

# ***Sistemas de protección catódica en tuberías enterradas***

*Adrián Gomila Vinent*

*Ingeniero industrial; Director de Guldager Electrolisis, SA*

*guldager@wilsonwalton.es*

## **La agresividad de los suelos**

### **Agresividad de los suelos. Corrosión externa**

El suelo es un medio complejo y heterogéneo que se comporta de forma dispar frente a los metales enterrados, lo que propicia, en algunos casos, fenómenos de corrosión graves y rápidos. En otros casos, sin embargo, las estructuras metálicas pueden estar mucho tiempo en contacto con el terreno sin corroerse prácticamente.

Por esta razón, desde hace muchos años se intenta, a partir de estudios de agresividad del suelo, poder determinar si el metal enterrado se corroerá o no; lo que permite indicar los medios de protección mas adecuados en cada caso.

### **Estudios de agresividad del suelo**

En 1952 el Dr. Carriere de KIWA, el profesor Leclerc de la Universidad de Lieja y el ingeniero Goldstein de S.A. de Tubes de la Meuse, iniciaron los contactos que, en 1960, dieron lugar a la creación del actual CEOCOR (Comité Europeo de estudio de la corrosión y protección de las canalizaciones).

Este fue uno de los primeros intentos de sistematizar los estudios y experiencias de distintos expertos sobre la corrosividad del suelo.

Tanto en Estados Unidos (Romanoff, Logan, Schwerdtfeger) como en Europa (Steinrath, Trabanelli, Girard) se publicaron multitud de trabajos sobre el tema, buscando siempre un método simple y fiable para relacionar las características del suelo con los riesgos de corrosión.

A nivel español el paso mas importante se dio con la publicación, en 1969, de la traducción del trabajo de Steinrath: "*Métodos de ensayo para la evaluación de la agresividad de los terrenos*".

Esta publicación, realizada por el Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua de Barcelona, se incluía como fruto de los trabajos de la Comisión Española dentro de la Comisión nº 1 del CEOCOR (Agresividad de los Suelos).

Esta Comisión siguió estudiando la Agresividad de los Suelos hasta que fue disuelta en 1991, al englobarse, junto con otras comisiones, en el Sector A del CEOCOR (Protección Externa).

Durante todo este tiempo diversos países han publicado Normas al respecto, destacando la DIN, basada en el trabajo de Steinrath y la francesa AFNOR A 05-250.

Esta última Norma, de marzo de 1990, busca la simplificación de los parámetros del suelo a controlar, e insiste en que su aplicación se limita a la apreciación de una probabilidad de corrosión, cuya interpretación debería reservarse a los especialistas.

Cabe añadir aquí, que, dado que se trata de probabilidades y riesgos, las decisiones deben ser tomadas por los responsables de la canalización en función de los estudios económicos, de seguridad y de medio ambiente.

Ello se debe a que es difícil garantizar totalmente la correspondencia entre los riesgos de corrosión derivados del estudio y la realidad: existen casos documentados en los que se constatan contradicciones significativas, con serios ataques por corrosión en suelos clasificados como poco agresivos, y tubos sin ataque en el caso contrario.

Para completar esta información, destacamos tanto un trabajo de la Sociedad General de Aguas de Barcelona, de 1983, sobre "*Comportamiento de la tubería de fundición dúctil en relación a la agresividad del terreno*", como el informe sobre "*Problemas de corrosión externa en los sistemas de distribución de agua*" del Congreso de la IWSA en Copenhague, de mayo de 1991.

En el año 2003 se publicaron las dos Normas Europeas sobre agresividad de los suelos que citamos a continuación:

UNE-EN 12501-1 "*Protección de materiales metálicos contra la corrosión. Probabilidad de corrosión en el suelo. Parte 1: generalidades*".

UNE-EN 12501-2 "*Protección de materiales metálicos contra la corrosión. Probabilidad de corrosión en el suelo. Parte 2: Materiales ferrosos de baja aleación y no aleados*".

Estas dos normas resumen un poco todo lo citado anteriormente.

## Principales parámetros a controlar

En el método de Steinrath se controlan 12 parámetros del suelo, a saber: clase de suelo, estado del suelo, resistividad, proporción de agua, pH, acidez total, potencial Redox, basicidad total, ácido sulfhídrico o sulfuro, proporción de carbón de coque, iones cloruro y finalmente iones sulfato.

La Norma A 05-250 limita el estudio a 5 parámetros: naturaleza del suelo, resistividad, nivel freático, pH y heterogeneidades.

En nuestra opinión actualmente se está aceptando el hecho de que no es prioritario realizar una gran inversión en el estudio exhaustivo del terreno; pues no se obtendrán conclusiones mucho más fiables que controlando menos parámetros, y deberán tomarse decisiones similares sobre los sistemas de protección a adoptar.

Con los parámetros que se controlen, se obtiene una visión de la agresividad del terreno frente al tubo que se denomina *corrosividad absoluta*, y que no depende de la longitud del mismo.

Las diferencias de algunos parámetros a lo largo del tubo crean pilas de corrosión específicas, como por ejemplo las denominadas pilas geológicas. Este hecho se conoce como *corrosividad relativa* y, como es obvio, varía en función de que el tubo tenga continuidad eléctrica longitudinal o no.

Otro parámetro importante a controlar, y que normalmente no se engloba en los estudios de agresividad, es la influencia de las corrientes vagabundas.

Como es sabido, las corrientes que circulan a lo largo del tubo propician zonas anódicas localizadas en los puntos de salida de la canalización hacia el suelo o el agua, que se pueden ver afectadas por la continuidad o no del tubo.

Existe, pues, cierta divergencia de opiniones sobre el interés en dar o no continuidad eléctrica a los tubos de fundición o de hormigón armado.

## Resistividad del suelo

La *resistividad* de un suelo depende de su contenido en sales solubles y de la humedad. En general se acepta que es el parámetro que aporta más información sobre la agresividad del mismo.

No obstante, es evidente que el grado de acierto dependerá del tipo de sales que contiene el suelo, de la variación de la humedad con el tiempo, y de la diferencia de resistividad entre distintas zonas del mismo tubo.

Con las reservas citadas, lo que sí parece aceptarse unánimemente es que cuando la resistividad es muy alta los riesgos de corrosión son mínimos.

Según Steinrath, la aportación al riesgo de corrosión por la medida de resistividad es mínima a partir de 10.000  $\Sigma$  cm, mientras que la norma AFNOR rebaja este valor a 5.000  $\Sigma$  cm.

La norma UNE-EN 12501-2 adopta también el valor de 10.000  $\Omega$  cm como guía.

## **Tuberías de acero revestido**

Es frecuente que las tuberías de acero lleven un buen revestimiento y además se equipen con sistemas complementarios de protección catódica.

Cuando, por la importancia de la tubería se acude a la solución de máxima garantía (buen recubrimiento y protección catódica), el estudio del suelo pasa a un segundo plano, y sirve tan solo para un dimensionado correcto de los sistemas de protección.

## **Tuberías de fundición**

En el caso de tuberías de fundición, nos encontramos frente a un material, al que los recubrimientos de zinc complementados con pintura bituminosa, le proporcionan una resistencia a la corrosión superior a la del acero protegido mediante revestimientos externos pasivos. Estas tuberías de fundición presentan, normalmente discontinuidad eléctrica entre tubos.

Cuando el terreno es muy agresivo o se teme el efecto de las corrientes vagabundas, existen dos posibilidades distintas de actuación complementaria, que cuentan con argumentos contrapuestos.

La primera consiste en hacer un estudio del terreno, montar protección suplementaria con mangas de polietileno en algunos tubos aislados en terrenos muy agresivos, y mantener la discontinuidad eléctrica. Con esta teoría se disminuye el riesgo de la corrosividad relativa y, al aumentar la resistencia longitudinal, se disminuye el riesgo de que se canalicen las corrientes vagabundas. Asimismo, aunque se produzcan pequeños desgarros en las mangas de polietileno, el agua que penetra dentro puede propiciar ataques no muy severos.

La otra forma de enfocar el problema se basa en que, pese a lo anterior, en algunos casos, se producen fenómenos de corrosión en los tubos (bien por condiciones especialmente severas, bien por corrientes vagabundas). En estas ocasiones es imposible la aplicación de la protección catódica si no es dando continuidad al tubo y evitando las mangas de polietileno.

En efecto, éstas dificultan la protección catódica al no estar adheridas e impedir que la corriente de protección penetre mucho más allá del defecto de la manga.

Lo recomendable es, entonces, puentear los tubos revestidos con zinc y pintura bituminosa o algún recubrimiento bien adherido de superior calidad y, donde parezca oportuno, mantener la separación eléctrica y dejar dos cables en superficie para poderlos puentear en el futuro si es preciso.

De esta manera, si en posteriores lecturas de potencial se aprecian riesgos por corrientes vagabundas, o se detectan ataques por corrosión, es posible aplicar un sistema de protección catódica de forma simple.

## **Tuberías de hormigón armado**

En las tuberías de hormigón armado, tanto la camisa de chapa como las armaduras deben quedar pasivadas por el mortero y, en teoría, no deben existir fenómenos de corrosión.

No obstante, como también se dan casos de corrosión, también aparece la inquietud de conocer la agresividad del terreno.

Como en el caso de la fundición, existen instalaciones con y sin continuidad eléctrica, aunque hay matices específicos.

El principal es que la protección que proporciona el hormigón por pasivación puede verse afectada por otros motivos, pudiendo deducirse si existe esta pasivación a partir de medidas de potencial.

Por ello parece fuera de toda duda el interés en puentear los tubos y, en todo caso, tener la posibilidad de separar o unir tramos mediante cables exteriores.

Si se puentean los tubos debe ser con cables de suficiente sección y con conexiones de baja resistencia para no incrementar en exceso la resistencia longitudinal del tubo.

En cuanto al control de la pasivación o aplicación de protección catódica, pueden existir varias opciones.

Si, por existir probabilidades elevadas de corrosión en muchos tramos, o por querer una garantía de resultados, se decide incorporar, ya de origen, un sistema de protección catódica, la vía más favorable para tubos de cierta longitud es la instalación de sistemas de corriente impresa.

En las zonas con riesgo de corrosión más bajo se pueden dejar tomas de potencial, y especificar un seguimiento con controles del potencial. En el caso de que se detectaran problemas de falta de pasivación o de corrientes vagabundas, también se puede así montar un sistema de protección catódica por corriente impresa de modo simple.

Finalmente, si no aparecen zonas con riesgo de corrosión importante, o no se desea montar protección catódica de inicio, se recomienda preparar la instalación para, como mínimo, poder controlarla.

## Principios de la corrosión

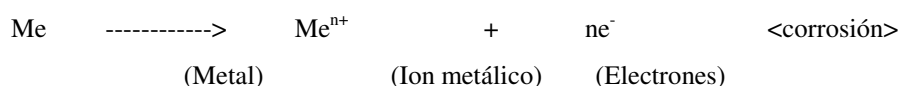
### Mecanismo de la corrosión

Razones termodinámicas motivan que los metales que se han obtenido a partir de sus minerales en la naturaleza tiendan, en su uso normal, a volver al estado combinado. El fenómeno que conduce al deterioro progresivo de las propiedades metálicas queda designado por el término corrosión.

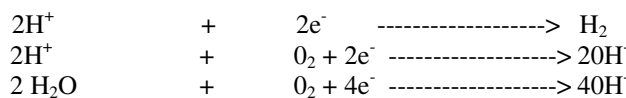
*La corrosión es casi siempre de naturaleza electroquímica*, esto es, una corriente eléctrica que circula entre determinadas zonas de la superficie del metal, conocidas con el nombre de ánodos y cátodos, a través de una solución llamada electrólito capaz de conducir dicha corriente. Este conjunto constituye micro o macro pilas en las que *la zona anódica es la que sufre los efectos de la corrosión*.

Cuando los átomos del ánodo se disuelven para formar iones, los electrones que dejan libres hacen al ánodo negativo con respecto a la solución. Sus electrones pasan al cátodo a través de la masa metálica y allí neutralizan a los iones positivos. La corrosión, por tanto, es sostenida por procesos simultáneos anódicos y catódicos.

Reacciones anódicas:



Reacciones catódicas:

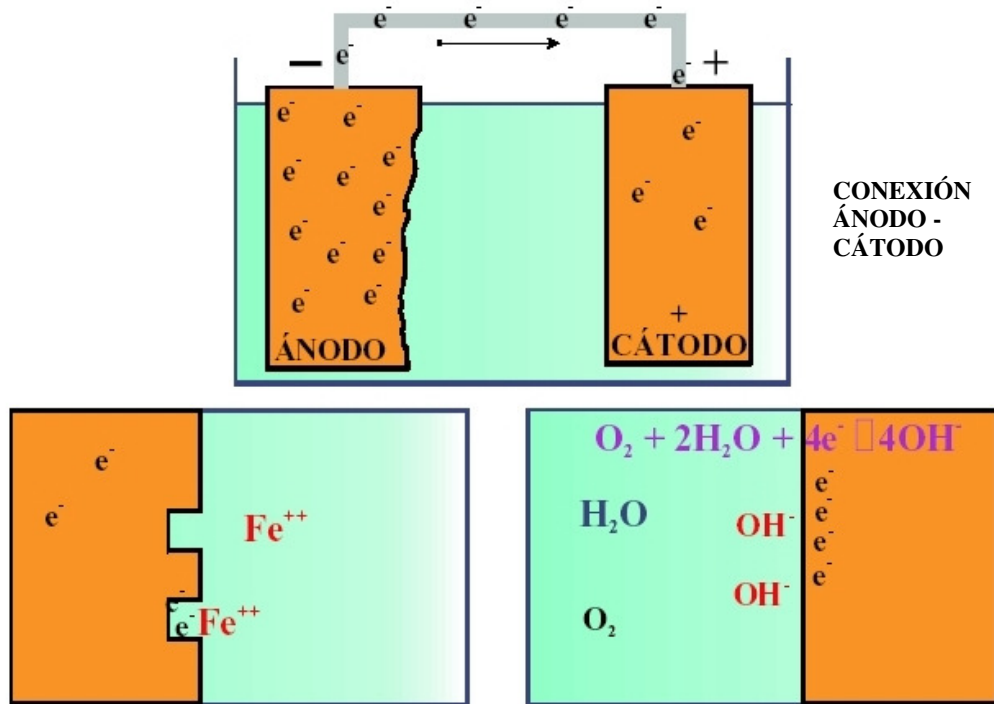


Esta corrosión de tipo electroquímico, característica de estructuras sumergidas o enterradas, es sumamente peligrosa, no por la pérdida de metal en sí, que suele ser pequeña, sino por tratarse de una corrosión localizada que puede ser origen de picaduras profundas.

Para que exista corrosión hemos visto la necesidad de que existan simultáneamente ánodos, cátodos y un electrólito.

Estos ánodos y cátodos son micro o macropilas con una diferencia de potencial entre sus dos semielementos.

*Las micropilas pueden tener su origen en el metal o en el electrólito*, siendo en cada caso provocadas por varios motivos.



*El mecanismo de la corrosión*

### Características del metal

Para que existan *micropilas en el metal*, es necesaria la presencia de heterogeneidades que pueden ser de varios tipos:

- de *construcción*: metales o aleaciones polifásicas.
- de *estructura*: fina, gruesa, deformada, etc.
- *mecánicas*: creadas por tensiones externas o internas.
- debidas a *diferentes estados superficiales*: grado de pulido, rayas, acoplamientos, óxidos.

En las tuberías metálicas enterradas los mayores riesgos se deben a los fallos del revestimiento.

### Características del medio corrosivo

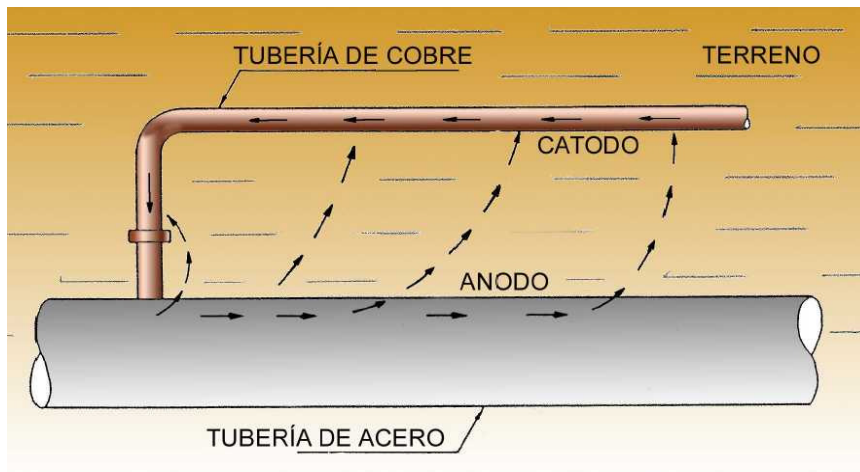
Las *micropilas debidas al electrolito* o medio corrosivo pueden resultar de diferencias de temperatura, pH, concentración y, en particular, de diferencias en el contenido de oxígeno, formando las pilas de aireación diferencial que son una fuente importantísima de fenómenos de corrosión.

*El reparto no uniforme de oxígeno es un importante factor de corrosión, independientemente de la naturaleza del metal*; las partes más aireadas funcionan como cátodos y las menos aireadas (rayas, entrantes agudos, uniones con radio de curvatura insuficiente, etc.) como ánodos, y son, por consiguiente, atacados (Fig. 2).

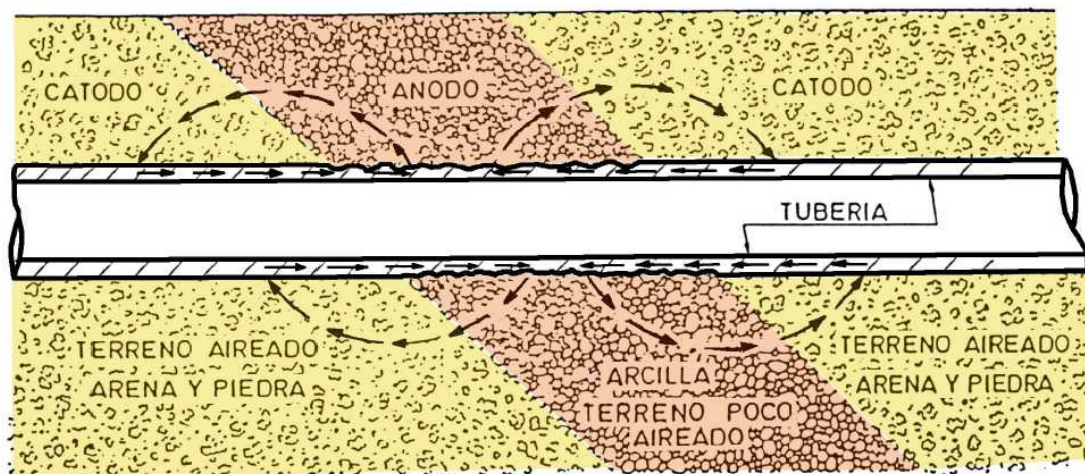


*Pilas de corrosión por diferencias de humedad y aireación*

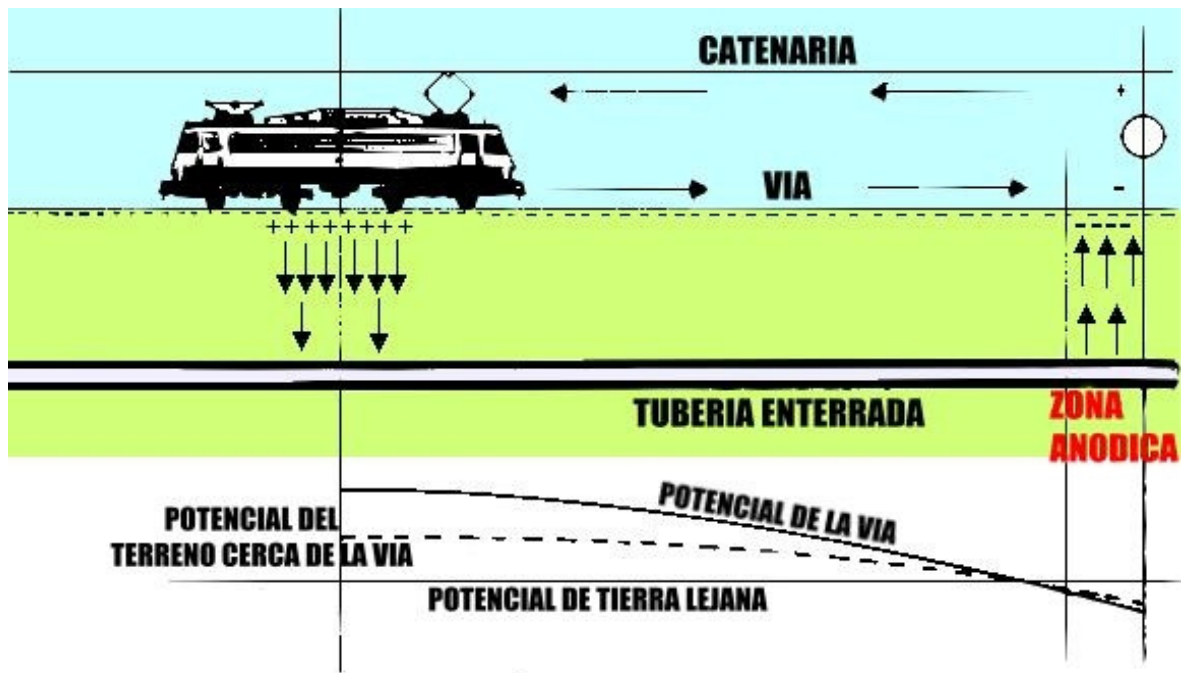
Las macropilas tienen su origen, por ejemplo, en uniones de metales distintos, o en diferencias de resistividad de suelos, o en el efecto de corrientes vagabundas.



*Uniones de metales distintos*



*Diferencias de resistividad del suelo*



Corrientes vagabundas

## Métodos de protección

Hemos descrito el mecanismo de corrosión electroquímica que se produce siempre, excepto en la oxidación a elevadas temperaturas.

Por lo tanto, para luchar contra la corrosión debemos eliminar, o separar de los otros dos, uno de los tres elementos citados: ánodo, cátodo y electrólito.

Si *distinguimos entre corrosión atmosférica y corrosión de estructuras enterradas y sumergidas* podemos también distinguir los métodos de protección.

En el caso de metales situados en una atmósfera agresiva, el electrólito es la zona húmeda cercana al metal, que no podemos modificar excepto en ciertos casos mediante inhibidores en fase vapor. No podemos tampoco emplear la protección catódica clásica. Nos queda pues tan solo el diseño y selección de metales y el empleo de recubrimientos protectores que separen el electrólito de los ánodos y cátodos y en algunos casos tengan además un carácter activo como el galvanizado.

Cuando se trata de estructuras enterradas, además de lo anterior podemos aplicar la protección catódica y raramente modificar el electrólito.

Finalmente, en estructuras sumergidas podemos actuar como en estructuras enterradas y, en muchos casos, modificar el electrólito. Por ejemplo, en el tratamiento químico del agua de una caldera.

Podemos subdividir los métodos a emplear como sigue.

### Métodos de diseño

Al proyectar cualquier estructura metálica deberán seleccionarse ante todo los materiales a emplear, teniendo la precaución, en el caso de trabajar con materiales con potenciales electroquímicos distintos, de aislarlos eléctricamente.

Es fundamental que las tuberías metálicas enterradas no se conecten a metales enterrados más nobles como el cobre de las tomas de tierra o armaduras de hormigón armado.

Asimismo el diseño debe evitar las situaciones que propicie pilas de corrosión.

### *Recubrimientos protectores*

Entendemos como recubrimiento protector aquel que intenta evitar el contacto entre el electrólito y el metal.

Este recubrimiento puede ser metálico por inmersión, proyección, electrodeposición o deposición química; buscando recubrir el metal base con otro inatacable en el medio en cuestión, o que forma con él productos de corrosión pasivantes.

Otro método consiste en variar la composición de la superficie metálica con un anodizado, fosfatado, cromatado, pavonado, aplicación de un estabilizador de óxido, etc.

Asimismo pueden utilizarse recubrimientos inorgánicos como vitrificados, silicatos de zinc, cemento, o bien recubrimientos orgánicos aplicados en frío o en caliente, siendo estos últimos los más empleados en estructuras enterradas.

Los recubrimientos orgánicos deberían reunir las condiciones siguientes para constituir una solución idónea:

- Perfecta adherencia a la superficie metálica, tanto en la aplicación como durante la vida útil.
- Ser compactos y no porosos.
- Poder dieléctrico elevado.
- No absorber humedad.
- Dureza para evitar su rotura (lo que ocasiona que quede la superficie metálica al descubierto).
- Elasticidad para absorber las dilataciones del metal base, sin fisurarse.
- Inalterabilidad frente a los agentes químicos
- Inerte ante hongos y bacterias.

En las tuberías enterradas, es imposible garantizar que el recubrimiento no ha sufrido daños durante la instalación.

### *Métodos electroquímicos*

Pueden citarse: protección anódica, protección catódica y canalización de corriente vagabundas, lo que no es mas que un caso particular de protección catódica.

De ellos, la protección catódica es el método mas extendido y tiene un gran campo de aplicación en los metales enterrados o sumergidos y en los recipientes que contienen líquidos.

En las tuberías metálicas enterradas la protección catódica es un excelente complemento de los recubrimientos.

## **Corrientes vagabundas**

### **Introducción**

Los metales enterrados, sumergidos o formando parte de sistemas que contienen ciertos fluidos, pueden sufrir ataques severos por corrosión, debidos a la circulación no deseada de corriente continua entre el metal y el medio que le rodea.

Cuando un metal está en contacto con un electrolito como el suelo húmedo, el agua, el hormigón, etc, sufre un ataque por corrosión cuando circula corriente continua del metal al electrolito.

Esta salida de corriente en las zonas anódicas disuelve el metal, dándonos la Ley de Faraday la velocidad del ataque, que en el caso del hierro es de 9.1 Kgs por año para una intensidad de un amperio.





Esta salida de corriente anódica se produce en todos los procesos de corrosión electroquímica a causa de las distintas pilas de corrosión, como por ejemplo las pilas galvánicas, pilas de aireación diferencial, pilas debidas a heterogeneidad del metal, etc.

En el caso de que la circulación de corriente se deba a una causa externa al sistema, como por ejemplo al estar nuestra estructura cerca de un ferrocarril electrificado alimentado en continua, el fenómeno puede ser muy intenso y se conoce como corrosión por corrientes vagabundas o corrientes erráticas por corriente continua.

Dicho fenómeno puede ser particularmente importante en el caso de estructuras enterradas o sumergidas de longitudes importantes que propicien la circulación de la corriente continua por ellas, como por ejemplo tuberías enterradas.

### **Normativa sobre corrientes vagabundas**

En los últimos años el CEN (Comité Europeo de Normalización) está trabajando en la elaboración de las Normas Técnicas sobre corrientes vagabundas que citamos a continuación.

UNE-EN 50122-2 *Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Parte 2: Medidas de protección contra los efectos de las corrientes vagabundas producidas por los sistemas de tracción de corriente continua (enero 1999).*

prEN 50162 *Protection against corrosion by stray current from direct current systems.* Este proyecto de norma podría convertirse en Norma UNE en un plazo relativamente corto.

En los próximos puntos destacaremos algunos aspectos relevantes que consideramos importantes de los dos documentos citados.

### **Riesgo de corrientes vagabundas**

Las corrientes vagabundas pueden ser producidas por un sistema de corriente continua como ferrocarriles electrificados de corriente continua, tranvías, metro, sistemas industriales de corriente continua, sistemas de protección catódica ajenos o sistemas de transmisión de corriente continua de alta tensión.

El problema se produce cuando parte de la corriente continua del sistema circula fuera de los caminos previstos y produce reacciones anódicas por salidas de corriente continua en la estructura afectada.

## Intercambio de información, identificación y medición de corrientes vagabundas

Las primeras actuaciones para prevenir los problemas por corrientes vagabundas, deben adoptarse en la fase de proyecto de sistemas que puedan generar o sufrir dichos problemas. Es esencial el intercambio de información y la colaboración entre los distintos responsables de instalaciones que pueden estar implicados, que en muchos casos realizarán previsiones para poder controlar posteriormente los sistemas.

En instalaciones existentes, el principal método que se puede utilizar para identificar las corrientes vagabundas, son mediciones de potencial de las estructuras enterradas o sumergidas respecto al medio que les rodea, para localizar fluctuaciones o desviaciones respecto a los valores normales. También pueden medirse gradientes de potencial en el medio y en algunos casos intensidades de corriente.

## Criterios de interferencia por corrientes vagabundas

En el caso de estructuras sin protección catódica, la Tabla que incluimos a continuación (extraída del prEN 50162 ) indica los valores máximos de variación anódica del potencial admisible.

En el caso de estructuras protegidas catódicamente, la prEN 50162 indica que no puede admitirse ninguna interferencia que impida el cumplimiento del criterio de protección catódica libre de IR de la UNE-EN-12954. La definición de estos criterios es muy importante pues permitirá concretar cuándo una interferencia representa un riesgo de corrosión importante y por lo tanto definir si es preciso o no intervenir.

*Máxima variación del potencial aceptable para estructuras enterradas o sumergidas sin protección catódica*

<i>Metal de la estructura.</i>	<i>Resistividad electrolito <math>\rho(\Omega Am)</math></i>	<i>Máxima variación positiva del potencial <math>\Delta U</math> (mV) (incluido IR-caída de tensión)</i>	<i>Desplazamiento máximo de potencial positivo <math>\Delta U</math> (mV) (excluido IR-caída de tensión)</i>
	> 200	300	20
Acero, fundición	15 – 200	1.5 x $\rho^*$	20
	<15	20	20
Plomo		1 x $\rho^*$	
Acero en estructuras enterradas de hormigón		200	

*\*  $\rho$  in  $\Omega.m$*

*Nota: La máxima variación positiva del potencial aceptable (IR-caída de tensión incluida) depende de la resistividad, pues la caída IR aumenta al aumentar la resistividad.*

## Reducción de las corrientes vagabundas

*Actuando sobre el foco emisor*

Para el caso más importante, debido a los sistemas de tracción, la UNE-EN 50122-2 define las precauciones principales que deben cumplir estas instalaciones para minimizar la emisión de corrientes vagabundas. Para limitar el riesgo de corrientes vagabundas debido a los sistemas de protección catódica, se recomienda disminuir la salida de corriente de los rectificadores, ( en algunos casos aumentando el número de equipos y lechos de ánodos ), equipar las estructuras a proteger con buenos revestimientos e instalar los lechos de ánodos lejos de las estructuras vecinas. Para otros posibles focos de corrientes vagabundas, la prEN 50162 establece las recomendaciones a seguir.

Actuando sobre la estructura afectada

Los principales métodos para disminuir los efectos de las corrientes vagabundas en una estructura se basan en los siguientes puntos:

Mejorar el revestimiento en algunas zonas de la estructura afectada

No instalar las estructuras cerca de los posibles focos de corrientes vagabundas.

Instalación de equipos específicos (sistemas de drenaje o de protección catódica por corriente impresa)

Modificar la continuidad eléctrica de las estructuras afectadas.

## Protección catódica

### Introducción

La protección catódica es uno de los métodos electroquímicos de que disponemos para luchar contra la corrosión.

El diagrama de Pourbaix refleja el comportamiento del hierro frente a la corrosión, en función de su potencial respecto al electrodo normal de hidrógeno y su pH.

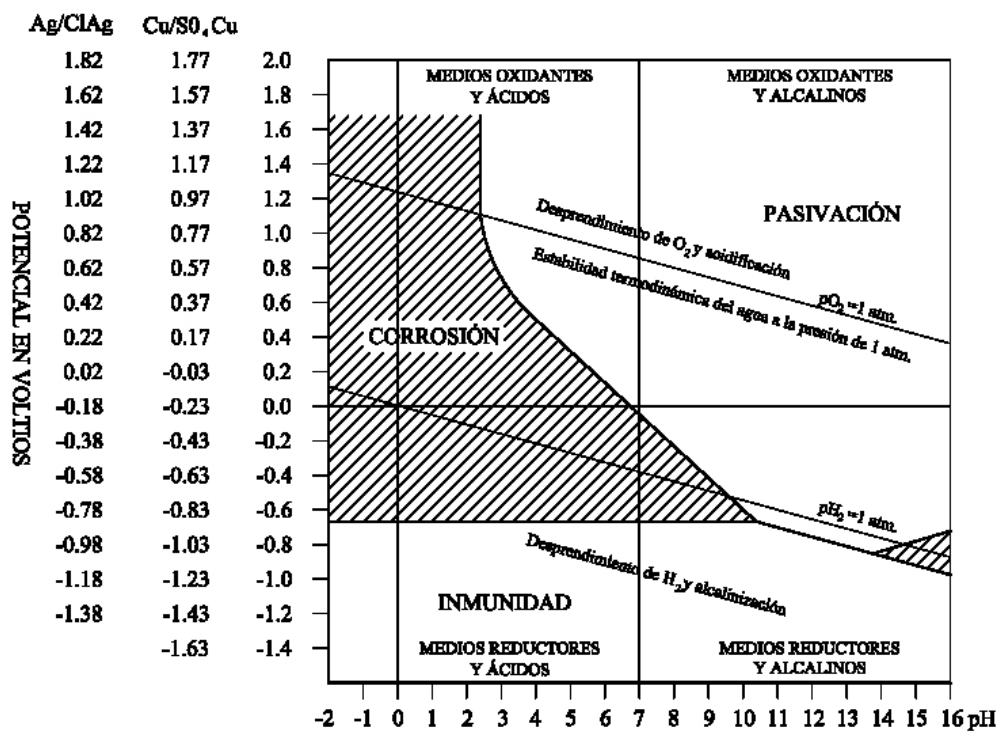


Diagrama de Pourbaix

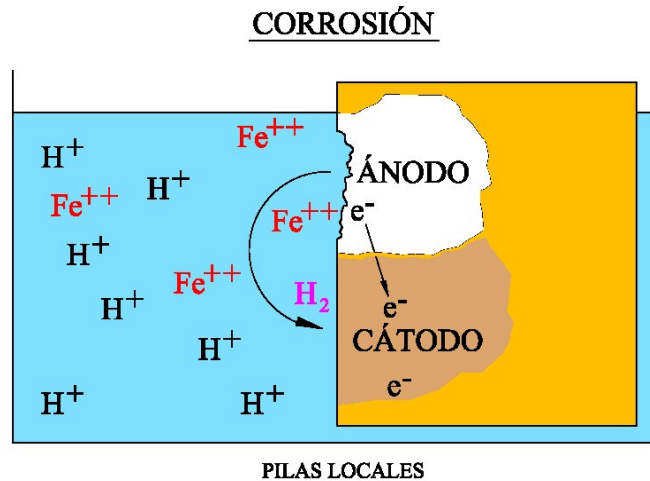
Este diagrama representa las circunstancias teóricas de corrosión, de pasivación y de inmunidad del hierro en presencia de una solución acuosa de 25 EC. El examen de este diagrama muestra la posibilidad de proteger al hierro por los tres métodos siguientes:

- Elevar el potencial hasta situarse en la zona de pasivación mediante la protección anódica.
- Alcalinizar el medio hasta superar el pH frontera entre la zona de corrosión y la de pasivación.
- Rebajar el potencial para situarse en la zona de inmunidad mediante la protección catódica.

## Fundamentos de la protección catódica

La protección catódica consiste en convertir en cátodo toda la superficie metálica a proteger, consiguiendo que por toda ella penetre corriente continua. Por medio de una corriente eléctrica aplicada exteriormente, la corrosión se reduce virtualmente a cero y se puede mantener una superficie metálica en un medio corrosivo, sin sufrir deterioro durante un tiempo indefinido. Su campo clásico de aplicación es en protección externa de estructuras metálicas sumergidas o enterradas y en protección interna de depósitos y grandes tubos que contengan agua. Cuando un metal se está corroyendo tiene multitud de ánodos y cátodos.

Cuando se produce un fenómeno de corrosión generalizada, ello es debido a que la pequeña diferencia de potencial de las micro pilas, permite que al formarse óxido sobre el ánodo éste se pasive lo suficiente para pasar a ser catódico frente a otra zona. Al alternarse las situaciones anódicas y catódicas el ataque es prácticamente uniforme. La figura adjunta representa un par ánodo-cátodo situado en el mismo trozo de metal sumergido.



*Par ánodo-cátodo situado en el mismo trozo de metal sumergido*

Vemos que a través del metal existe un flujo de electrones del ánodo al cátodo que es el que permite que continúe la corrosión. El sentido convencional de la corriente, inverso al de los electrones, es, pues, a través del metal del cátodo al ánodo, y en el electrolito sale corriente continua por el ánodo y entra por el cátodo.

En definitiva, vemos que en las zonas por las que sale corriente continua del metal al electrolito (los ánodos) hay corrosión, y en las zonas en las que penetra corriente continua del electrolito al metal (los cátodos) hay protección. Para lograr la protección catódica unimos nuestro conjunto de ánodos y cátodos a un ánodo exterior (figura adjunta), que sabemos que sufrirá corrosión, capaz de suministrar la suficiente corriente continua para que penetre por toda la superficie a proteger.

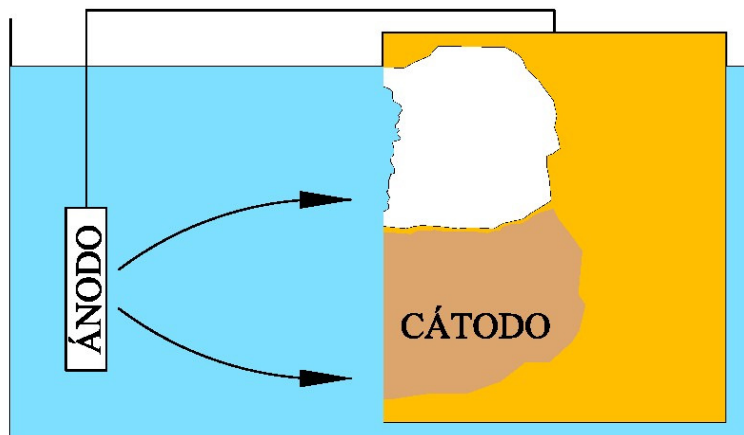
Podemos decir que la corriente que circulaba por el metal y salía del antiguo ánodo al electrolito, se ve ahora forzada, por la presencia del ánodo de la protección catódica, a seguir por el conductor, desapareciendo este antiguo ánodo que ahora actúa catódicamente.

Como el electrodo de hidrógeno que se utiliza en el diagrama de Pourbaix es un electrodo de laboratorio, no utilizable en campo, se dan los potenciales de protección con respecto a otros electrodos de referencia más manejables:

<i>POTENCIAL DE PROTECCIÓN (mV)</i>	<i>ELECTRODO DE REFERENCIA</i>
+220	Zinc puro
-620	Hidrógeno
-760	Ag/ClAg en agua salada saturada
-800	Ag/ClAg en agua de mar
-850	Cu/SO <sub>4</sub> Cu
-860	Calomelanos saturado
-900	Calomelanos 1 N

*NOTA: Este criterio de protección "habitual" varía en algunos casos.*

## PROTECCIÓN CATÓDICA



*Unión de ánodos y cátodos a un ánodo exterior*

### **Tipos de protección catódica**

Para conseguir la protección catódica necesitamos conectar con la estructura a proteger algún elemento que tenga una diferencia de potencial con la misma, suficiente para hacer circular la corriente en el sentido deseado.

Si observamos la serie electroquímica de los metales de la tabla adjunta, vemos que están ordenados según sus potenciales tomando como cero el Hidrógeno.

*Características de los metales*

<i>IONES</i>	<i>POTENCIAL</i>	<i>IONES</i>	<i>POTENCIAL</i>
Li <sup>+</sup>	-3.022	Ni <sup>++</sup>	-0.22
Rb <sup>+</sup>	-2.924	Sn <sup>++</sup>	-0.136
K <sup>+</sup>	-2.925	Pb <sup>++</sup>	-0.129
Na <sup>+</sup>	-2.715	H <sup>++</sup>	∇0.000
Mg <sup>+</sup>	-1.866	Bi <sup>+++</sup>	+0.226
Al <sup>+++</sup>	-1.67	Cu <sup>++</sup>	+0.344
Zn <sup>++</sup>	-0.762	Te <sup>++++</sup>	+0.558
Cr <sup>++</sup>	-0.71	Hg <sup>++</sup>	+0.798
Fe <sup>++</sup>	-0.441	Ag <sup>+</sup>	+0.799
Cd <sup>++</sup>	-0.397	Pt <sup>++</sup>	+1.2
Ti <sup>+</sup>	-0.336	Au <sup>+++</sup>	+1.42
Co <sup>++</sup>	-0.29		

Si conectamos un trozo de hierro cuyo potencial es de -0.441 V, con un trozo de zinc cuyo potencial es de -0.762 V, la diferencia existente establecerá una corriente eléctrica a través del electrolito, del zinc (ánodo) al hierro (cátodo). Estamos realizando la protección catódica del hierro sacrificando un trozo de zinc. Este método se denomina *protección catódica por ánodos de sacrificio* y se consigue uniendo el metal a proteger con otro que sea más electronegativo que él en la tabla anterior.

Observamos que la diferencia de potencial de que disponemos en el ejemplo anterior es de unos 320 mV, que divididos por la resistencia eléctrica del circuito nos da la intensidad disponible. En la tabla adjunta se da una visión más práctica de las pilas galvánicas.

## Pilas galvánicas

	Potencial Corrosión [mV]	
Cobre. Acero en hormigón.	+ 50 a -100 -100 a -200	Atacan al hierro.
Acero/fundición en arena lavada. Acero/fundición en suelos mixtos. Acero/fundición en suelos arcillosos.	-400 a -450 -450 a -600 -600 a -800	Hierro enterrado.
Zinc. Magnesio.	-900 a -1100 -1100 a -1700	Protegen al hierro.

Si por ser la resistencia elevada, o por ser la intensidad necesaria alta, tenemos dificultades con los ánodos de sacrificio, podemos usar como ánodo cualquier metal que nos convenga y lograr la diferencia de potencial necesaria con una fuente de corriente continua cuyo negativo conectaremos a la estructura a proteger. Este método se denomina *protección catódica por corriente impresa* o corriente forzada.

## Cálculo de una instalación de protección catódica

Para conseguir que la estructura a proteger alcance el nivel de protección de -0.85 V respecto al electrodo de referencia de Cu/SO<sub>4</sub>Cu debemos determinar que intensidad de corriente será necesaria. La intensidad necesaria dependerá evidentemente de la superficie a proteger, pero además influyen una multitud de factores suplementarios relacionadas con el electrolito (naturaleza, temperatura, agitación aireación, etc.) y con el metal a proteger (naturaleza, tipo de recubrimiento, estado superficial, dimensiones, etc.). La intensidad total necesaria será pues el producto de la superficie a proteger en m<sup>2</sup> y la *densidad de corriente* precisa en mA/m<sup>2</sup>.

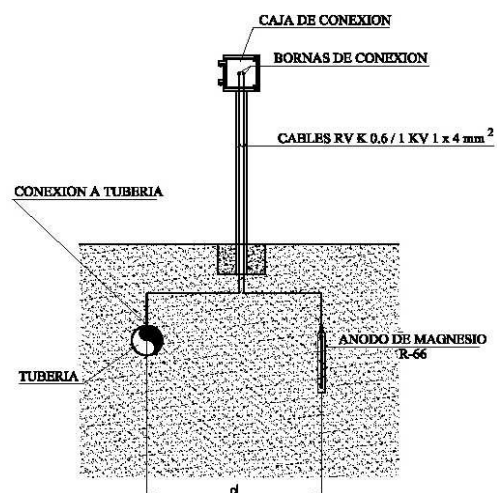
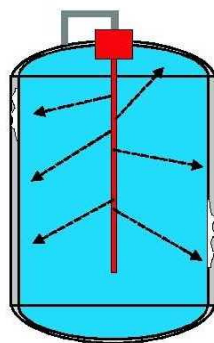
## Protección por ánodos de sacrificio

Al proyectar un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio tenemos un dato que nos viene impuesto, que es el potencial del ánodo y que depende del tipo de ánodo escogido. Los ánodos de sacrificio mas comúnmente empleados son los formados por *aleaciones de zinc, magnesio y aluminio*.

$$i = \frac{V_{MG} - 0.85}{R}$$

DEPENDE DEL AGUA

$$VIDA (AÑOS) = K \frac{PESO}{i \cdot \text{ÁNODO}}$$



Protección catódica por ánodos de sacrificio

## Campos de utilización de los ánodos de sacrificio

### Zinc

El valor relativamente elevado de su potencial de disolución implica un alto rendimiento de corriente, una disminución muy controlada del potencial de la estructura a proteger y una alcalinización muy pequeña del medio en contacto con esa estructura.

Uno de los factores que más puede limitar la utilización del zinc es la resistividad del medio agresivo, y por ello *es aconsejable que su empleo quede limitado para resistividades inferiores a los 1000  $\Omega\text{cm}$ .*

También debe cuidarse su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas por encima de 65 EC, ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero, o en todo caso quedar pasivado por los carbonatos precipitados.

Como ánodo de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar: buques, pantalanes, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas petrolíferas, depósitos de agua, condensadores, etc. También se utiliza en suelos de baja resistividad.

### Aluminio

Por su situación en la serie electroquímica, el aluminio es el metal más idóneo para la realización de la protección catódica, intermedio entre el zinc y el magnesio, con una elevada capacidad de corriente. Su *utilización es en el campo naval*: su elevada capacidad de corriente hace que un solo ánodo de aluminio pueda ejercer la acción de tres de zinc de iguales características, para una misma duración del ánodo.

Estas circunstancias han motivado que estos ánodos estén siendo muy utilizados para la protección catódica de tanques de lastre y carga-lastre de petroleros.

Aunque el precio del aluminio es algo más elevado que el del zinc, al necesitar menos ánodos, esta diferencia se compensa; pero además si se considera el ahorro en mano de obra de colocación de los ánodos, el aluminio puede llegar incluso a ser más económico.

El campo de utilización de estos ánodos es, en principio, semejante al de los de zinc, siendo su comportamiento altamente satisfactorio en la protección catódica de estructuras sumergidas en aguas dulces, sobre todo el de la aleación Al-In de la cual se tiene una gran experiencia.

### Magnesio

El magnesio es un elemento muy reactivo lo que implica una capacidad de proporcionar una densidad de corriente elevada, a costa de consumirse con gran rapidez.

Por ello su principal aplicación es en el caso de ánodos *enterrados en suelos de resistividades más elevadas* (2000 a 5000  $\Omega \times \text{cm}$ ).

Otro importante campo de aplicación son los *acumuladores de agua caliente* sanitaria aunque suele limitarse a depósitos pequeños y bien revestidos.

### Ánodos enterrados

Cuando un ánodo de sacrificio se utiliza para la protección de una estructura enterrada conviene asegurarse que trabajará en las mejores condiciones. En general los ánodos suelen rodearse con mezcla activadora (formada por una combinación de bentonita, yeso y sales). Con ello se consiguen tres objetivos:

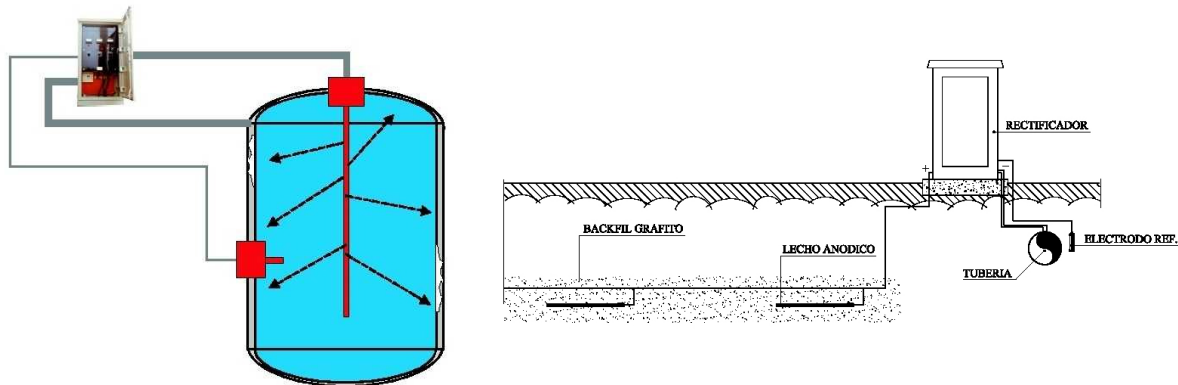
- a) Aumentar la superficie de contacto con el terreno.
- b) Mantener un cierto grado de humedad alrededor del ánodo.
- c) Evitar la pasivación del ánodo con el paso del tiempo.

La utilización de mezcla activadora es fundamental en ánodos enterrados, pudiendo tan solo instalarse sin backfill para resistividades muy bajas en terrenos anegados.

Los ánodos de sacrificio no deben utilizarse para proteger tuberías enterradas si las necesidades de corriente son elevadas y si el suelo tiene una resistividad elevada.

## Protección catódica por corriente impresa

La característica fundamental de un sistema de corriente impresa es que la fuente de energía para proteger la estructura es externa. Generalmente se trata de rectificadores de corriente continua. Lógicamente, la ventaja de esta opción es que puede controlarse exteriormente la fuente de alimentación.



*Protección catódica por corriente impresa*

### *Tipos de ánodos*

Distinguimos entre ánodos *consumibles* y *permanentes*. En realidad todos los ánodos se *gastan* en cierta manera al *sacar* corriente. Consideramos permanentes aquellos ánodos cuya pérdida de material por corrosión es despreciable.

Ánodos consumibles son, principalmente, Fe y Al.

Ánodos permanentes son, Grafito, FeSi, PbAg, TiPt, Ti Metal Mixed Oxides, (MMO) cerámicos, tántalo platinado, etc.

Los ánodos consumibles se utilizan al ser su coste inferior, y ser fácilmente sustituibles. Sirva de ejemplo la protección catódica de buques en armamento para lo que se suelen sumergir en el mar trozos de chatarra de gran disponibilidad en los astilleros conectados al positivo del rectificador.

En ocasiones también se utilizan carriles u otro tipo de chatarra enterrándolos, aunque los gastos de obra civil para su sustitución no hacen rentable el sistema si la intensidad a disipar es importante. También se utilizan ánodos consumibles de aluminio en corriente impresa, en algunas aplicaciones en agua dulce caliente. Realizando la protección catódica de un depósito metálico, se consigue además un segundo efecto de tratamiento electrolítico del agua que consigue, con los productos de corrosión del aluminio, la protección contra la corrosión e incrustación de las tuberías de galvanizado del resto del circuito.

En general, los ánodos mas utilizados son los de tipo permanente. En instalaciones enterradas se suelen utilizar de titanio MMO, ferrosilicio o grafito, rodeados de un backfill que mejora sus condiciones de trabajo. (El backfill es un tipo de carbón que mejora la superficie de contacto, reduce la resistencia con el terreno y permite la difusión de los gases producidos en las reacciones anódicas).

Cuando los ánodos están sumergidos no llevan backfill, y suelen emplearse de titanio-platinado, tántalo-platinado, plomo-plata, plomo-platino, ferrosilicio o titanio MMO. También se utilizan ánodos continuos de polímeros y carbono, aunque tienen poca capacidad de salida de corriente. La Tabla adjunta compara distintos tipos de ánodos para corriente impresa.

### *Características de distintos tipos de ánodos*

	<i>Ti Metal Mixed Oxides</i>	<i>Pt/Ti</i>	<i>Grafito</i>	<i>Pb/Ag</i>	<i>Fe/Si</i>	<i>Magnetita</i>
<i>Densidad [gr/cm<sup>3</sup>]</i>	4-6	4-6	1-3	12	8	3-5
<i>Densidad de corriente Normal [mA/cm<sup>2</sup>]</i>	80-100	30-80	0.1-0.4	6-18	1-2	8-10
<i>[mg/A año]</i>	4-5	6	250.10	68.10 <sup>3</sup>	250.10 <sup>3</sup>	1,5.10 <sup>3</sup>



## *Rectificadores*

Según sea su modo de funcionamiento podemos distinguir entre rectificadores manuales o automáticos. En estos últimos es un electrodo de referencia el que controla el sistema, midiendo constantemente el potencial de la estructura a proteger.

# **Protección catódica externa de tuberías enterradas**

## **Introducción**

La mejor garantía para evitar la corrosión externa de una tubería de acero enterrada es la combinación de un buen revestimiento y de un sistema correcto de protección catódica, siendo la protección catódica recomendable tanto para obra nueva como para tubos existentes que reúnan los requisitos necesarios.

En ciertos casos también se instalan sistemas de protección catódica para los tubos de hormigón armado con camisa de chapa siempre que tengan una buena continuidad eléctrica longitudinal, siendo menos frecuente que para las tuberías de acero.

La protección catódica de las tuberías enterradas debe realizarse según la norma UNE-EN 12954 "*Protección catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Principios generales y aplicación para tuberías*".

## **Continuidad eléctrica**

Lógicamente, para que la protección catódica sea efectiva y no exista el riesgo de crear influencias no deseadas, los tubos a proteger deben tener continuidad longitudinal y estar conectados al negativo del rectificador en el caso de protección catódica por corriente impresa.

Ello no suele ser un problema en las tuberías de acero, normalmente con uniones soldadas entre los tubos.

En el caso de ciertas uniones embridadas o con otros tipos de conexión, debe garantizarse su continuidad eléctrica longitudinal instalando puentes de cable si es preciso. Estos cables deben asegurar una baja resistencia longitudinal de los tubos, para lo que deben tener suficiente sección y conexiones de resistencia eléctrica despreciable. Es recomendable poner más de un cable para garantizar los resultados.

## **Proyecto**

Para optimizar el proyecto de la protección catódica de una tubería enterrada es necesaria la combinación de ciertas mediciones y observaciones realizadas sobre el terreno con los conocimientos y experiencia suficientes para desarrollar el proyecto.

Cuando se trata de la protección de tuberías nuevas bien revestidas, de pequeña longitud, es posible prescindir de los estudios de campo pues suele ser más interesante dimensionar el sistema con ciertas suposiciones.

## **Trabajos previos de campo**

Cuando las condiciones del proyecto así lo recomiendan, deben realizarse las siguientes operaciones:

Recorrido de la zona para observar los detalles fundamentales de tipos de terrenos, presencia de otras instalaciones, suministro eléctrico, accesos, etc.

Medidas de resistividad a ciertos intervalos de la traza cuya separación depende del punto anterior.

Medidas de resistividad en los posibles emplazamientos de ánodos.

Previsión de las posibles influencias de corrientes vagabundas debidas a elementos como líneas de tracción de corriente continua, sistemas de protección catódica por corriente impresa, etc. En algunos casos se recomienda realizar mediciones de campos eléctricos o registros de potencial en ciertas zonas de los raíles.

Cercanía de líneas de alta tensión y precauciones frente a fenómenos de conducción o inducción.

## **Dimensionamiento**

El primer punto a definir es la selección del método a utilizar, ánodos de sacrificio o corriente impresa. Desde un punto de vista práctico y de optimización de la inversión, los ánodos de sacrificio se suelen utilizar tan solo para suelos de resistividad hasta  $10.000 \Sigma \times \text{cm}$  y para pequeñas superficies enterradas y bien revestidas.

La intensidad de corriente total a instalar para alcanzar el criterio de Protección Catódica se obtiene multiplicando la superficie a proteger por una determinada densidad de corriente expresada en  $\text{mA/m}^2$  que dependerá del material de la tubería a proteger y de su revestimiento.

## **Criterio de protección**

El valor más frecuentemente empleado como criterio de protección catódica es conseguir que los potenciales reales de la tubería de acero respecto a un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$  sean más negativos de  $-0.85$  voltios.

Este criterio puede variar precisándose valores de  $-0.95$  voltios cuando existen condiciones anaerobias que posibiliten la presencia de bacterias sulfatoreductoras.

En ciertos suelos arenosos de muy alta resistividad pueden aceptarse valores menos negativos del orden de  $-0.75$  voltios.

En el caso de las tuberías de hormigón armado con camisa de chapa se utilizan otros criterios de protección que se desarrollan en el Anexo A.

## **Aislamiento de otras estructuras**

Para lograr la protección catódica de una tubería enterrada, ésta debe alcanzar el potencial de inmunidad.

Para conseguir este potencial debemos lograr que llegue suficiente corriente continua a las zonas del metal en contacto con el electrolito, por lo que la intensidad necesaria depende entre otros factores de la calidad del revestimiento.

Es por ello que el modo más económico y seguro de lograr la protección catódica de una tubería enterrada además de revestirla, es aislarla de otras estructuras enterradas que no deseemos proteger catódicamente.

En efecto, si nuestra tubería enterrada está comunicada eléctricamente con otras tuberías, armaduras de hormigón armado, redes de tierra de cobre, etc., las necesidades de corriente serán muy superiores y en ciertos casos difíciles de aplicar por tratarse de una estructura compleja. La protección catódica de las estructuras complejas se desarrolla en el Anexo B.

Para las tuberías de agua, deben tomarse ciertas precauciones al diseñar este aislamiento.

En efecto, debe evitarse que la corriente cortocircuite las juntas dieléctricas por el interior a través del agua, lo que acarrearía dos problemas. Por un lado, el aislamiento deja de ser efectivo y por otro lado se puede producir una corrosión acelerada en el interior de las tuberías, en el lado en el que salta la corriente continua del tubo al agua.

Para evitar este fenómeno deben instalarse carretes en el lado de la junta dieléctrica que corresponde al tramo de tubería que pretendemos proteger catódicamente.

Estos carretes deben ser de material aislante o revestirse internamente de modo que la columna de agua que deba recorrer la corriente sea suficientemente larga para presentar una resistencia eléctrica suficiente.

Lógicamente, la longitud del carrete depende de la resistividad del agua, del diámetro del tubo y de las condiciones de la instalación.

El carrete no debe situarse en el lado del tubo que no pretendemos proteger y que es aquel con riesgo de que salte la corriente del tubo al agua.

En el caso de tuberías de gran diámetro pintadas interiormente, es suficiente garantizar que la pintura interior, tanto de la junta aislante como del tramo de tubo situado cerca de la junta, esté en perfecto estado.

En general, el diámetro importante que suelen tener las tuberías enterradas de agua con protección catódica, hace que el tema de la junta dieléctrica no sea simple, recurriéndose en ciertos casos a elementos alternativos como juntas de dilatación que pueden realizar el mismo cometido.

## Control del potencial

Para controlar si los potenciales de la tubería alcanzan el Criterio de Protección es preciso que a ciertos intervalos (normalmente 1 Km.) existan tomas de potencial.

Una toma de potencial (TP) está formada por un cable conectado a la tubería enterrada y que tiene el otro extremo accesible y situado en el interior de una caja.

Ello permite conectar un polo del voltímetro a la tubería, conectándose el otro a un electrodo de referencia portátil que debe hacer buen contacto con el suelo natural que rodea al tubo.

El potencial que nos interesa medir es el que existe entre la tubería y un electrodo de referencia que debería situarse muy cerca de cada defecto del revestimiento, lo que en la práctica no es posible.

Para evitar los errores que representan los gradientes de potencial en el suelo, entre el electrodo de referencia y los fallos del revestimiento existen diversos métodos. Entre ellos podemos destacar las medidas ON-OFF, la instalación de electrodos probeta y otros ya aceptados o en desarrollo que persiguen la obtención del potencial real sin la influencia  $I \times R$  de los gradientes a través del suelo.

Las técnicas de medida en protección catódica se analizan en la norma UNE-EN 13509 "*Técnicas de medida en protección catódica*".

Es importante localizar los defectos principales del revestimiento una vez enterrados los tubos, para lo que existen diversos métodos entre los que destaca el DCVG que permite una gran precisión en la localización, incluso en presencia de corrientes vagabundas.

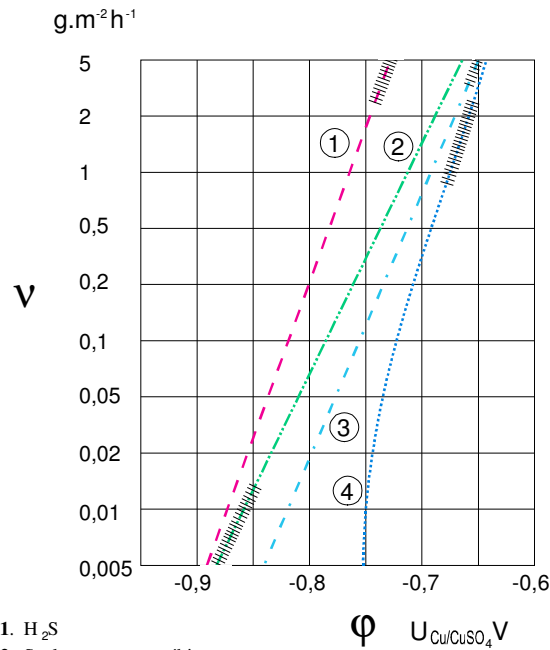
## Medidas de potencial

### Técnicas de medida en protección catódica

Una protección catódica correcta, permite asegurar que la velocidad de corrosión es inferior a 10 micras por año, lo que es despreciable desde un punto de vista práctico. En la figura adjunta, se observa que la velocidad de corrosión, aplicando protección catódica, depende del potencial de protección y del tipo de suelo.

Para asegurar una protección catódica correcta, debe alcanzarse el Criterio de Protección, es decir un potencial de protección real que normalmente es de -850 mV respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado. En la Tabla adjunta presentamos un resumen de los Criterios de Protección de la Norma UNE-EN 12954.

Todos los potenciales están libres de caída óhmica  $IR$  y se refieren a un electrodo de referencia cobre/sulfato de cobre saturado  $E_{Cu} = E_H - 0,32$  V. Lógicamente, para que la velocidad de corrosión sea inferior al valor admitido, debe cumplirse el Criterio de Protección en todos los puntos de la tubería enterrada en los que hay riesgo de corrosión a causa de los defectos del revestimiento. Un caso particular se presenta bajo los revestimientos despegados, en el que pensamos que pueden distinguirse tres posibilidades: (ver fig. adjunta).



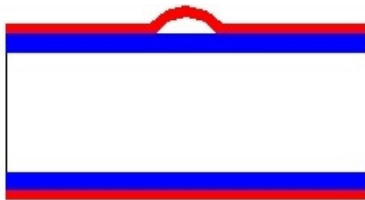
1. H<sub>2</sub>S
2. Suelo neutro anaeróbico
3. Arcilla
4. Suelo neutro aeróbico

Las zonas rayadas representan velocidades naturales de corrosión.

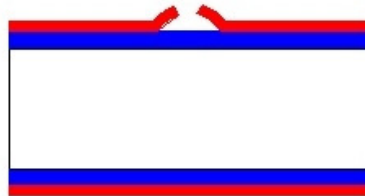
Velocidad de corrosión en función del potencial para distintos medios

Criterios de Protección de la Norma UNE-EN 12954

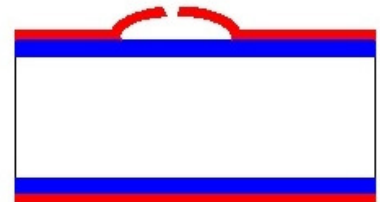
Metal o aleación metálica	Medio	Potencial libre de corrosión: $E_n$ (sin formación de pila de corrosión). Valor indicativo.	Potencial de protección $V$	
Materiales féreos no aleados o poco aleados con límite elástico 800 N·mm <sup>-2</sup>	Agua y suelos en condiciones aerobias.	Normal condition $T < 40^{\circ}\text{C}$	-0,65 a -0,40	-0,85
		$T > 60^{\circ}\text{C}$	-0,80 a -0,50	-0,95
	Suelo arenoso aireado	$100 < \Delta < 1000 \Sigma\text{m}$	-0,50 a -0,30	-0,75
		$\Delta > 1000 \Sigma\text{m}$	-0,40 a -0,20	-0,65
	Agua y suelos en condiciones anaerobias.		-0,80 a -0,65	-0,95



No hay defectos



Despegue pequeño y defecto grande



Despegue grande y defecto pequeño

Revestimiento despegado

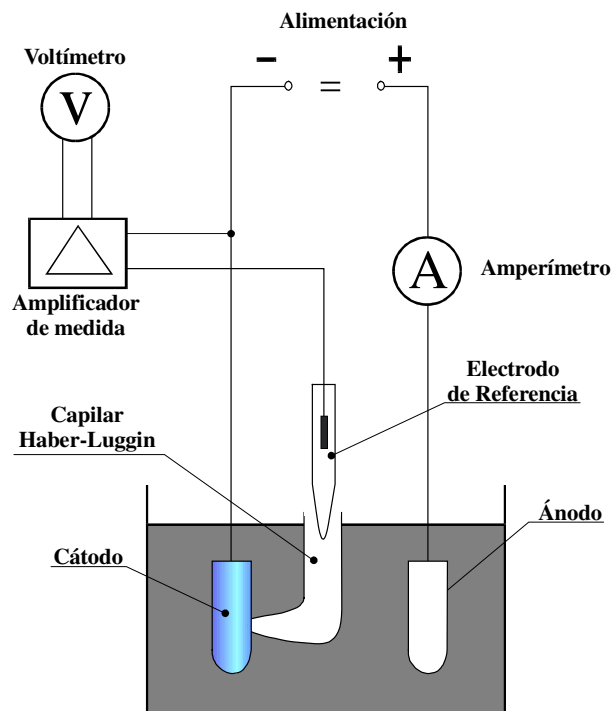
El revestimiento está despegado, pero no existe defecto. Puede producirse un efecto de apantallamiento para la protección catódica, pero es posible que la corrosión sea poco importante.

El revestimiento está despegado y existe un defecto del revestimiento. En este caso, la protección catódica puede ser eficaz o no en función de las condiciones, principalmente del tamaño del defecto y de la superficie despegada.

## Potencial real

En el laboratorio, existen métodos para medir los potenciales con errores despreciables, a base de realizar la medición justo en la superficie del metal en contacto con el medio agresivo. (ver fig. adjunta).

Sobre el terreno, al no ser posible este tipo de medidas, para asegurarse de que se alcanza el potencial real deseado hay que evitar los errores de medida provocados por los gradientes  $I \times R$  en el suelo. Estos errores de medida son debidos a las caídas de tensión en el suelo y dependen de la corriente que circula por el suelo y de la resistencia entre los defectos del revestimiento y el electrodo de referencia. La precisión de la lectura es mejor si la intensidad en el suelo es nula o si la resistencia entre el defecto y el electrodo es pequeña.



*Medida en laboratorio*

La corriente que circula por el suelo puede ser debida:

Al sistema de protección catódica

A las corrientes de compensación que se intercambian entre defectos que no están polarizados al mismo nivel, en el momento de detener la protección catódica.

A las corrientes vagabundas.

La resistencia entre el electrodo de referencia y los defectos del revestimiento depende de:

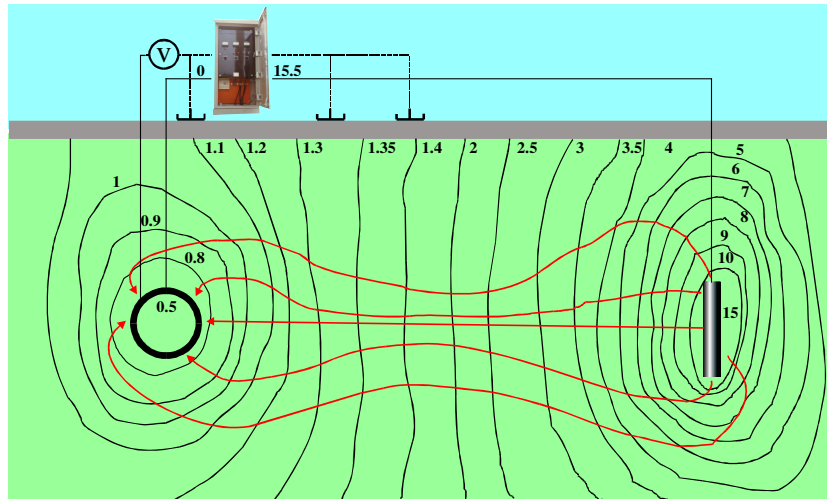
El tamaño de los defectos.

La resistividad del suelo.

La distancia entre el electrodo de referencia y el defecto.

## Medidas de potencial clásicas

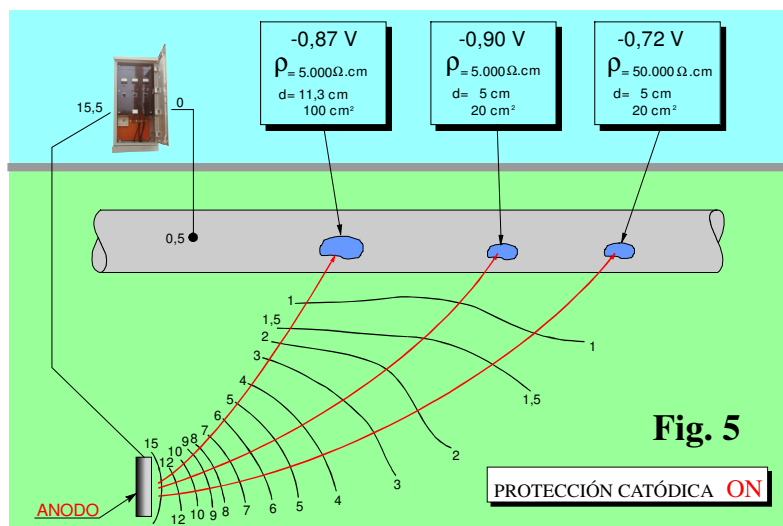
Las medidas de potencial clásicas, realizadas en las tomas de potencial (TP), con la protección catódica funcionando y utilizando electrodos portátiles, dan unos valores que son la media de los potenciales reales de los defectos más cercanos al punto de medida más todo el error  $I \times R$  citado. Por ello hay un riesgo muy importante de no alcanzar el potencial real necesario para una protección catódica correcta. (ver fig. adjunta).



Variación del potencial medido según la situación del electrodo de referencia

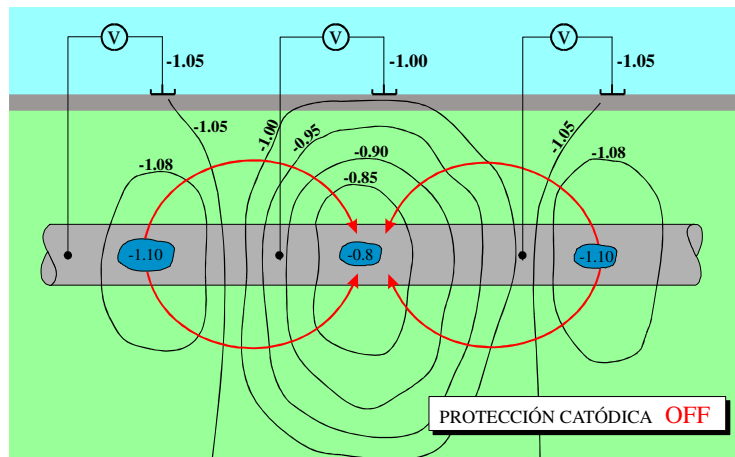
## Medidas de potencial ON - OFF

Las medidas ON -OFF, realizadas mediante cortes cíclicos de la corriente de protección catódica, pueden dar una indicación relativamente fiable en ausencia de corrientes vagabundas. En la fase en que la protección catódica esta funcionando (ON), las distintas condiciones de cada defecto (resistividad del suelo, tamaño y superficie del defecto,...), hacen que el nivel de potencial real en cada defecto pueda ser distinto. (Ver Fig. adjunta)



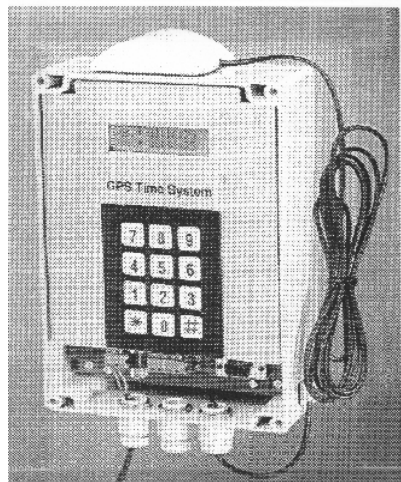
Medidas de protección on-off

En el momento de interrumpir la protección catódica (OFF), aparecen las corrientes de compensación que producen un cierto error  $I \times R$ . ( ver fig. adjunta)



*Corrientes de compensación*

Si el tubo tiene en general un buen revestimiento (tipo polietileno), la presencia de defectos importantes en los que el potencial real no alcance el nivel de protección es posible. Ello puede quedar enmascarado por los gradientes debidos a las corrientes de compensación, por lo que es importante localizar los defectos del revestimiento una vez enterrado el tubo. Para realizar medidas ON - OFF en tubos protegidos por mas de un rectificador deben sincronizarse los interruptores. (Ver Fig. adjunta). En presencia de corrientes vagabundas, las medidas ON - OFF pierden su fiabilidad, pues los gradientes en el suelo continúan siendo muy importantes a pesar de cortar la corriente de la protección catódica.

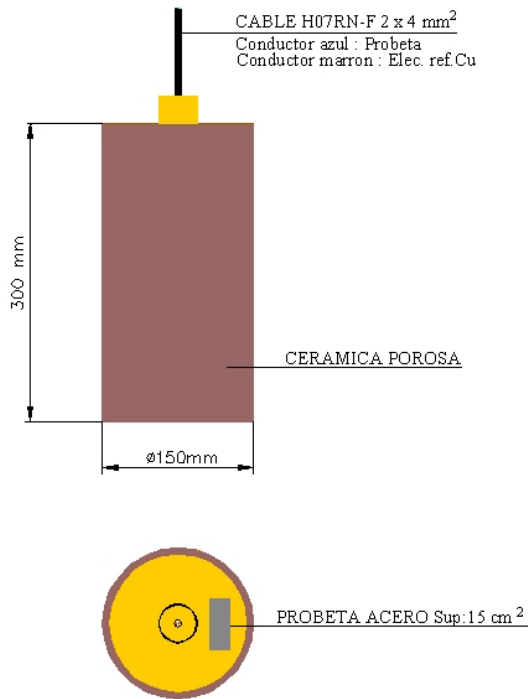


*Cronorruptor radio-sincronizado por satélite para medidas ON-OFF en protección catódica*

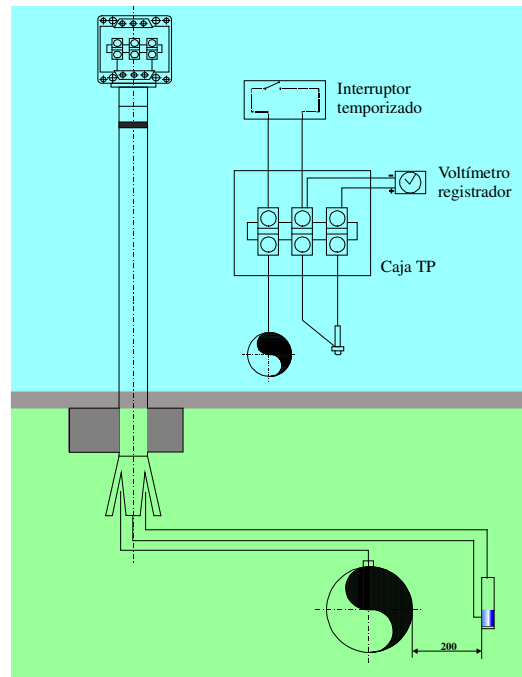
## **Electrodos probeta**

Un electrodo probeta esta formado por un electrodo de referencia permanente y una probeta de acero de una superficie determinada. (ver fig. adjunta). El electrodo probeta debe enterrarse cerca de la tubería y conectarse de modo que puedan realizarse mediciones de potencial ON - OFF en la probeta así como mediciones de intensidad. (Ver Fig. adjunta). Es un método cada vez mas empleado, que permite la medida del potencial real de la probeta metálica, a pesar de las corrientes vagabundas. Para que la lectura sea representativa, la superficie de la probeta

debe ser superior a la de los defectos del revestimiento. Otra vez se ve el interés en localizar los defectos del revestimiento para comprobar que nuestras probetas son más grandes que los defectos reales.

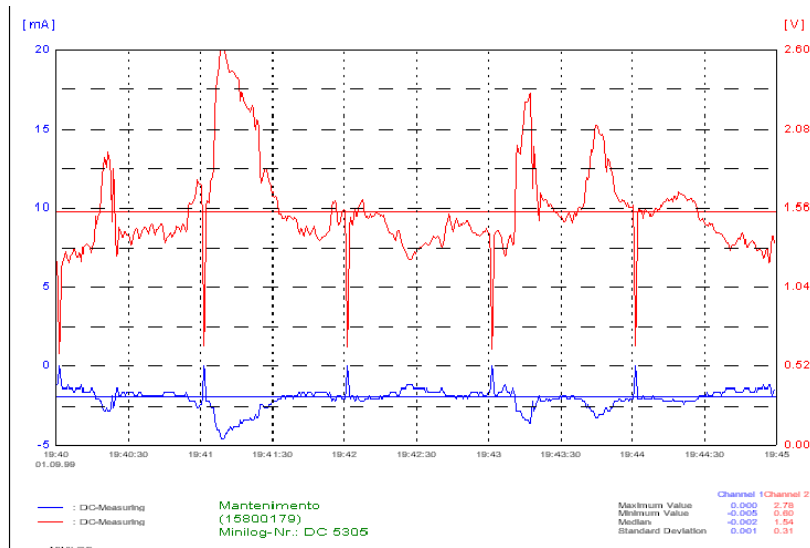


Electrodo Probeta



Esquema medición on/off con electrodo probeta

En la Fig. adjunta puede apreciarse un caso en el que con potenciales ON que oscilan entre -1,1 V y en algún punto superan los -2,6 V, el potencial real de la probeta no alcanza el Criterio de Protección.



Registro de potencial ON-OFF e intensidad en un electrodo probeta

La utilización de electrodos probeta es un método excelente, con la limitación de que solo tenemos información del lugar donde lo hemos instalado y que lógicamente disponemos de un número de electrodos definido.



## Corrosión por corriente alterna

En las cercanías de las líneas de alta tensión o de los trenes alimentados en alterna, pueden aparecer tensiones de alterna entre el tubo enterrado y el suelo. En algunos países europeos se han producido algunos casos de corrosión por este motivo, siendo un problema que está analizando el CEOCOR, quien en el año 2001 publicó el documento "*AC Corrosion on cathodically protected pipelines. Guidelines for risk assessment and mitigation measures*". Indiquemos aquí tan solo que existe evidencia de que el problema está muy relacionado con la existencia de pequeños defectos en revestimientos de gran calidad. Éste es otro motivo para localizar los defectos del revestimiento en algunos tubos enterrados.

## Inspección y control de la protección catódica

### Introducción

La inspección del buen funcionamiento y la eficacia de un sistema de protección catódica puede dividirse en dos tipos de controles.

Verificaciones funcionales : controles rutinarios de funcionamiento del sistema.

Medidas de potenciales reales : controles periódicos para verificar la eficacia de la protección catódica.

Las verificaciones funcionales tienen por objeto comprobar que los equipos siguen funcionando sin averías y que no se producen variaciones anormales en el sistema que aconsejen una investigación más detallada. Los controles para verificar la eficacia de la protección catódica deben comprobar que se cumplen los criterios de protección, lo que significa que se protege el metal contra la corrosión. Para ello deben realizarse medidas de los potenciales reales.

La Reglamentación Española que se aplica a los gasoductos es el "*Reglamento de Redes y Acometidas de Combustibles gaseosos*" de Octubre de 1983, utilizándose similares criterios para tuberías enterradas por las que circulan otros fluidos. En este Reglamento se definen como criterios de protección valores del potencial sin ninguna referencia a valores de potencial real o libre de IR. Se trata de los denominados potenciales ON.

Recientemente disponemos de la Norma UNE-EN 12954 (Febrero de 2002) "*Protección catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Principios generales y aplicación para tuberías*", en la que se indica claramente que el potencial de protección para el cual la velocidad de corrosión es inferior a 0,01 mm por año, debe medirse libre de IR, por lo que los potenciales ON no son válidos para verificar la eficacia de la protección catódica.

El detalle de cómo deben realizarse las mediciones se contempla en la Norma UNE-EN 13509 "*Técnicas de medida en protección catódica*".

### Verificaciones funcionales

Las verificaciones funcionales pueden realizarse a base de visitar periódicamente los puntos clave o mediante control remoto a través de los sistemas adecuados.

Las principales operaciones que permiten verificar que los equipos siguen funcionando y no se han producido variaciones anormales son las siguientes :

Funcionamiento de los rectificadores, midiendo por ejemplo la intensidad y la tensión y el potencial ON cuando incorporan un electrodo de referencia permanente. Estas mediciones pueden ser instantáneas o mediante registros.

Funcionamiento de los drenajes.

Medidas de potencial ON instantáneas o mediante registros en puntos seleccionados.

## **Verificación de la eficacia de la protección catódica**

Debe ser realizada periódicamente comprobando que se cumple el criterio de protección catódica. En la actualidad el Reglamento exige una lectura anual, aunque hasta que no se adopte la UNE-EN 12954, los potenciales pueden ser ON. Para obtener valores de potencial libres de IR pueden utilizarse medidas ON-OFF en ausencia de corrientes vagabundas. Cuando existen interferencias suelen realizarse medidas ON-OFF nocturnas y medidas ON-OFF en electrodos probeta estratégicamente situados.

Estas operaciones periódicas permiten fijar unos parámetros que deberían mantenerse hasta el próximo control, controlándose mediante las verificaciones funcionales.

En la H.T. 46 "*Control de la protección catódica de tuberías enterradas*", se analizan con detalle los controles más adecuados en cada caso.

## **Verificaciones funcionales mediante control remoto**

Las verificaciones funcionales deberían ser suficientemente frecuentes para detectar rápidamente cualquier problema.

En efecto, es importante que si se produce el fallo de un rectificador, de un equipo de drenaje o de una junta dieléctrica, se sepa rápidamente para evitar periodos prolongados de mal funcionamiento de la protección catódica.

El interés de tener esta información lo antes posible, junto con el coste importante que representa que los técnicos visiten los equipos frecuentemente, hace que cada vez sea más importante realizar las verificaciones funcionales por control remoto.

## **Control remoto propio o contratado**

El disponer de un sistema propio de control remoto por parte del propietario de la tubería es el sistema utilizado mayoritariamente debiendo destacar las siguientes particularidades.

Debe seleccionarse el sistema más adecuado, para lo que se precisa personal especializado en protección catódica y en telecomunicaciones.

Debe organizarse un sistema de recepción de datos, tratamiento de los mismos, análisis y generación de instrucciones de intervención.

Exige una inversión que puede ser significativa, en el caso de redes de tuberías importantes.

El sistema puede ser obsoleto al cabo de cierto tiempo en función del progreso técnico.

Ultimamente existe la posibilidad de contratar el servicio de Control Remoto a una agrupación de empresas en la que hay especialistas en protección catódica y en telecomunicaciones así como una importante empresa de distribución de gas italiana. En este caso el propietario de la tubería se limita a alquilar el equipo y recibir los datos con lo que tiene las siguientes ventajas.

Con una cuota mensual tiene en una página de Internet la información que precisa de las verificaciones funcionales de su sistema.

No precisa ninguna inversión.

Está a cubierto de averías y el sistema se actualiza y moderniza periódicamente.

## **Conclusión**

Es fundamental conocer la agresividad de los suelos cuando no se instala un sistema de protección catódica, aunque es difícil obtener una información fiable sobre el suelo. Cuando se instala un sistema de protección catódica, el conocimiento del suelo se limita al diseño de la protección catódica.

El riesgo de corrosión puede verse incrementado de modo importante por la presencia de corrientes vagabundas. Para una protección catódica simple y fiable es fundamental la continuidad eléctrica de la tubería, la presencia de un buen revestimiento y el aislamiento de otras estructuras enterradas.

Para tuberías importantes debe recurrirse normalmente a la protección catódica por corriente impresa. Es fundamental utilizar las técnicas de medida del potencial adecuadas. Con una protección catódica correcta y mantenida correctamente, puede garantizarse la protección catódica de las tuberías enterradas sin problema.

## **Anexo A Criterios de protección catódica en tuberías**

### **Planteamiento**

La protección catódica del acero embebido en hormigón, se puede realizar en casos muy distintos, que pueden ir desde proteger una estructura nueva en plan preventivo hasta proteger en plan salvamento una estructura corroída en la que el efecto pasivante del hormigón prácticamente ha desaparecido.

En estas condiciones, existe unanimidad de criterios en considerar que cuando el hormigón está carbonatado o contaminado por cloruros debe utilizarse un Criterio de Protección Catódica del mismo orden, aunque algo menos electronegativo al que se utiliza en el acero enterrado que es de -0.85 Voltios respecto al electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre.

Por otro lado, cuando el hormigón armado es nuevo y en ausencia de cloruros, existe una opinión mayoritaria que mantiene otro enfoque que admite Criterios menos restrictivos.

### **Hormigón degradado o contaminado**

Cuando las armaduras no están pasivadas a causa de la degradación o contaminación del hormigón, se acepta un Criterio de Protección Catódica de -0.75 Voltios respecto al electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ , tal como indica la Norma UNE-EN 12954.

### **Hormigón nuevo no contaminado**

Cuando el hormigón realizado correctamente no está carbonatado ni contaminado por cloruros, mantiene pasivadas las armaduras embebidas en él, por lo que la corrosión no progresa. Ante el riesgo de que esta situación cambie con el tiempo, principalmente por la posible contaminación del hormigón, una alternativa es la instalación de un sistema de protección catódica en plan preventivo.

En estas condiciones las últimas tendencias ratifican la idea de que el objetivo de la protección catódica puede ser algo distinto del convencional. En efecto, así como en la aplicación clásica de la protección catódica de tubos enterrados se llega a la zona de inmunidad del diagrama de Pourbaix, en este caso puede ser suficiente mantener la pasivación del acero aunque el hormigón se vea contaminado. La protección catódica tiende a impedir la progresión de los aniones, como los cloruros, y al mismo tiempo aumenta el pH del cátodo, lo que justifica lo anterior.

### **Norma UNE-EN 12696**

Cuando el objetivo de la protección catódica es la mejora de la resistencia a la corrosión del acero embebido en hormigón armado de estructuras nuevas, que se presume que puedan ser contaminadas por cloruros durante su vida útil, la Norma UNE-EN 12696 recomienda una actuación preventiva.

En este caso, se aplica una pequeña polarización al acero desde el inicio. Esta polarización debe mantener el potencial del acero en el hormigón más negativo que el potencial en el que pueden producirse las picaduras en presencia de cloruros (Epit), previniendo así la iniciación del ataque.

Esta polarización negativa, limita o previene, asimismo, la migración de los iones cloruro hacia el acero de las armaduras, con lo que si el sistema funciona desde el principio se evita la despasivación del acero. Esta *prevención catódica* se consigue con densidades de corriente comprendidas entre 0.2 y 2 mA/m<sup>2</sup>.

Esta baja densidad de corriente precisa para la *prevención catódica*, se debe no tan solo a que el potencial que se pretende obtener no es tan negativo como en el caso de estructuras activadas sino también a que es más fácil polarizar el acero pasivado. Este valor del potencial que representa el Criterio no queda definido en el documento.

## **Protección catódica**

Se refiere a viejas estructuras y en ellas el objetivo es reducir o frenar la velocidad de corrosión de armaduras para lo que se utiliza como Criterio el potencial de protección  $E_{prot}$ .

Este potencial de protección depende de las condiciones y el documento tampoco lo define, aunque se supone que en el caso mas desfavorable debe alcanzarse un valor de unos - 0.75 o - 0.77 Voltios respecto al electrodo de referencia de Cu/SO<sub>4</sub>Cu. En estas condiciones las densidades de corriente pueden oscilar entre 2 y 20 mA/m<sup>2</sup>.

## **Conclusiones**

Para el caso de tuberías nuevas en las que entendemos que el objetivo es prevenir un posible problema de despasivación de las armaduras por contaminación, pensamos que el Criterio de protección de -0.75 V respecto al Cu/SO<sub>4</sub>Cu es excesivamente exigente, necesitándose unas densidades de corriente muy elevadas.

Entendemos que para esta aplicación lo lógico es aplicar el concepto de “prevención catódica” utilizando una pequeña densidad de corriente. Debería tomarse una decisión sobre la densidad de corriente a aplicar y el criterio a adoptar. Para ello pueden sacarse conclusiones de la norma sobre protección catódica del hormigón armado y tal vez contrastarlas con algún Centro especializado en corrosión de armaduras de hormigón armado.

# **Anexo B Criterios de protección catódica en estructuras enterradas**

## **Introducción**

Este documento se centra en la protección catódica de estructuras enterradas en las que no son válidos los conceptos utilizados para proteger estructuras simples como tuberías o depósitos enterrados bien revestidos y aislados.

Los problemas típicos en estos casos derivan de la gran necesidad de corriente de protección que se requiere debido a que la estructura a proteger está unida a otros elementos metálicos enterrados, así como el riesgo de apantallamientos que dificultan la llegada de suficiente corriente a los puntos precisos.

## **Normativa**

Existe el Proyecto de Norma CEN prEN 14515 "*Cathodic protection of complex structures*" que aborda el tema.

Tales trabajos se han conocido en ciertos medios técnicos como "*Protección Catódica Global*" en referencia a que se protegen todas las estructuras o como "*Protección Catódica Local*" por tener que complementar localmente la protección en algunas zonas concretas.

## **Estructuras ajenas conectadas**

Habitualmente, el principal objetivo suele ser la protección catódica externa de las tuberías enterradas, los tanques enterrados o la base inferior en contacto con el suelo de los depósitos aéreos. Sin embargo, estos suelen estar unidos eléctricamente a otros elementos metálicos enterrados, lo que complica el problema.

Los dos casos mas corrientes y significativos son el contacto con las armaduras metálicas de zonas de hormigón armado enterrado o con sistemas de puesta a tierra, muchas veces formados por una gran superficie de cobre desnudo enterrado.

En los casos citados, la corriente de protección catódica necesaria es muy elevada no tan solo por el pobre o nulo aislamiento a tierra del acero embebido en hormigón o del cobre de las tomas de tierra sino por la pila galvánica que se crea con el acero a proteger.

A pesar de que la pila galvánica existente entre el acero y cobre enterrado es bien conocida (ver H.T. 28), resulta menos evidente la pila que se forma entre las armaduras pasivadas dentro del hormigón enterrado y los tubos o paredes de tanques de acero en contacto con el suelo.

Estas estructuras ajenas no tan solo requieren mucha corriente para su polarización, sino que su baja resistencia a tierra facilita la penetración de corriente proveniente de los ánodos en detrimento de la corriente que debe dirigirse a las estructuras que realmente se desea proteger. Ello es motivo de apantallamientos y subprotección de algunas zonas.

Este efecto de apantallamiento suele incrementarse en muchos casos al estar situadas las tomas de tierra de cobre o las armaduras de hormigón entre los ánodos y las estructuras a proteger.

Otros efectos de apantallamiento o reparto irregular de corriente pueden producirse por elementos no metálicos que impiden o dificultan el paso de la corriente como vainas, sistemas de contención de plástico o zonas de gravas u hormigón.

## **Interferencias**

Como consecuencia de las elevadas intensidades necesarias, pueden crearse interferencias en otras estructuras, tema que se analiza en detalle en el Proyecto de Norma CENELEC sobre corriente vagabundas prEN 50162.

El primer caso a destacar es la posible interferencia con sistemas de protección catódica de tuberías bien aisladas que penetran en la instalación, como por ejemplo, en el caso de un gasoducto u oleoducto de gran longitud que tenga las juntas dieléctricas dentro de la planta.

Otro caso es la existencia de ciertas tuberías o tramos de tuberías metálicas, no unidas al negativo de los rectificadores, que podrían presentar puntos de salida de corriente que se canalizase por ellas, con el consiguiente problema de corrosión localizada.

Por ello, para evitar tramos desconectados, reducir las caídas excesivas de tensión de ciertas zonas, e incluso para controlar la intensidad de retorno de algunos sectores, es conveniente analizar bien la posición y número de conexiones de negativos, y prever ciertos puentes en algunos casos. Es fundamental, pues, que tanto durante la fase de diseño, como en la puesta en marcha del sistema de protección catódica se realicen mediciones adecuadas tanto de los potenciales como de los retornos de corriente para prevenir dichos riesgos.

## **Dimensionamiento**

Como ya se ha indicado, a causa de la presencia de armaduras de hormigón armado enterradas, de sistemas de toma de tierra, e incluso de estructuras a proteger con pobres recubrimientos, la protección catódica de

estructuras complejas requiere corrientes de protección considerables y la distribución de las mismas puede ser difícil.

Otro aspecto importante es que la protección catódica no se establece de forma inmediata con la puesta en marcha, sino que puede requerir tiempos de polarización importantes.

Si además se suma el hecho de que, en muchos casos, no se conoce con exactitud la superficie de metal enterrado, resulta que el cálculo de la intensidad necesaria es difícil de concretar hasta que se aplica la protección.

Es fundamental realizar un diseño que tenga en cuenta todos los factores conocidos y sea fácilmente modificable tras la puesta en marcha inicial, completando la protección de las zonas apantalladas o con potenciales insuficientes.

## **Lechos de ánodos**

En general, resulta interesante montar varios lechos de ánodos distribuidos por la instalación, siendo importante obtener bajas resistencias en cada caso, para lo que resulta básico montar los ánodos suficientes con el volumen de backfill adecuado.

Es fundamental cuidar al máximo el aislamiento de cables y conexiones así como el control individual de la corriente de cada ánodo. Aunque este comentario es aplicable a todos los ánodos de corriente impresa, las elevadas intensidades precisas así como los problemas de distribución, lo hacen particularmente crítico en este caso.

## **Medidas de potencial**

El potencial medido por el electrodo de referencia se ve afectado por los gradientes de potencial que provoca el paso de la corriente por el terreno, tanto la de protección catódica como la originada por corrientes vagabundas o galvánicas.

Para reducir el error de medida es importante situar el electrodo de referencia lo mas cerca posible de la estructura a proteger, lo que no siempre es fácil tanto por la profundidad a la que se puede encontrar la zona a proteger como por la presencia de asfalto, hormigón, etc.

Por ello deben preverse algunas catas para poder colocar el electrodo de referencia portátil en múltiples puntos, bien señalizados y situados lo mas cerca posible de las estructuras a proteger.

En muchos casos es preferible montar electrodos de referencia permanentes enterrados, e incluso electrodos probeta con los que se puede medir exactamente el potencial y la corriente intercambiada en un trozo de metal aislado que recibe protección catódica.

## **Conclusiones**

La protección catódica de estructuras complejas, conectadas a grandes masas metálicas enterradas, requiere consideraciones especiales que complican el diseño del sistema.

La elevada corriente necesaria puede ocasionar fallos en los sistemas de ánodos y errores importantes en las medidas si no se toman las debidas precauciones.