

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
**FACULTAD REGIONAL LA PLATA**

# **PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS**

Carlos A. Giudice y Andrea M. Pereyra

<b>Índice</b>	<b>Página</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2. PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 Propiedades de un material anódico.....	8
2.2 Características electroquímicas del zinc, magnesio y aluminio.....	10
2.3 Intensidad de la corriente anódica.....	13
2.4 Vida de los ánodos.....	14
2.5 Fijación de los ánodos.....	16
2.6 Cálculo del número de ánodos.....	18
2.7 Aleaciones para los ánodos.....	19
2.8 Campo de aplicación de los ánodos galvánicos.....	25
<b>3. PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA. GENERALIDADES.....</b>	<b>28</b>
<b>4. CRITERIOS DE APLICACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....</b>	<b>33</b>
4.1 Ánodos galvánicos.....	34
4.2 Corriente impresa.....	35
<b>5. METODOLOGÍA DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA.....</b>	<b>38</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión que se aplica en el mundo entero en instalaciones de ductos para transportar petróleo, productos terminados, agua, etc. así como en tanques de almacenamiento, cables eléctricos, telefónicos enterrados y otras instalaciones metálicas importantes.

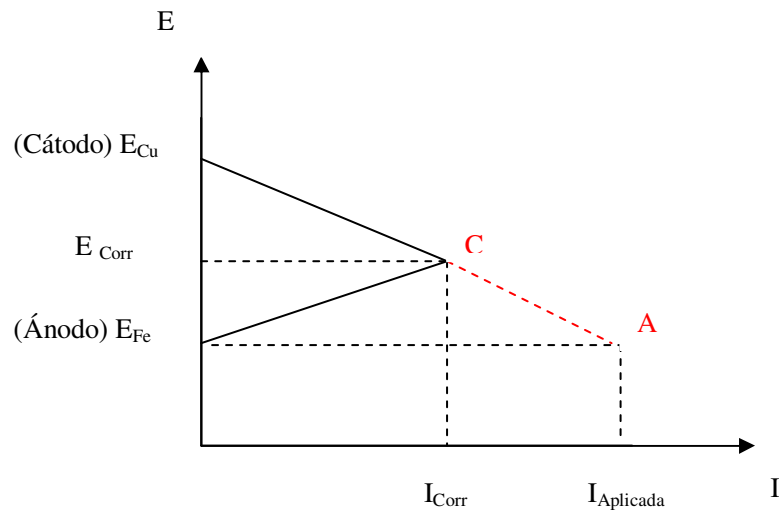
En la práctica, se puede aplicar protección catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón y aluminio en contacto con todos los suelos y con casi todos los medios acuosos con el objeto de controlar o eliminar el deterioro por corrosión en todas sus formas (bajo tensión, intergranular, picadura, ataque generalizado, etc.).

Como condición fundamental, las estructuras componentes del objeto a proteger y del elemento de sacrificio deben mantenerse en contacto eléctrico e inmerso en un electrolito.

Los estudios de protección catódica usualmente emplean potenciales de reducción; consiste en disminuir el potencial (más negativo) del metal a proteger por debajo de un valor definido para cada metal en el que termodinámicamente no hay corrosión electroquímica.

La *protección catódica* es el único medio preventivo que asegura la inmunidad del metal contra la corrosión; además, se neutraliza toda corriente que circula por la estructura y que origina corrosión (corrientes vagabundas).

El funcionamiento más detallado de este método se fundamenta a través del análisis de la Figura 1. La zona en la que la corriente negativa penetra en la estructura se comporta como catódica en relación al medio circundante; es decir, que sobre la superficie total de la estructura sumergida en un electrolito se desarrollan reacciones de reducción y por lo tanto se impide la salida de los iones metálicos positivos (oxidación del metal) con la consiguiente pérdida de sus propiedades fisicomecánicas.



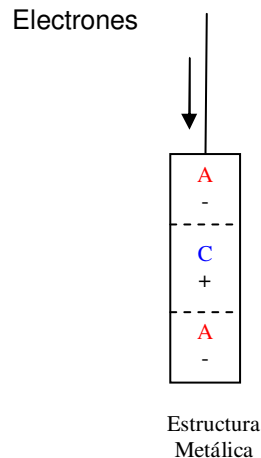
**Figura 1. Diagrama de Evans**

La Figura 1 indica la polarización del cátodo (el cobre en el caso del ejemplo) por medio de una corriente externa negativa (parte C-A) que lleva el potencial de corrosión  $E_{Corr}$  de la pila al potencial del ánodo  $E_{Fe}$  a circuito abierto (sin circulación de corriente).

En tal caso, ambos electrodos (cátodo y ánodo) se encuentran al mismo valor de potencial y por lo tanto no hay un gradiente de energía libre que genere la disolución del hierro en el ejemplo mencionado. Este es el fundamento en que se basa la protección catódica para inmunizar el metal en contacto con un electrolito contra la corrosión.

La Figura 2 muestra una estructura metálica protegida catódicamente; se ha identificado con C las áreas catódicas y con A, las anódicas. Una fuente de corriente continua exterior que provee el flujo electrónico completa el sistema.

Cuando las áreas catódicas son polarizadas por la corriente externa al potencial del ánodo, toda la superficie del metal está al mismo potencial y por lo tanto no hay circulación de corriente eléctrica (se evita en proceso corrosivo). Esta situación se mantiene mientras circula la corriente.



**Figura 2. Esquema conceptual de la protección**

En resumen, la protección catódica necesita una corriente continua externa negativa capaz de llevar el potencial de corrosión de la pila al potencial del ánodo a circuito abierto.

Desde un punto de vista aplicado, se comienza efectuando un reconocimiento visual del estado superficial de la estructura y midiendo al mismo tiempo los potenciales respecto al medio en diferentes puntos, con referencia a un electrodo impolarizable (por ejemplo, cobre-sulfato de cobre).

Estos potenciales son naturales, es decir que son los que adquiere la estructura inmediatamente luego de sumergida en el electrolito (exentos de campos perturbadores). También se determinan los parámetros fisicoquímicos del medio electrolítico, particularmente las especies agresivas y la resistividad.

Efectuado el reconocimiento quedan determinadas las áreas anódicas y catódicas; luego, el estudio tiene como objeto seleccionar el sistema de protección más adecuado (tipo de protección catódica, compatibilidad con revestimientos, etc.).

El criterio que debe primar es el técnico-económico, teniendo en cuenta el tipo de metal a proteger, las dimensiones de la estructura y estado de su cubierta (desnuda, pobre o bien revestida), características del suelo (pH, sulfato, resistividad, etc.) y condiciones particulares (por ejemplo, disponibilidad de suministro eléctrico, personal capacitado y accesibilidad, problemas de interferencias con estructuras, zonas anegadas, etc.).

Dado que son conocidos experimentalmente los potenciales de protección de los metales que dan inmunidad a las estructuras contra la corrosión, en la práctica se utilizan ellos en lugar de fijar la corriente  $I$  aplicada en la Figura 1. En consecuencia, para cualquiera metal de la estructura a proteger existe un potencial negativo mínimo respecto al medio (suelo o agua) que se debe alcanzar mediante la aplicación de los sistemas de protección catódica.

En particular para las estructuras de acero y de plomo, se obtiene una protección efectiva de las mismas llevando su potencial natural respecto al medio a  $-0,85$  V (preferiblemente  $-0,91$  V) y a  $-0,60$  V respectivamente, referidos al electrodo impolarizable de cobre-sulfato de cobre saturado.

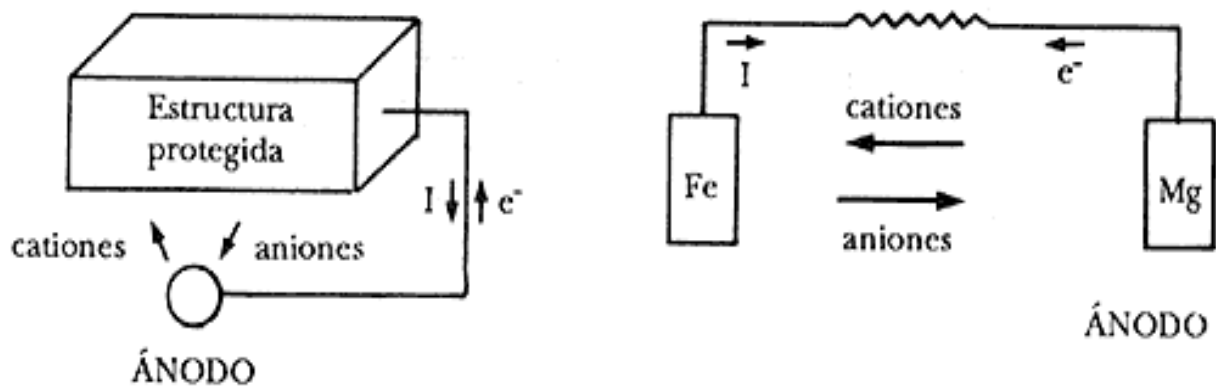
## **2. PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS GALVÁNICOS**

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 o panes de zinc de elevada pureza.

En este método se conecta el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, es decir, más negativo en la serie electroquímica (Tabla 1). 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 (polo negativo), Figura 3.

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 tienen un potencial más negativo quedan reducidos en la práctica al zinc (Zn), al aluminio (Al) y al magnesio (Mg) y sus aleaciones.



**Figura 3. Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio**

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; cabe mencionar que en los últimos años han tenido un gran desarrollo.

## 2.1 Propiedades de un material anódico

Analizando la serie electroquímica de los metales (Tabla 1), 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. La Figura 4 ilustra el mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio.

**Tabla 1. Serie electroquímica de los metales**

Equilibrio	d.d.p. (Voltios)	Equilibrio	d.d.p. (Voltios)
$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2 e^-$	-2,34	$Co \rightleftharpoons Co^{2+} + 2 e^-$	-0,277
$Ti \rightleftharpoons Ti^{2+} + 2 e^-$	-1,75	$Ni \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2 e^-$	-0,230
$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3 e^-$	-1,61	$Sn \rightleftharpoons Sn^{2+} + 2 e^-$	-0,136
$Mn \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2 e^-$	-1,05	$Pb \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2 e^-$	-0,126
$\rightarrow Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2 e^-$	-0,762	$H_2 \rightleftharpoons H^{2+} + 2 e^-$	$\pm 0,000$
$Cr \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3 e^-$	-0,71	$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2 e^-$	+0,345
$\rightarrow Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2 e^-$	-0,441	$Ag \rightleftharpoons Ag^{1+} + 1 e^-$	+0,800
$Cd \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2 e^-$	-0,402	$Au \rightleftharpoons Au^{3+} + 3 e^-$	+1,42

Las *propiedades* que debe presentar un material anódico son las siguientes:

- Un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero (que es el metal que normalmente se

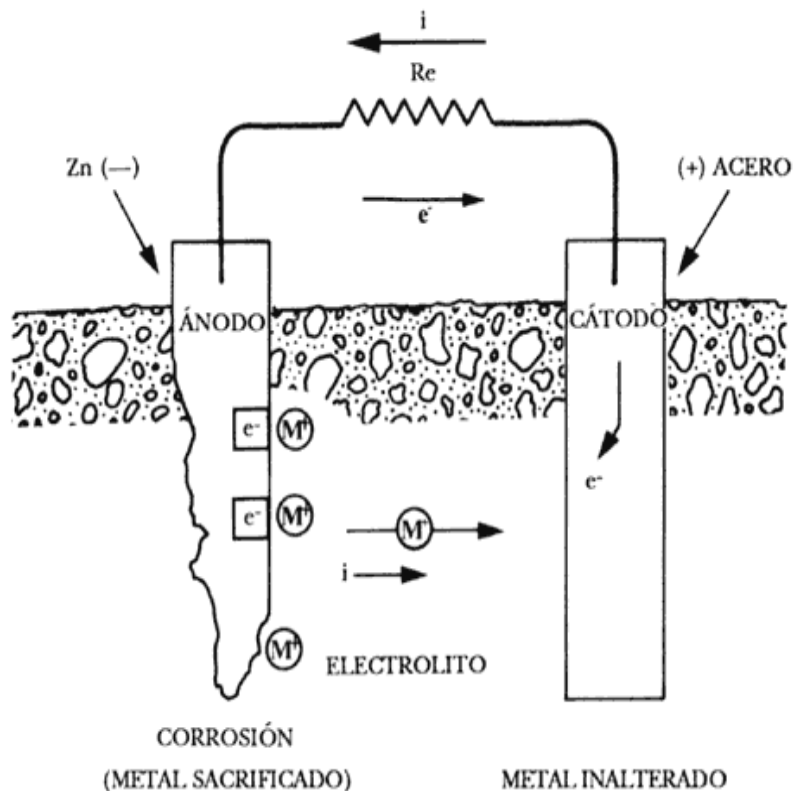


protege) a  $-0,80$  V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre  $-0,95$  V y  $-1,7$  V.

- Una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.

- Un elevado rendimiento eléctrico, expresado en Amper-hora por kg de material ( $A \times h / kg$ ) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.

- Un proceso de disolución anódica uniforme.



**Figura 4. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio**

- Fácil adquisición y susceptible de fundir en diferentes formas y

tamaños.

- Costo razonable, de modo que en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por Ampere-año.

## **2.2 Características electroquímicas del zinc, magnesio y aluminio**

Las exigencias antes mencionadas ponen de manifiesto que solamente el zinc, el magnesio y el aluminio y sus aleaciones pueden ser considerados aptos como materiales para ser utilizados desde un punto de vista práctico como ánodos de sacrificio.

Las propiedades de estos metales se incluyen en la Tabla 2.

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); otros, como el cromo (Cr), no son aptos porque son fácilmente pasivables.

En una reacción electroquímica, un metal se disuelve de acuerdo con las leyes de Faraday: el paso de una cantidad de corriente de 96.500 Coulomb (número de Faraday) disuelve una cantidad equivalente de cualquier elemento químico.

Por lo tanto, si circula una dada intensidad de corriente (el requerido para alcanzar la protección catódica adecuada), durante un tiempo prefijado (vida útil en servicio), la masa de metal disuelto se calcula de la siguiente manera:

$$M = I \times t \times PA / (N \times 96500)$$

donde:

M = gramos de metal disuelto.

I = intensidad de la corriente, en Ampere (A).

t = tiempo, en segundos (s).

PA = peso atómico del metal (átomo gramo), en gramos (g).

N = valencia del elemento (número de electrones que pierde el metal al disolverse).

**Tabla 2. 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 de la masa disuelta, calculados de la forma citada, consideran que el metal no sufre autocorrosión, es decir que se

consume íntegramente para producir el flujo electrónico protector. Para un rendimiento de corriente del 100%, el aluminio es el que sufre la pérdida de peso más pequeña ya que es el que proporciona mayor capacidad eléctrica o sea el mayor número de Coulomb por kg de metal disuelto, Tabla 2.

Siguiendo el razonamiento, para suministrar una misma intensidad de corriente y sobre la base de un rendimiento en corriente del 100% (2.982 A x h), se necesitan 1 kg de aluminio, 3,64 kg de zinc y 1,35 kg de magnesio; esto último implica, en relación al aluminio, un rendimiento práctico para el zinc de 27,5% y para el magnesio de 74,0% de corriente aproximadamente.

A su vez para cada metal, los rendimientos prácticos no alcanzan nunca el 100%, ya que industrialmente no se pueden fabricar ánodos galvánicos puros debido a sus costos muy elevados. Los rendimientos normales están entre el 50% y el 90% del rendimiento teórico. En la Tabla 3 se presentan los valores teóricos y prácticos de la capacidad eléctrica para los metales comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio.

**Tabla 3. 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

### 2.3 Intensidad de la corriente anódica

Como se mencionara, a partir de las leyes de Faraday se puede calcular la intensidad de corriente que es capaz de suministrar 1 kg de metal, en un tiempo dado, en su actividad en servicio. Ahora bien, este valor está muy lejos de la realidad, ya que no tiene en cuenta que:

- La intensidad que es capaz de generar un metal en su actuación anódica es función de su *forma geométrica*, Figura 5; es decir, por ejemplo, que 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, esta 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.



**Figura 5. Diferentes formas de ánodos de sacrificio**

- 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 sobre los electrodos. Por otra parte, la autocorrosión que, en mayor o menor grado presentan los tres

metales empleados como ánodos galvánicos, hace siempre que su rendimiento sea inferior al 100%.

Cada tipo de ánodo, sumergido o enterrado, tiene una *resistencia* que depende de la resistividad del medio ( $\rho$ ), de su longitud y del llamado radio equivalente; esta resistencia se calcula con la siguiente ecuación empírica:

$$R = [\rho / 2 \pi L] [2,3 \log (4 L / r) - 1]$$

donde:

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

L = longitud, en cm

$\rho$  = resistividad del medio, en ohm por cm ( $\Omega \times \text{cm}$ )

r = radio equivalente, en cm

El *radio equivalente* de un ánodo es el radio de un cilindro de igual superficie transversal, cuando este se haya consumido un 40%. Si la sección del ánodo S es igual a  $\pi \times r^2$ , para el 60 % de área remanente el valor del radio equivalente está dado por:

$$r = \sqrt{0,60 S / \pi}$$

Cada ánodo puede suministrar una intensidad de corriente I que está fijada por la *ley de Ohm*  $I \times R = V$ , donde V es la diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección (para el acero, 0,80 V con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl) y R es la resistencia del ánodo, calculada según la fórmula anterior.

## 2.4 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 es una función del peso del ánodo (leyes de Faraday) y no del número de ánodos que se coloquen. Si se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo (I) y su peso (kg), teniendo en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente así como su rendimiento y su factor de utilización (Tabla 3), se puede calcular fácilmente su duración.

El factor de utilización puede ser del 85%, ya que cuando un ánodo se consumió, 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.

La vida del ánodo puede calcularse de la siguiente manera:

$$V = C \times P \times R \times F / I$$

donde:

V, vida (años)

C, capacidad de corriente (A x año/ kg)

P, peso del ánodo (kg)

R, rendimiento (%)

F, factor de utilización (adimensional)

I, intensidad de corriente (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, es la siguiente:

Capacidad de corriente C (Tabla 2) = 820 Axh/kg

Capacidad de corriente C (un año, 8.760 horas) = 0,094 Axaño/kg

Rendimiento = 90%

Factor utilización = 85%

Por tanto, su vida es la siguiente:

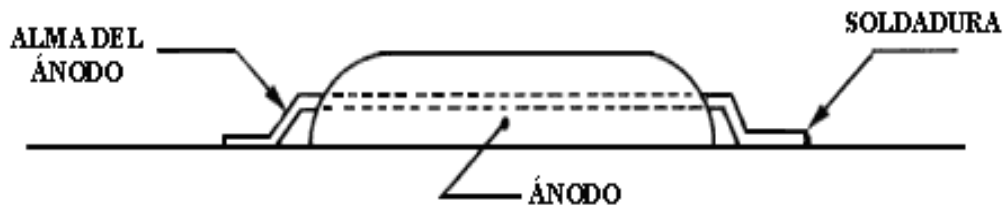
$$V = 0,094 \text{ (Axaño/kg)} \times 14 \text{ (kg)} \times 0,85 / 0,1 \text{ (A)}$$

$$V = 10,07 \text{ años}$$

## 2.5 Fijación de los ánodos

Los ánodos se pueden colocar en la estructura a proteger de maneras diferentes, pero siempre con ayuda del alma que los atraviesa, la 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, Figura 6; se utilizan también con frecuencia sistemas de grapas o espárragos o simplemente se atornillan.

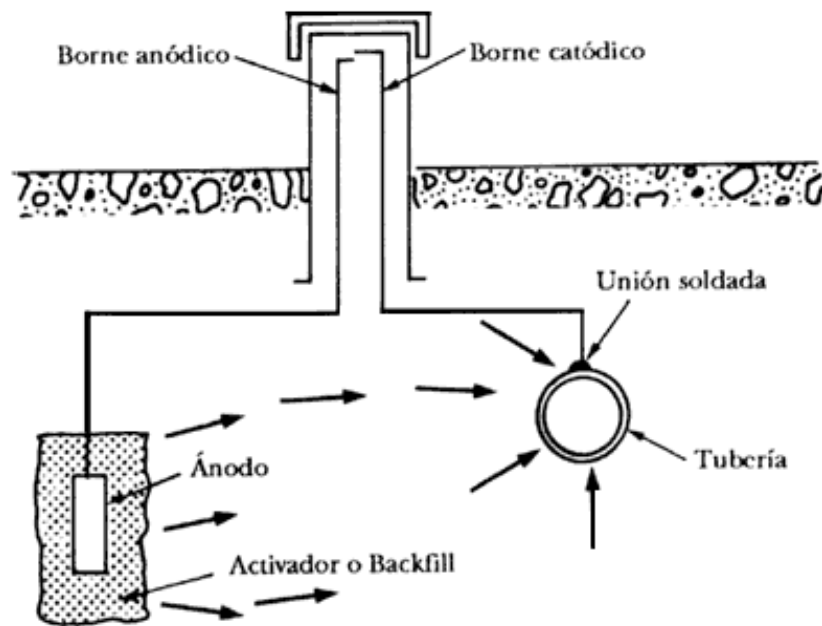


**Figura 6. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio**

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; la Figura 7 presenta el detalle de instalación de ánodos de sacrificio.





**Figura 7. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio**

En forma genérica, se puede mencionar que el procedimiento de instalación consiste básicamente en realizar una perforación en el terreno de aproximadamente 2 m de profundidad y 0,25 m de diámetro, a una distancia de 2 a 3 m del eje de la estructura.

Finalizada la excavación del pozo, se introduce el ánodo rodeado por un material denominado "*back-fill*", el que está contenido en una bolsa de lienzo.

Como ya se mencionó, la pieza metálica posee axialmente un alma de acero cincado que se suelda al cable que permite su conexión a la estructura a proteger.

Generalmente, el "*back-fill*" es una mezcla bien homogeneizada y apisonada de yeso hidratado, bentonita y sulfato de sodio; su finalidad es regular la corrosión del ánodo.

Luego de introducir la bolsa, se rellena el pozo con suelo seleccionado

de buena conductividad, carente de piedras.

Se debe prestar especial atención en que la cabeza del ánodo (o de la bolsa) quede a la profundidad del eje de la estructura. El ánodo puede conectarse directamente a la estructura o indirectamente por medio de bornes, a una caja de medición montada especialmente.

Estas cajas facilitan la medición de los potenciales de la estructura contra tierra y las corrientes drenadas por los ánodos. Generalmente se las pinta con fines de señalización.

La elección del material de ánodos a utilizar depende fundamentalmente de la *resistividad* del electrolito.

Es importante señalar que la instalación de electrodos y ánodos requieren técnicas especializadas que, de no llevarse a cabo, reducen o eliminan la protección perseguida.

## **2.6 Cálculo del número de ánodos**

Con el fin de conocer el número de ánodos requeridos para llevar a cabo la protección catódica es necesario inicialmente determinar la superficie a proteger y calcular la densidad de corriente de protección.

El producto de la superficie a proteger (en m<sup>2</sup>) por la densidad de corriente de protección (en mA/m<sup>2</sup>) da 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, se tiene que el número de ánodos  $N$  está dado por la siguiente relación:

$$N = I_t / I$$

## **2.7 Aleaciones para los 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, la composición de los ánodos tiene una gran influencia sobre las propiedades de los productos de corrosión formados en el ánodo durante su actuación en servicio: porosidad, adherencia, dureza, conductividad eléctrica, etc.

### **- Ánodos de zinc**

Entre sus impurezas, las más perjudiciales son el hierro (Fe) y el plomo (Pb). Se ha encontrado que niveles 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 resultan muy difíciles de obtener comercialmente.

Por otro lado, parece estar bien demostrado que la adición al Zn de pequeños porcentajes de Al, de Al y Cd o Al y Si es un recurso útil para contrarrestar los efectos del Fe como impureza.

Ello queda reflejado en la nueva especificación MIL-A-18001 G (Tabla 4); se observa que esta permite hasta 0,005% de Fe, pero exige al mismo tiempo, contenidos de 0,025 - 0,15% de Cd y 0,10 - 0,50% de Al.

**Tabla 4. Composiciones exigidas a los ánodos de zinc, según especificaciones militares estadounidenses**

<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 Li, el Cr, el Mg, el Al y el Cd. La Tabla 5 presenta las calidades de Zn según la especificación B6-46 de la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM).

**Tabla 5. 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 estadounidenses, cuya composición se indica en las Tablas 4 y 6.

**Tabla 6. 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

#### - Ánodos de magnesio

Se estudiaron una amplia serie de aleaciones de Mg con vistas a ser utilizadas como ánodos de sacrificio. Las Tablas 7 y 8 reúnen dichas composiciones. El rendimiento en corriente de estas aleaciones crece con la densidad de corriente.

**Tabla 7. 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

**Tabla 8. Composición comercial típica de los ánodos 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-I 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 al 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 alcanza el 0,03%, la corrosión espontánea del ánodo se multiplica aproximadamente 500 veces. El bajo rendimiento de la aleación "cell" (Tabla 7) se atribuye a su elevado contenido de Fe (0,03%).

Por su parte, el níquel ocasiona efectos desastrosos sobre los ánodos

de Mg. Se ha comprobado que contenidos superiores al 0,001% dan lugar a la disolución del ánodo por corrosión espontánea y a potenciales de disolución sensiblemente nobles (positivos).

El cobre es otro elemento que ejerce una acción nociva sobre el Mg. Si el contenido de Cu es inferior al 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 Mg-Al tienen una buena resistencia a la corrosión espontánea.

El zinc 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 porque 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 ejerce, en general, una acción favorable ya que tiende a eliminar los efectos del hierro y a compensar los del cobre.

#### **- Ánodos de aluminio**

El Al, a pesar de ser por sus características electroquímicas el material idóneo para ser utilizado como ánodo de sacrificio, se emplea como tal en forma relativamente reciente. La razón estriba en que este metal, aleado o no, presenta un serio 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.

La Tabla 9 reúne las características de algunas de las aleaciones de Al desarrolladas y que resultan altamente eficientes.

**Tabla 9. 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, ejercen sobre el potencial del Al.

Se concluyó que el Cu y el Mn hacen más catódico el potencial del Al mientras que el Zn, el Cd, el Mg y el Ba hacen dicho potencial de -0,1 a -0,3 V más anódico; también se demostró que el Ga, el Hg, el Sn y el In) lo hacen también más anódico (entre -0,3 y 0,9 V).

Las combinaciones que en principio tuvieron un interés especial son las de Al-Hg-Sn y las de Al-Hg-Bi, de similar comportamiento entre sí y con



potenciales parecidos a los de las aleaciones Al-Hg.

Por su parte, las aleaciones Al-Hg-Zn, Al-Sn-Zn y Al-In-Zn tienen potenciales alrededor de -1,05 V y rendimientos elevados.

La aleación Al-Hg-Zn ha sido estudiada sistemáticamente; se ha tenido en cuenta 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.

## **2.8 Campo de aplicación de los ánodos galvánicos**

- **Ánodos de zinc.** Su gran utilización como ánodo de sacrificio (primer metal que se empleó como tal) está justificada porque tiene un valor relativamente elevado de su potencial de disolución que 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 resistividades inferiores a los 5.000 ohmxcm.

También hay que limitar su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas superiores a los 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, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas de perforación de petróleo, depósitos de agua, condensadores, etc.

- **Ánodos de aluminio.** Este metal, por su situación en la serie electroquímica, es el más idóneo para la protección catódica, pues ocupa una posición intermedia entre el Zn y el Mg y tiene además una capacidad elevada de corriente (Tablas 3 y 10).

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

Debido precisamente a su elevada capacidad de corriente, un solo ánodo de Al puede ejercer la acción de tres de Zn de iguales características, para una misma duración del ánodo. Estas circunstancias han motivado que estos ánodos se utilicen frecuentemente en construcciones navales, para la protección catódica de tanques de lastre y en los buques petroleros.

**Tabla 10. Características electroquímicas de algunas aleaciones de zinc, de aluminio y de 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.

Aunque el precio del Al es más elevado que el del Zn, al tener que colocar menos ánodos esta diferencia se compensa y si se considera

además el ahorro de mano de obra de la colocación, estos pueden llegar a ser incluso más económicos que los de Zn.

**- Ánodos de magnesio.** La utilización del Mg y sus aleaciones resulta del valor bastante reducido que presenta su potencial de disolución (Tabla 10), lo que implica un bajo rendimiento de corriente y una disminución, a veces bastante grande, del potencial de la estructura a proteger.

El magnesio se puede utilizar para la protección catódica de estructuras provistas de un recubrimiento de mala calidad situadas en un medio de resistividad elevada (10.000 ohmxcm) tal como es el caso de un suelo arenoso; en resumen, su mejor campo de aplicación es en medios de resistividad elevada (entre 5.000 y 20.000 ohms-cm).

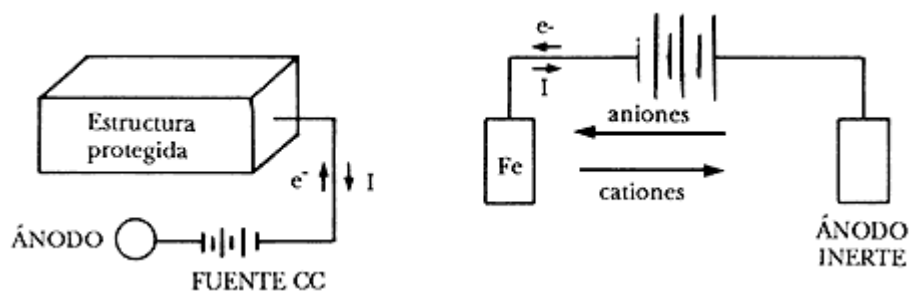
Estos ánodos no son recomendables para su utilización en agua de mar, ya que su elevada autocorrosión hace que los rendimientos sean muy bajos. La Tabla 11 indica lo anterior mencionado y puede ayudar en la selección de un material anódico en función de la resistividad del medio.

**Tabla 11. Ánodos de sacrificio recomendables en función de la resistividad del medio**

<i>Material</i>	<i>Medio</i>	<i>Resistividad Ω-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

### 3. PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA. GENERALIDADES

En este método se conecta el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) al metal a proteger y el polo positivo de dicha fuente a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro, ferro-silicio, plomo-plata, grafito, etc. Un esquema simplificado del mismo se presenta en la Figura 8.



**Figura 8. Protección catódica con corriente impresa**

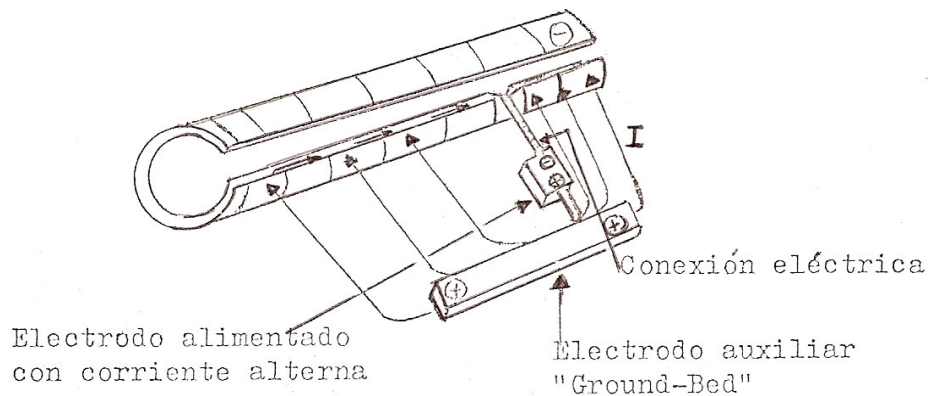
El sistema de protección catódica con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. En este sistema, se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura.

#### 3.1 Unidades rectificadoras y “ground-bed”.

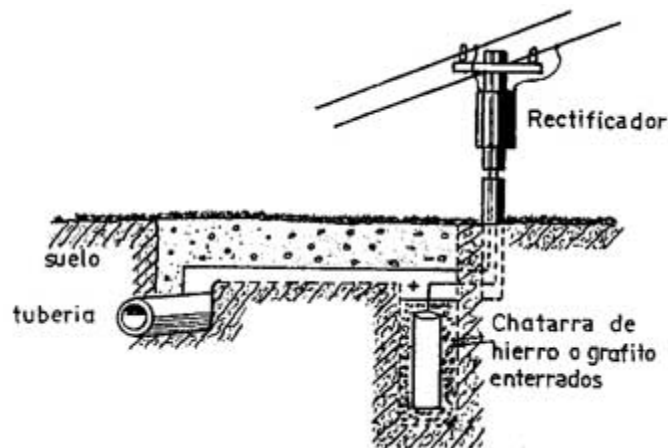
El principio en que se basa ese tipo de protección, se esquematiza en las Figuras 9 y 10.

Por su parte, la Figura 11 muestra algunos detalles de la instalación.

La *unidad rectificadora* está constituida por transformadores y celda rectificadora. El *transformador* permite obtener distintas potencias de salida, mediante regulación en el primario o secundario del mismo; por su parte, la *celda rectificadora* puede estar constituida con placas de selenio o diodos de silicio, con tendencia a utilizar cada vez más estos últimos.



**Figura 9. Unidad rectificadora**

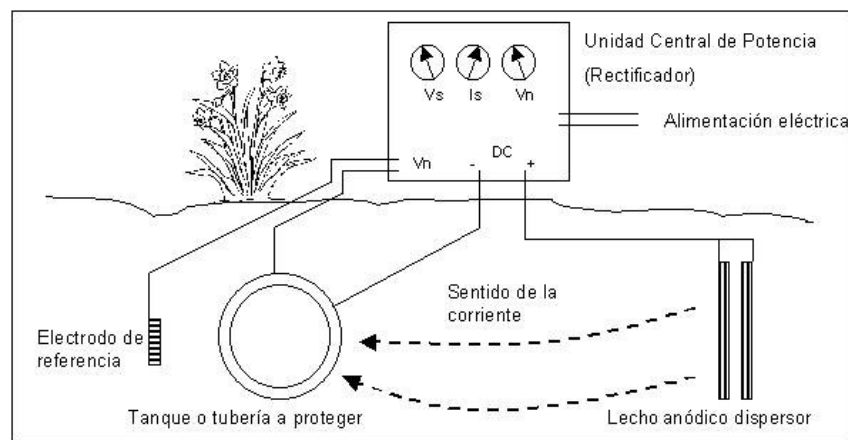


**Figura 10. Esquema de una instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa**

Las unidades rectificadoras se alimentan mediante corriente alterna (200/380 V, 50 Hz) y poseen dos robustos bornes de salida que permiten las conexiones de las mismas con la estructura a proteger

(borne negativo) y con el electrodo auxiliar (borne positivo), denominado comúnmente “*ground-bed*” o dispersor superficial.

El “*ground-bed*” es una toma de tierra destinada a drenar la corriente proveniente de la estructura a proteger. Su eficiencia es mayor cuanto menor sea la resistencia del electrolito (suelo o agua) en el lugar de su instalación y cuanto mayor sea la conductividad de los elementos de sacrificio utilizados.



**Figura 11. Detalle de la instalación**

Para el conocimiento de la resistividad del electrolito, se realiza previamente en el lugar donde se piensa instalar el “*ground-bed*” una medición mediante instrumental especializado.

Los materiales componentes del electrodo auxiliar o “*ground-bed*” experimentaron la evolución de la técnica. Inicialmente se utilizaron chatarra de hierro, rieles, electrodo de grafito, etc. En la actualidad en nuestro país, se realiza la fabricación y la aplicación de electrodos de corriente impresa de alto tenor de hierro-silicio en dos tipos de aleación, por su elevadísima eficiencia con respecto a los anteriores.

Con la aparición de esta aleación, fueron eliminados muchos problemas

que no solucionaban aquellos elementos, no sólo por su constitución, sino además por su posibilidad de aplicación.

Una aleación está constituida de 14,4 % de silicio, 0,95 % de carbono, 0,70% de manganeso y el resto, hierro. Su aplicación es amplia en distintos tipos y tamaños, desde el "ground-bed" común utilizado para la protección de gasoductos, oleoductos, acueductos, cables de energía y telefónicos, etc. hasta su empleo en tanques de almacenamiento, conductos telefónicos, intercambiadores de calor, cañerías, etc. como electrodos flexibles o de alta profundidad (estos últimos especialmente diseñados para ser empleados donde física o económicamente no es posible instalar el "ground-bed" convencional).

La segunda aleación, además de los componentes anteriores, posee 4,5% de cromo. Se aconseja utilizarla en agua de mar y en suelos salitrosos.

Las ventajas que ofrecen son, entre otras, las que se detallan a continuación:

- No tienen restricciones de densidades de corrientes. Para valores de las mismas hasta 50 Amper/m<sup>2</sup> no experimentan prácticamente pérdida de peso.
- No sufren ataques selectivos ni deterioros prematuros de instalación.
- Poseen las mejores propiedades eléctricas y mecánicas. Estas últimas de capital importancia para el transporte, almacenamiento e instalación. Cualquiera sea el material del "ground-bed" a utilizar, instalado el mismo, es conveniente obtener una resistencia respecto al medio de un ohm o menor.

Una vez determinado el sitio de la instalación de la protección catódica dentro de las posibilidades prácticas (lugar con suministro de energía

eléctrica, espacio para ubicar los electrodos, etc.) se procede a efectuar las excavaciones destinadas a albergar los electrodos de corriente impresa. Estas excavaciones se realizan dentro de lo posible en dirección paralela a la estructura a proteger, a no menos de 30 metros de la misma, separando los pozos entre sí a 6 m aproximadamente.

En el caso que las dimensiones del terreno no lo permitan, se pueden instalar los electrodos en dirección normal a la estructura, pero con una disminución del rendimiento de los mismos por superposición de las líneas de fuerza del campo eléctrico.

Previo a la realización de los trabajos, es necesario estimar la potencia nominal de salida del rectificador y el número de electrodos a instalar. Para ello, se deben efectuar ensayos de necesidades de corriente para obtener en toda la estructura a proteger el potencial mínimo de inmunidad adecuado al metal de que se trate.

Además, se debe estimar la cantidad de material sacrificable para el "ground-bed", fijando el número de años de la estructura (5, 10, 15, etc.).

Cuando la potencia de protección supera cierto valor, se utilizan rectificadores convenientemente distribuidos a lo largo de la estructura.

En el punto de conexión del o de los rectificadores se puede suministrar a la estructura un potencial negativo de 2,5 V respecto al electrolito, referido al electrodo de cobre-sulfato de cobre.

Desde hace algunos años se están instalando con remarcado éxito *generadores termoeléctricos* alimentados a gas propano o natural cuando no existe alimentación eléctrica y no se recomienda instalar ánodos galvánicos.

Las *pinturas o revestimientos* complementan la protección catódica y se



aconseja el empleo de buenos tratamientos de superficie, indicados en cada caso por el proyectista especializado. Con ello se consigue mejorar la resistencia de aislación estructura-medio.

#### **4. CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA**

Existen varios criterios para la elección del potencial de protección catódica.

Un primer criterio consiste en llevar el potencial del cátodo a un valor cercano al potencial del ánodo a circuito abierto, por ejemplo un cambio negativo en el potencial estructura-electrolito de 0,25 a 0,30 V (la velocidad de corrosión es aceptable y compatible con la vida útil de la estructura); un segundo criterio consiste en producir un cambio catódico de una estructura exactamente al potencial del ánodo a circuito abierto (la estructura está teóricamente protegida totalmente); un tercer criterio consiste en producir una variación catódica del potencial de toda la estructura a un valor más negativo que el potencial del ánodo a circuito abierto (se asegura así una protección total desde un punto de vista práctico) y finalmente un cuarto criterio que consiste en proteger catódicamente una estructura metálica exclusivamente en sus puntos anódicos ("hot spot").

Para hacer efectivo el control de la corrosión empleando alguno de los criterios enunciados, se puede utilizar uno de los dos sistemas de protección catódica ya descriptos.

La aplicación de uno u otro sistema depende de un número de consideraciones técnicas y económicas.

Algunas de ellas son las que se detallan a continuación:

## 4.1 Ánodos galvánicos

Los ánodos galvánicos son aplicables y efectivos donde los requerimientos de corrientes son bajos, donde la estructura a proteger se encuentra bien revestida y donde existe baja o media resistividad del medio circundante.

Las ventajas y desventajas de la protección con ánodos galvánicos se resumen en la Tabla 12. Esencialmente la protección con ánodos de sacrificio puede utilizarse cuando se requiere 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.

**Tabla 12. Ventajas y desventajas de la protección catódica con ánodos de sacrificio**

<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.	

## 4.2 Corriente impresa

Para la utilización del sistema rectificador "ground-bed" deben ser considerados los siguientes factores:

- Tipo de condición de la estructura
- Disponibilidad de suministro de energía eléctrica
- Resistividad del suelo o del agua
- Requerimiento de corriente
- Equipos y materiales necesarios
- Problemas de interferencia con otras estructuras
- Recursos humanos calificados
- Accesibilidad
- Mantenimiento

El tipo y la condición de la estructura a proteger es la primera y más importante consideración en el diseño del sistema rectificador "ground-bed".

Los factores que deben ser considerados principalmente son si la estructura está revestida o no, el estado del revestimiento, las dimensiones de la estructura a proteger y la continuidad eléctrica de la misma.

La corriente requerida para la protección catódica depende del área de la estructura, de los efectos de polarización de la misma o del suelo.

Las ventajas y desventajas que presenta el método de protección catódica por corriente impresa se resumen en a Tabla 13.

Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio cuando se trata de proteger estructuras muy grandes, con una gran demanda de corriente y/o cuando la resistividad del ambiente es elevada.

**Tabla 13. Ventajas y desventajas de la protección catódica por corriente impresa**

<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<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 sistema debe ser proyectado con cuidado para no causar problemas de corrientes erráticas (vagabundas o parásitas), las que pueden provocar la corrosión de estructuras vecinas.

También una densidad de corriente excesiva puede provocar fallas por desprendimiento de hidrógeno gaseoso el cual permanece ocluido en la estructura del metal.

Cuando no es posible utilizar equipos rectificadores por falta de alimentación de energía eléctrica, se emplean *generadores*

*termoeléctricos*, diseñados especialmente en los últimos años para ser aplicados en protección catódica.

La fuente de alimentación de los generadores termoeléctricos depende del tipo de cañería a proteger; en el caso de gasoductos, la alimentación proviene del propio gas natural transportado mientras que en poliductos, oleoductos, acueductos u otro tipo de cañería, la alimentación se efectúa mediante garrafas o tanques de gas propano.

Los generadores termoeléctricos suministran corriente continua proveniente del contacto galvánico de metales preciosos (termoelemento) en un medio con temperatura por calentamiento catalítico, es decir sin llama directa.

Estos generadores están estandarizados en sus diseños mediante módulos de 40 W, 60 W o 80 W de potencia de salida.

Para lograr un alto rendimiento en su aplicación es recomendable valores de resistencia de "ground-bed" entre 0,3 y 0,5 ohm.

En tales casos las salidas en corriente continua, alcanzan los siguientes valores:

- Módulo 40 W, de 9,0 a 11,5 A
- Módulo 60 W, de 11,0 a 14,0 A
- Módulo 80 W, de 12,5 a 16,5 A.

Cuando son requeridas intensidades de corriente superiores a las señaladas, se pueden instalar en grupos de 2 o más módulos.

## 5. METODOLOGÍA DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

