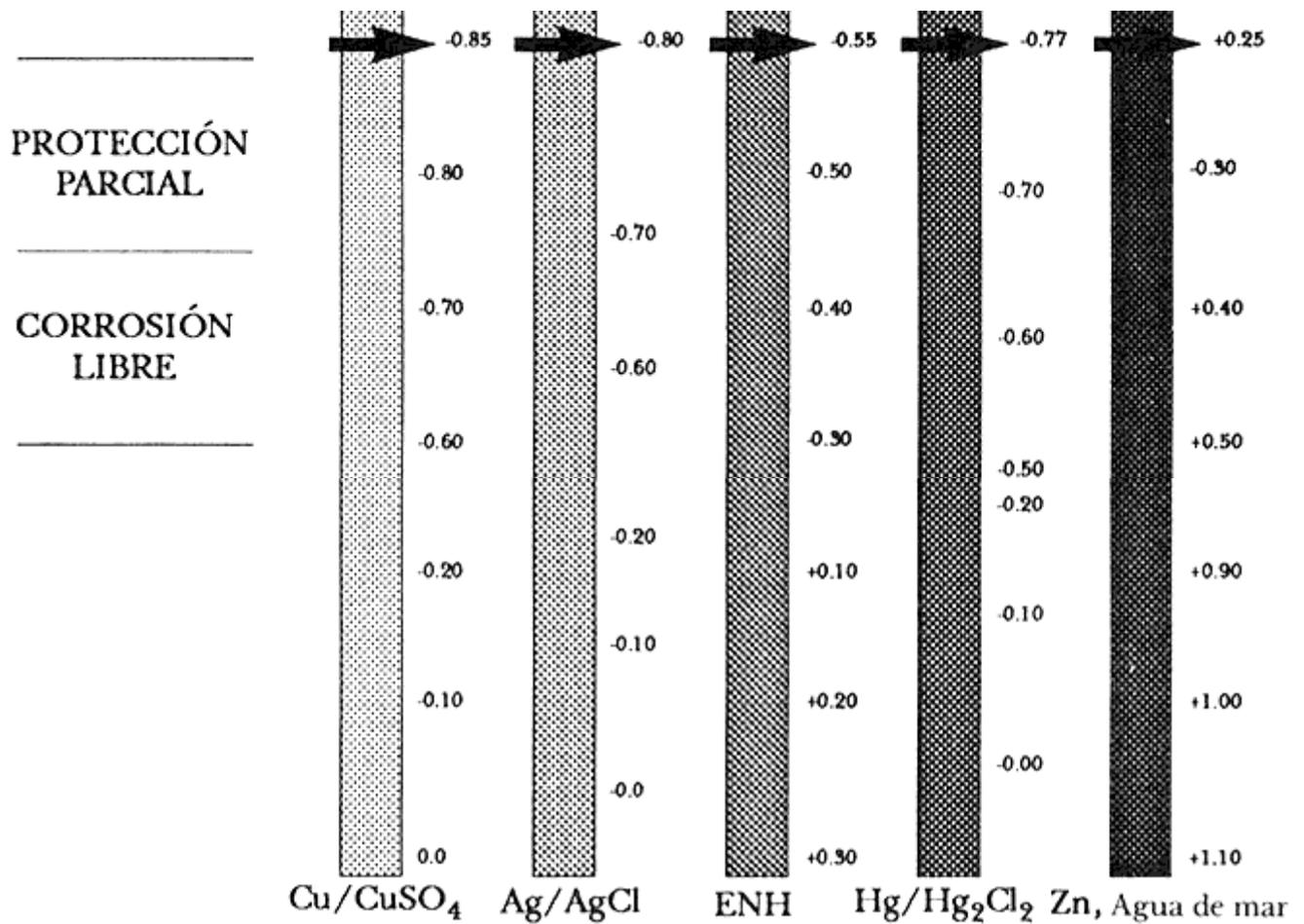


Figura 8. Equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodos de referencia utilizados en protección catódica, con indicación de los intervalos de corrosión, protección y sobreprotección para acero al carbono.

### III. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

UNA celda electroquímica es una combinación del tipo siguiente:

**Conductor  
electrónico**

**Conductor  
iónico**

**Conductor  
electrónico**

**(metal)**

**(electrolito)**

**(metal)**

En ella pueden tener lugar procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que tenemos una *celda galvánica o pila*. Si, en cambio, la celda electroquímica consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que tenemos una *celda electrolítica*.

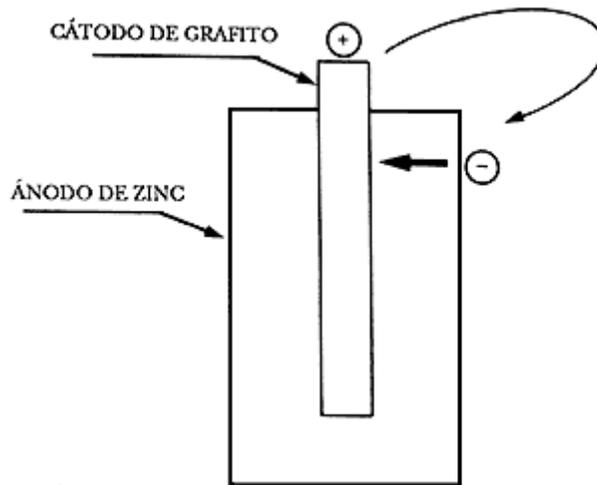
Algunas celdas galvánicas reciben nombres especiales. Una *celda de corrosión* es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión. Una celda de corrosión de dimensiones muy pequeñas (por ejemplo ( $< 0.1$  mm) se conoce como *celda de acción localizada o microcelda galvánica*. Las celdas locales o micropilas se dan, por ejemplo, en aleaciones multifásicas o en metales con recubrimientos que presentan buena conductividad eléctrica o en inclusiones de óxidos, sulfuros, carbón, etc. La acción de estas celdas a menudo conduce a un ataque localizado, tal como picaduras o corrosión bajo tensión.

#### DEFINICIÓN DE ÁNODO Y CÁTODO

Para la notación de los dos electrodos en una celda electroquímica (galvánica o electrolítica) son válidas las siguientes definiciones generales: El *ánodo* es el electrodo en el cual, o a través del cual, la corriente positiva pasa hacia el electrolito. El *cátodo* es el electrodo en el cual entra la corriente positiva proveniente del electrolito.

Generalmente, se toman como válidas las siguientes reglas:

- 1) La reacción anódica es una oxidación y la reacción catódica una reducción.
- 2) Los aniones (iones negativos) migran hacia el *ánodo* y los cationes (iones positivos) hacia el *cátodo*. Hay que hacer notar que particularmente en una celda galvánica, por ejemplo en una pila seca (Figura 9), la corriente positiva fluye del polo (+) al (-) en el circuito externo, mientras que dentro de la celda, la corriente positiva fluye del (-) al (+).



**Figura 9. Dirección de la corriente positiva en una pila seca.**

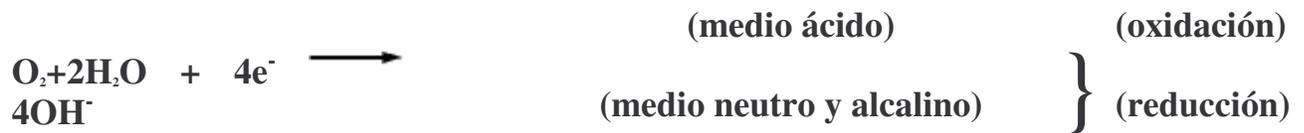
### CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.

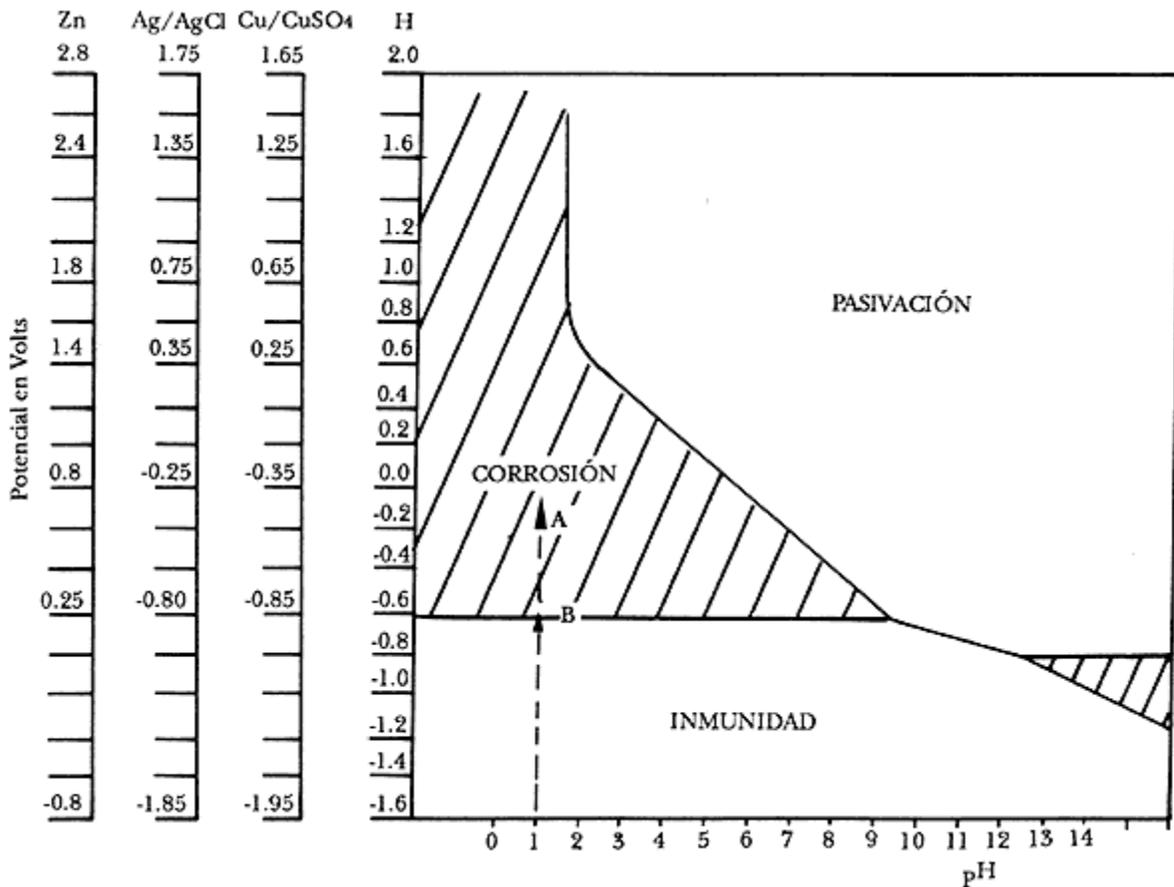
Las reacciones que tienen lugar en las zonas anódicas y catódicas son las siguientes:





Ya que la corrosión de los metales en ambientes húmedos es de naturaleza electroquímica, una aproximación lógica para intentar parar la corrosión sería mediante métodos electroquímicos. Los métodos electroquímicos para la protección contra la corrosión requieren de un cambio en el potencial del metal para prevenir o al menos disminuir su disolución.

La protección catódica, en este sentido, es un tipo de protección (electroquímico) contra la corrosión, en el cual el potencial del electrodo del metal en cuestión se desplaza en la dirección negativa. Los principios de la protección catódica pueden ilustrarse mediante un diagrama termodinámico potencial - **pH**, como se muestra en la figura 10, en el caso del hierro (**Fe**).



**Figura 10. Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe).**

Consideremos un espécimen de acero al carbono sumergido en ácido clorhídrico (HCl) de concentración 0.1 M. El acero se disolverá con desprendimiento de hidrógeno (H<sub>2</sub>). El potencial de corrosión del espécimen quedará entre los potenciales de equilibrio correspondientes al electrodo de H<sub>2</sub> y Fe (puntos A y B en la figura 10).

De acuerdo con el diagrama, hay un camino para prevenir la corrosión mediante un cambio de potencial. Aplicando una corriente catódica, el potencial del espécimen de acero se desplazará en la dirección negativa, hacia la zona de inmunidad, en la cual el metal, termodinámicamente, se encuentra estable (no se puede corroer). Para lograr este desplazamiento del potencial en la dirección negativa, el objeto que se corroe se une eléctricamente a un metal más negativo en la serie electroquímica, un ánodo, formando una celda galvánica en la que actuará como cátodo. Para que el metal esté protegido catódicamente, el valor de su potencial de electrodo tiene que quedar por debajo de su potencial de corrosión en la solución mencionada. Su disolución será así prevenida totalmente (protección catódica completa) o al menos disminuirá (protección catódica incompleta). Como consecuencia de la corriente que circule en la celda galvánica formada,

en el metal protegido catódicamente tendrá lugar el desprendimiento de hidrógeno o la reducción de oxígeno.

## FUNDAMENTOS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

Como se ha señalado, para que exista la corrosión electroquímica o húmeda, como se le conoce también, es fundamental que se ponga en funcionamiento una pila galvánica que denota la existencia de un *ánodo*, un *cátodo* y un electrolito. En el momento en que uno de estos tres elementos básicos para el funcionamiento de una pila falle, ésta dejará de funcionar y por tanto se detendrá la corrosión.

Los sistemas de protección contra la corrosión están basados en la eliminación de alguno de estos elementos o en hacerlos inoperantes.

El procedimiento que elimina todos los ánodos de la superficie metálica haciéndola toda catódica, se conoce con el nombre de *protección catódica*.

¿Cómo se puede volver catódica una superficie metálica? Existen dos procedimientos diferentes para lograrlo:

a) Conectando el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, es decir, más negativo en la serie electroquímica (Cuadro 3). Este sistema se conoce como *protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio* y consiste realmente en la creación de una pila galvánica en que el metal a proteger actúe forzosamente de cátodo (polo positivo de la pila), mientras que el metal anódico se "sacrifica", o sea que se disuelve (Figura 11). Como el metal más comúnmente utilizado en la práctica por su bajo precio y alta resistencia mecánica es el acero, los metales que se puedan conectar a él y que deben tener un potencial más negativo quedan reducidos en la práctica al zinc (Zn), aluminio (Al), magnesio (Mg) y a sus aleaciones.

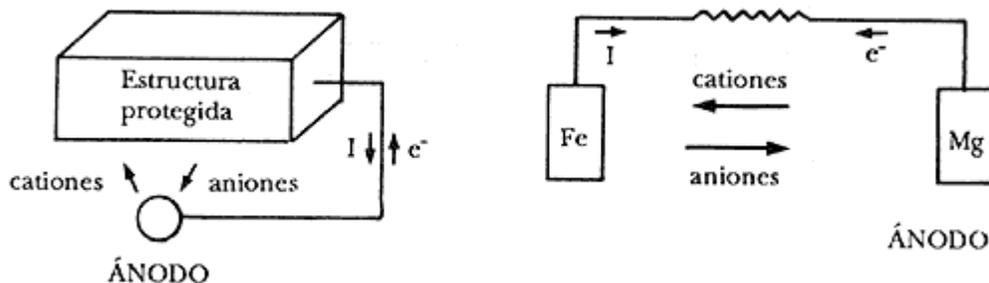
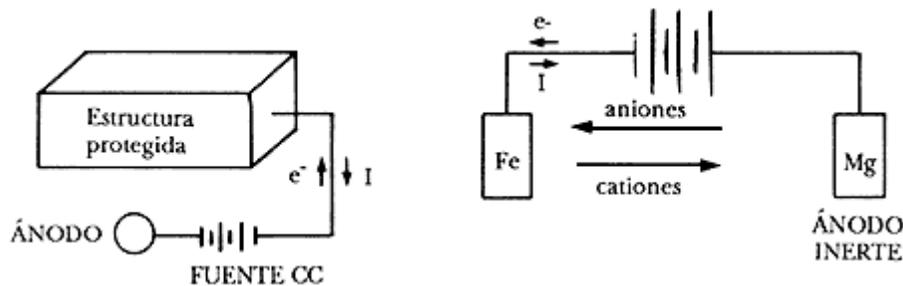


Figura 11. Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio.

b) Conectando el metal a proteger al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua, pura o rectificada, y el polo positivo a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro, ferro-silicio, plomo-plata, grafito, etc. Este sistema se conoce con el nombre de *protección catódica con corriente impresa*. Un esquema simplificado del mismo se presenta en la figura 12.



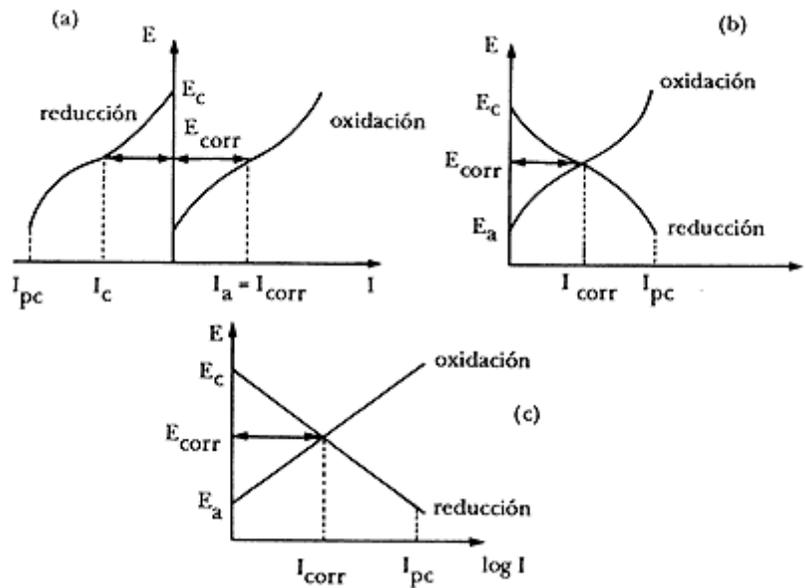
**Figura 12. Protección catódica con corriente impresa.**

Desde el punto de vista de la termodinámica, la protección catódica se basa en la existencia de un potencial y de una zona de inmunidad, en el correspondiente diagrama de estabilidad termodinámica o diagrama potencial - pH, más conocido como diagrama de Pourbaix. Si consideramos este diagrama para el caso del hierro (acero) figura 10, se puede observar en él que están perfectamente delimitadas las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad. Para poder pasar el hierro a la zona de inmunidad hay que rebajar su potencial a un valor de 0.62 V con respecto al electrodo de referencia de hidrógeno, que equivale a -0.80 V con respecto al Ag/AgCl. Esta será, pues, otra definición de la protección catódica. La densidad de corriente que será necesario aplicar para conseguir rebajar el potencial de la estructura a proteger (0.80 V) al valor señalado. Éste será un dato de gran valor ya que influirá directamente en la economía del sistema.

Desde un punto de vista cinético, en un sistema cualquiera en el cual tenga lugar el fenómeno -de corrosión, existe un balance perfecto entre las reacciones anódicas y catódicas sobre la superficie del metal. En un diagrama de Evans se ejemplifica lo anterior en la figura 13(a) que representa un diagrama que relaciona la densidad de corriente con el potencial.

Por razones de simplicidad en la construcción gráfica, se acostumbra representar ambos procesos, anódico o de oxidación y catódico o de reducción, en un mismo cuadrante con lo que se obtiene, como se indica en la figura 13(b) el diagrama de Evans, o el de Evans-Tafel si en lugar de utilizar la corriente se emplea el logaritmo de la corriente

(Figura 13(c)). Polarizando la superficie del metal que se corroe a un valor igual o inferior a  $E_a$  (Figura 13) se anula la reacción anódica en el metal, siendo  $I_{pc}$  la corriente catódica que tendrá que ser suministrada por el sistema de protección catódica.



**Figura 13. Diagrama de Evans de un sistema en corrosión.**

Cuando la cinética de los dos procesos, anódico y catódico, es tal que una pequeña variación en la corriente catódica provoca una gran variación en la corriente anódica (o sea en la corriente de corrosión), se dice que el sistema está bajo control catódico. Inversamente, cuando una pequeña variación en la corriente anódica produce un gran desequilibrio en el proceso catódico, o sea, en la intensidad de corrosión, se dice que el sistema está bajo control anódico. En la figura 14 se representan ambos casos.

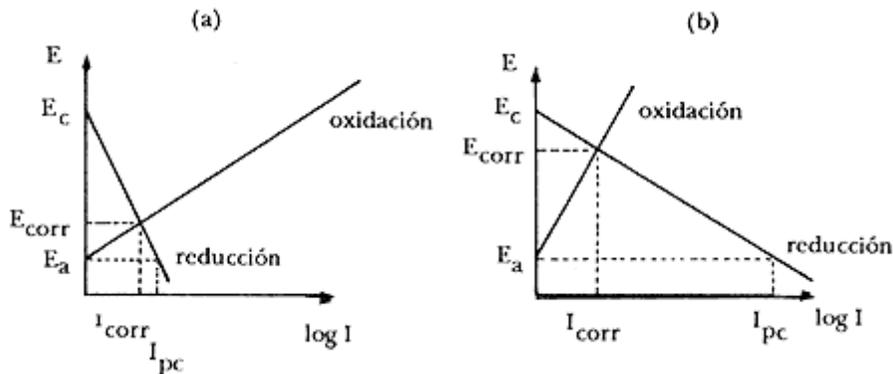
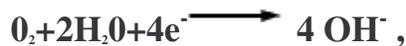


Figura 14. Sistema bajo control: (a) anódico, (b) catódico.

En los sistemas en corrosión en los cuales la reacción catódica predominante es la reducción del oxígeno,  $O_2$ , agua de mar por ejemplo, según



se tiene un control catódico. La intensidad de corriente depende de la disponibilidad del  $O_2$  que llega a la interfase metal/electrolito, la cual está limitada por la velocidad con que el  $O_2$  llega del seno del electrolito hasta la interfase.

Por lo general, un sistema de protección catódica puede considerarse como una pila o celda galvánica. Teniendo en cuenta una micropila de corrosión cualquiera, como la que se muestra en la figura 15(a), o un esquema equivalente de la misma (Figura 15(b)), se tiene:

$$I_a = I_c = I_o = I_{cor}$$

En esta misma figura,  $E_a$  es el potencial del ánodo,  $E_c$  el potencial del cátodo,  $R_a$  la resistencia del ánodo y  $R_c$  la resistencia del cátodo. Existe siempre una resistencia asociada al ánodo y al cátodo que limita la corriente producida por una pila de corrosión,  $I_o$ , que como se desprende del circuito eléctrico de la figura 15(b), debe ser igual a la corriente que circula por ambos electrodos,  $I_a$  e  $I_c$ , o sea: conocida como la corriente de corrosión de la pila  $I_{corr}$ .

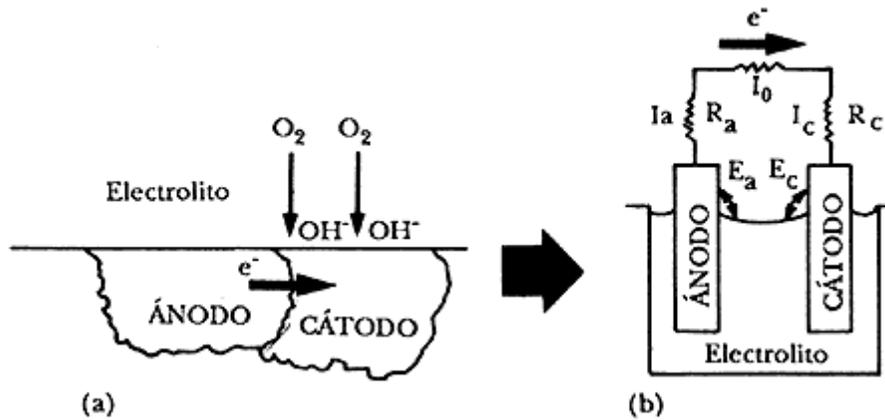


Figura 15. (a) Micropila corrosión. (b) Esquema eléctrico equivalente.

Si se introduce en el sistema anterior un tercer electrodo, un ánodo galvánico, designado como P, tendremos una pila con tres electrodos (Figura 16). Si aplicamos la ley de Kirchoff se obtiene:

$$I_c = I_a + I_p$$

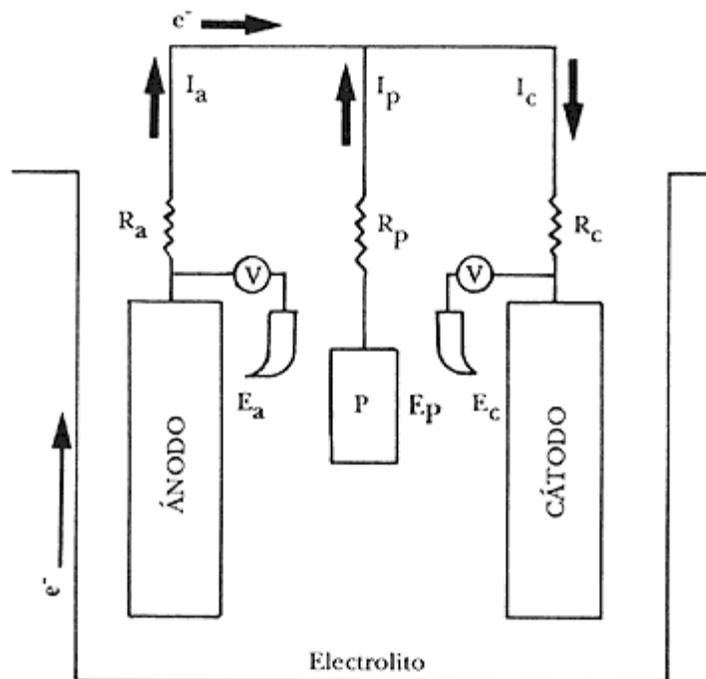


Figura16. Esquema eléctrico equivalente.

La fuerza electromotriz (fem) entre el ánodo y el cátodo es:

$$E_c - E_a = I_c R_c - I_a R_a,$$

y como

$$I_c = I_a + I_p,$$

resulta

$$E_c - E_a = (I_a + I_p)R_c + I_a R_a = I_a R_c + I_p R_c + I_a R_a$$

$$E_c - E_a = I_a(R_c + R_a) + I_p R_c,$$

de donde, despejando  $I_a$  se tiene lo siguiente:

$$I_a = \frac{(E_c - E_a) - I_p R_c}{R_c + R_a}$$

Por otro lado,

$$\frac{E_c - E_a}{R_a + R_c} = I_o,$$

y haciendo

$$\frac{R_c}{R_a + R_p} = K,$$

con lo cual se obtiene:

$$I_a = I_o - KI_p.$$

Haciendo que  $KI_p = I_o$ , se tiene que  $I_a = 0$ , o sea la condición de que la corriente de corrosión sea cero, para lo cual se tiene que cumplir que

$$I_p = I_o/K = I_o \frac{R_a + R_p}{R_c}$$

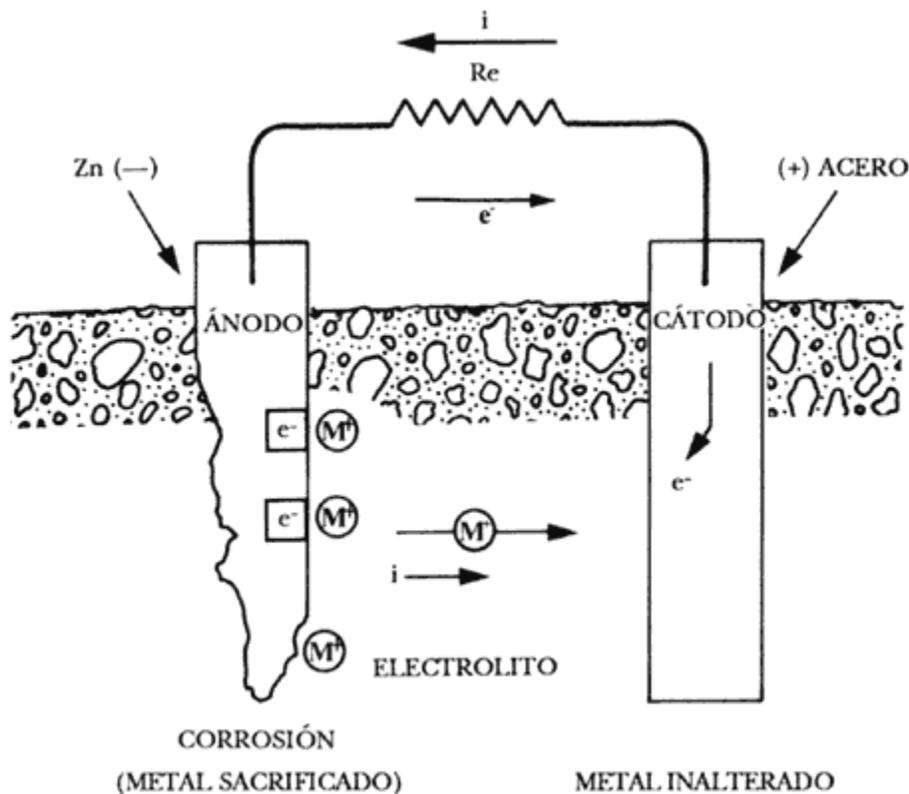
Anulando así la corriente de corrosión, se proporciona el sistema de protección.

## I V . P R O T E C C I Ó N C A T Ó D I C A C O N Á N O D O S G A L V Á N I C O S

SE ATRIBUYE al inglés Davy la paternidad del descubrimiento de la protección catódica, ya que en 1824, para proteger la envoltura de cobre de los buques de guerra británicos utilizó, por vez primera, bloques de zinc, con lo que se inició lo que se conoce en la actualidad como protección catódica. La realización de la protección catódica con ánodos de sacrificio o galvánicos se lleva a cabo normalmente con tres metales característicos: zinc (Zn), magnesio (Mg), aluminio (Al) y sus aleaciones. El zinc ha sido siempre el material anódico clásico, y es el pionero en el desarrollo de la protección catódica. Los ánodos de aleaciones de magnesio han sido también utilizados con éxito; principalmente se emplean para la protección de estructuras que requieren de una polarización rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos. El aluminio es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas. Sin embargo, la obtención de aleaciones de aluminio adecuadas para ánodos de sacrificio ha sido más lenta que las de los dos otros metales, que en los últimos años han tenido un gran desarrollo.

### PROPIEDADES DE UN MATERIAL ANÓDICO

Tomando en cuenta la serie electroquímica de los metales (Cuadro 3), un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. Así, por ejemplo, el hierro será anódico con relación al cobre y catódico respecto al zinc. El metal que actúa como ánodo se "sacrifica" (se disuelve) en favor del metal que actúa como cátodo; por esto el sistema se conoce como *protección catódica con ánodos de sacrificio*. Lo anterior se ilustra en un esquema de la figura 17.



**Figura 17. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio.**

Las propiedades que debe reunir un material anódico son las siguientes:

- 1) Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero (que es el metal que normalmente se protege) a  $-0.80$  V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre  $-0.95$  V y  $-1.7$  V.
- 2) Cuando el metal actúe como ánodo debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- 3) El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperes-hora por kg. de material (Ah/kg.) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.
- 4) En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
- 5) El metal debe ser de fácil adquisición y deberá de poderse fundir en diferentes formas y tamaños.

6) El metal deberá tener un costo razonable, de modo que en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por ampere-año.

Estas exigencias ponen de manifiesto que solamente el zinc, el magnesio y el aluminio y sus respectivas aleaciones pueden ser consideradas como materiales para ser utilizados prácticamente como ánodos de sacrificio.

#### CARACTERÍSTICAS ELECTROQUÍMICAS DEL ZINC (Zn), MAGNESIO (Mg) y ALUMINIO (Al)

Las propiedades que deben reunir los materiales anódicos para que puedan ser utilizados como tales en la práctica, remiten, pues, al **Zn**, **Al** y al **Mg** como metales seleccionados. Otros posibles candidatos, como los metales alcalinos (**Li**, **Na**, **K**) y los alcalino-térreos (**Be**, **Ca**, **Sr**), quedan descartados porque son demasiado activos (tienen un sobrepotencial de hidrógeno pequeño y un potencial de disolución muy elevado) y otros, como el cromo (**Cr**), porque son fácilmente pasivables.

En una reacción electroquímica, un metal se disuelve de acuerdo con las leyes de Faraday, las cuales dicen que, prácticamente, el paso de una cantidad de corriente de 96 500 coulombs (número de Faraday) disuelve una cantidad equivalente de cualquier elemento químico. Por tanto, si una cantidad de electricidad de **Q** coulombs pasa, la cantidad de metal disuelto será:

$$QC \times \frac{1 \text{ equiv.}}{96\,500 \text{ C}} \times \frac{1 \text{ mol}}{n \text{ equiv.}} \times \frac{\text{P.A. g}}{1 \text{ mol}} = p \text{ g.}$$

Además,

$$Q = I \cdot t$$

(coulomb = ampere multiplicado por un segundo). Por tanto,

$$p = I \times t \times \frac{\text{P.A.}}{n \times 96\,500},$$

en donde:

**p** = gramos de metal disuelto

**I** = intensidad de la corriente en amperes (A)

**t** = tiempo en segundos (s)

**P.A.** = peso atómico del metal en gramos (g)

$n$  =valencia del elemento, número de electrones que pierde el metal al disolverse

**El cociente  $P.A./96\ 500\ Xn$  es el *equivalente electroquímico*.**

De esta manera se puede calcular la cantidad de metal consumido para suministrar la cantidad determinada de corriente. Estos datos se presentan en el cuadro 5.

**CUADRO 5. Propiedades físicas y electroquímicas del Mg, Zn y Al**

<i>Propiedades</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>
peso atómico (g)	24.32	65.38	26.97
peso específico a 20°C, g/cm <sup>3</sup>	1.74	7.14	2.70
punto fusión (°C)	651	419.4	660.1
resistividad eléctrica (Ω-cm)	4.46 10 <sup>-6</sup>	6.0 10 <sup>-6</sup>	2.62 10 <sup>-6</sup>
valencia	2	2	3
equivalente-gramo	12.16	32.69	9.00
equivalente electroquímico (mg/C)	0.12601	0.3387	0.0931
capacidad eléctrica teórica (A-h/kg)	2204	820	2982
capacidad eléctrica teórica (A-h/dm <sup>3</sup> )	3836	5855	8051
capacidad eléctrica práctica (A-h/kg)	1322	738	1491
rendimiento corriente (%)	60	90	50
consumo teórico (kg/A-año)	3.98	10.69	2.94
consumo teórico (dm <sup>3</sup> /A-año)	2.3	1.5	1.1
potencial normal a 25°C (V vs. Ag/AgCl)	-2.63	-1.05	-1.93
potencial disolución en agua de mar (V vs. Ag/AgCl)	-1.55	-1.05	-1.85

Estos valores consideran que el metal no sufre autocorrosión, es decir, que se utiliza íntegramente para producir corriente. Para un rendimiento de corriente del 100%, el aluminio es el que sufrirá la pérdida de peso más pequeña ya que, según el cuadro 5, es el que proporciona mayor capacidad eléctrica, o sea el mayor número de coulombs por kg de metal disuelto. Siguiendo el razonamiento, para suministrar una misma intensidad de corriente, sobre la base de un

rendimiento en corriente del 100% (digamos 2 982 A-h), necesitaríamos 1 kg de aluminio, 3.64 kg de zinc y 1.35 kg de magnesio, lo cual implica, en porcentajes, un rendimiento práctico para el zinc de 27.5% y para el magnesio de 74% de corriente aproximadamente.

Ahora bien, los rendimientos prácticos no alcanzan nunca el 100%, ya que en la práctica industrial no se pueden fabricar ánodos galvánicos puros, porque resultan incosteables. Los rendimientos normales están entre 50% y 90% del rendimiento teóricamente considerado. En el cuadro 6 se presentan los valores teóricos y prácticos de la capacidad eléctrica para los metales comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio.

### INTENSIDAD DE LA CORRIENTE ANÓDICA

A partir de las leyes de Faraday se puede calcular la intensidad de corriente que es capaz de suministrar 1 kg de metal en su actuación anódica. Ahora bien, este valor está muy lejos de ser significativo, ya que no tiene en cuenta que:

*a)* la intensidad que es capaz de dar un metal en su actuación anódica es función de su forma geométrica; es decir, 1 kg de metal en forma cilíndrica suministrará una intensidad de corriente menor que si tiene forma de estrella. Por otra parte, hay que tener en cuenta que cualquiera que sea su superficie, ésta va disminuyendo a medida que el ánodo se va desgastando, lo cual es un factor que habrá que tener en cuenta en el cálculo real de la intensidad.

*b)* el valor obtenido a partir de las leyes de Faraday equivale a un rendimiento electroquímico del 100%, que como ya se ha indicado, nunca se puede alcanzar en la práctica. La pila formada por el ánodo galvánico y su estructura darán un valor máximo de corriente en el instante de iniciar su funcionamiento, el cual decrecerá después por los procesos de polarización que tienen lugar en los electrodos. Por otra parte, la autocorrosión que, en mayor o menor grado, presentan los tres metales empleados como ánodos galvánicos hará siempre que su rendimiento sea inferior al 100%.

Cada tipo de ánodo, sumergido o enterrado, tendrá una resistencia determinada que dependerá de la resistividad del medio ( $\rho$ ), de su longitud y del llamado radio equivalente y que viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left( 2.3 \log \frac{4 L}{r} - 1 \right),$$

en donde:

**R** =resistencia del ánodo, en ohms ( $\Omega$ )

**L** =longitud, en cm

**p** =resistividad del medio, en ohms por cm ( $\Omega - \text{cm}$ )

**r** =radio equivalente, en cm.

El *radio equivalente* es el radio de un cilindro de igual superficie transversal que el ánodo, cuando éste se haya consumido en 40%. Si la sección del ánodo es:  $S = \pi r^2$

despejando r se tiene:

$$r = \sqrt{S / \pi \times 0.6}$$

Cada ánodo podrá suministrar una intensidad de corriente que vendrá fijada por la ley de Ohm

$$I = V / R,$$

en donde: diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio

**V** =agresivo y el potencial de protección (0.80 V con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para el acero)

**R** =resistencia del ánodo, calculada según la fórmula anterior.

## VIDA DE LOS ÁNODOS

Un factor importante que se debe tener en cuenta es la duración o vida" de los ánodos. La vida para cada valor de intensidad de corriente será una función del peso del ánodo (ley de Faraday) y no del número de ánodos que se coloquen. Si se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo (1) y su peso (kg), teniendo en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente (Cuadro 6) así como su rendimiento y su factor de utilización, se puede calcular fácilmente su duración. El factor de utilización puede ser de 85%, ya que, cuando un ánodo se ha consumido, este porcentaje debe sustituirse, pues el material que queda es insuficiente para mantener un porcentaje adecuado de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar.

**CUADRO 6. Valores electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos.**

<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

La vida del ánodo puede calcularse de la siguiente manera:

$$\text{Vida} = \frac{\text{capacidad de corriente (A-año/kg)} \times \text{peso ánodo (kg)} \times \text{rendimiento (\%)} \times \text{factor de utilización}}{\text{intensidad (A)}}$$

Por ejemplo, la vida de un ánodo de Zn de 14 kg de peso, capaz de suministrar una intensidad de corriente de 0.1 A, será:

$$820 \frac{\text{A-h}}{\text{kg}}$$

capacidad de corriente (véase cuadro 5):

teniendo en cuenta que un año tiene **8 760 horas**

$$0.094 \frac{\text{A-año}}{\text{kg}},$$

rendimiento **90%**

factor utilización **85%**. Por tanto, su

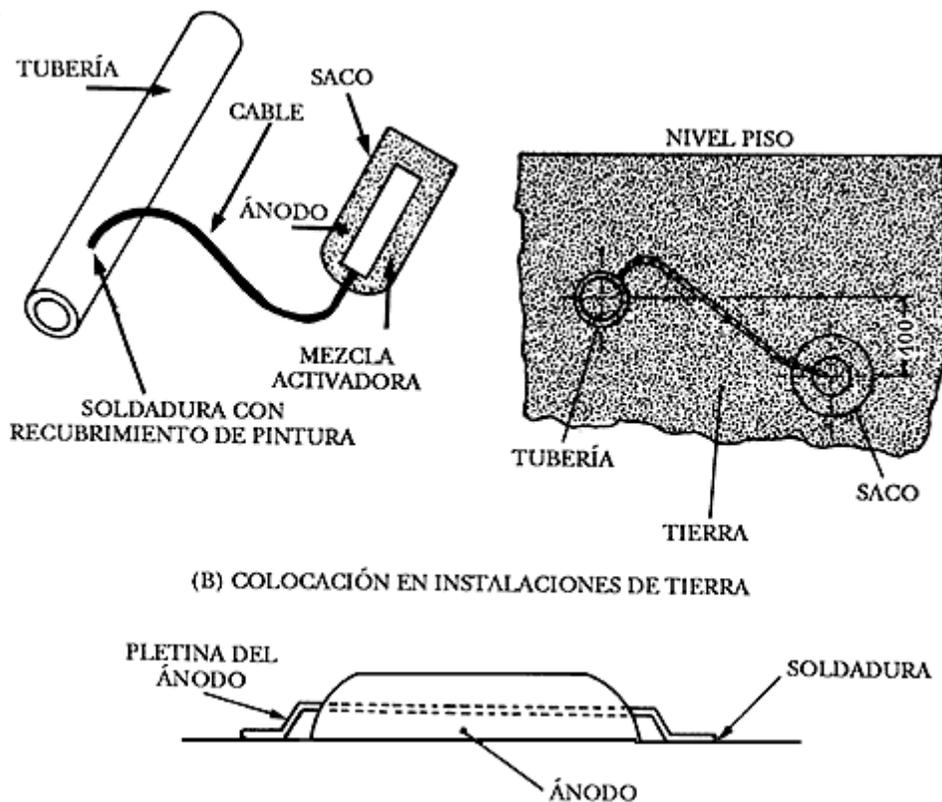
$$\text{Vida} = \frac{0.094 \times 14 \times 0.9 \times 0.85}{0.1} = 10.07 \text{ años}$$

#### FIJACIÓN DE LOS ÁNODOS

Los ánodos se pueden colocar en la estructura a proteger con distintos procedimientos, pero siempre con ayuda del alma que los atraviesa que suele ser redonda y de acero. Los extremos que sobresalen del alma pueden doblarse ligeramente y soldarse, lo que es el caso más común.

Ahora bien, se utilizan también con frecuencia sistemas de grapas o espárragos o simplemente se atornillan.

Cuando van enterrados se introducen en una bolsa de tela y son rodeados de una mezcla de componentes de baja resistividad que proporcionan un funcionamiento homogéneo del ánodo. Por medio de un cable se une el alma de acero del ánodo con la estructura que se quiere proteger (en la figura 18 se presenta el detalle de instalación de ánodos de sacrificio).



**Figura 18. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio.**

### CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS

Para conocer el número de ánodos que se van a necesitar para llevar a efecto la protección catódica es necesario determinar la superficie a proteger y conocer la densidad de corriente de protección. El producto de la superficie a proteger (en  $m^2$ ) por la densidad de corriente de protección (en  $mA/m^2$ ) nos dará la intensidad total necesaria para la protección catódica ( $I_t$ ).

Por otra parte, como se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo, tendremos que

número de ánodos =

$$\frac{I_1}{I}$$

## ALEACIONES PARA ÁNODOS

La composición de los ánodos tiene una gran importancia ya que actúa de una forma muy directa sobre las cuatro propiedades que permiten apreciar el valor de un metal o aleación para poder ser utilizado como ánodo de sacrificio: el potencial de disolución, el rendimiento de corriente, la polarizabilidad y la homogeneidad en la corrosión del ánodo. Asimismo tiene una gran influencia sobre las propiedades de los productos de corrosión formados en el ánodo durante su actuación: porosidad, adherencia, dureza, conductividad eléctrica, etcétera.

### *Zinc*

Entre sus impurezas, las más perjudiciales son el hierro (Fe) y el plomo (Pb). Se ha encontrado que porcentajes de hierro superiores al 0.01% causan la pérdida de actividad del ánodo. Trabajos posteriores recomiendan no sobrepasar el 0.002%.

En aplicaciones de ánodos de Zn en agua de mar, sería recomendable un límite máximo de 0.0002% de Fe, aunque los ánodos de esta composición no se puedan obtener comercialmente.

Por otro lado, parece estar bien demostrado que la adición de pequeños porcentajes de Al, de Al y cadmio (Cd), o Al y silicio (Si) al Zn es un recurso útil para contrarrestar los efectos del Fe como impureza. Ello queda reflejado en la nueva especificación MIL-A-18001 G (véase el cuadro 7), que permite hasta 0.005% de Fe, pero exige, al mismo tiempo, contenidos de un 0.025 - 0.15% de Cd y 0.10 - 0.50% de Al.

### **CUADRO 7. Composiciones exigidas a los ánodos de zinc, según especificaciones militares norteamericanas.**

<i>Composición (%)</i>	<i>Especificaciones militares (EE.UU.)</i>	
	<i>MIL-A-18001</i>	<i>MIL-A-18001 G</i>
Plomo (Pb)	0.006 máx.	0.006 máx.
Hierro (Fe)	0.0014 máx.	0.005 máx.
Cadmio (Cd)	0.004 máx.	0.025 - 0.15
Cobre (Cu)	0.005 máx.	0.005 máx.
Aluminio (Al)	0.1 máx.	0.10 - 0.50
Silicio (Si)	- -	0.125 máx.
Zinc (Zn)	resto	resto

Entre los elementos de aleación utilizados con resultados más o menos satisfactorios, para mejorar el comportamiento general de los ánodos de sacrificio de Zn, figuran principalmente el litio (Li), el cromo (Cr), el Mg, el Al y el Cd. En el cuadro 8 se presentan las calidades de Zn según la especificación B6-46 de la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM).

**CUADRO 8. Calidades del zinc según la especificación ASTM B6-46**

<i>Calidades</i>	<i>Contenido máximo en impurezas</i>				
	<i>Pb</i>	<i>Fe</i>	<i>Cd</i>	<i>Total</i>	<i>Zn</i>
Superior especial	0.006	0.005	0.004	0.01	99.99
Superior	0.07	0.02	0.07	0.10	99.9
Intermedia	0.20	0.03	0.50	0.50	99.5
“Brass special”	0.60	0.05	0.5	1.00	99
“Selected”	0.80	0.04	0.75	1.25	98.75
“Prime Western”	1.60	0.08	—	—	98.32

Las aleaciones más utilizadas en la actualidad son las MIL, norteamericanas, cuya composición se indica en los cuadros 7 y 9.

**CUADRO 9. Composición comercial típica de ánodos de zinc (aleación Zn-Al-Cd)**

	<i>MIL-A-18001 H</i>	<i>Comercial</i>	<i>Comercial</i>
Cu	0.005 máx.	0.005 máx.	0.005 máx.
Al	0.10 - 0.50	0.30 - 0.50	0.9 - 0.6
Si	0.125 máx.	0.003 máx.	0.125 máx.
Fe	0.005 máx.	0.002 máx.	0.0015 máx.
Pb	0.006 máx.	0.005 máx.	0.3 máx.
Cd	0.0025 - 0.15	0.025 - 0.100	0.075 - 0.125
Rendimiento	95%	95%	95%
Potencial (V)	-1.05 vs Ag/AgCl	-1.05 vs Ag/AgCl	-1.05 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h/kg)	780	780	780

### *Magnesio*

Se ha estudiado una amplia serie de aleaciones de Mg con vistas a ser utilizada como ánodos de sacrificio. Los cuadros 10 y 11 reúnen dichas Composiciones. El rendimiento en corriente de estas aleaciones crece con la densidad de corriente.

**CUADRO 10. Composiciones de magnesio y sus aleaciones utilizadas como ánodos de sacrificio**

<i>Denominación</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>
Galvomag	0.10 máx.	0.02	0.03	0.001	0.5-1.3	—
Magnesio cell	0.01	0.01	0.027	0.001	0.10	0.01
Dowmetal Fs-1	2.6	0.003	0.005	0.001	0.4	1.1
Dowmetal H	6.0	0.01	0.009	0.001	0.26	2.5
Dowmetal H-1	6.5	0.01	0.001	0.001	0.24	3.4
Dowmetal J-1	6.5	0.005	0.001	0.001	0.23	0.78

**CUADRO 11. Composición comercial típica de los anodos de magnesio**

	<i>MIL-A-21412</i>	<i>Comercial</i>	<i>Comercial</i>
Cu	0.1 máx.	0.02 máx.	0.02 máx.
Al	5-7	5.3 - 6.7	0.01 máx.
Si	0.3 máx.	0.10 máx.	—
Fe	0.003 máx.	0.003 máx.	0.003 máx.
Mn	0.15 mín.	0.15 mín.	0.5 - 1.3
Ni	0.003 máx.	0.002 máx.	0.001
Zn	2-4	2.5 - 3.5	—
Otros	0.3 máx. (c/u)	0.3 máx. (c/u)	Pb, Sn 0.01 máx.
Rendimiento	50%	50%	50%
Potencial (V)	-1.50 vs Ag/AgCl	-1.50 vs Ag/AgCl	-1.70 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h/kg)	1100	1230	1230

El Dowmetal H - 1 es la aleación que ha tenido un comportamiento más satisfactorio frente al agua de mar por lo que es la aleación que más se utiliza en este medio. Presenta una buena distribución del ataque anódico y un consumo homogéneo del ánodo, una susceptibilidad muy pequeña a la polarización con el tiempo y un rendimiento de corriente entre los más elevados que se pueden obtener con ánodos de Mg (55-67%).

La mayoría de los metales son catódicos en relación con el Mg; así pues, las impurezas constituyen un peligro de corrosión espontánea, si se desean obtener buenos rendimientos es necesario mantenerlas dentro de límites bien determinados. El hierro es particularmente perjudicial; su influencia es pequeña en tanto no exceda el 0.014%, pero si sube hasta el 0.03%, la corrosión espontánea del ánodo se multiplica aproximadamente 500 veces. El bajo rendimiento de la aleación "cell" (véase el cuadro 10) se atribuye a su elevado contenido de Fe (0.03%). El níquel (Ni) ocasiona efectos desastrosos sobre los ánodos de Mg. Se ha comprobado que contenidos superiores a 0.001% dan lugar a la disolución del ánodo por corrosión espontánea y a potenciales de disolución sensiblemente nobles (positivos).

El cobre (Cu) es otro elemento que ejerce una acción nociva en el Mg. Si el contenido de Cu permanece inferior a 0.5%, no se observan cambios notables en el potencial de disolución del ánodo. Contenidos superiores dan lugar a un aumento en el potencial y a una disminución de la intensidad de corriente proporcionada por el ánodo para la protección de una estructura determinada. Cuando el contenido de Cu alcanza 4%, el potencial de disolución se vuelve tan positivo que se produce una inversión de la polaridad del magnesio.

La acción que ejerce el Al como elemento de aleación del magnesio es eliminar gran parte del Fe durante la preparación de la aleación. Las

aleaciones MgAl tienen una buena resistencia a la corrosión espontánea.

El Zn produce efectos favorables como elemento de aleación del Mg. Por una parte favorece el consumo homogéneo del ánodo, especialmente con contenidos entre 2.5 y 3.5% y por otra, actúa dando un margen mayor a la acción de las impurezas; se puede admitir hasta un 0.01% de Fe sin afectar el rendimiento.

Por último, el manganeso (Mn) ejerce, en general, una acción favorable, ya que tiende a eliminar los efectos del Fe y a compensar los del cobre.

### *Aluminio*

El Al, a pesar de ser, por sus características electroquímicas, el material idóneo para ser utilizado como ánodo de sacrificio, su empleo como tal es relativamente reciente. La razón estriba en que este metal, aleado o no, presenta un inconveniente: se le forma una película de óxido de aluminio (pasivación anódica) que lo hace muy resistente a la corrosión y por tanto al "sacrificio".

Para la utilización del Al como ánodo galvánico se han realizado numerosas investigaciones cuyo objetivo principal ha sido la búsqueda de elementos de aleación que limiten la pasivación anódica del mismo. El cuadro 12 reúne las características de algunas de las aleaciones de Al desarrolladas.

**CUADRO 12. Composición comercial típica de ánodos de aluminio.**

Si	0.11 - 0.21	0.10 máx.	0.10 máx.
Fe	0.10 máx.	0.13 máx.	0.13 máx.
Zn	0.3 - 0.50	3.5 - 5.0	4.00 - 5.00
Sn	—	—	0.08 - 0.16
Mg	—	0.3 - 0.8	—
Hg	0.020 - 0.050	—	—
In	—	0.02 - 0.05	—
Cu	0.006 máx.	0.006 máx.	0.01 máx.
Otros (c/u)	0.02 máx.	0.02 máx.	0.02 máx.
Rendimiento	95%	90%	50 - 80%
Potencial (V)	-1.05 Ag/AgCl	-1.10 vs Ag/AgCl	-1.10 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h/kg)	2830	2700 máx.	variable

El camino seguido en estas investigaciones fue determinar los efectos que un gran número de elementos, en forma aislada, ejercían sobre el potencial del Al. El Cu y Mn hacían más catódico el potencial del Al. El Zn, Cd, Mg y bario (Ba) hacían de -0.1 a -0.3V más anódico dicho potencial y el galio (Ga), mercurio (Hg), estaño (Sn), e indio (In) lo hacían también más anódico (entre -0.3 y 0.9V).

Las combinaciones que en principio tenía un interés especial fueron las de Al-Hg-Sn y Al-Hg-Bi, cuyo comportamiento es muy similar, pues tienen potenciales parecidos a los de las aleaciones Al-Hg.

Las aleaciones Al-Hg-Zn, Al-Sn-Zn y Al-In-Zn tienen potenciales alrededor de -1.05V y rendimientos elevados. La aleación Al-Hg-Zn ha sido estudiada sistemáticamente; se ha tenido en cuenta en esto el efecto de la variación de la composición, la densidad de corriente y la pureza del Al empleado. Para este tipo de aleación se alcanzan rendimientos del 95%. Esta aleación y la de Al-In-Zn son de las más utilizadas en la actualidad.

Las aleaciones con Hg tienen un problema específico que vale la pena señalar y que, a pesar de sus importantes características electroquímicas, hace que su utilización tienda a ser cada vez más reducida: la acción contaminante del Hg.

## CAMPOS DE APLICACIÓN DEL ZINC, ALUMINIO, MAGNESIO Y SUS ALEACIONES COMO ÁNODOS GALVÁNICOS

La gran utilización del Zn como ánodo de sacrificio está justificada porque es el primer metal que se empleó como tal. El valor relativamente elevado de su potencial de disolución le confiere un alto rendimiento de corriente.

Uno de los factores que más puede limitar la utilización del Zn es la resistividad del medio agresivo. Es aconsejable que su empleo quede limitado a las resistividades inferiores a los 5 000 ohms-cm. También hay que cuidar su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas arriba de 65°C, ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero.

Como ánodo galvánico o de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar: buques, pantalanés, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas de perforación de petróleo, depósitos de agua, condensadores, etcétera.

El Al, por su situación en la serie electroquímica, es el metal más idóneo para la protección catódica, pues ocupa una posición intermedia entre el Zn y el Mg, y tiene una capacidad elevada de corriente

(Cuadros 6 y 13). Debido precisamente a su elevada capacidad de corriente, un solo ánodo de Al puede ejercer la acción de tres de iguales características de Zn, para una misma duración del ánodo. Estas circunstancias han motivado que estos ánodos estén siendo muy utilizados en construcción naval, para la protección catódica de tanques de lastre de cargalastre y en los petroleros. Aunque el precio del Al es más elevado que el del Zn, al tenerse que colocar menos ánodos esta diferencia se compensa y si se considera además, el ahorro de mano de obra en la colocación de los ánodos de aluminio, éstos pueden llegar a ser incluso más económicos que los de Zn.

El campo de aplicación de los ánodos de Al es semejante al de los de Zn y su comportamiento es satisfactorio en la protección catódica de estructuras sumergidas en aguas dulces.

**CUADRO 13. Características electroquímicas de algunas aleaciones de zinc, aluminio y magnesio utilizadas en la actualidad**

<i>Aleación</i>	<i>Potencial (V) Ag/AgCl</i>	<i>Potencial respecto al acero protegido (-0.8V)</i>	<i>Capacidad de drenaje de corriente A-h/kg</i>
Zn*	-1.05	-0.25	780
Al-Zn-Sn	-1.07	-0.27	2 420
Al-In	-1.15	-0.35	2 740
Al-Hg	-1.05	-0.25	2 830
Mg	-1.5 a -1.7	-0.7 a -0.9	1 050 a 1 200

\* Especificación militar norteamericana.

La utilización del Mg y sus aleaciones resulta del valor bastante bajo de su potencial de disolución (Cuadro 13), que implica un bajo rendimiento de corriente y una disminución, a veces bastante grande, del potencial de la estructura a proteger. El magnesio puede utilizarse para la protección catódica de estructuras provistas de un recubrimiento de mala calidad situadas en un medio de resistividad elevada (10 000 ohms-cm) tal como es el caso de un suelo arenoso.

No son recomendables estos ánodos para su utilización en agua de mar, ya que su elevada autocorrosión hace que los rendimientos sean muy bajos; y su mejor campo de aplicación es en medios de resistividad elevada (entre 5 000 y 20 000 ohms-cm).

El cuadro 14 resume lo anterior y puede ayudar en la selección de un material anódico en función de la resistividad del medio.

**CUADRO 14. Ánodos de sacrificio recomendables en función de la resistividad del medio**

<i>Material</i>	<i>Medio</i>	<i>Resistividad <math>\Omega</math>-cm</i>
	<b>Agua</b>	
Al		hasta 150
Zn		hasta 500
Mg (-1.5V)		mayor de 500
	<b>Suelo</b>	
Zn con backfill		hasta 1 500
Mg (-1.5V) con backfill		hasta 4 000
Mg (-1.7V) con backfill		4 000–6 000

**VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS**

Las ventajas y desventajas de la protección con ánodos galvánicos se resumen en el cuadro 15. Esencialmente la protección con ánodos de sacrificio puede utilizarse cuando se requiere de una corriente pequeña y la resistividad del medio agresivo es baja. Puede usarse además como complemento de la protección catódica con corriente impresa, para proteger alguna parte de la estructura o bien para eliminar la posibilidad de corrosión por corrientes vagabundas (véase el capítulo VII.)

**CUADRO 15. Ventajas y limitaciones de la protección con ánodos galvánicos**

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
● Fácil de instalar.	● Corriente suministrada limitada.
● No se necesita de una fuente de corriente continua ni de un regulador de voltaje.	● Ineficaz en ambientes de resistividad elevada.
● No provoca problemas de interferencia.	● Costo inicial alto.
● Bajo costo de mantenimiento.	● Alto consumo de ánodos para estructuras enterradas mal revestidas y sin revestimiento en agua de mar.
● Permite obtener una distribución de corriente uniforme.	
● Se puede aumentar el número de ánodos, con el sistema en operación.	

## V . P R O T E C C I Ó N C A T Ó D I C A P O R C O R R I E N T E I M P R E S A

EL SISTEMA de protección catódica con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura, como se indicó en la figura 12.

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales

metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que éste suministra.

Por ejemplo, en el caso de un ánodo de chatarra de hierro o de acero al carbono, la reacción electródica es la de disolución del hierro:



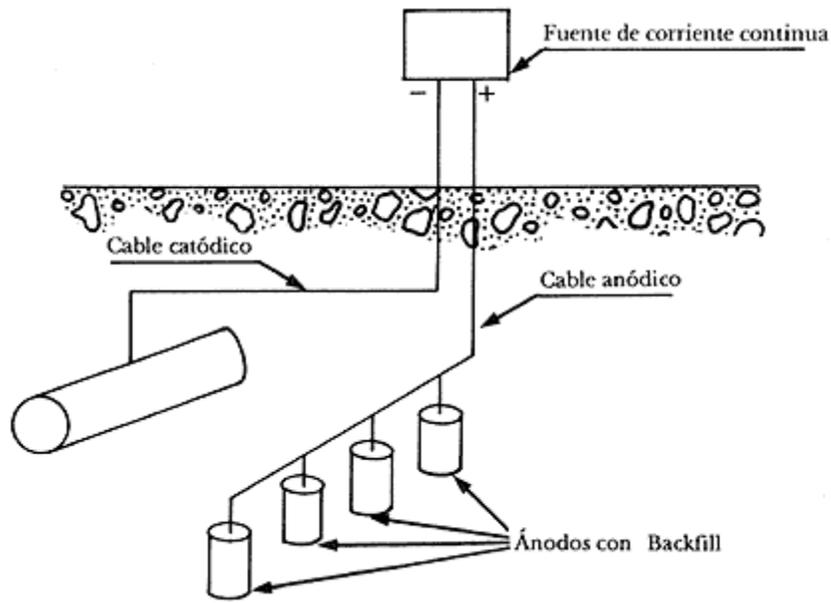
y por tanto, el ánodo se consume con el tiempo. Para aquellos ánodos que se pueden considerar insolubles o inertes, por ejemplo el de titanio platinado, la reacción electroquímica puede ser:



según el ambiente y la densidad de corriente suministrada por el ánodo.

En el suelo y en las aguas naturales tiene lugar la reacción (2), mientras que en el agua de mar tiene lugar principalmente la reacción (3). Los componentes de un sistema de protección catódica con corriente impresa son:

*a)* un ánodo dispersor, *b)* una fuente de corriente continua y *c)* el cable portador de la corriente. En la figura 19 se presenta un esquema de la protección de una tubería enterrada en el suelo.



**Figura 19. Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada.**

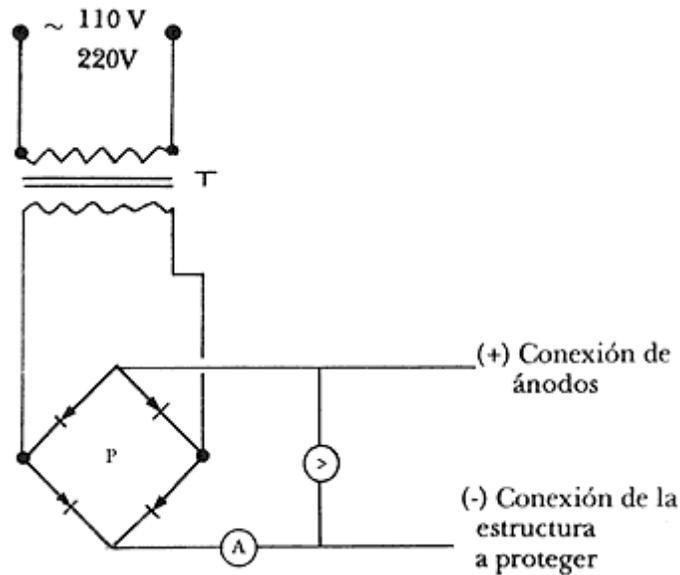
#### FUENTES DE CORRIENTE

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años.

#### *Rectificadores*

Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido se conocen con el nombre de rectificadores.

Estos aparatos se alimentan con corriente alterna. Si se trata de un rectificador monofásico (Figura 20), estará constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario a 110 o 220 V (tensión de la red de distribución). La tensión de salida puede ajustarse según las necesidades. Un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica. El selenio es más barato, pero también es más frágil que el silicio.



**Figura 20. Esquema de un transformador rectificador monofásico.**

Un voltímetro permite controlar la tensión de salida y un amperímetro la intensidad total.

La tensión de salida puede ser regulada con ayuda de regletas o por medio de un "variac", el cual permite una regulación continua desde el 0 al valor máximo.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380 V.

#### *Dinamo con motor térmico*

Permite la protección catódica en donde no existe posibilidad de suministrar energía eléctrica, como en el caso de los desiertos o zonas selváticas. El motor térmico puede estar alimentado, ya sea directamente a partir de la conducción que se desea proteger, ya sea por un depósito que se llena periódicamente.

### ÁNODOS AUXILIARES

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.

#### *Chatarra de hierro*

Por ser lo más económico, la chatarra de hierro es utilizada con frecuencia como ánodo auxiliar. Dentro de los perfiles es el carril viejo el más utilizado y, 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 constituido por carbón de coque (con un diámetro medio de partícula de 10 mm).

El consumo medio de los lechos constituidos por perfiles de acero viene a ser de 5 kg/A-año y de 8-10 kg/A-año para la tubería de fundición.

#### *Ferrosilicio*

El ánodo de ferrosilicio 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 (1 A), 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 corriente altas, entre 0.1 0.3 kg/A-año.

Sus dimensiones más normales corresponden a 1 500 mm de longitud, 75 mm de diámetro, y su peso aproximado es de 60 kg.

El ferrosilicio es muy frágil en virtud de su estructura cristalina, por lo que se ha de tener un extremo cuidado en su embalaje y transporte.

#### *Grafito*

El 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. Sus dimensiones varían: su longitud oscila entre 1 000 y 2 000 mm y su diámetro entre 60 y 100 mm. Son más ligeros de peso que los de ferrosilicio.

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*

El de 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 (12 V) se pueden sacar intensidades elevadas de corriente, y además, su desgaste es apenas perceptible. En el agua de mar tiene, sin embargo, 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. En aguas dulces que no tengan cloruros estos ánodos pueden actuar a tensiones de 40-50 V. La salida máxima de corriente puede ser de 3 000 A/m<sup>2</sup>, y su desgaste en las condiciones más adversas es de 0.01 g/A-año.

Su forma es diversa: pueden estar hechos en forma de una barra maciza, de tubo, chapa, alambre, etc. El platinado puede ser continuo o a intervalos, según las necesidades, y los espesores de platino pueden ser de 2.5 y 5 micras. La vida de los ánodos con 2.5 micras de espesor de platino se estima en 10 años aproximadamente y los de 5 micras duran entre 20 y 25 años.

Su resistencia mecánica es pequeña, y por simple abrasión, como en los casos de buques que naveguen por zonas que tengan arena, puede suceder que el platino desaparezca y quede el ánodo pasivado instantáneamente, y resulte, por tanto, inservible. Es éste un caso extremo, que no suele suceder, pero al menos se tiene que saber que esto puede pasar.

#### *Tántalo platinado*

El ánodo de tántalo platinado es semejante al anterior, aunque tiene sobre aquél 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<sup>2</sup>. Se desgasta entre 50 y 200 g/A-año.

Estos ánodos deben presentar una superficie plana, con lo cual se evitan 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, desarrollados en Estados Unidos en 1968, están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y de rutenio, que se adhieren a un soporte de titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C) Como resultado se obtiene una estructura cristalina y dura que presenta una superficie extremadamente rugosa, lo que aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico. Su máxima capacidad de corriente (1100 A/m<sup>2</sup>) lo coloca a la altura de los ánodos de titanio platinado, y su costo es, aproximadamente, 20% menor.

#### ÁNODOS AUXILIARES: PROPIEDADES

Como se ha visto, los diversos tipos de materiales que se utilizan como ánodos para los sistemas de protección catódica con corriente impresa se escogen básicamente en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados.

En general, un buen ánodo debe poseer las propiedades siguientes:

- a) Bajo consumo,
- b) densidad de corriente erogada elevada,
- c) pequeñas dimensiones,
- d) baja resistividad,
- e) buena resistencia mecánica, y
- f) elevado potencial de ruptura.<sup>2</sup> 

Los ánodos que se utilizan en la corriente impresa pueden dividirse, en cuanto a su consumo, en: a) ánodos solubles, b) semiinertes y c) inertes. Actualmente se prefieren los inertes ya que, pese a que su costo es más alto, tienen las mejores características. En el cuadro 16 se resumen las propiedades principales de los ánodos utilizados en la corriente impresa, clasificados según su consumo. En el mismo cuadro se incluye el medio en el cual pueden utilizarse.

#### **CUADRO 16. Características de los ánodos empleados en protección catódica con corriente impresa.**

Tipo	Peso específico g/cm <sup>3</sup>	Consumo kg/A-año	Densidad de corriente A/m <sup>2</sup>		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	
Titanio platinado	4.5	8.10 <sup>-6</sup>	400 por cada micra de plati- no de espe- sor	500-1 000	terreno no salino con backfill, agua de mar; excluido el fondo 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 <sup>-7</sup>	1100	700-1 100	todos

En el suelo o terreno se usa principalmente la aleación **Fe-Cr-Si**, mientras que en el agua de mar se tiende a utilizar ánodos inertes del tipo **Ti/Pt o Ti/RuO<sub>2</sub>**, (ánodos dimensionalmente estables, DSA).

La elección de un ánodo no se hace solamente en base a su consumo o a 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, y se disminuye de esta forma la resistencia ánodo-suelo, se evitan los problemas de corrosión localizada que pueden romper el ánodo y reducir el consumo del material anódico.

## CÁLCULO DE LA PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS

El cálculo de un sistema de protección catódica con corriente impresa es relativamente más sencillo que el de ánodos galvánicos. De hecho, no es necesario optimizar las dimensiones y peso de los ánodos para garantizar por un lado el suministro de la corriente necesaria para la protección, y por el otro la duración de los ánodos elegidos.

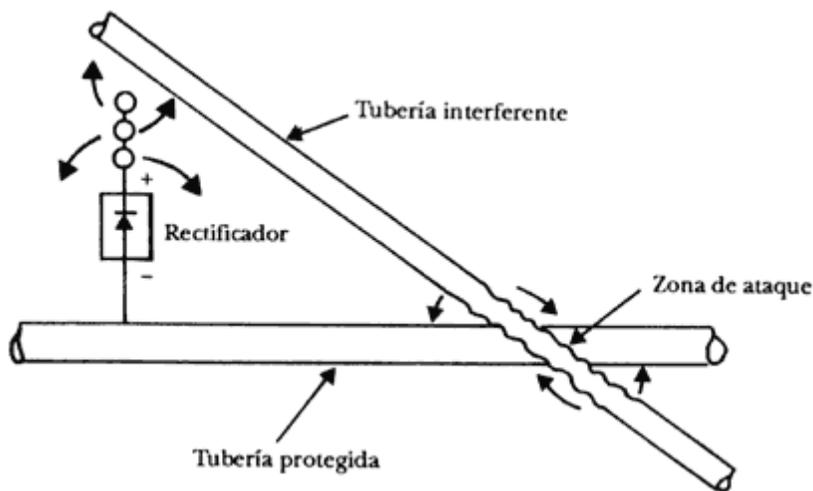
Una vez establecida la corriente total de protección, se elige el tipo de ánodo con base en los criterios examinados en el párrafo anterior y, teniendo en cuenta la densidad de corriente máxima que puede suministrar cada ánodo, se determina su número por exceso con respecto al teórico, para así poder obtener un mayor grado de confiabilidad.

Todavía deberá tenerse en cuenta, para lograr una protección lo más económica posible, la optimización del número y dimensiones de los ánodos, en relación con la mayor o menor resistencia total que se determine, lo que se reflejará en la potencia del generador o fuente de corriente continua y en su costo de instalación.

Para la protección de estructuras ya existentes en agua de mar (por ejemplo la protección de estructuras viejas, protegidas inicialmente con ánodos de sacrificio) la elección de pocos pero potentes ánodos remotos, o al revés, de muchos pequeños distribuidos sobre toda la estructura, puede llevar a grandes diferencias en el costo de instalación, todo ello ligado al elevado costo de la instalación submarina de los ánodos. La elección de instalar pocos ánodos resulta sin duda más económica, pero en este caso es necesario tener presente que si se instalan pocos ánodos el sistema pierde confiabilidad, pues si uno de los ánodos queda fuera de servicio, esto significará una pérdida de protección que puede oscilar entre 50 y 100%, lo cual no sucede cuando se colocan muchos ánodos pequeños distribuidos en toda la estructura.

En la ubicación de los ánodos o del lecho anódico es muy importante conocer la posición de posibles estructuras que pudieran estar presentes en las vecindades, con objeto de evitar fenómenos de interferencia que puedan provocar ataques graves de corrosión. Por ejemplo, si se debe proteger una tubería que cruza a otra, disponiendo los ánodos como se indica en la figura 21, se interfiere la tubería extraña. Ésta, de hecho,

representa el "camino" preferible (de menor resistencia) para la corriente suministrada por los ánodos. Aquella zona de la tubería extraña que recibe la corriente queda protegida catódicamente, mientras que en aquella de la cual sale la corriente, hay corrosión. Como la mayoría de la tuberías enterradas, está además protegida con algún tipo de recubrimiento aislante, la corriente está relacionada con algún defecto del recubrimiento, por lo cual la densidad de corriente local puede resultar muy elevada y por ahí producir un ataque particularmente severo.



**Figura 21. Ejemplo de interferencia provocada por una tubería extraña situada en la proximidad de una tubería protegida catódicamente.**

#### VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA

Las ventajas y desventajas que presenta el método de protección catódica por corriente impresa se resumen en el cuadro 17. Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio, cuando se tratan de proteger estructuras muy grandes o con una gran demanda de corriente y cuando la resistividad del ambiente es elevada, como en el caso de los suelos.

#### **CUADRO 17. Ventajas y limitaciones de la protección catódica con corriente impresa.**

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.</li> <li>● Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.</li> <li>● Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.</li> <li>● Potencial y corriente variables.</li> <li>● Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.</li> <li>● Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Puede causar problemas de interferencia.</li> <li>● Está sujeto a rotura de la fuente de corriente.</li> <li>● Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.</li> <li>● Requiere de una fuente de corriente continua.</li> <li>● Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrógeno.</li> <li>● Conexiones y cables sujetos a roturas.</li> <li>● Tiene un costo elevado.</li> </ul>

Una gran ventaja de este método es su posibilidad de proteger una gran superficie con un solo ánodo. Por otra parte, tanto la diferencia de potencial como la corriente suministrada son variables y de aquí se desprende que el sistema presenta una gran flexibilidad operacional.

Este tipo de sistemas debe ser proyectado con cuidado para no causar problemas de corrientes erráticas (parásitas), las cuales pueden provocar la corrosión de estructuras vecinas.

## V I . C O N D I C I O N E S D E P R O T E C C I Ó N C A T Ó D I C A . C R I T E R I O S D E P O T E N C I A L Y R E Q U E R I M I E N T O S D E C O R R I E N T E

### CRITERIO PARA LA ELECCIÓN DEL POTENCIAL DE PROTECCIÓN

EL CRITERIO de potencial 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. Hay que resaltar que no se considera aquí la forma de prevenir los casos de corrosión localizada, para los cuales el potencial de protección se elige o selecciona con criterios diferentes a los que se señalan en esta parte. De aquí que la validez del criterio de potencial queda restringida a los casos de corrosión generalizada.

### *Criterio basado en consideraciones termodinámicas*

Desde un punto de vista termodinámico se podría escoger el valor del potencial de equilibrio de la reacción de corrosión como potencial de protección, en cuanto que limita de una manera superior el intervalo de potencial en el cual el metal no puede corroerse (está en condiciones de inmunidad termodinámica). De hecho este criterio no es utilizado por dos motivos principales:

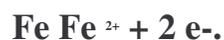
a) En primer lugar, si se toma el potencial de protección como potencial de equilibrio de la reacción de disolución del metal, esto implica necesariamente conocer la composición química de la solución en contacto con la superficie metálica bajo las condiciones de protección catódica. Dicha composición química es variable y depende de las condiciones ambientales, estado de la superficie, etc., por lo que es muy difícil precisarla.

b) En segundo lugar, al menos en el caso en que el ambiente no contenga prácticamente iones del metal que se corroe, o que su contenido sea muy bajo (lo que es un caso normal en la práctica de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas en el suelo o sumergidas en agua de mar), el potencial de equilibrio toma valores muy negativos y tiende a  $-\infty$  infinito en concentraciones cercanas al valor cero.

Recuérdese que la relación entre el potencial de equilibrio de un metal que se corroe y la concentración de sus iones está fijada por la ley de Nernst

$$E = E^{\circ} + 0.059/n \log [Me^{n+}]$$

Para la reacción de disolución del acero (hierro):



En la ecuación de Nernst, sustituyendo  $E^{\circ} = -0.44 \text{ V}$  y  $n = 2$ , se tiene que:

$$E = -0.44 + 0.059/2 \log [Fe^{2+}].$$

El profesor Marcel Pourbaix ha abordado el problema del potencial de protección, y le ha dado una solución basada en consideraciones termodinámicas. Ha propuesto considerar "inmune" a la corrosión a un metal que se encuentre a potenciales más negativos que el que correspondería al valor de su potencial de equilibrio en una solución que contuviera sus iones a una concentración  $10^{-6}$  moles/litro.

Así, aplicando la ecuación de Nernst, se tendría, para  $[Fe^{2+}] = 10^{-6}$ :

$$E_{\text{protección}} = -0.44 + 0.059/2 \log 10^{-6} = -0.62 \text{ V}$$

El potencial de protección resulta ser entonces de -0.62 V respecto al electrodo de referencia de hidrógeno. En la figura 10 se presentó el correspondiente diagrama potencial pH (diagrama de Pourbaix) para el sistema Fe-agua, en el cual se delimita la zona de inmunidad y corrosión con el valor del potencial calculado en este apartado.

En los términos propuestos por Pourbaix, aplicando una corriente se impone al metal que se quiere proteger el potencial que corresponda a una concentración mínima de iones metálicos en la solución. La concentración límite adoptada es de  $10^{-6}$  moles/litro.

Por convención, habrá corrosión si la concentración de los iones metálicos en el electrolito es igual o mayor que  $10^{-6}$  moles/litro.

Esto permite calcular, basándose en la ecuación de Nernst, el potencial de protección, el cual, sin embargo, es función del pH del electrolito. La información puede obtenerse del correspondiente diagrama potencial -pH del metal en cuestión (Cuadro 18).

**CUADRO 18. Potencial de protección\* a diferentes pH de algunos metales, obtenido a partir de los correspondientes diagramas de potencial -pH a 25°C**

<i>Metal</i>	<i>pH=0</i>	<i>pH=7</i>	<i>pH=14</i>
<b>Plata</b>	<b>+0.44</b>	<b>+0.44</b>	<b>+0.32</b>
<b>Cobre</b>	<b>+0.14</b>	<b>+0.14</b>	<b>-0.38</b>
<b>Plomo</b>	<b>-0.31</b>	<b>-0.31</b>	<b>-0.74</b>
<b>Hierro</b>	<b>-0.62</b>	<b>-0.62</b>	<b>-0.92</b>

• Los valores del potencial están expresados en volts (V), respecto al electrodo de referencia de hidrógeno.

\* los valores del potencial están expresados en volts (v), respecto al electrodo de referencia de hidrógeno.

#### *Otros criterios*

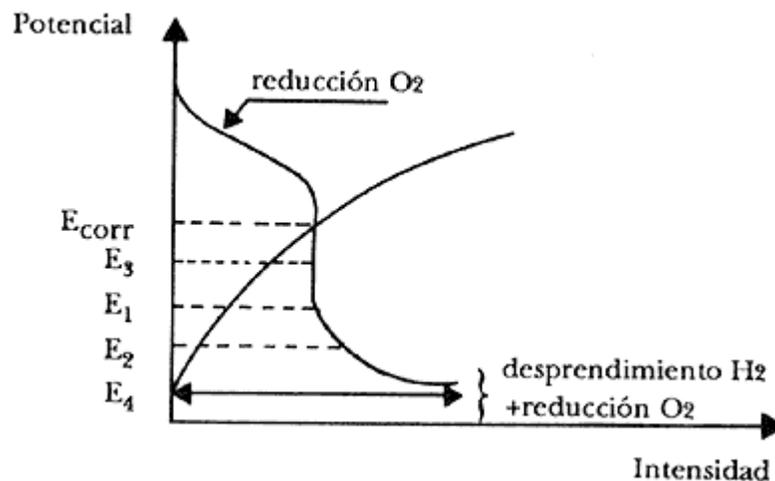
En general, para la definición del potencial de protección no se utilizan criterios que supongan la condición de "inmunidad" del material, sino otros en los cuales se puede decir que está "cuasi inmune", y que correspondería a una velocidad de corrosión suficientemente pequeña y por tanto aceptable en la práctica.

El potencial de protección podría definirse entonces como aquel al cual la velocidad de corrosión debe mantenerse lo suficientemente baja, esto es, menor a un límite fijado.

Por ejemplo, si se pone como límite para el acero en solución acuosa una velocidad de corrosión de 12 micras/año ( $\mu\text{m/año}$ ), el potencial de protección a 25 y 50°C resulta ser, respectivamente, de **-750 y -850 mV**, contra **Cu/CuSO<sub>4</sub>** (saturada).

Experimentalmente, la determinación del potencial de protección puede realizarse encontrando las características de polarización catódica, potencial/logaritmo de la densidad de corriente, con lo que se determina el valor del potencial en el cual se inicia el comportamiento lineal (de Tafel) de las características catódicas. Este valor del potencial, de hecho, señala cuándo la velocidad del proceso de corrosión es despreciable.

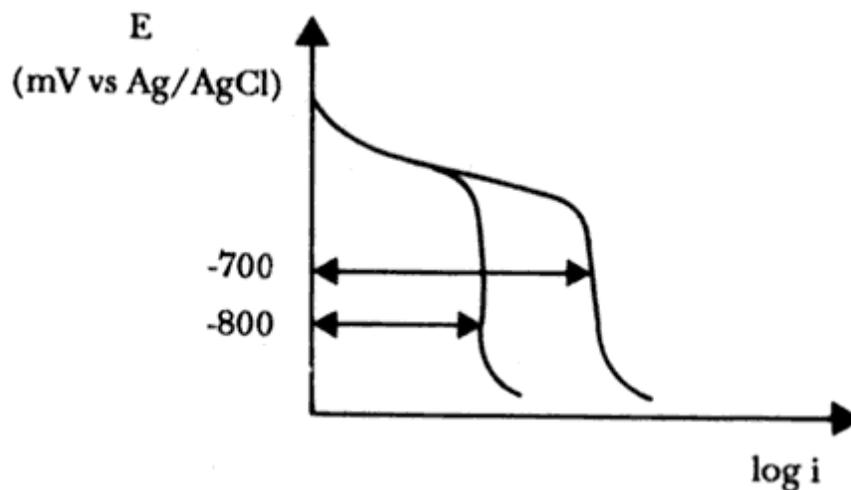
Como un ejemplo, veamos el caso esquematizado en la figura 22, relativo al acero en una solución acuosa aereada (agua de mar, por ejemplo). Se intuye rápidamente que no es adecuado para efectuar la protección que se alcance un potencial como  $E_4$ , el cual corresponde a una elevada corriente que lleva a una protección completa, pero que produce un importante desprendimiento de hidrógeno. En este caso parece más indicado trabajar en el intervalo comprendido entre  $E_1$  y  $E_2$ , en el cual se está en unas condiciones tales que no se disminuye sensiblemente el efecto de protección (como sucede para potenciales tipo  $E_3$  o superiores) y que al mismo tiempo mantiene la corriente catódica en valores pequeños y que por tanto resulta despreciable el desprendimiento de hidrógeno.



**Figura 22. Diagrama potencial-intensidad de corriente en un sistema de corrosión en condiciones de control catódico por difusión de O<sub>2</sub>**

En otros casos puede resultar oportuno imponer una disminución del potencial mayor de la que es estrictamente necesaria para reducir la velocidad de corrosión, por debajo del límite aceptable desde el punto de vista técnico. Por ejemplo, para una estructura desnuda sumergida en agua de mar, una disminución de 150 a 200 mV respecto al potencial de corrosión libre lleva a reducciones de la velocidad de corrosión de al menos dos órdenes de magnitud y de ahí a un grado de protección aceptable, al menos en la mayoría de aplicaciones. Por tanto, en este ambiente debería de aconsejarse un potencial de protección comprendido entre -700 y -750 mV y no uno de -800 mV (vs. Ag/AgCl), como se hace generalmente.

En efecto, se observa que polarizando la estructura a -700 mV, el aumento en el pH que se produce en el cátodo como consecuencia de la reducción del oxígeno, no es suficiente para lograr la precipitación de las capas de carbonato y de hidróxido; en cambio, a -800 mV se obtiene este depósito, lo que provoca una disminución de la corriente límite de difusión del oxígeno y por tanto de la corriente de protección, la cual, a -800 mV, resulta muy inferior a la necesaria para mantener la estructura a un potencial de -700 mV (Figura 23).



**Figura 23. Densidad de la corriente de protección con diferentes potenciales.**

En ciertas condiciones ambientales en las cuales la formación de depósitos calcáreos puede resultar obstaculizada (por ejemplo, por una fuerte acción abrasiva o en presencia de soluciones de salmuera poco

incrustantes) puede resultar necesario operar con potenciales del orden de -900 mV para obtener los depósitos calcáreos y con ellos el efecto benéfico consecuente.

*Algunos criterios utilizados en la práctica*

Por lo revisado anteriormente, el potencial de protección puede definirse como aquel en el cual cualquier aumento del grado de protección implica poco costo, ligado directa o indirectamente al aumento de la corriente necesaria, con la ventaja que se deriva de la consecuente disminución de la velocidad de corrosión.

De hecho, en la gran mayoría de los casos (por ejemplo en la protección catódica en suelos, agua de mar, etc.) los criterios que tienen aplicación son aquellos que están basados en la experiencia práctica.

El Código de Práctica inglés de la British Standard Institution ("Code of Practice for Cathodic Protection" [C.P. 1021] agosto de 1973) recomienda, para diferentes materiales, los potenciales de protección que se presentan en el cuadro 19.

**CUADRO19. Potencial de protección adoptado generalmente en el suelo y agua de mar**

<i>Metal o aleación</i>	<i>Suelo Cu/CuSO<sub>4</sub> (saturado)</i>	<i>Agua de mar Ag/AgCl/agua de mar</i>
<b>Acero al carbón</b>		
— condiciones normales	-850 mV	-800 mV
— condiciones anaerobias	-950 mV	-900 mV
<b>Plomo</b>	-600 mV	-550 mV
<b>Cobre y sus aleaciones</b>	-500 a -650 mV	-450 a -600 mV
<b>Aluminio</b>	-950 a -1200 mV	-900 a -1150 mV

En particular, el valor normalmente indicado para la protección de estructuras de acero enterradas nuevas y bien protegidas con algún tipo de recubrimiento es aquel que lleva a un potencial inferior a los -850 mV vs. **Cu/CuSO<sub>4</sub>** (criterio de los -850 mV) y a -900 mV en el caso de un suelo que contenga bacterias sulfato-reductoras (o sea, más agresivo).

Un criterio análogo se emplea para proteger el acero en agua de mar; se toma como protegida una estructura cuando se encuentra a un potencial de -800 mV respecto del electrodo de referencia de Ag/AgCl, que es el más usado en agua de mar. Si el acero está en contacto con el lodo del fondo marino y en condiciones en las cuales pueden desarrollarse bacterias sulfato-reductoras, el potencial de protección se aumenta a -900 mV vs. Ag/AgCl.

La experiencia muestra, sin embargo, que no siempre se utilizan criterios de este tipo. Por ejemplo, si una estructura enterrada no está protegida con un buen recubrimiento (una estructura vieja por ejemplo) o sencillamente no está protegida por algún recubrimiento, no es conveniente, especialmente en terrenos muy aereados, aplicar el criterio de los -850 mV vs. **Cu/CuSO<sub>4</sub>**, por que la corriente necesaria para alcanzar este potencial puede resultar muy elevada. En este caso, por ejemplo, se prefiere recurrir al criterio conocido como "desplazamiento del potencial", el cual consiste en disminuir 300 mV el potencial de la estructura con respecto al potencial de corrosión libre.

#### MEDIDA DEL POTENCIAL

En la determinación del potencial de la estructura; a proteger se puede incurrir en algunos errores, ligados sobre todo a una mala situación del electrodo de referencia, los cuales sólo pueden conocerse o eliminarse si se conoce la magnitud del potencial que se mide.

El potencial de una estructura, respecto al electrodo de referencia colocado en su vecindad, es la suma de tres contribuciones esencialmente:

*a)* una contribución de tipo termodinámico que depende del electrodo de referencia utilizado. Esta contribución interesa sólo en cuanto que fija la diferencia al potencial cero en la escala convencional que toma como potencial cero el del electrodo de hidrógeno. Por ejemplo, en el caso de una estructura enterrada, el electrodo más utilizado como referencia es el de cobre/sulfato de cobre (**Cu/CuSO<sub>4</sub>**). El cero de potencial respecto a este electrodo se encuentra cerca de 300 mV por encima del cero en la escala del de hidrógeno (véase Figura 8).

*b)* Una contribución, debida esencialmente al sobrepotencial de activación y de concentración de la reacción que se produce en la interfase superficie metálica/electrolito. Este sobrepotencial está ligado a la naturaleza del proceso electroquímico, a su velocidad, etcétera.

*c)* Un término de caída óhmica que depende de la posición en la cual se sitúa el electrodo de referencia respecto de la estructura, de la

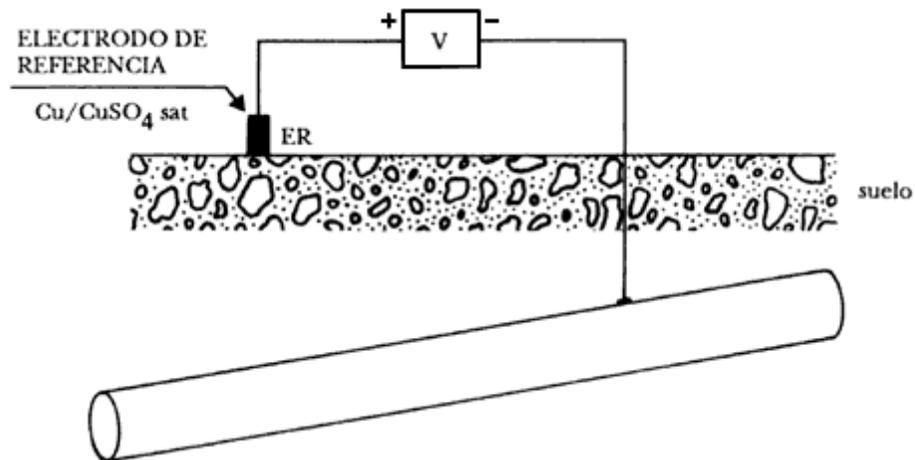
geometría del sistema, de su conductividad, de la corriente que circula (en virtud de la protección catódica o de corrientes parásitas), etcétera.

El potencial que se desea conocer, con el fin de valorar las condiciones de protección de la estructura, es precisamente el de la estructura con respecto al ambiente que la rodea. Este potencial se puede medir directamente (considerando despreciable el término de la caída óhmica) si se coloca el electrodo de referencia en la vecindad inmediata, es decir, junto a la estructura.

En la práctica, el modo más empleado para determinar directamente, sobre una estructura en servicio, la contribución de la caída óhmica, consiste en "interrumpir" o en variar la corriente (en este segundo caso, sólo en sistemas con corriente impresa) con la cual se está polarizando la estructura que se desea proteger, a partir de lo cual se registrará la consiguiente variación de potencial. La variación instantánea del potencial, en el momento de abrir el circuito, corresponde a la contribución de la caída óhmica. Los tipos de electrodos de referencia más empleados en la práctica de la protección catódica, el de  $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{agua de mar}$ ,  $\text{Zn}/\text{agua de mar}$  y  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  (saturado), se han descrito ya en el capítulo II.

#### *Medida del potencial en estructuras enterradas*

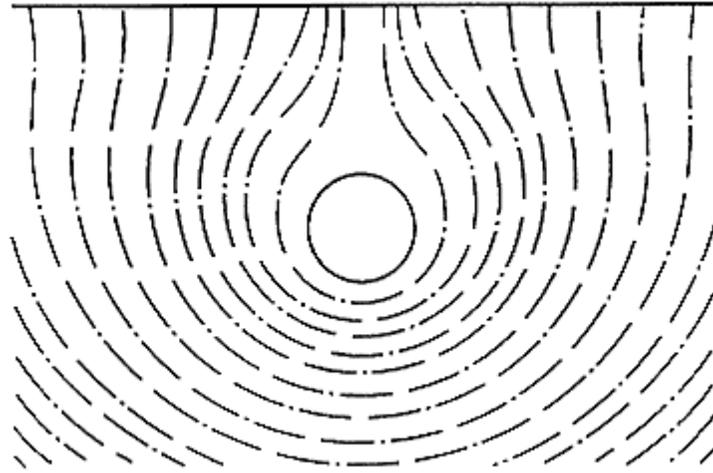
Cuando se trata de medir el potencial de una tubería enterrada, se toma el electrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  (saturado) como referencia y un milivoltímetro de resistencia interna elevada (mayor de 100 000 ohms). El polo positivo del aparato se une al electrodo de referencia y el negativo a la tubería. El valor que marque el aparato será el potencial de disolución del metal del tubo, en función del medio agresivo, en este caso el del suelo. La disposición y la forma de realizar esta medida se representa en la figura 24. El electrodo debe situarse justo encima de la generatriz superior de la tubería, de forma que quede perpendicular a ella.



**Figura 24. Realización práctica de medida de potencial de una tubería con un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  sat.**

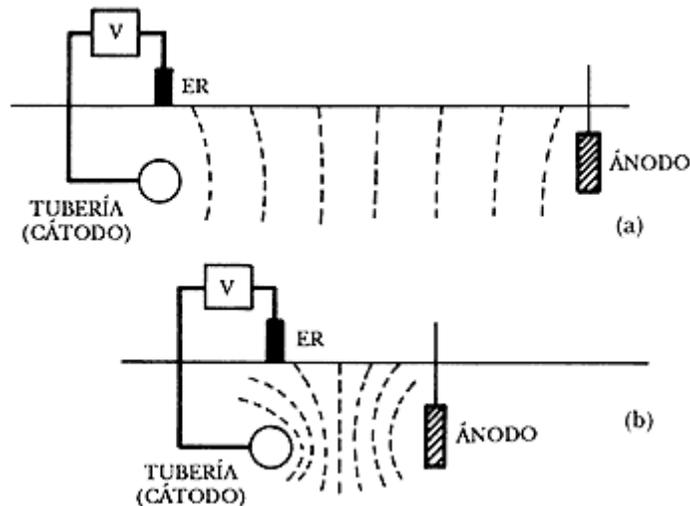
Como ya se ha indicado, las medidas de potencial pueden verse afectadas por la caída óhmica producida por el paso de la corriente eléctrica que genera el proceso de protección catódica. Esta caída de voltaje puede ser desde unos milivoltios a uno o varios centenares, según sea el proceso. La magnitud del error depende de la forma de la estructura a proteger, de la corriente que fluye entre ella y los ánodos, de la resistividad del medio y de la distancia entre el electrodo de referencia y la estructura. Si la distancia y la corriente son pequeñas, la caída de potencial puede ser despreciable.

La corriente que llega a la estructura que desea protegerse crea un campo eléctrico de líneas equipotenciales a su alrededor (Figura 25). Según esta figura, cualquier punto de la superficie del suelo elegida para colocar el electrodo de referencia, tendrá un potencial diferente al inmediatamente próximo. Cada uno de estos puntos tendrá a su vez una caída de potencial que dependerá de la resistencia del terreno entre el electrodo y la tubería. El electrodo de referencia deberá colocarse justamente encima de la generatriz superior del tubo. En el caso de un depósito enterrado es exactamente igual, ya que la acción del campo eléctrico no afecta la medida.



**Figura 25. Campo eléctrico alrededor de una tubería.**

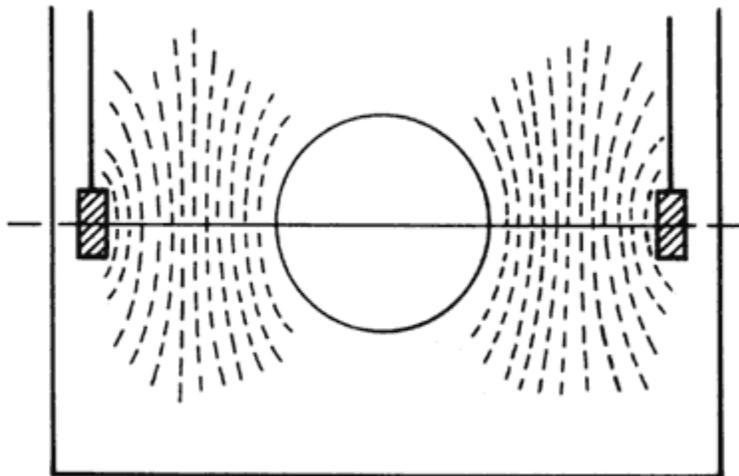
Para asegurar una medida correcta del potencial, estas líneas equipotenciales deben ser perpendiculares a la superficie del suelo. Esto se consigue cuando la distancia entre la estructura enterrada y el ánodo es muy grande, en comparación con la profundidad a la que dicha estructura está enterrada (Figura 26 a). Si la separación es pequeña, las líneas equipotenciales sufren una distorsión, por lo que dejan de ser perpendiculares a la superficie del suelo y, por tanto, afectan mucho las medidas (Figura 26 b).



**Figura 26. (a) La medida de potencial no se ve afectada por el campo eléctrico. (b) la medida de potencial se ve afectada por el campo eléctrico.**

En el caso de depósitos de gases licuados de petróleo (GLP) enterrados, como van dentro de un cubeto de mampostería relleno con arena lavada de río, se topan con una resistencia elevada del medio y, por falta de espacio, con los ánodos próximos al depósito. En este medio tan resistivo, la salida de corriente de los ánodos de sacrificio, incluso si es de Mg, es muy pequeña. Por tanto, hay que colocar muchos ánodos de poco peso, para hacer un buen reparto de corriente, pues es muy pequeña la que suministran.

Si la corriente es muy pequeña, la caída de potencial será también muy pequeña, pero además por la configuración geométrica entre el depósito y los ánodos, la longitudinal superior debe verse libre de la acción del campo eléctrico (Figura 27). Por este motivo, cuando se realiza una protección catódica en estos depósitos, la medida de potencial debe realizarse en la longitudinal superior.



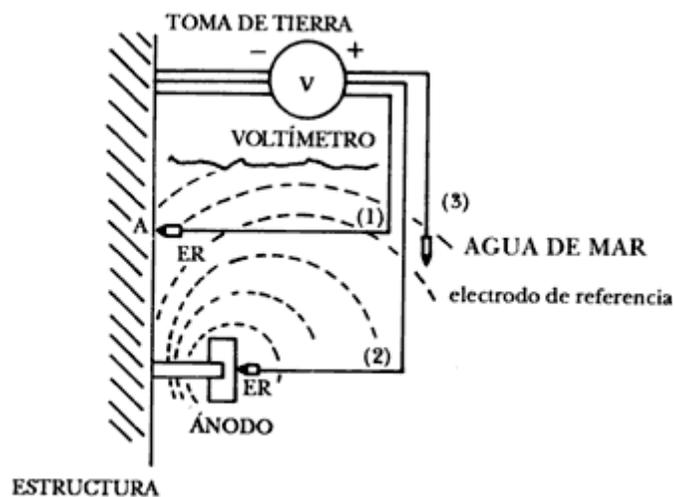
**Figura 27. Campo eléctrico alrededor de un depósito de GLP enterrado.**

Cuando el electrodo de referencia se desplaza del ánodo de sacrificio hacia la estructura protegida, en dirección de la corriente de protección, el potencial medido que incluye la caída óhmica se vuelve más noble; por el contrario, éste se hace aparentemente más activo cuando el electrodo de referencia se separa de la estructura protegida catódicamente y se aproxima al ánodo (Figura 28). La caída de potencial se traduce en lecturas falseadas del potencial que indican un grado de protección mayor que el que existe en realidad.



2) Medición del potencial de algunos ánodos de sacrificio representativos, para verificar su buen comportamiento (la ausencia de polarización excesiva).

La figura 29 representa el principio de medida del potencial electroquímico. La estructura protegida se conecta al polo negativo de un voltímetro, mientras que el electrodo de referencia, sumergido en el electrolito por el cual circula la corriente de protección, se conecta al polo positivo. La posición exacta del electrodo de referencia en el campo eléctrico establecido entre el ánodo y el cátodo es de suma importancia. En efecto, el potencial leído corresponde a la superficie equipotencial sobre la cual se sitúa el electrodo de referencia. Así, en la figura 29, el circuito 1 corresponde a la medida del potencial en el punto A de la estructura, mientras que el Circuito 2 corresponde a la medida de potencial del ánodo. El circuito 3 representa una situación intermedia.



**Figura 29. Principio de la medida del potencial electroquímico.**

Teóricamente, un error de lectura causado por la caída óhmica en el circuito de medida es inevitable, aunque en la práctica este error será irrelevante si se toman las precauciones necesarias. En particular, la corriente que circule por el circuito de medida debe ser lo más pequeña posible. Para esto, la impedancia de entrada del voltímetro utilizado debe ser lo más elevada posible (mayor de 100 000 ohms). Además el contacto con la estructura debe realizarse en las mejores condiciones posibles, con objeto de evitar resistencias de contacto parásitas.

**MATERIAL UTILIZADO**

### *Electrodos de referencia*

Si bien el electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado (**Cu/CuSO<sub>4</sub>sat.**) es prácticamente el único que se utiliza para la medición del potencial de estructuras enterradas, en el caso de estructuras marinas (offshore) se puede escoger entre varios:

a) El electrodo **Cu/CuSO<sub>4</sub>** saturado puede utilizarse, aunque hay que renovar frecuentemente la solución de **CuSO<sub>4</sub>**, pues su contaminación por el agua de mar llega a falsear la lectura.

b) El electrodo de calomelanos saturado fue utilizado en un principio, aunque en la actualidad prácticamente no se usa en virtud de su fragilidad.

c) La práctica más corriente consiste en utilizar el electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) en agua de mar, con lo cual se evita el problema de contaminación. Hay que tener en cuenta con este electrodo además que el valor del potencial leído es función de la concentración de iones cloruro (véase el capítulo II) del agua de mar y por tanto de la salinidad. La variación, de todos modos, es pequeña para las salinidades habituales.

d) Para aquellos casos en que se requiera que los electrodos funcionen por lapsos largos en una posición fija, se prefiere utilizar el Zn de alta pureza. Un inconveniente de este electrodo es una cierta variación del potencial de un electrodo a otro, por lo cual se recomienda una calibración periódica de los mismos con un electrodo de Ag/AgCl.

El criterio de inmunidad del acero con respecto a los diferentes electrodos de referencia indicados en condiciones normales de aereación y salinidad, es el siguiente:

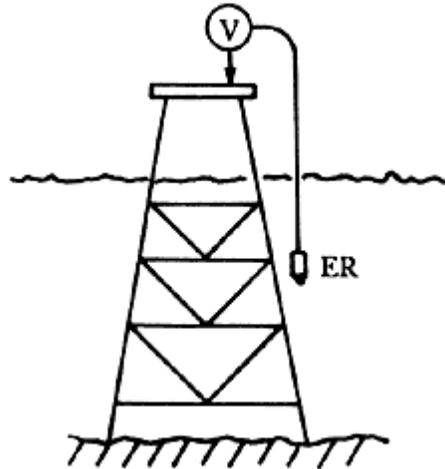
-850 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado

-790 mV vs. Ag/AgCl en agua de mar

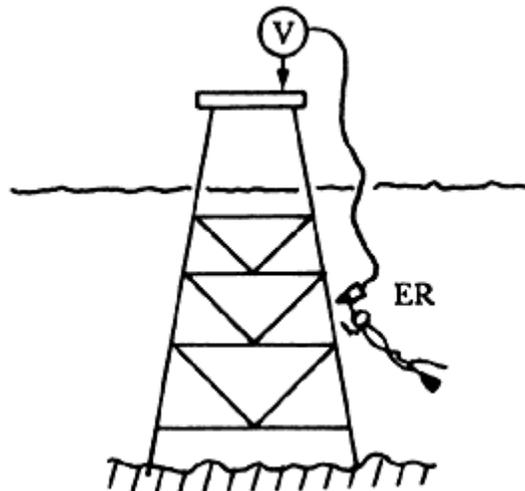
+250 mV vs. Zn

Además del electrodo de referencia y de un voltímetro de alta impedancia de entrada, se requiere de cables eléctricos, cuyo calibre puede ser pequeño y de una buena conexión a la masa de la estructura que se puede lograr con pinzas de cocodrilo o por contacto por presión, por soldadura, etc. La utilización de voltímetros electrónicos minimiza los errores causados por las caídas óhmicas.

Algunos de los métodos utilizados para la medida del potencial tanto de estructuras como de ánodos, se presentan en las figuras 30-35.



**Figura 30. Medición del potencial. Electrodo móvil con voltímetro en la superficie.**



**Figura 31. Medición del potencial con la ayuda de un submarinista.**

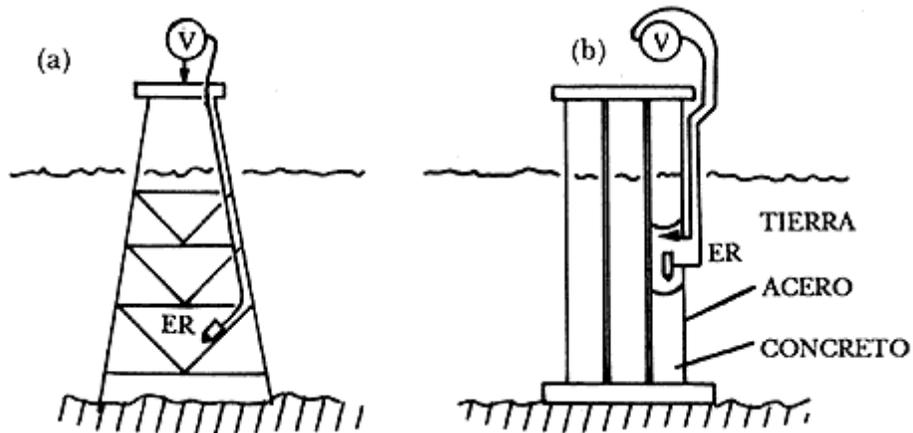


Figura 32. Electrodo fijo con voltímetro en la superficie. (a) Masa en la superficie. (b) Masa sumergida.

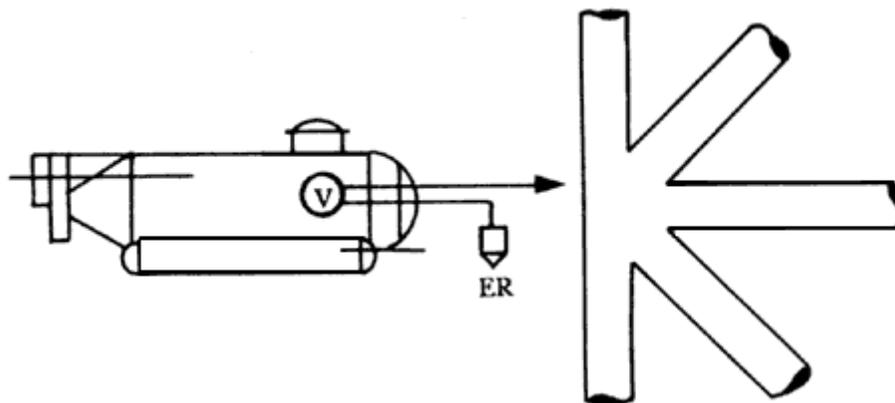
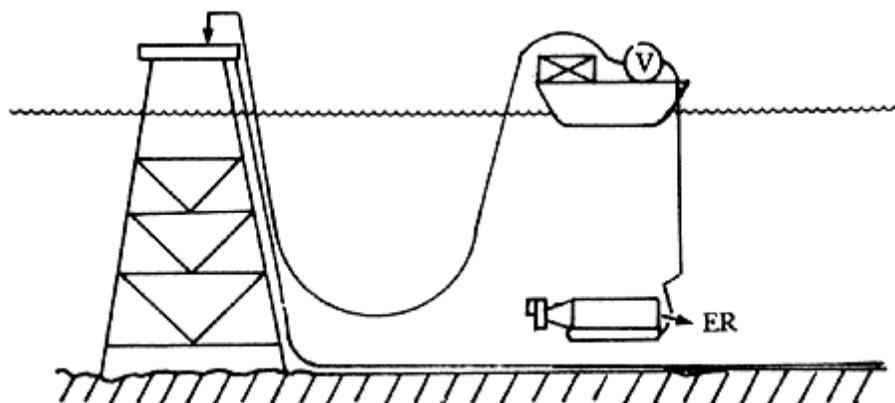
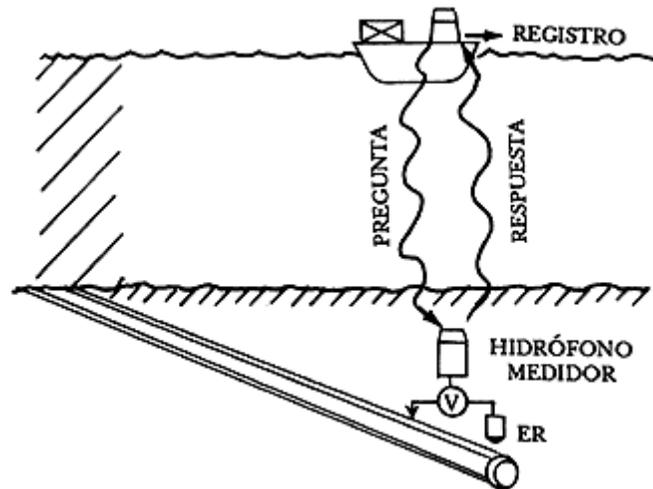


Figura 33. Medida del potencial con la ayuda de un submarino.



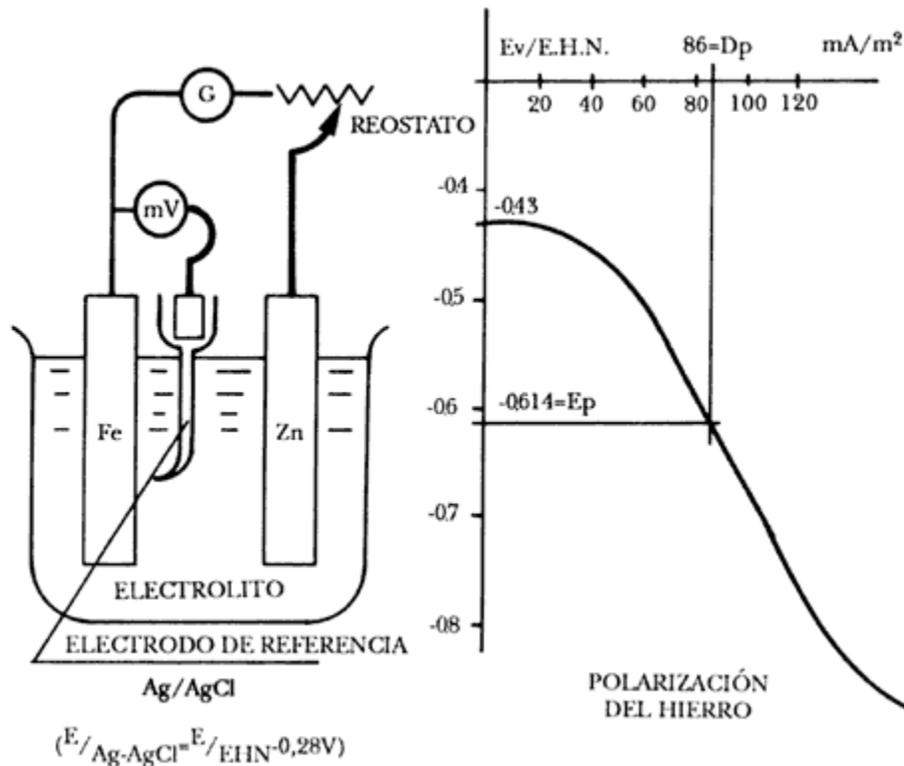
**Figura 34. Medida del potencial con la ayuda de un submarino y toma de tierra (masa) en la superficie.**



**Figura 35. Control del potencial por transmisión acústica.**

#### DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN

Pueden utilizarse diferentes métodos para la determinación de la intensidad de protección ( $I_p$ ) o de la densidad de corriente de protección. La figura 36 representa un método experimental de polarización, adecuado para determinar la densidad de corriente de protección ( $D_p$ ). Aplicando una corriente eléctrica creciente se obtiene una serie de valores del potencial del hierro o del acero en agua de mar o en cualquier otro electrolito. Si llevamos sobre la curva de polarización obtenida para el hierro el potencial de protección anteriormente calculado (véase el capítulo II),  $-0.61$  V, se obtiene la densidad de corriente de protección, que según la figura 36 resulta ser de  $86$  mA/  $m^2$ .



**Figura. 36. Método experimental del trazado de una curva de polarización utilizable para el cálculo de la densidad de corriente de protección ( $D_p$ ).**

Este valor es máximo, porque no tiene en cuenta los procesos de polarización que tienen lugar en función del tiempo y que dan lugar a modificaciones superficiales, como la acumulación de iones OH, de hidrógeno, los depósitos de magnesio calcáreos, etcétera.

*Valores prácticos de la densidad de corriente de protección*

Por cualquier método que pueda ser empleado, la densidad de corriente de protección ha sido determinada en función del estado superficial del acero, que puede estar pintado o no o recubierto con un sistema pasivo de protección. Algunos resultados prácticos se agrupan en el cuadro 20.

**CUADRO 20. Densidad de corriente de protección en distintos medios agresivos**

<i>Estado superficial</i>	<i>Medio agresivo</i>	<i>Densidad de corriente mA/m<sup>2</sup></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
Acero pintado sujeto a roces por hielos, fon- dos, etcétera	Agua de mar	50-210
Acero pintado (alumi- nio 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 lim- pio	Agua de mar	190
Acero desnudo	Agua dulce estancada	56
Acero desnudo	Agua dulce en movi- miento	56-66
Acero desnudo	Agua dulce, turbulen- ta o caliente	56-170
Acero desnudo	Suelo neutro o estéril	5-17
Acero desnudo	Suelo aereado 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

Hay que resaltar la influencia de la velocidad del agua que habrá que tener siempre muy en cuenta, así como la existencia de bacterias o de cualquier otro factor susceptible de incidir directamente en la corrosión y por tanto en la densidad de corriente para lograr la protección.

Las capas de pinturas que se aplican sobre el acero reducen la densidad de corriente necesaria para la protección y esta reducción variará en función del espesor y tipo de pintura. En el cuadro 20 se dan algunos valores indicativos.

La amplitud y diversidad de las instalaciones marinas y las características de las aguas de los distintos mares no hacen posible que se pueda presentar con detalle la infinidad de datos recogidos a lo largo de los años debidos a la experiencia de investigadores e ingenieros en este campo.

En lo que se refiere a las aguas dulces, las instalaciones son menos importantes y menos numerosas que las sumergidas en agua de mar. Algunos valores de densidad de corriente adecuada para conseguir la protección catódica en este tipo de agua se presentan en el cuadro 20.

La densidad de corriente necesaria para la protección catódica de estructuras enterradas, básicamente de tuberías, es un caso especial, ya que el suelo es un medio heterogéneo donde varía mucho la velocidad de corrosión. De un suelo natural se puede separar, fundamentalmente, arena, arcilla, cal y humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones, lo que dará lugar a distintos grados de agresividad y, por tanto, a valores distintos de la densidad de corriente para lograr la protección. Si el oxígeno atmosférico no puede penetrar en el suelo, lo que con frecuencia es el caso en suelos arcillosos o turbosos, pueden existir bacterias. Estos microorganismos que se desarrollan en ausencia completa de oxígeno (condiciones anaerobias) como el *Sporovibrio desulfuricans*, originan graves problemas de corrosión al transformar los sulfatos presentes en el terreno, en sulfuros; los síntomas de este tipo de corrosión anaerobia son: un ennegrecimiento local del suelo por el sulfuro de hierro que se forma y a veces, un olor a ácido sulfhídrico.

Un factor importante para conocer la agresividad de un suelo es el conocimiento de su resistividad. (Para mayor información al respecto, véase el capítulo VII.)

Es en función de todos estos factores que se debe determinar la densidad de corriente de protección. En la última parte del cuadro 20 se presentan algunos valores de la densidad de corriente en suelos de diferentes tipos.

En la mayoría de los casos de tuberías enterradas la protección catódica se efectúa sobre ductos ya protegidos con un recubrimiento como pintura, alquitrán, etc. La corriente de protección resulta ser entonces un porcentaje pequeño con respecto a la necesaria para proteger a la estructura metálica desnuda, pues deberá servir para proteger las partes en las que el revestimiento presenta defectos: poros, rasguños, imperfecciones, etc. La corriente de protección resultará más baja mientras mayor sea la eficiencia del recubrimiento.

Podemos definir la eficiencia del recubrimiento ( $\phi$ ) como el porcentaje de la superficie metálica efectivamente revestida o recubierta. Por ejemplo, si se dice que un recubrimiento tiene un 90% de eficiencia, querrá decir que hay un 10% de la superficie metálica que está descubierta, o sea no protegida por el recubrimiento y que, por tanto, se necesitará sólo un 10% de la corriente necesaria para proteger toda la estructura desnuda; entonces, la densidad de corriente de protección es proporcional a la fracción de superficie descubierta o no protegida, y, en general, se puede formalizar de la siguiente manera:

$$i_r = i(1 - \phi),$$

en  
d  
o  
n  
de  
:

$i =$  la densidad de corriente de protección de la estructura desnuda

$i_r =$  la densidad de corriente de protección de la estructura recubierta

$\phi =$  la eficiencia del recubrimiento (fracción unitaria).

Naturalmente, la eficiencia de un recubrimiento puede variar con el tiempo. Por ejemplo, para tuberías enterradas sin mantenimiento puede pasar al 95 o al 90% después de 10 o 20 años.

El envejecimiento es aún más acelerado en estructuras que están en contacto con el agua del mar. Por ejemplo, en el caso de un barco bien revestido (con 5 capas de pintura), la eficiencia del recubrimiento puede pasar durante el primer año del 99.9 al 99% y así sucesivamente, sin que se le dé un mantenimiento preventivo. Obviamente, además del envejecimiento normal del recubrimiento, contribuyen a disminuir la eficiencia notablemente los daños mecánicos (abrasión) que por lo general son mayores en barcos grandes y veloces.

La eficiencia efectiva de recubrimientos porosos o dañados mecánicamente puede mejorar, cuando es posible la precipitación de sales (carbonato de calcio e hidróxido de magnesio), lo cual tiene lugar en agua de mar en las zonas descubiertas de la estructura, en las cuales se concentra la corriente de protección.

### SOBREPROTECCIÓN

Se dice que una estructura o, en ocasiones, alguna parte de la misma está sobreprotegida cuando la densidad de corriente intercambiada en su superficie es mayor que la necesaria para una protección completa. En general, esta condición sucede cuando la protección catódica se efectúa mediante el sistema de corriente impresa.

Evidentemente la sobreprotección debe evitarse, tanto porque implica un consumo inútil de electricidad, un mayor consumo del ánodo, etc., como, y especialmente, por el daño indirecto que puede provocar: ampollamiento del recubrimiento, degradación del mismo, desprendimiento de hidrógeno con posibilidad de fragilización del acero, etc. Por ejemplo, en agua de mar, cuando en la estructura que se quiere proteger se miden potenciales más negativos de -1150 mV vs. **Cu/CuSO<sub>4</sub>** saturado, es señal de una densidad de corriente demasiado elevada, por lo que pueden tener lugar efectos negativos en virtud de:

- a) una alcalinización excesiva,
- b) desprendimiento de hidrógeno.

A altas densidades de corriente tiene lugar la reducción del agua, según:



lo cual explica lo anterior.

De hecho, en la superficie de la estructura protegida se obtienen valores de pH de alrededor de 11, en virtud de que la reacción que tiene lugar en la estructura protegida es la reducción del oxígeno:



En condiciones de sobreprotección, el pH aumenta provocando la corrosión de aquellos metales como el Al, el Zn o el Pb y sobre todo, el ampollamiento o degradación del recubrimiento.

La formación de ampollas en el recubrimiento se produce en especial cuando, aunque sea localmente, tiene lugar el desprendimiento de hidrógeno. De hecho, si este gas se forma en algún defecto del

recubrimiento de la superficie metálica, puede llegar a ejercer una presión elevada y provocar el desprendimiento del recubrimiento y la base metálica quedar desprotegida.

El ampollamiento del recubrimiento también puede ser provocado por la migración del agua hacia la superficie metálica a través del recubrimiento, bajo la acción del campo eléctrico (fenómeno de electroósmosis). En cualquier caso, el ampollamiento del recubrimiento debe ser evitado, para lo cual se da normalmente un límite inferior al potencial al cual debe llevarse la estructura. En el cuadro 21 se presentan los valores límites del potencial para diversos tipos de pinturas. Por ejemplo, la pintura hecha a base de minio no puede aplicarse sobre estructuras protegidas catódicamente ya que puede reducirse el óxido de plomo y destruirse la pintura.

**CUADRO 21. Valor límite del potencial aplicado para diversos tipos de pintura**

<i>Tipo de pintura</i>	<i>Potencial, V vs Ag/AgCl</i>
óleo-resinosa	-0.8 a -1.0
bituminosa al aluminio	-1.1
cloro-caucho	-1.1
vinílica	-1.1 a -1.2
epoxi-alquitrán	-1.6
epoxídica	-2.0

En general, sin embargo, las pinturas pueden aplicarse con éxito aun en condiciones de sobreprotección cuando son muy adherentes y muy resistentes químicamente (se deben excluir por ejemplo las pinturas saponificables), además de que deben poseer un espesor suficiente para aumentar la impermeabilidad. Existen discrepancias sobre el comportamiento de los primarios inorgánicos de Zn que en general no se incluyen en la formulación de los esquemas de pintado de las estructuras sumergidas en agua de mar y protegidas catódicamente. Sin duda, en condiciones de protección normal, el primario inorgánico de Zn se comporta bien y puede utilizarse por ejemplo en sistemas de protección con ánodos de sacrificio de Zn o Al.

Por lo que se refiere a la influencia del espesor, en el cuadro 22 se indican los espesores mínimos de varios tipos de pinturas que resisten a un potencial de -900 mV vs. Ag/AgCl (valor aceptado por la Compañía de Seguros Lloyds para los cascos de los barcos). Estos valores parecen

muy altos en cuanto a que, en la práctica, se utilizan sin grandes problemas espesores mucho menores.

**CUADRO 22. Espesores mínimos para diversos esquemas de pintado resistentes a un potencial de -900 mV vs. Ag/AgCl**

<i>Tipo de pintura</i>	<i>Espesor mínimo micras</i>
aluminio bituminosa	500-700
cloro-caucho	500-900
poliuretano	500-900
vinílica	600-800
epoxídica	800-1000

## V I I . C O R R O S I Ó N E N S U E L O S

EL TERRENO o suelo por su contenido variable de humedad, sales y materia orgánica en descomposición es el electrolito más complejo de todos los que se pueden encontrar.

Por necesidades mecánicas, económicas y de seguridad, la industria tiene que apoyar sobre él y enterrar numerosas y muy variadas estructuras de acero, las cuales se ven sometidas a un proceso de corrosión que en algunos casos puede ser complicado.

Para tener un buen control de la corrosión de estas estructuras se han de combinar los dos tipos de protección a nuestro alcance: un buen recubrimiento pasivo, complementado por un sistema de protección catódica adecuado. Confiar la protección anticorrosiva de una estructura enterrada solamente a la protección catódica, puede hacerse, pero será siempre antieconómico si la estructura no es de dimensiones pequeñas.

El suelo generalmente es un medio heterogéneo en donde se dan muchas variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Un suelo natural contiene los siguientes elementos: arena, arcilla, cal y

humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones que darán lugar a distintos grados de agresividad.

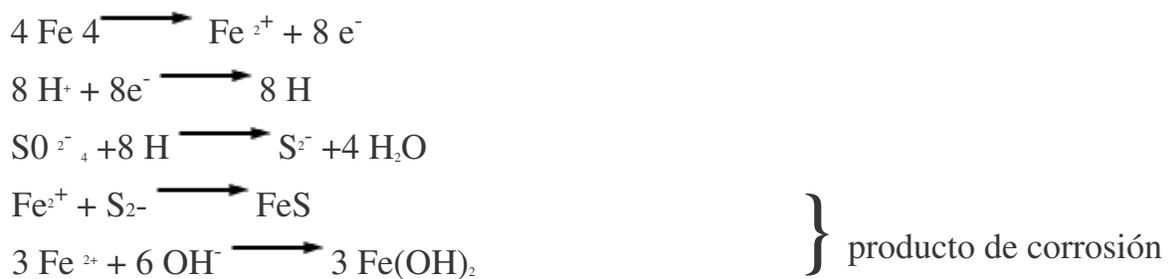
Por lo general, los suelos arenosos, margo-arenosos, margo-calcáreos y calcáreos no son agresivos; los suelos arcillosos en algunas condiciones son agresivos. Los que son agresivos de por sí son las turbas, los humus libres de cal y también los suelos cenagosos y de aluvión.

Los suelos artificiales, esto es los formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción y residuos humanos e industriales también son agresivos.

### CAUSAS DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS ENTERRADAS. ESTUDIO DE LA AGRESIVIDAD DEL SUELO. CORROSIÓN ANAEROBIA

Si el oxígeno atmosférico no puede penetrar el suelo, es frecuente el caso en suelos arcillosos o turbosos, el hidrógeno producido a consecuencia de la reacción catódica en la estructura enterrada puede llegar a ser eliminado (oxidado) por una acción microbiana. Este proceso es el resultado de la actividad metabólica de un microorganismo (la bacteria *Sporovibrio desulfuricans*) que se desarrolla en ausencia completa de oxígeno libre (condiciones anaerobias).

Para oxidar el hidrógeno de estos medios nutritivos orgánicos, esta bacteria no utiliza el oxígeno libre, sino el ion sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), reduciéndolo a sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ) Uno de los mecanismos más comúnmente aceptados para explicar lo anterior es el siguiente:



El resultado neto es que la corrosión continúa y se denomina corrosión anaerobia. Los síntomas característicos en las conducciones metálicas enterradas son el ennegrecimiento local del suelo por la formación del sulfuro de hierro y a veces el olor a ácido sulfhídrico.

### AGRESIVIDAD DEL SUELO EN FUNCIÓN DE SU RESISTIVIDAD, pH Y POTENCIAL RÉDOX

La velocidad de corrosión está ligada a la resistividad del terreno de la forma que se señala en el cuadro 23.

**CUADRO 23. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad**

<i>Resistividad (<math>\Omega</math>-m)</i>	<i>Grado de agresividad</i>
< 10	Severo
10 - 100	Discreto
100 - 1000	Escaso
> 1000	Nulo

La resistividad de un terreno depende, en particular, de su estructura, de las dimensiones de sus partículas constituyentes, de su porosidad y permeabilidad, del contenido de agua (humedad) y de su contenido de iones.

Por ejemplo, en lo que se refiere a un suelo arcilloso, con un 5% de humedad, dicho suelo puede presentar una resistividad de 10 000 ohm-m, en cambio, con un 20% de humedad, la resistividad disminuye hasta 100 ohm-m.

Es obvio, por tanto, que la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la actividad agrícola e industrial, etcétera.

En cambio, la temperatura no ejerce una influencia tan marcada, a menos que supere el punto de congelación, después de lo cual hay un aumento significativo de la resistividad.

En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos (**pH <5.5**) pueden motivar una rápida corrosión del metal desnudo, y la agresividad del suelo aumenta con el incremento de la acidez (disminución del pH), pero estos valores de pH no son normales. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 5.0 y 8.0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores. En suelos alcalinos parece existir una cierta correlación entre conductividad y agresividad.

En un medio anaerobio es posible predecir la corrosión midiendo el pH y el potencial rédox. Estas medidas permiten establecer las condiciones que favorecen la actividad microbológica responsable de la corrosión anaerobia. El pH más favorable es entre 5.5 y 8.5 (neutro). En estas condiciones, la medida del potencial rédox efectuada con un electrodo

de platino, permite establecer si un terreno está predispuesto al crecimiento de bacterias sulfatoreductoras.

Basándose en los datos reportados en el cuadro 24, es posible determinar la agresividad potencial de un suelo desde el punto de vista del crecimiento de bacterias sulfato-reductoras, lo cual permite establecer una clasificación de los suelos. Por ejemplo, un suelo cuyo contenido en sulfatos sea apreciable y su potencial rédox esté alrededor de +200 mV está en condiciones favorables para que esta corrosión pueda tener efecto. Si en otro terreno se obtiene un valor del potencial rédox de +400 mV, es posible excluir la posibilidad del crecimiento y desarrollo de bacterias anaerobias. Naturalmente existe la posibilidad de que se desarrollen otras familias de bacterias.

**CUADRO 24. Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato-reductoras en función del potencial rédox**

<i>Valor del potencial rédox en mV vs. electrodo de hidrógeno</i>	<i>Grado de agresividad potencial (posibilidad de corrosión anaerobia)</i>
< 100	Severa
100 - 200	Moderada
200 - 400	Escasa
> 400	Nula

Un grupo de bacterias aerobias particularmente dañinas son los tiobacilos (*Ferrobacillus ferrooxidans*, que son capaces de oxidar el azufre y los sulfuros para convertirlos en ácido sulfúrico.

En el cuadro 25 se presentan unos índices que permiten determinar las características agresivas de un suelo basándose en el contenido de aniones del mismo, cloruros, sulfatos y sulfuros, pH, potencial rédox y resistividad. Este tipo de información resulta de interés para predecir la agresividad de un suelo frente a, por ejemplo, una tubería enterrada y con base en esto, evaluar la corrosión y la protección correspondiente.

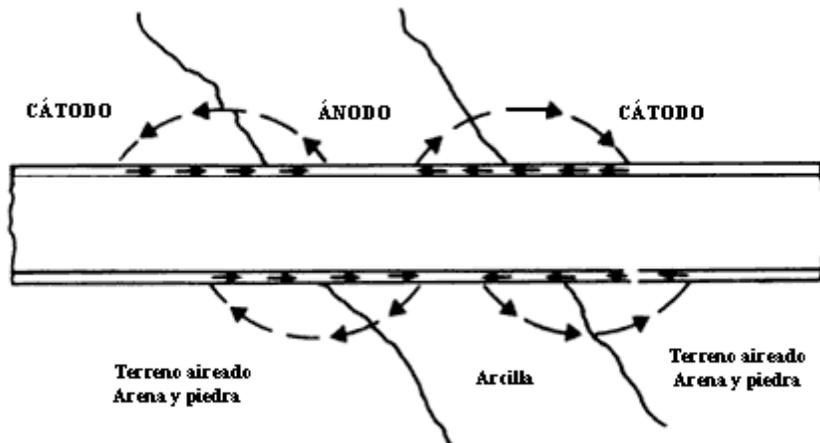
**CUADRO 25. Determinación de la agresividad de suelos**

		<i>ÍNDICE</i>
Resistividad, $\rho$ ( $\Omega$ -cm)	> 12 000 .....	0
	12 000 - 5 000 .....	-1
	5 000 - 2 000 .....	-2
	< 2 000 .....	-4
Potencial rédox, $E_{\text{rédox}}$ (mV vs. enh)	> + 400 .....	+2
	400 - 200 .....	0
	200 - 0 .....	-2
	< 0 .....	-4
pH	> 5 .....	0
	< 5 .....	-1
Cloruros, $\text{Cl}^-$ (mg/kg)	< 100 .....	0
	100 - 1000 .....	-1
	> 1000 .....	-4
Sulfatos, $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/kg)	< 200 .....	0
	200 - 300 .....	-1
	> 300 .....	-2
Sulfuros, $\text{S}^{2-}$ (mg/kg)	0 .....	0
	0 - 0.5 .....	-2
	> 0.5 .....	-4
<i>Características del suelo</i>		<i>Suma</i>
No agresivo .....		0
Débilmente agresivo .....		-1 a -8
Medianamente agresivo.....		-8 a -10
Sumamente agresivo .....		< -10

## CORROSIÓN POR AIREACIÓN DIFERENCIAL

En cualquier electrolito que se pueda pensar que sea homogéneo existen frecuentemente diferencias en la concentración de aire disuelto. Esta es una causa de corrosión puesta en evidencia por Evans (llamada aireación diferencial o efecto Evans). Si una tubería metálica se encuentra en un terreno donde exista una concentración diferente de oxígeno, la parte menos oxigenada será la zona anódica y por tanto será la que sufrirá los efectos de la corrosión.

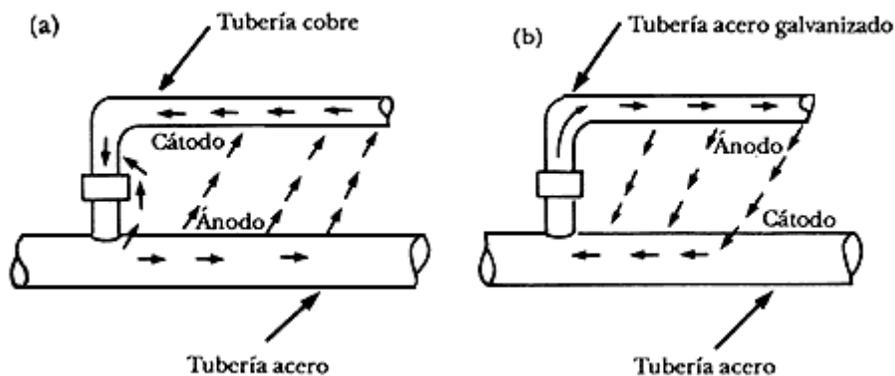
Este fenómeno se verá agravado si la tubería, a partir de una cierta longitud, atraviesa terrenos de naturaleza diferente, ya que puede ser muy distinta la permeabilidad al aire en cada uno de sus componentes y por tanto mayores sus diferencias en la concentración de oxígeno (Figura 37).



**Figura 37. Corrosión por aireación diferencial. Corrosión de una tubería que atraviesa terrenos de naturaleza diferencial.**

### CORROSIÓN GALVÁNICA

Este tipo de corrosión tiene lugar cuando se ponen en contacto dos metales diferentes. A veces ocurre que de un conducto principal de acero se sacan conductos derivados en cobre o acero galvanizado; en el primer caso se atacara el acero y en el segundo se disolverá el Zn (del galvanizado) (Figura 38 (a) y (b)).



**Figura. 38. (a) Corrosión de una conducción principal de acero por la conexión de una derivación de cobre. (b) Disolución del zinc de una tubería de acero galvanizado que ha sido conectada a una conducción principal de acero.**

Se puede incluir en este tipo de corrosión el caso de la asociación de un conducto viejo (oxidado) con uno nuevo. El metal oxidado (pasivado)

es siempre más noble que el metal nuevo, ya que tiene un potencial más elevado; por tanto, este último sufrirá los efectos de la corrosión.

Hay que señalar, desde el punto de vista práctico, que este fenómeno es válido para metales tan parecidos como el acero y la fundición. Un caso frecuente en los explotadores de canalizaciones enterradas es el de la corrosión de los tornillos de acero de unión de las bridas de los tubos de fundición.

### 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: tracción eléctrica, subestaciones, etcétera.

La corriente eléctrica busca siempre recorridos de menor resistencia y 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.

La figura 39 ilustra el mecanismo de la corrosión de una tubería motivada por la acción de corrientes vagabundas que provienen de un sistema de tracción eléctrica.

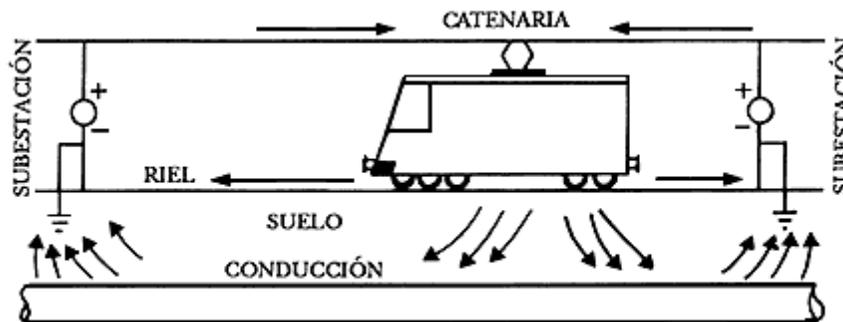


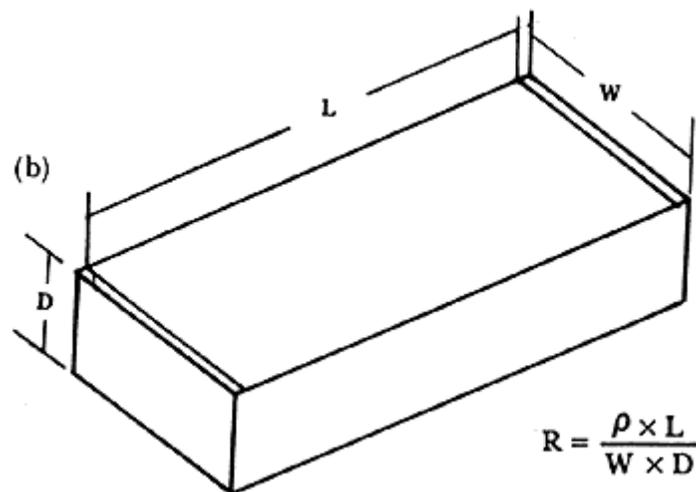
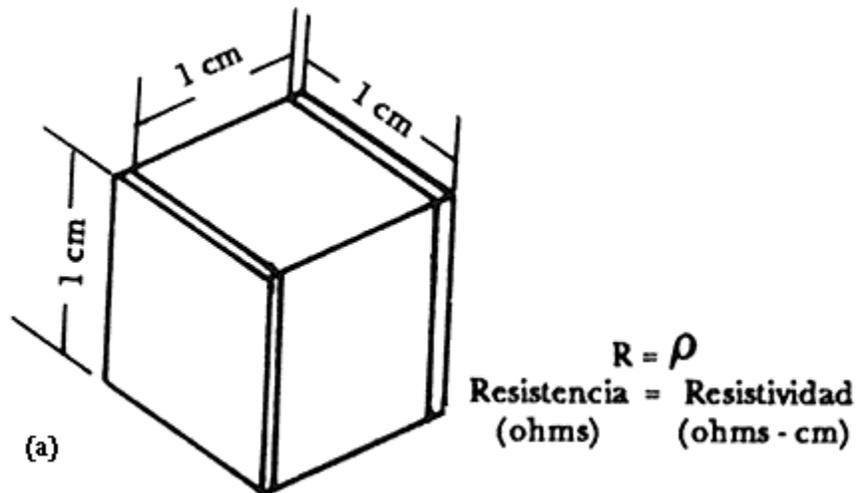
Figura 39. Mecanismo de corrosión de una tubería por efecto de las corrientes vagabundas que provienen de un sistema de tracción eléctrica.

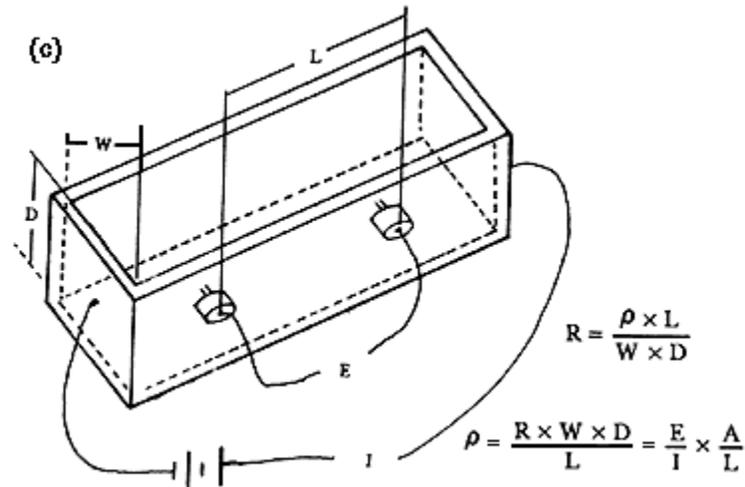
## MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Para determinar si puede utilizarse la protección catódica para prevenir la corrosión de una estructura enterrada, se debe conocer, en primer lugar, cómo medir la resistividad del suelo o terreno.

### *Unidades de resistividad del suelo*

La unidad de resistividad del suelo es el ohm-centímetro ( $\Omega\text{-cm}$ ). La resistividad de un suelo determinado es igual numéricamente a la resistencia que ofrece el terreno contenido en un cubo de 1 cm de arista, que se mide entre las caras opuestas del cubo (véase la figura 40).





**Figura 40. (a) La resistividad ( $\rho$ ) en  $\Omega \cdot \text{cm}$  es numéricamente igual que la resistencia ( $R$ ) en ohms en un cubo de un cm de arista. (b) Resistencia de un sólido rectangular. (c) Caja de suelo.**

La resistencia de un sólido rectangular está dada por:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{W \cdot D},$$

en donde  $W$ ,  $L$  y  $D$  son las dimensiones (en cm), como se ve en la figura 40, y  $\rho$  es la resistividad (en  $\Omega \cdot \text{cm}$ ) para que las unidades sean consistentes. La resistencia entre dos terminales de forma y tamaño cualquiera, en contacto con un terreno, está determinada por la relación entre el tamaño y la distancia entre las terminales y por la resistividad del suelo. En casos sencillos se puede determinar la resistencia, pero la complejidad matemática a menudo es muy grande.

*Determinación de la resistividad por el método de los cuatro electrodos*

En la práctica de la ingeniería de la corrosión se requiere medir la resistividad de grandes extensiones y a menudo, a una cierta profundidad. Para ello se utiliza el método de Wenner, más conocido como método de los 4 electrodos. El circuito básico se presenta en la figura 41.

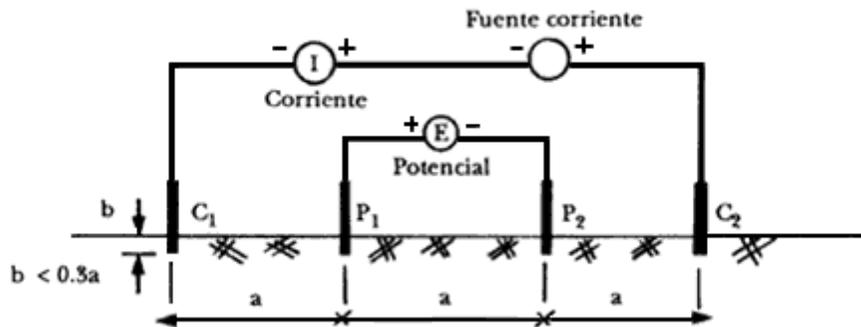


Figura 41. Medición de la resistividad del suelo por el método de Wenner o de los cuatro electrodos. La distancia (b) o sea la profundidad a la que está enterrada el electrodo (barra de cobre o acero) debe ser pequeña comparada con la distancia (a) entre los electrodos.

$$\rho = 2\pi a \frac{E}{I}$$

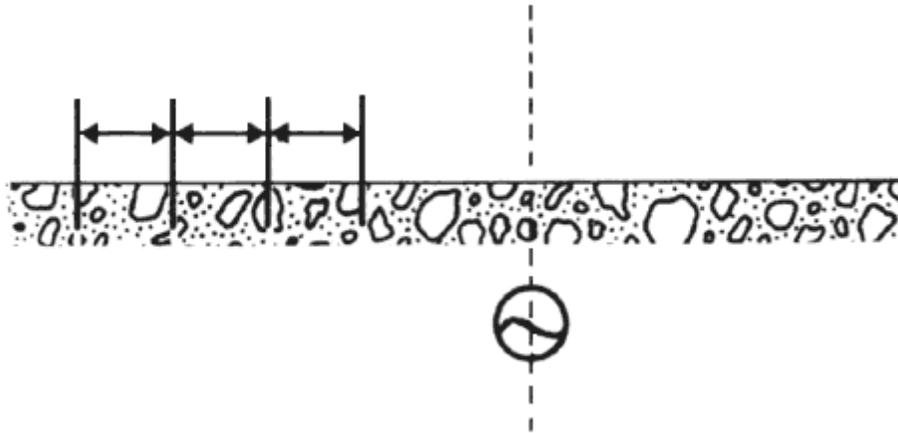
La resistividad se determina a partir de:

La medida que se obtiene es un valor promedio a una profundidad aproximadamente igual que el espaciado entre los electrodos. Es costumbre efectuar las mediciones de resistividad con un espaciado entre electrodos previamente establecido. Así, con espaciados de 5 pies 2 1/2 pulgadas, 10 pies 5 pulgadas y 20 pies 10 pulgadas, el producto  $2\pi a$  respectivamente toma los valores de 1 000, 2 000 y 4 000, lo que facilita el cálculo.

Los detalles de la operación varían de acuerdo con el instrumento particular empleado, pero el principio es común a todos. Se entierran cuatro varillas de cobre equiespaciadas, y se conectan las dos externas ( $C_1$  y  $C_2$  en la figura 41) a las terminales de la fuente de corriente, y las dos internas ( $P_1$  y  $P_2$  de la misma figura) a un medidor potencial (voltímetro). Nótese que se mide la resistencia entre las dos varillas internas o electrodos de potencial; las dos varillas externas sirven para introducir corriente en el suelo.

El valor obtenido corresponde a la resistividad promedio a una profundidad aproximadamente igual al espaciado entre los electrodos.

La presencia de estructuras metálicas enterradas puede alterar los resultados de la medición. En este caso se aconseja realizar el alineamiento de los cuatro electrodos perpendicularmente a la estructura enterrada (Figura 42).



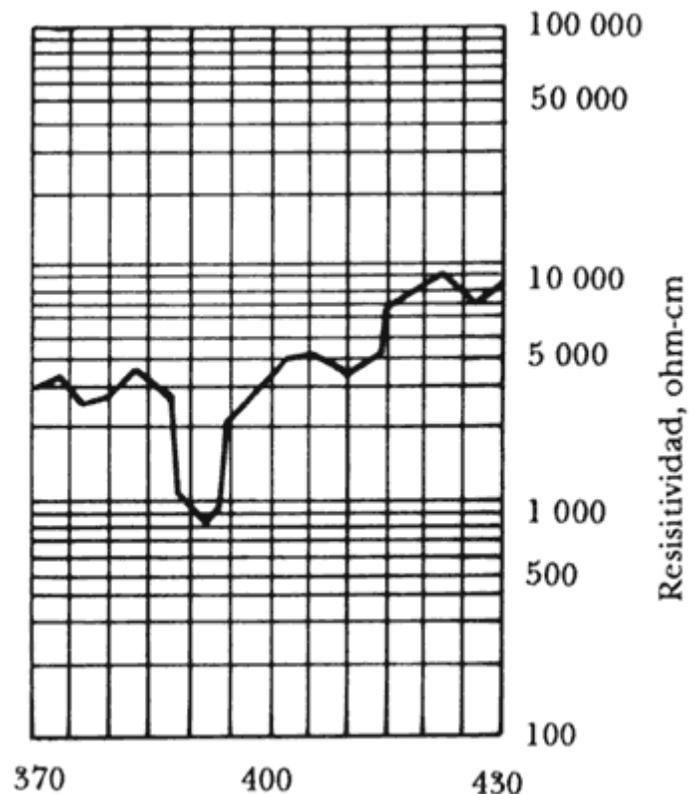
**Figura 42. Disposición correcta de los cuatro electrodos para la medida de la resistividad en presencia de una tubería enterrada.**

La investigación de la resistividad de un suelo consiste, por lo general, en una serie de medidas tomadas a lo largo de una línea, y se utiliza normalmente el método de los cuatro electrodos. Las lecturas deben tomarse de acuerdo con un procedimiento sistemático. Un método recomendable seguiría los siguientes pasos:

- 1) Deben efectuarse lecturas al menos cada 400 pies (1 pie = 12 cm).
- 2) Deben realizarse medidas donde exista un cambio visible en las características del suelo.
- 3) Dos lecturas sucesivas no deben diferir por más de 2:1. Cuando una lectura difiere de la precedente por mayor cantidad que la relación anterior, es necesario volver atrás y rehacer la lectura; esto debe repetirse hasta que se cumpla con la condición.
- 4) Como una excepción a la regla anterior, no será necesario tomar 2 lecturas a distancias menores de 25 pies.
- 5) Como otra excepción a la regla, ésta no debe aplicarse cuando el valor más bajo de las dos lecturas es mayor que 20 000  $\Omega$ -cm.

Para este tipo de investigaciones deben efectuarse mediciones de la resistividad del suelo a la profundidad a la cual va a estar enterrada la tubería. El método de los cuatro electrodos debe emplearse con un espaciado entre varillas de aproximadamente una vez y media la profundidad de la tubería. Muy a menudo, se escoge un espaciado de 5 pies 2 pulgadas y media para este propósito (lo cual supone que el producto  $2\pi a$  es igual a 1000).

Los resultados obtenidos por este procedimiento se grafican en un diagrama que represente la longitud de la línea ( figura 43). La escala de resistividad es logarítmica, ya que es más importante la relación de resistividades que sus diferencias. A partir de estos diagramas se pueden localizar fácilmente los "puntos calientes" o sea las áreas de mayor corrosividad del suelo.



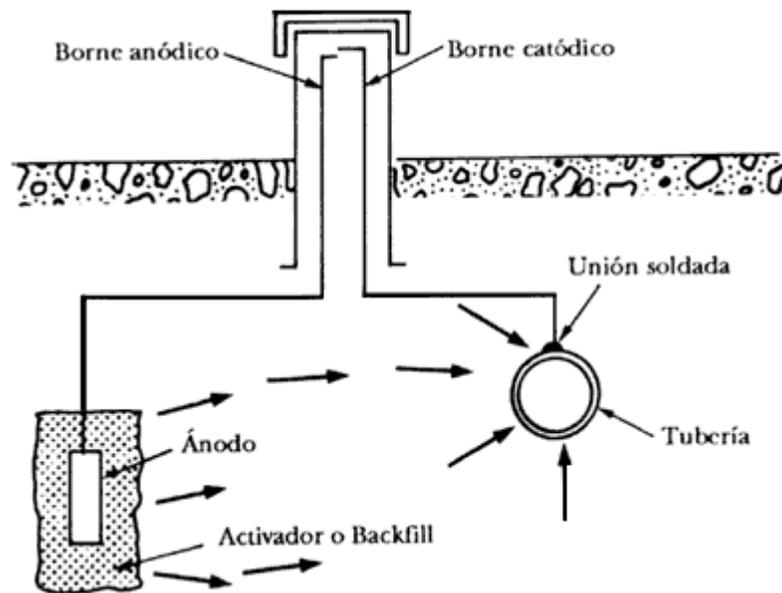
**Figura 43. Perfil de resistividad de un suelo. Las mediciones de resistividad se colocan en el eje de ordenadas (utilizando una escala logarítmica y las distancias a lo largo de la tubería, en el eje de abscisas (escala métrica).**

## PROTECCIÓN CATÓDICA DE TUBERÍAS ENTERRADAS

### *Protección con ánodos de sacrificio*

Se une eléctricamente la tubería de hierro al ánodo galvánico, generalmente Zn o Mg. Un esquema simple de montaje está representado en la figura 44. 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 de estar siempre bien aislado evitando un consumo innecesario de corriente para lograr su protección.



**Figura 44 Esquema del montaje de un sistema de protección catódica de una tubería enterrada con un ánodo de sacrificio.**

Cuando los ánodos están en contacto directo con el suelo, se recubren con frecuencia de una capa muy resistente. Esta capa ocasiona un aumento sensible de la resistencia de los ánodos con tendencia a pasivarlos, hasta el punto de hacerlos inoperantes. Para remediar la influencia desfavorable de estos factores sobre el proceso de disolución de los ánodos de sacrificio, se coloca a su alrededor un medio químico artificial. Este medio químico, que podemos llamar "activador" (véase la figura 44), es más conocido en la terminología de la ingeniería de la corrosión por la palabra inglesa "backfill", y debe ejercer tres funciones principales:

- 1) Reducir la resistencia de contacto ánodo-suelo.
- 2) Estabilizar el potencial del ánodo, evitar la polarización y asegurar una fuente segura de corriente.
- 3) Mejorar el rendimiento, disminuyendo la corrosión espontánea y consiguiendo un ataque del ánodo uniforme.

Numerosos productos químicos han sido utilizados en la composición del "activador o backfill", como por ejemplo la arcilla ordinaria, la

bentonita, el sulfato de calcio, la cal, el hidróxido de sodio, el dicromato de sodio, el cloruro de sodio, el sulfato de sodio, el de magnesio, etc. Los activadores a veces están constituidos por un solo compuesto, pero lo más frecuente es que sean mezclas binarias o ternarias. Entre los productos citados, el yeso y la bentonita son los de uso más corriente, ya que permiten preparar activadores muy eficaces, posiblemente en virtud de su propiedad de retener el agua.

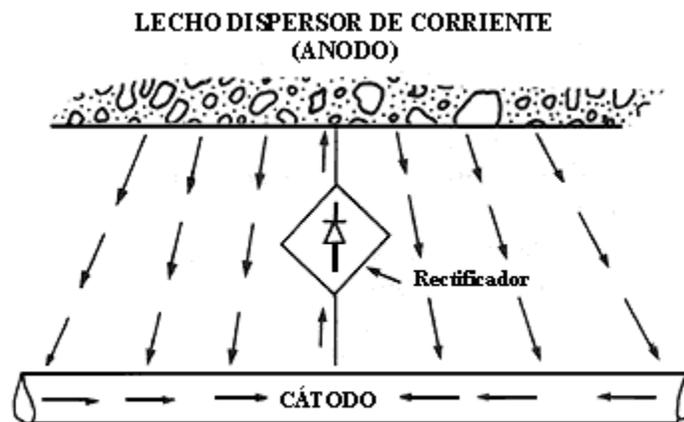
El empleo de la mezcla formada por arcilla y yeso para los ánodos de Zn permite obtener un rendimiento elevado. En la práctica, las mezclas de yeso y arcilla se realizan en las siguientes proporciones:

arcilla 50 %- yeso 50 %

arcilla 25 %- yeso 75 %

#### *Protección con corriente impresa*

En este caso, se obtiene la protección de la tubería conectándola al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua. El polo positivo (ánodo) está constituido generalmente por grafito, aleaciones de plomo o aleación de hierro y silicio. La corriente que sale del ánodo llega a la tubería que se trata de proteger según el esquema de la figura 45.



**Figura 45. Sentido de la corriente de un sistema de protección catódica con corriente impresa de una tubería.**

Normalmente las tuberías, además de la protección catódica, llevan un sistema de protección a base de sustancias bituminosas de 3 a 6 mm de espesor, lo que les proporciona un buen aislamiento. También se

utilizan mucho para este fin las bandas adhesivas de cloruro de polivinilo (PVC). En el cuadro 26 se dan algunos valores para la protección de una tubería enterrada en función de la resistencia del revestimiento y del diámetro del conducto.

**CUADRO 26. Densidad de corriente necesaria (en mA/km), para la protección de una tubería enterrada en función de la resistencia del revestimiento y del diámetro del conducto.**

Diámetro del conducto (mm)	mA/km		
	1 000 $\Omega/m^2$	10 000 $\Omega/m^2$	100 000 $\Omega/m^2$
150	150	15	1.5
300	300	30	3.0
400	400	40	4.0
600	600	60	6.0

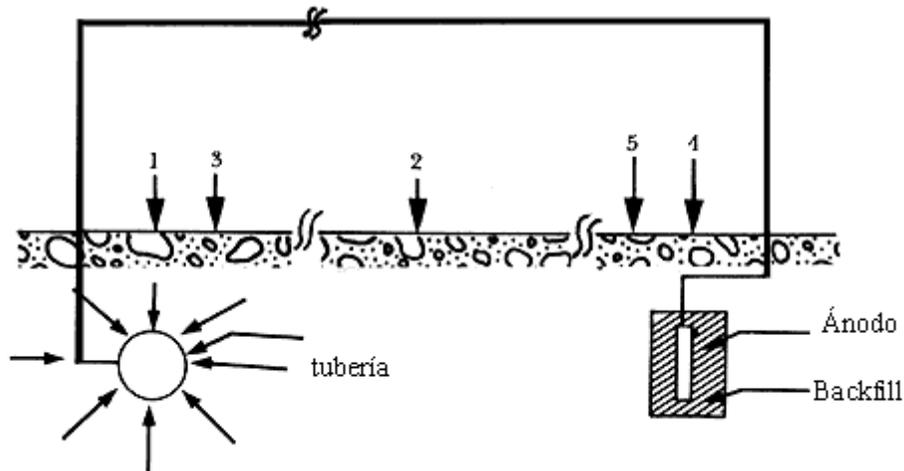
Tal como se ha indicado en la figura 45, para que el reparto de corriente sea bueno los ánodos deben estar lo más lejos posible del conducto; se recomienda una distancia mínima de 50 metros.

En determinados casos o cuando se crea oportuno, los ánodos pueden ir en un lecho de bentonita o polvo de coque; esto crea un medio homogéneo, húmedo y de baja resistividad alrededor del ánodo, con lo que aumenta su diámetro aparente.

Como ya se ha señalado, el potencial al que hay que llevar la tubería es de -0.85 V con respecto al electrodo de referencia de **Cu/CuSO<sub>4</sub>** saturado.

#### MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE UNA ESTRUCTURA ENTERRADA

La medición se realiza con ayuda de un electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado y un voltímetro de alta impedancia de entrada.

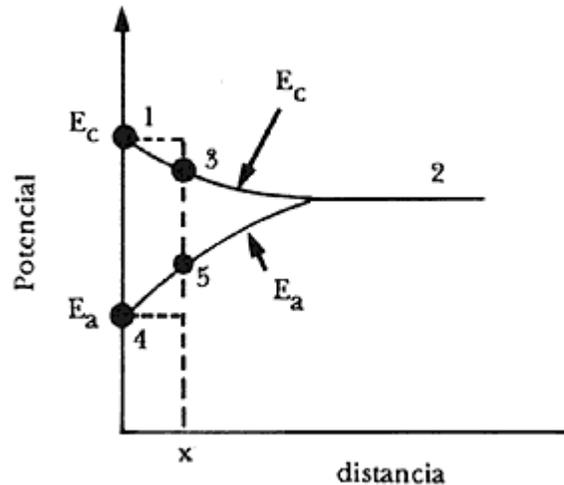


**Figura 46. Posiciones del electrodo de referencia en la medida de potencial de una estructura enterrada (potencial tubería-suelo).**

El valor del potencial medido depende de la posición en que se sitúa el electrodo de referencia con respecto a la estructura. Por ejemplo, en la figura 46 se presenta el caso de una tubería protegida catódicamente, en la cual el electrodo de referencia se coloca en las siguientes posiciones:

- 1) En un punto del terreno sobre la vertical de la tubería ( $E_c$ ).
- 2) En un punto del terreno suficientemente alejado de la tubería y del ánodo, de modo que el valor medido sea constante ( $E_{remoto}$ ).
- 3) En un punto del terreno intermedio entre los puntos 1 y 2.
- 4) En un punto del terreno sobre la vertical del ánodo ( $E_a$ ).
- 5) En un punto del terreno intermedio entre los puntos 2 y 4.

Cuando el electrodo se sitúa en las posiciones 1 y 4, los potenciales respectivos de la tubería y del ánodo corresponden a  $E_c$  y  $E_a$ , en la figura 47. Cuando el electrodo de referencia se sitúa en el punto 3, el potencial de la tubería ( $E_c$ ) es siempre más negativo que  $E_c$ , tanto más cuanto mayor es la distancia del punto 3 a la tubería (Figura 47). La diferencia ( $E_{c'}$  del punto 3 -  $E_c$ ) corresponde a la caída óhmica entre los puntos 3 y 1.



**Figura 47. Variación del potencial de la tubería y del ánodo con la situación del electrodo de referencia.**

El potencial del ánodo con el electrodo de referencia en el punto 5 es siempre más positivo que  $E_a$ , y se vuelve más positivo al aumentar la distancia ánodo-electrodo de referencia.

El potencial de la tubería (y el del ánodo) con el electrodo de referencia situado en el punto 2 estará siempre comprendido entre  $E_c$  y  $E_a$ , sin variar al trasladar el de referencia.

Por tanto, con la medida del potencial efectuada colocando el electrodo de referencia sobre la tubería (punto 1), sobre el ánodo (punto 4) o en posición remota (punto 2), es posible conocer si el área de la tubería que está debajo del electrodo de referencia funciona catódica u anódicamente. Hay que señalar que si con el electrodo de referencia colocado en el punto 2 se mide un potencial más negativo que el determinado sobre la vertical de la tubería, la zona enterrada es catódica; si se mide un potencial más positivo la zona será anódica.

En la práctica, este tipo de determinaciones sólo es posible en estructuras no revestidas, en cuanto que la corriente en éstas es lo suficientemente elevada como para dar lugar a caídas óhmicas importantes en el terreno y debido a esto, medir diferencias de potencial apreciables cuando se traslada el electrodo de referencia de un punto a otro.

**V I I I . A L G U N A S  
A P L I C A C I O N E S  
P R Á C T I C A S**

## SELECCIÓN DEL TIPO DE PROTECCIÓN

LA SELECCIÓN del tipo de protección catódica más conveniente para una determinada estructura depende esencialmente de consideraciones técnicas y económicas. Deben analizarse las ventajas y desventajas de cada sistema, su costo, su viabilidad técnica, la vida útil que se desea, entre otros aspectos. A modo de ilustración se presentan ahora algunas ventajas y desventajas de los dos tipos de sistemas de protección catódica.

### *Ánodos galvánicos*

a) Este sistema de ánodos galvánicos es el indicado para electrolitos de baja resistividad, en general del orden de 1 500 W-cm para ánodos de Zn y 6 000 W-cm para ánodos de Mg. En medios de resistividad más alta, su empleo debe estar precedido de un minucioso estudio de todos los parámetros involucrados.

b) Los ánodos galvánicos se recomiendan generalmente para estructuras pequeñas. Para grandes instalaciones, por ejemplo, grandes estructuras marítimas, debe hacerse una cuidadosa evaluación técnica y económica que tenga en cuenta que el costo inicial será muy alto, particularmente si el diseño se efectúa para un vida útil larga, como en el caso de las plataformas marinas de producción de petróleo en mares profundos.

c) Cuando el diseño se realiza para una vida útil corta, hay que tener en cuenta la reposición periódica de los ánodos, como en el caso de las embarcaciones.

d) No es recomendable este sistema para proteger estructuras que puedan estar sujetas a corrientes de interferencia, a no ser que estas corrientes tengan intensidades muy bajas.

e) Los sistemas galvánicos con ánodos de zinc y de aluminio son normalmente autorregulables. Cuando se utilizan ánodos de Mg, el sistema acepta una pequeña regulación.

f) El sistema presenta un índice elevado de continuidad operacional.

g) Con un Sistema de ánodos galvánicos no hay posibilidad de una inversión de la polaridad.

## CORRIENTE IMPRESA

a) La resistividad del medio o electrolito no constituye una limitación seria para el sistema de corriente impresa, una vez ajustada la diferencia de potencial necesaria para proporcionar dicha corriente.

- b)* Este sistema es el indicado para estructuras medias y grandes.
- c)* El sistema necesita de un seguimiento operacional, especialmente de una inspección periódica del equipo de impresión de corriente. La inspección de los ánodos puede ser menos frecuente ya que están proyectados para una vida útil de 20 años o más.
- d)* Es recomendable para estructuras que puedan presentar problemas de corrientes parásitas o vagabundas, ya que permite su control.
- e)* El sistema de corriente impresa permite un amplio intervalo de regulación mediante la variación del voltaje de salida de los equipos para la impresión de la corriente, siempre y cuando se proyecte en forma adecuada.
- f)* En general, el costo inicial es mayor que el de un sistema de ánodos galvánicos, a menos que se trate de una estructura muy grande y diseñada para una vida útil larga.
- g)* Este sistema está sujeto a interrupciones en su funcionamiento como consecuencia de fallos en el suministro de energía eléctrica y defectos en el equipo propio para la impresión de la corriente.
- h)* Tiene la posibilidad de inversiones de polaridad.

## PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS

Para calcular la protección catódica de una estructura de acero que está rodeada de un electrolito cualquiera, se han de tener en cuenta varios factores:

- a)* Resistencia total del circuito, compuesta por la resistencia a tierra de la estructura y de los ánodos, y por la resistencia de los conductores.
- b)* La densidad de corriente que es necesario aplicar a la estructura para que todos y cada uno de los puntos alcancen el potencial de protección. Dicha densidad de corriente, multiplicada por la superficie de la estructura, dará la intensidad de corriente total que se deberá proporcionar a la estructura.
- c)* Con estos dos datos se puede calcular la diferencia de potencial necesaria entre el lecho de ánodos y la estructura, a través del electrolito.

Este proceso es el normal de cálculo para un sistema de corriente impresa, pero en el caso de ánodos de sacrificio se ha de proceder al revés, ya que la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo (la estructura) es fija y depende del material de los ánodos. Entonces, lo que se tendrá que calcular y ajustar es la resistencia del lecho anódico,

conociendo la intensidad total de corriente y el potencial de los ánodos en cuestión. Esta resistencia debe variarse de acuerdo con el número de ánodos y sus dimensiones geométricas.

La resistencia total del circuito depende de la resistividad del electrolito y cuando éste es un terreno, esta resistividad puede ser muy elevada y además varía de un lugar a otro.

En esencia, la teoría de protección es igual para todo tipo de estructuras enterradas, pero la manera de orientar el cálculo será diferente para cada tipo de estructura.

Se pueden hacer dos distinciones principales:

- 1) Estructuras enterradas en una zona limitada de terreno, y
- 2) Tuberías de gran longitud.

Entre las primeras puede haber grandes longitudes de tubería, pero no dispuestas longitudinalmente, sino formando una red de distribución dentro de una factoría, fondos de tanques de almacenamiento, depósitos enterrados, etcétera.

En el primer caso, la dificultad de cálculo más importante consiste en estimar la densidad de corriente necesaria para alcanzar los niveles de protección y la distribución geométrica de los ánodos.

Veamos algunos otros casos importantes.

## PROTECCIÓN DE FONDOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los tanques de almacenamiento tienen el fondo apoyado en el suelo, lo que da muchos problemas de corrosión, tanto de adentro hacia afuera como de afuera hacia adentro. Vamos a tratar sólo los problemas de corrosión de afuera hacia adentro ya que estamos interesados en la protección catódica de estructuras enterradas.

Tanto si se trata de un solo tanque como de un parque de tanques ya construido, el problema de la protección tiene que ver más con cuestiones económicas y de distribución de ánodos. En este caso no es sencillo determinar previamente una densidad de corriente, por lo que será necesario hacer un ensayo de campo de inyección de corriente, ya sea tanque por tanque o en el parque en general.

Para ello debe estudiarse geoméricamente la situación de los lechos anódicos, de ser posible para que los ánodos se coloquen a distancias iguales de los tanques que van a proteger. Los lugares elegidos serán objeto de una medida de resistividades del terreno (véase el capítulo

VII) con el objeto de elegir las zonas menos resistivas. Por último se realizará un ensayo de inyección de corriente, enterrando ánodos ocasionales (por ejemplo barras de cobre o simplemente papel aluminio) y utilizando una fuente de corriente continua, como por ejemplo un grupo de soldadura con corriente continua. Con ello se ajustarán los potenciales de los tanques y se medirá la corriente que se está suministrando, para calcular el lecho definitivo de los ánodos y el transformador necesario.

Si la distancia disponible entre los tanques no fuese grande, nos podemos encontrar con que para llegar a obtener los  $-0.85\text{ V}$  respecto a **Cu/CuSO<sub>4</sub>**, de protección en el punto del tanque diametralmente opuesto a los ánodos, tendremos que llegar a potenciales muy negativos en el punto del tanque más cercano al lecho anódico. Esto no tiene tanta importancia como en el caso de las tuberías recubiertas, puesto que la formación de hidrógeno no puede desprender un recubrimiento inexistente. No obstante tendremos un consumo innecesario de corriente por mala distribución de la misma. Esto se puede solucionar con la instalación de lechos anódicos y verticales profundos, siempre que el terreno lo permita, y con su instalación alejamos el lecho en sentido vertical descendente.

El problema de la difusión de corriente aumenta considerablemente la dificultad de protección. Si, por ejemplo, el fondo del tanque no está bien aislado, la corriente procedente de los ánodos llegará a proteger una corona circular periférica del fondo del tanque, pero no sabemos si llega al centro del círculo, porque éste es inaccesible al electrodo de referencia. Por ello, pudiera ocurrir que un tanque al cual se le ha instalado una serie de ánodos de sacrificio alrededor, diera potenciales de protección en su periferia, pero que estos potenciales se atenuaran hasta obtener los valores de potenciales naturales (menos negativos) apenas avanzara unos cuantos decímetros hacia el centro.

Si la construcción de la base de apoyo de los tanques es buena, la densidad de corriente necesaria puede quedar reducida en una cuarta o quinta parte y por lo tanto, no sólo se necesitará menos equipo, sino que la difusión de la corriente hacia el centro del tanque será mejor.

#### PROTECCIÓN DE TUBERÍAS ENTERRADAS DE GRAN LONGITUD, OLEODUCTOS Y GASODUCTOS

Para el transporte por tubería de productos petrolíferos se emplean tuberías de diferentes diámetros que abarcan grandes distancias que en muchas ocasiones sobrepasan los 1 000 kilómetros.

Estos ductos, por lo general, suelen ir enterrados y su protección anticorrosiva se obtiene siempre con una acción combinada de recubrimiento y protección catódica.

En tuberías enterradas de gran longitud se emplean principalmente sistemas de protección catódica por corriente impresa, aunque hay ocasiones en que la protección de estos equipos se tiene que suplementar con ánodos de sacrificio de Mg.

Para hacer un proyecto de protección catódica de una tubería enterrada de gran longitud se debe, en primer lugar, de reconocer el trazado del terreno tomando las medidas de las resistividades y anotando cuidadosamente las disponibilidades de suministro de energía eléctrica para la alimentación de los transformadores. En las inmediaciones de los puntos en donde se tenga posibilidad de un suministro de corriente, debe de medirse la resistividad del terreno, a ambos lados del eje de la tubería, o cada 50, 75 y 100 m para el proyecto de los futuros lechos anódicos. Asimismo, deben anotarse las variaciones geológicas del terreno que se vayan encontrando, sacando muestras de las mismas, que deberán mandarse analizar y que se deberán comparar con los cuadros y perfiles de resistividades. Así mismo, debe de conocerse la mayor cantidad de información sobre el revestimiento que va a ser aplicado, como el tipo de revestimiento, el espesor, la forma de aplicación y los métodos de inspección.

Debe de tenerse también información sobre las características de la tubería, su diámetro y los espesores de los tramos. La presencia de ferrocarriles electrificados, con paralelismos, cruces y aproximaciones, deberá de ser tenida en cuenta para prever los medios de atenuación de posibles corrientes vagabundas que puedan afectar a la tubería.

Con la recopilación de estos datos puede realizarse un anteproyecto que deberá de ser confirmado con medidas posteriores, hechas sobre la tubería, una vez enterrada e instalada.

#### *Proceso de cálculo*

Una fuente de corriente continua cuyo polo negativo está conectado a una tubería revestida de gran longitud y cuyo polo positivo está unido a una toma de tierra (lecho anódico), situada a distancia de la tubería, dará como resultado una disminución del potencial de la superficie de la tubería respecto del terreno que la rodea, potencial que irá aumentando según que las medidas se vayan alejando del punto de conexión a la fuente de corriente.

Para una tubería de diámetro y espesor uniformes revestida uniformemente, este aumento de potencial sigue una ley exponencial, según la fórmula:

$$E_x = E_A \cdot \exp(-\alpha x),$$

en donde:

$E_x$  = potencial tubería/suelo en un punto separado  $x$  km del punto de inyección de la corriente

$E_A$ : potencial en el punto de inyección

$\alpha$ : factor de atenuación del potencial

$x$ : distancia en km.

El factor de atenuación ( $\alpha$ ) es función particular de la tubería considerada y viene dado por:

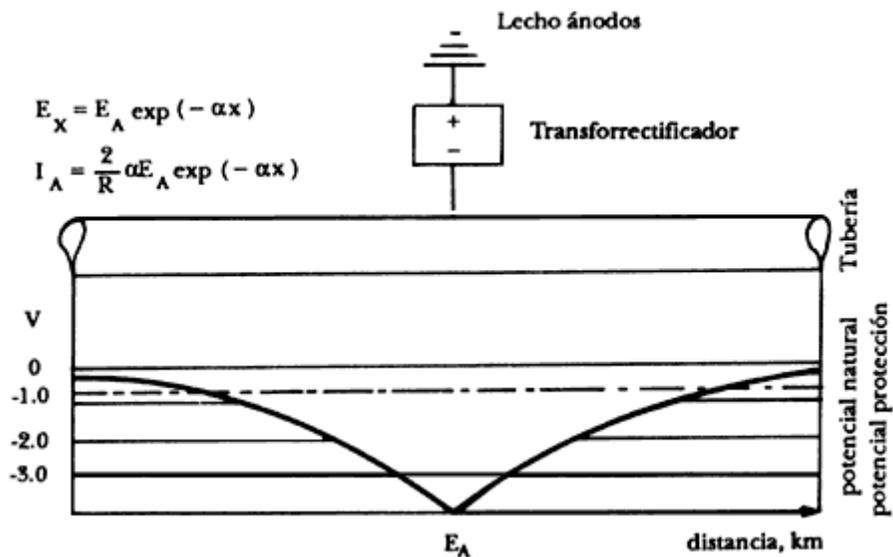
$$\alpha = \sqrt{R_s \cdot g},$$

en donde:

$R_s$  = resistencia óhmica longitudinal de la tubería, en  $\Omega$ /por unidad de longitud,

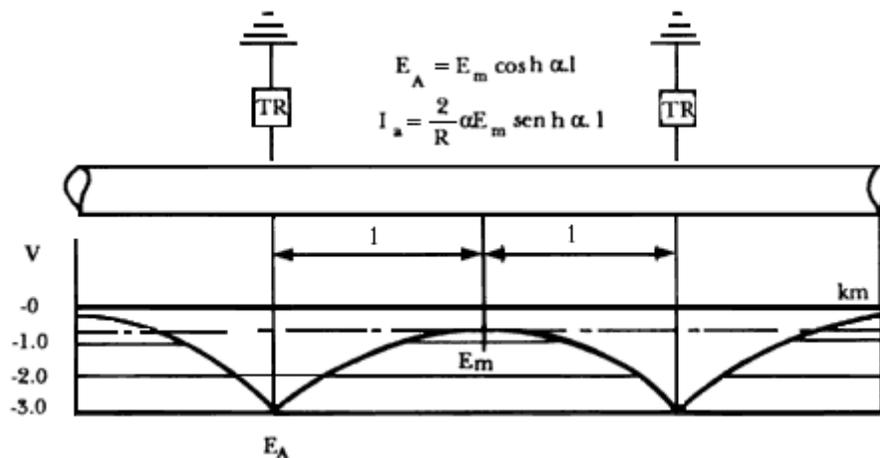
$g$  = conductancia del revestimiento, en mhos ( $\text{mho} = \Omega^{-1}$  X unidad de longitud),

La figura 48 representa la forma de la curva teórica de atenuación de potencial en una tubería de longitud infinita con un solo punto de inyección de corriente.



**Figura 48. Curva teórica de atenuación del potencial en una tubería de longitud infinita con un solo punto de inyección de corriente.**

Si en lugar de un punto de inyección de corriente se emplean dos o más, convenientemente espaciados, se puede lograr que en el punto medio de los puntos de inyección, el potencial tubería/suelo sea el necesario para que esté protegida catódicamente.



**Figura 49. Curva teórica de atenuación del potencial en una tubería de longitud infinita con dos puntos de inyección de corriente.**

En este caso, el potencial seguirá una curva de atenuación como la representada en la figura 49, que sigue la ecuación:

$$E_A = E_m \cdot \cos h \alpha \cdot l,$$

en donde:

- $E_A$  = potencial en el punto de drenaje
- $E_m$  = potencial en el punto medio entre los dos drenajes
- $\alpha$  = factor de atenuación
- $l$  = mitad de la distancia entre los dos puntos de drenaje.

La corriente que sale desde el lecho de ánodos vendrá dada por las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$I_A = \frac{2}{R} \alpha E_A \exp(-\alpha x),$$

$$I_A = \frac{2}{R} \alpha E_m \operatorname{sen} h \alpha \cdot l,$$

en donde:

$E_m$  = potencial máximo de la tubería respecto a tierra. Debe corresponder al potencial de protección, **-0.85 V vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>**

$E_A$  = la elección del potencial mínimo debe ser función del recubrimiento empleado y del terreno que vaya a rodear a la tubería. Debe saberse si el recubrimiento es poco o muy absorbente de la humedad; si es susceptible de fenómenos de electroósmosis, etc. Un recubrimiento asfáltico a potenciales más negativos que -1 V puede desprenderse, mientras la brea de hulla, resinas epoxi y determinadas bandas plásticas pueden soportar potenciales inferiores a -3 V sin sufrir deterioros.

$\alpha$  = el factor de atenuación es el dato más importante, a partir del cual se conoce la resistencia óhmica del metal de la tubería por unidad de longitud, ya que se conocen sus dimensiones, pero no la resistencia del revestimiento asociada al electrolito que lo rodea. Este dato se puede suponer por experiencia anterior, a partir de los datos: tipo de recubrimiento, espesor, forma de aplicación, etc. De lo contrario hay que medirlo mediante ensayos de campo, una vez enterrada la tubería.

Con todos estos datos se podrá ajustar la distancia entre puntos en los que se dispone de suministro eléctrico y el potencial admisible en los puntos de inyección. Si los puntos de suministro de la corriente eléctrica estuvieran muy alejados y se tuvieran que disminuir mucho los potenciales de los puntos de inyección (hacerlos muy negativos) puede pensarse en suplementar el punto central con ánodos de sacrificio o con una fuente autónoma de corriente eléctrica.

Se ha podido calcular asimismo la intensidad de corriente, ( $I_A$ ), necesaria para alcanzar la protección en todos los puntos intermedios entre los rectificadores. Luego, para calcular éstos, falta sólo conocer el voltaje de salida de los mismos. Este voltaje deberá ser igual a la suma de caídas de tensión a través del circuito, es decir, a través de la tubería, cables y de la puesta a tierra. Por regla general, las dos primeras caídas de tensión no son significativas respecto de la de los ánodos a tierra, por lo tanto, habrá que calcular la resistencia a tierra del lecho de ánodos, o mejor dicho, hacer un tanteo del número de ánodos necesarios para que en un terreno de una determinada resistividad, se obtenga la resistencia deseada.

## CÁLCULO DE UN LECHO DE ÁNODOS

La resistencia de un lecho de ánodos depende de la resistividad del terreno, de las dimensiones y forma de los ánodos y del lecho.

Un ánodo enterrado verticalmente en un terreno de resistividad  $\rho$  ohm-cm, rodeado de una columna de relleno (backfill) de  $L$  (cm de longitud) y  $a$  (cm de radio), tiene una resistencia en ohms que viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{ae},$$

en donde  $e = 2.718$  (base de los logaritmos naturales). Si se dispone de varios ánodos enterrados verticalmente y paralelos entre sí a una distancia  $s$ , la resistencia del lecho viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{\pi n} \left[ \frac{1}{2L} \ln \frac{4L}{ae} + \frac{1}{s} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right]$$

Los resultados de estas fórmulas pueden encontrarse en tablas y ábacos que hacen más cómodo el cálculo.

Si se trata de un lecho horizontal de ánodos con relleno continuo (backfill de polvo de grafito o de coque) la resistencia total del lecho viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \ln \frac{4L}{D} + \ln \frac{L}{s} - 2 + \frac{2s}{L} \right],$$

en la que  $L$  es la longitud total del ánodo (en cm),  $D$  es el diámetro (en cm),  $s$  es la profundidad al centro del lecho (en cm),  $R$  vendrá expresado en ohms cuando la resistividad  $\rho$  esté en ohm-cm.

Una vez conocida la resistencia a tierra del lecho anódico y multiplicándola por la intensidad que se necesita transportar desde los ánodos a la tubería, se obtiene el voltaje de salida del transformador, y se suma a este valor la caída de tensión de los cables.

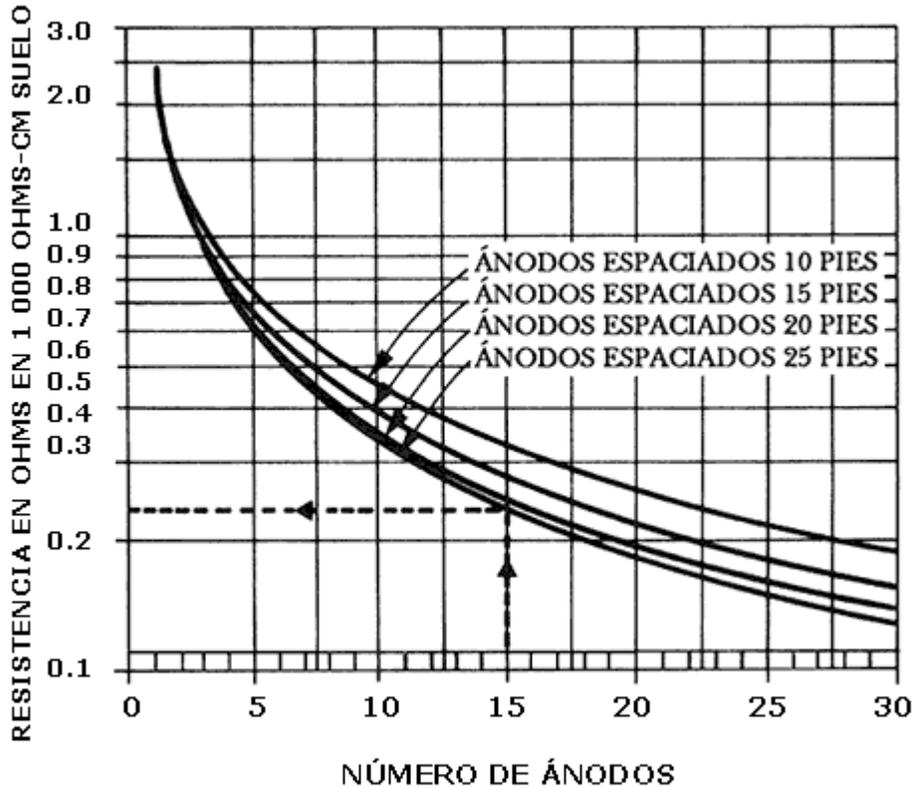


Figura 50. Nomograma para lechos anódicos verticales en sistemas de corriente impresa. Basado en ánodos de 2X 60 pulgadas, enterrados en columnas de polvo de coque de 50 ohm-cm de resistividad. Resistencia de un ánodo = 2.56  $\Omega$  más 0.160  $\Omega$  de resistencia interna. Los ánodos deben estar en línea recta. Un ejemplo: para obtener la resistencia de 15 ánodos en paralelo espaciados 25 pies en un suelo de 2 200  $\Omega$ -cm.

La resistencia de los ánodos en paralelo en un suelo de 1 000  $\Omega$ -cm (del nomograma) = 0.233 $\Omega$ . Resistencia en el suelo de 2 000  $\Omega$ -cm = 0.233 X 2 200/1 000 = 0.513  $\Omega$ . Añadir resistencia interna de un ánodo dividida por el número de ánodos en paralelo:

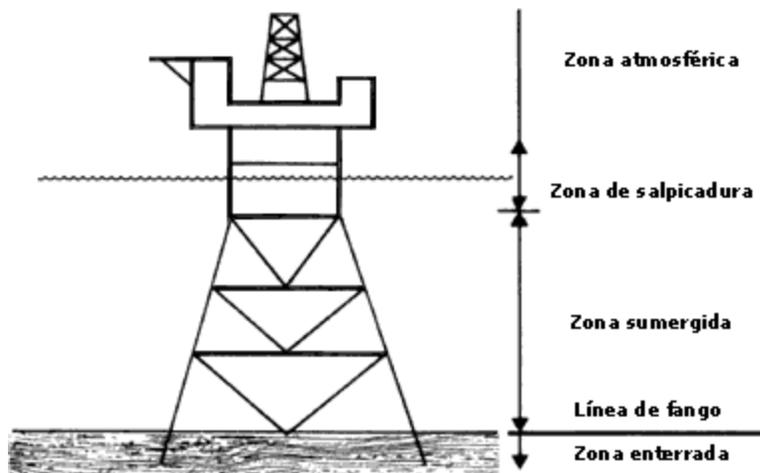
$$0.513 + \frac{0.106}{15} = 0.52 \Omega.$$

#### PROTECCIÓN CATÓDICA DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS

La protección catódica del acero en estas condiciones es bastante más sencilla que en el caso de estructuras enterradas, ya que por regla

general, el electrolito tiene una resistividad uniforme y, además, si se trata de agua de mar, dicha resistividad es muy baja, entre 20 y 40  $\Omega$ -cm según los mares y, por lo tanto, la difusión de la corriente de protección se puede lograr con gran facilidad.

Hay que tener en cuenta que mientras que la protección catódica de una estructura de acero enterrada y desnuda es antieconómica, si dicha estructura estuviera sumergida en agua de mar podría confiarse su protección anticorrosiva a un sistema de protección catódica solamente, ya que si se le comunica la densidad de corriente adecuada, la superficie metálica podrá quedar recubierta por una capa calcárea causada por la precipitación de algunas sales presentes en el agua de mar, principalmente de hidróxido de magnesio y carbonato cálcico. Esta capa calcárea hará disminuir bastante la corriente de protección. De hecho, así sucede en los tanques petroleros, los cuales van, por regla general, sin pintar y protegidos por ánodos de sacrificio. Igualmente, muchas plataformas de sondeo y explotación de yacimientos petrolíferos submarinos llevan, a excepción de la zona de salpicadura, la superficie desnuda y protegida catódicamente (véase la figura 51).



**Figura 51. Diferentes zonas de corrosión en una plataforma marina (estructura "offshore").**

#### *Generalidades sobre el cálculo*

La técnica de protección catódica a emplear es muy distinta en cada caso, dependiendo también de la clase de agua que rodea a la estructura metálica.

En cualquier caso y cualquier tipo de agua, la teoría de aplicación de la protección catódica siempre será la misma. Habrá que hacer circular una corriente determinada de  $I$  ampere por un circuito de resistencia total  $R \Omega$ , para lo cual se necesitará de una diferencia de potencial o tensión de  $V$  voltios.

La corriente en amperios será calculada fácilmente si se conoce la densidad de corriente necesaria para que la estructura metálica en contacto con el agua alcance el potencial de protección en toda su superficie. Existe mucha información al respecto y se han dado valores orientativos basados en la experiencia acumulada durante años. Estos valores de densidad de corriente vienen en miliamperes por metro cuadrado ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) y, por lo tanto, al conocer la superficie de acero en contacto con el agua, se puede calcular la corriente total necesaria. Por otra parte, este dato se podrá obtener también experimentalmente en cada caso, haciendo una inyección de corriente eventual y midiendo la intensidad.

La resistencia total del circuito de protección es perfectamente calculable ya que es la suma de la resistencia de la estructura frente al agua que la rodea (resistencia catódica), la de los ánodos (resistencia anódica) y la de los conductores eléctricos.

La resistencia de la estructura frente al electrolito resulta despreciable, ya que estas estructuras suelen tener una gran superficie en contacto con el agua. La resistencia de los cables es conocida, dependiendo de su grosor y longitud. La resistencia anódica se calcula dependiendo de las dimensiones geométricas de los ánodos utilizados y de la resistividad del agua. Esta resistencia, en el caso de ánodos de sacrificio o galvánicos, es la única que se tiene en cuenta. Más adelante se verá la forma de calcularla.

Conociendo la intensidad total que va a consumir la estructura y la resistencia del circuito, se puede determinar de inmediato el voltaje de salida que deberá tener la fuente de alimentación de la corriente ( $V = I.R$ ).

Lo dicho hasta ahora se refiere al cálculo de una instalación de corriente impresa, en la cual hemos calculado la intensidad y resistencia para obtener la tensión de salida del transformador. Ahora bien, si tenemos que hacer la instalación de protección con ánodos de sacrificio, habrá que tener en cuenta que cada material anódico (Zn, Al, Mg) dispone de un potencial de circulación fijo. Este potencial, como ya se ha expuesto, es la diferencia entre el potencial electroquímico de corrosión del metal anódico y el potencial del acero protegido, ambos medidos con respecto al mismo electrodo de

referencia. Por lo tanto, sólo se dispone de 0.25 V si se utiliza el Zn, de 0.3 V si se emplea el Al y de 0.7 V si se usa Mg.

Para el agua de mar, los ánodos de Zn y Al normalizados por cada fabricante ya tienen tabuladas las salidas de corriente en amperes, que dependen de su forma geométrica (resistencia).

A continuación se describe el cálculo y ejecución de algunos casos comunes.

### *Estructuras sumergidas*

Las estructuras de acero sumergidas que se encuentran con mayor frecuencia son de dos tipos: fijas y móviles.

Las fijas, más comunes, se usan en obras portuarias, tuberías de transporte, compuertas y plataformas marinas y las móviles, en cascos de buque.

*Estructuras fijas sumergidas en agua.* Conocidas las dimensiones que la estructura tiene sumergida, conoceremos su superficie. A esta superficie se le aplicará la densidad de corriente adecuada.

Tratándose de agua de mar, habrá que tener en cuenta el efecto protector de las incrustaciones y su calidad, que está en función de la densidad de corriente aplicada. En efecto, una superficie de acero sumergida en agua de mar puede ser protegida catódicamente aplicando cantidades comprendidas entre 60 mA/m<sup>2</sup> y 2 mA/m<sup>2</sup>. Con altas densidades de corriente, la formación de incrustaciones, constituida principalmente por hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>), es instantánea, voluminosa, muy porosa y se desprende fácilmente incluso con los movimientos del agua de poca velocidad.

Con densidades de corriente bajas, la formación de incrustaciones, constituida principalmente por carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), es muy lenta; se forma una película delgada, dura y compacta, fuertemente adherida a la superficie metálica y que, por tanto, la protege mucho.

La instalación de protección catódica será tanto más económica cuanto los elementos constituyentes sean más pequeños y entren en menor número; las densidades de corriente óptimas están comprendidas entre los 200 y los 60 mA/n<sup>2</sup>. Con 100 mA/m<sup>2</sup> inicialmente, la capa incrustante tardaría entre 45 y 60 días en formarse definitivamente; estará constituida principalmente por carbonato cálcico y así la instalación quedaría protegida, una vez formada dicha capa, con una densidad de corriente de 40 mA/m<sup>2</sup>, es decir, que la corriente de mantenimiento equivaldría a un 40% de la inicial.

Los casos y cifras anteriores se refieren a superficies de acero desnudas. Pero si la estructura a proteger está pintada, deberá aplicarse un factor de eficiencia de la pintura en función de los deterioros que haya sufrido durante el montaje. Para obras portuarias como pantalanes de pilotes o tablestacados, los factores de eficiencia de las pinturas oscilan entre el 80 y el 90%, es decir que la superficie que queda descubierta del acero será del 20 al 10% de la total. Por lo tanto, si tenemos una estructura de 10 000 m<sup>2</sup> de superficie sumergida, pintada con una buena pintura submarina, y que los deterioros sufridos en el montaje han sido del 10% (eficiencia del recubrimiento 90%) y aplicáramos una densidad de corriente de 100 mA/m<sup>2</sup>, la cantidad de corriente que se deberá suministrar para protegerla catódicamente será igual a:

$$10\ 000\ \text{m}^2 \times 100\ \text{mA/m}^2 \times 0.1 = 100\ 000\ \text{mA},$$

o sea, 100 amperes.

Este tipo de estructuras sumergidas fijas suele tener una parte enterrada en el fondo, la cual también va a demandar una corriente de protección que, por lo tanto, debe ser calculada. La fijación de los componentes de la estructura, como pilotes o tablestacas, se hace por hincado en el fondo marino por lo que este tipo de estructuras se deben considerar desnudas y de hecho se instalan desnudas, sin ningún tipo de recubrimiento, ya que si lo tuvieran, lo perderían casi todo en la operación de hincado. El acero desnudo en los fondos marinos puede demandar para su protección catódica una densidad de corriente que va de 20 a 60 mA/m<sup>2</sup>.

Siguiendo con el ejemplo anterior, si nuestra estructura (de 10 000 m<sup>2</sup>) tiene una parte enterrada de 5 000 m<sup>2</sup>, estimando una demanda de 40 mA/m<sup>2</sup>, la corriente consumida sería de:

$$5\ 000\ \text{m}^2 \times 40\ \text{mA/m}^2 = 200\ 000\ \text{mA},$$

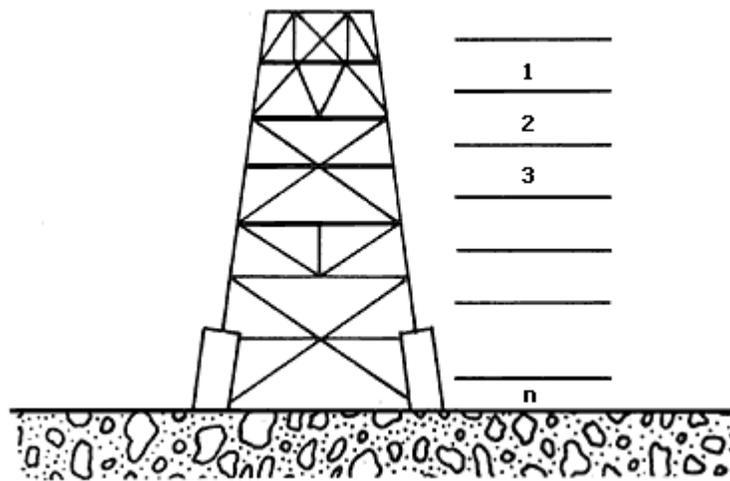
o sea, 200 amperes.

La corriente total demandada por esta estructura será 300 amperes, que se deberán suministrar por uno de los dos métodos posibles: ánodos galvánicos o corriente impresa. A continuación se presenta un análisis de ellos.

*Protección catódica por ánodos galvánicos.* Una estructura de este tipo suele estar constituida por elementos tubulares o perfiles normalizados. Tanto de los pantalanes como de las plataformas de sondeo y explotación, los elementos que las constituyen son tubos, que pueden o no estar unidos eléctricamente. Así mismo, hay determinados tipos de empalizadas portuarias constituidas por perfiles de varios tipos, pero

que tienen, todos ellos, superficies unitarias calculables cuya suma nos daría la superficie total a proteger.

En tal caso, la protección con ánodos de sacrificio se calculará por superficies parciales, capaces de ser protegidas con un ánodo o grupo de ánodos (Véase la figura 52).



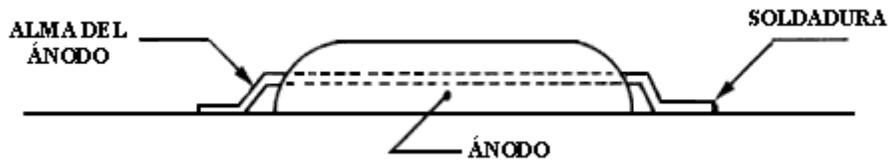
**Figura 52. Representación esquemática de la división en zonas de una plataforma.**

La cantidad de corriente que es capaz de suministrar un ánodo de unas determinadas dimensiones, o bien está dada en las tablas del fabricante o bien se puede conocer calculando su resistencia en un medio de resistividad conocida y sabiendo la diferencia entre el potencial de disolución del material anódico y el potencial de protección de la estructura de acero. Supóngase que se dispone de ánodos de Zn, con salidas de corriente de 2.5, 2, 1.4 y 1.2 A y que los 300 A que se han determinado anteriormente como necesarios para la protección de la estructura, corresponden a 160 pilotes de 1.9 A cada pilote. En este caso, se instalaría como mínimo un ánodo de 2 A de salida en cada pilote. La vida de esta instalación se calcularía en función del peso de aleación, de acuerdo con la fórmula ya presentada en la página 56:

$$\text{Vida} = \frac{Q \cdot P \cdot \theta \cdot \beta}{I},$$

en donde **Q** es la capacidad de corriente de la aleación en A-año/kg, **P** es el peso del ánodo, **θ** el rendimiento, **β** el factor de utilización e **I** la intensidad.

La instalación de estos ánodos es muy sencilla, pero si la estructura ya está colocada puede llegar a ser muy costosa, porque se tendrían que emplear hombres rana con equipo de soldadura submarina. Los ánodos van equipados de un alma de acero sobresaliente por ambos extremos, la cual se conformará en la obra y se soldará en el lugar preciso de la estructura (Figura 53).



**Figura 53. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio en estructuras fijas en el mar.**

*Protección catódica con corriente impresa.* Para proteger catódicamente una estructura por corriente impresa, la corriente continua o directa se generará mediante un transforrectificador a cuyo polo negativo se conecta la estructura y al polo positivo un conjunto de ánodos permanentes, conectados en paralelo.

Para conectar la estructura al polo negativo del generador de corriente continua, ésta debe de tener continuidad eléctrica entre todos los elementos metálicos que se quieren proteger. En el caso de una plataforma marina de sondeo o explotación, todas las partes metálicas sumergidas están soldadas entre sí y por lo tanto, la conexión se podrá hacer en cualquier punto de la estructura metálica.

Un pantalán está constituido por dinteles separados y, en ocasiones ni siquiera hay una continuidad entre pilotes de un mismo dintel. En estos casos hay que unir los pilotes de cada dintel ya sea soldando pletinas de acero entre ellos o bien mediante cables de cobre con aislamiento. Los dinteles se pueden conectar entre sí a través de cualquier elemento metálico de la superestructura que recorra el pantalán de un extremo a otro, por ejemplo por una tubería.

La cantidad de corriente necesaria para la protección puede suministrarse desde uno o varios transforrectificadores instalados en el centro de carga de secciones equisuperficiales del pantalán. Es decir, en el caso anterior, los 300 A se podrían suministrar por un transforrectificador de 300 A situado en el centro del pantalán, o bien con dos situados cada uno en el centro de cada una de las mitades del mismo, etc. El número de estos depende única y exclusivamente de

consideraciones económicas, en la que se consideran, con mayor peso, las longitudes y secciones de cables.

Para introducir esta corriente en el electrolito, agua de mar en este caso, se emplea una serie de ánodos conectados en paralelo al polo positivo del transformador. Estos ánodos podrían ser los mismos que se emplean en la protección de estructuras enterradas, pero las condiciones mecánicas a que van a estar sometidos desaconsejan a algunos de ellos.

La chatarra de hierro es una mala técnica, porque se consume rápidamente y sólo se aconseja para instalaciones ocasionales y en industrias en las que dicha chatarra sobra y es fácilmente reemplazable. Un buen ejemplo de esto es la protección de cascos de buques cuando se están armando.

Los ánodos de grafito no funcionan demasiado bien en agua pues se acelera su consumo por deterioros mecánicos. La permanencia prolongada en el agua los esponja y pulveriza.

El ferrosilicio es comúnmente empleado cuando entra el cromo en proporciones de 4.5 a 6.5% en su composición. Las aleaciones de plomo con 2% de plata siguen empleándose en la protección exterior de cascos de buques, pero menos cada vez por su gran peso en la protección de estructuras fijas.

Tanto los ánodos de estas aleaciones de plomo como los de ferrosilicio tienen un gran peso y son incómodos de manejar debajo del agua. Se suelen instalar en lechos de ánodos convenientemente alejados de la estructura, depositados o enterrados en el fondo del mar. En la figura 54 se presenta un esquema de una instalación típica.

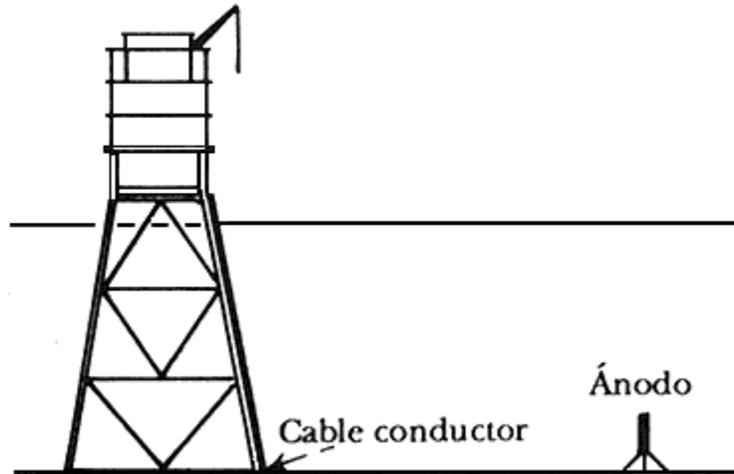
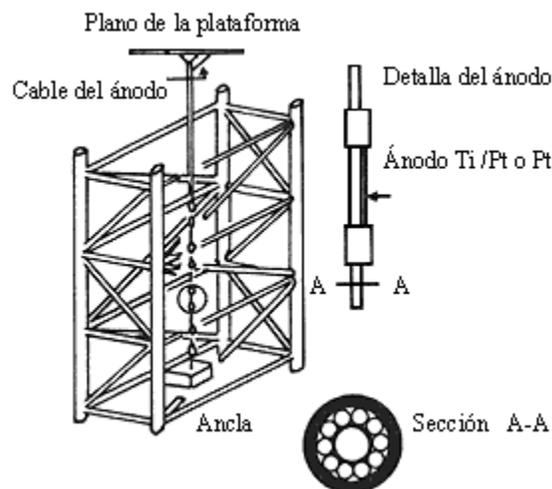
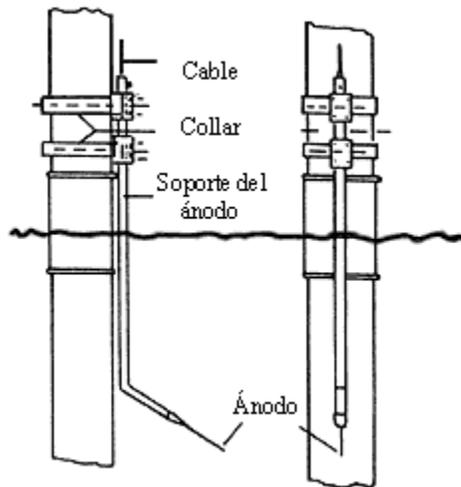


Figura 54. Ánodo remoto para la protección de una plataforma.

Para la protección de pantalanos tablestacados, plataformas, etc., el ánodo idóneo es el de titanio platinado. Las barras de titanio platinadas con cinco micras de espesor de platino soportan densidades de corriente hasta de  $1000 \text{ A/m}^2$  de superficie activa. Esto hace que cada metro de barra de  $12 \text{ mm}$  de diámetro pueda suministrar  $38 \text{ A}$  con un peso bajísimo, propio del ánodo. Estos ánodos se colocan anclados a la misma estructura, ensamblados en armazones adecuados (véase la figura 55) circunstancia que evita la rotura de los cables anódicos ya que todo el tendido de cables se puede hacer en la superficie a excepción de las que bajan a los ánodos, las cuales irán dentro de un tubo de acero. La colocación, bajo el agua de estos ánodos es sencilla; la figura 55 muestra uno de los muchos ensamblajes que pueden hacerse con estos ánodos.





**Figura 55. Ánodo de TI/Pt, instalado sobre una plataforma.**

Los ánodos de titanio platinado, si bien soportan una densidad de corriente muy elevada, en presencia de cloruros deberán de trabajar a bajo voltaje (entre 8 y 10 V como máximo). Así mismo, la corriente drenada por ellos ha de tener el menor componente de corriente alterna posible, es decir, la corriente rectificadora deberá de filtrarse, o bien proceder de un transformador trifásico para que su frecuencia sea superior a 100 Hz como mínimo, de lo contrario la capa de platino se deteriora.

Las obras submarinas fijas más frecuentes son los pantalanes y las tuberías submarinas. En el caso de un pantalán, los ánodos irán conectados en paralelo al polo positivo del transformador mediante un cable común al cual se empalman los cables de cada ánodo a través de cajas de derivación, las cuales servirán en todo momento para regular la corriente de salida por cada ánodo, y se intercalarán además, resistencias de equilibrio.

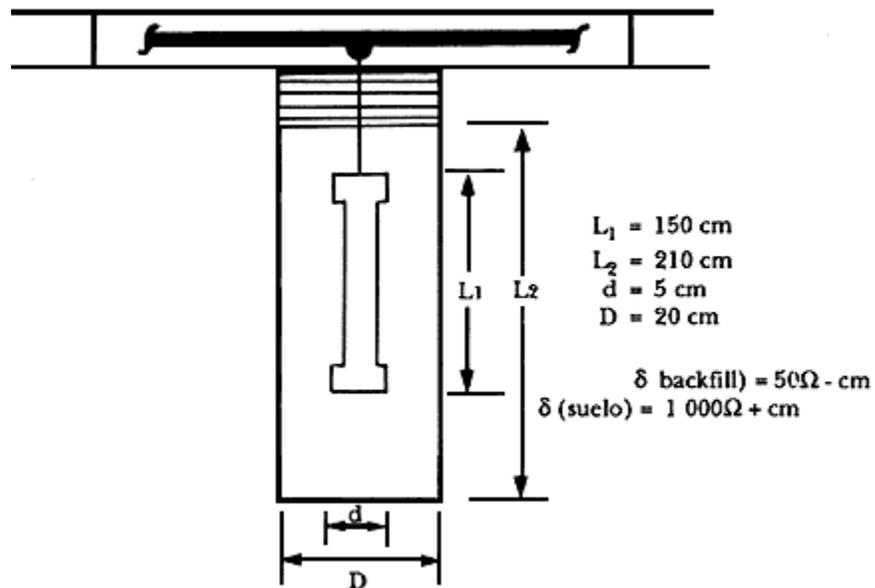
Este cable general anódico es el que determina el número de transformadores que se deben de instalar en un pantalán, ya que su longitud unida a la gran intensidad que debe circular por él a muy bajo voltaje, hace que sea de una gran sección. Al dividir el amperaje entre dos o tres transformadores, no sólo se divide en dos o tres la intensidad, sino también la longitud, dividiendo entre cuatro (con dos transformadores) o entre nueve (tres transformadores) la sección del cable.

Si se trata de una tubería submarina ("sea line"), el transformador irá instalado en tierra o en la plataforma de un pantalán, según si la tubería parte desde tierra o desde una de estas instalaciones portuarias. Los ánodos se pueden instalar enterrados en la playa, en el fondo del mar,

sumergidos en el agua, usando como soporte un pilote auxiliar, o de cualquier otra forma, teniendo siempre en cuenta que el cable anódico esté protegido al máximo para que no se corte por el simple, deterioro de su aislamiento.

## A P É N D I C E

### CÁLCULO DE LA CORRIENTE LIBERADA POR UN ÁNODO ENTERRADO EN EL SUELO



**Figura 56. Esquema de un ánodo enterrado en el suelo.**

A partir del esquema presentado en la figura 56, se tiene:

$$I = \frac{V}{R},$$

en donde:

$I$  = corriente liberada en amperes

V = diferencia de potencial disponible, en voltios

R = resistencia del circuito, en ohms.

La resistencia del circuito es la resistencia de contacto ánodo-suelo, la cual se puede descomponer en los siguientes términos:

$$R = R_{\text{ánodo/backfill}} + R_{\text{backfill}} + R_{\text{backfill/suelo}} ;$$

La  $R_{\text{ánodo/backfill}}$  se calcula a partir de:

$$R_{\text{ánodo/backfill}} = \frac{\rho}{2\pi L_1} \left( \ln \frac{8 L_1}{d} - 1 \right) = 0.2377 \text{ ohms,}$$

en donde:

$\rho = 50$  ohm-cm (resistividad del backfill)

$L_1 = 150$  cm

$d = 5$  cm.

La  $R_{\text{backfill}}$  se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{backfill}} = \rho \frac{L}{S}; \quad L = \frac{D - d}{2} = 12.5 \text{ cm}$$

$S = \pi d_m L_1 d_m = (D+d)/2 = 17.5$  cm

$S = 8246$  cm<sup>2</sup>,

por lo tanto:

$$R_{\text{backfill}} = 0.0758 \text{ ohms;}$$

en donde:

$\rho = 50$  ohm-cm (resistividad del backfill)

$D = 30$ cm

$d = 5$  cm

La  $R_{backfill/suelo}$  se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$R_{backfill/suelo} = \frac{\rho}{2\pi L_2} \left( \ln \frac{8 L_2}{D} - 1 \right) = 2.2928 \text{ ohms,}$$

en donde:

$\rho = 1\ 000$  ohm-cm (resistividad del suelo)

$L_2 = 210$  cm

$D = 30$  cm.

La resistencia total será la suma de las tres resistencias:

$R = 0.2377 + 0.07758 + 2.2928 = 2.6063$  ohms.

Entonces, la corriente proporcionada por el ánodo sería:

$I = 0.25/2.6063 = 0.09592$  A = 96 mA.

La diferencia de potencial V se ha determinado considerando un ánodo de una aleación de Zn con un potencial de -1.05 V y con un potencial de protección de la estructura de -0.80 V.

## B I B L I O G R A F Í A

### *Corrosión*

Atkinson J.T.N. y H. VanDroffelaar, *Corrosion and its Control. An introduction to the Subject*, NACE, Houston, 1982.

Ávila J. y J. Genescá, *Más allá de la herrumbre*, FCE-SEP-CONACYT, México, 1986, 110 pp. (Colección La Ciencia desde México, núm. 9).

Bockris J.O'M., N. Bonciocat y F. Gutmann, *An Introduction to Electrochemical Science*, Wykeham Pub., Londres, 1974.

Fontana M.G. y N.D. Greene, *Corrosion Engineering*, McGraw Hill, Nueva York, 1978.

Galvele J.R., *Corrosion*, OEA, Washington, 1979 (Monografía núm. 21).

González José A. (comp.), *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*, CSIC, Madrid, 1984.

Uhlig H.H., *Corrosión y control de la corrosión*, Ed. Urmo, Bilbao, 1975.

Van Delinder L.S., (comp.), *Corrosion Basics, An Introduction*, NACE, Houston, 1984.

### ***Protección catódica***

Applegate L.M., *Cathodic Protection*, McGraw-Hill, Nueva York, 1960.

Byran W.T., *Designing Impressed Current Cathodic Protection Systems with Durco Anodes*, The Duriron Co., Dayton, 1970.

Lazzari L. y P. Pedferri, *Protezione Catodica*, CLUP, Milán, 1982.

Morgan J.H., *Cathodic Protection*, Leonard Hill, Londres, 1959.

Parker M.E., *Pipe line Corrosion and Cathodic Protection*, Gulf Publishing Co., Houston, 1954.

Peabody A.W., *Control of Pipeline Corrosion*, NACE, Houston, 1967.

Roche M., *Protection contre la corrosion des ouvrages maritimes petroliers*, Technip, París, 1979.

Shreir L.L., *Corrosion*, vol. II, Newnes-Butterworth, Londres, 1976.

Von Beckmann W. y Sohwenk, *Handbook of Cathodic Protection*, Portcullis Press, Redhill Surrey, 1975.

## C O L O F Ó N

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1995 en Impresora y Encuadernadora Progreso, SA. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. Se tiraron 2 000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO y MARIA DEL CARMEN FARÍAS.

## C O N T R A P O R T A D A

"El bienestar del hombre —escriben Javier Ávila y Joan Genescá— depende en buena parte de los materiales que fabrica", mas desde que el hombre descubrió la manera de producir metales a partir de los minerales que los contienen también, en reversa, se reinició el proceso: los metales, debido a la corrosión, se revierten en minerales. Tomar conciencia del peligro de la corrosión y de cómo la ciencia y la tecnología química contribuyen a su control fue el tema del primer volumen (La Ciencia desde México, núm. 9) sobre la herrumbre.

El segundo está dedicado a introducir al lector al conocimiento de uno de los métodos de protección contra la corrosión más utilizados en la práctica de la ingeniería: la protección catódica. Una de las formas de corrosión más frecuentes es la electroquímica. proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica —la que sufre la corrosión—, una zona catódica y un electrolito que es, por lo general, el agua condensada de la atmósfera. Dado que la corrosión de los metales a causa de la humedad es de naturaleza electroquímica, la aproximación lógica para detener el proceso es recurrir a métodos electroquímicos. Así, el cátodo, el ánodo y el electrolito integran lo que se denomina una pila galvánica y, en el momento en que falle uno de aquellos tres elementos básicos para el funcionamiento de una pila, ésta deja de funcionar y se detiene la corrosión. En este fenómeno, sencillo en apariencia, se basa la mayoría de los sistemas de defensa contra la herrumbre, los cuales se estudian en este volumen dedicado a los ingenieros que, con sus esfuerzos, contribuyen al mantenimiento de la planta industrial.

Joan Genescá es doctor en ingeniería química del Instituto Químico de Sarriá, España. A partir de 1983 se convirtió en profesor titular del Departamento de Metalurgia de la Facultad de Química de la UNAM. El doctor Javier Ávila, egresado de la Facultad de Química de la UNAM, obtuvo su maestría en la City University y su doctorado en la Universidad de Oxford, ambas de Inglaterra. Es jefe del Departamento de Metalurgia de Posgrado en la UNAM.