

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

APLICACIÓN DEL METODO DE PROTECCION CATODICA A UNA ADUCCION DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br:
Ortiz Colmenares, Antonio José

Para optar al título de
Ingeniero Civil

CARACAS, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

APLICACIÓN DEL METODO DE PROTECCION CATODICA A UNA ADUCCION HIDRAULICA DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS

TUTOR ACADEMICO: Ing. Nelson Camacho

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br :

Ortiz Colmenares

Antonio José

Para optar al Título de

Ingeniero Civil

Caracas, 2013

AGRADECIMIENTO

Le quedo agradecido profundamente a esta, la Universidad Central de Venezuela por permitirme el privilegio de formarme en ella, también a el profesor tutor, Ing. Nelson Camacho, al Ing. Naddord Zambrano conocedor de esta materia y del Ing. Víctor Bolívar por la importante ayuda en la facilitación de los instrumentos requeridos para las mediciones, sin las cuales hubiera sido imposible terminar este proyecto. Además de la gran ayuda aportada por mi gran amigo el señor Guillermo Pinto.

ANTONIO J. ORTIZ C

**APLICACIÓN DEL METODO DE PROTECCION CATODICA A
UNA ADUCCION HIDRAULICA DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA
DE CARA ACAS**

TUTOR ACADÉMICO : ING. NELSON CAMACHO.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO. CARACAS, U.C.V. FACULTAD DE INGENIERÍA.

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL. 2013, 73 PAG.

PALABRAS CLAVE.: Protección Catódica, Tuberías de Acero, Ánodo.

RESUMEN

En este Trabajo Especial de Grado se aplicó el Método de Protección Catódica a una Aducción situada en la Facultad de Ciencias de la Ciudad Universitaria a objeto de comprobar el grado de corrosión de esta Aducción.

El material de la Tubería es de acero dúctil A – 36 de $\varnothing = 36$ pulgadas y 133 metros de longitud y en todo su trayecto se encuentra enterrada.

Con el resultado de los Potenciales y Resistividades obtenidos, que se realizaron in situ, se obtuvo que esta tubería contiene un promedio considerable de corrosión, a pesar de ser una tubería de aproximadamente cuatro años de ser instalada.

INDICE

TABLAS

1.	Serie de Fuerzas Electromotriz para Metales	11
2.	Relación con respecto a Potenciales de Acero protegido Catódicamente	27
3.	Densidades de Corriente necesarias para Protección	29
4.	Propiedades Físicas y Electroquímicas del Mg, Zn, y Al	32
5.	Valores Electroquímicos para el Cálculo de la Vida de los Ánodos	33
6.	Características de los Ánodos empleados en Protección Catódica con Corriente Impresa	41
7.	Factor de Forma	45
8.	Factor de Paralelismo	46
9.	Resistencia de Cables de Cobre	47

FIGURAS

1.	Curva Esfuerzo - Deformación para Acero de Bajo Carbón	6
2.	Celda Galvánica con Metales Disimiles	9
3.	Protección Catódica con Ánodos Galvánicos o de Sacrificio	16
4.	Protección Catódica con Corriente Impresa	17
5.	Diagrama Potencial pH para el Hierro (Fe) de acuerdo a los Electrodo de Referencia	19
6.	Esquema de Instalación para Medir la Resistividad del Suelo por el Método de Wenner	20

7.	Medición de Potencial de la Estructura con respecto al Electrodo de referen	23
8.	Mecanismo de Protección Catódica con Ánodo de Sacrificio	30
9.	Detalle de Instalación de Ánodos de Sacrificio	35
10.	Protección Catódica con Corriente Impresa de una Tubería Enterrada	37
11.	Esquema de un Transformador Monofásico	38
12.	Interferencia provocada por una Tubería Extraña situada en la en la proximidad de una Tubería protegida Catódicamente	43
13.	Lugar de Tubería Instalada	49
14.	Mediciones por el Método de Wenner o de los Cuatro Pines	50
15.	Lecturas Arrojadadas en Las Mediciones	51
16.	Aparato GEOHM C, Utilizado en Las Mediciones	51
17.	Lecturas de Potenciales Tomadas en las Dos Tanquillas	53

ABREVIATURA

Agencia para el Desarrollo Internacional	AID
American Society for Testing Materials	ASTM
ESTUDIOS NOUEL S . A	ENOSA
MANUAL AWWA MII VOL. 56 Nov. 1964	AWWA
mezcla de coque	Backfill
NACE Internacional	NACE

SIMBOLOS

Ácido clorhídrico	HCl
-------------------	-----

Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄
Ae (Área efectiva)	m ²
Aluminio	Al
Amper	A
Amper – hora sobre kilogramo	A – h / Kg
Ap. (área a proteger)	m ²
Cap de Corr (Capacidad de Corriente)	A – año / Kg
Cobre / Sulfato de Cobre	Cu / CuSO ₄
Densidad de corriente (m A / (m ² o pie ²))	J
Diámetro del ánodo (pulgada)	Øa
Diámetro de la Tubería (pulgada)	Øt
electrón	e
Factor de Forma (constante)	K
Factor de Paralelismo (constante)	P
valor de resistencia del cable (Ω)	fr
factor de seguridad (constante)	fs
Factor de utilización (%)	fu
gramos de materia disuelta	g
gramos	g
Hidrogeno	H ₂
hierro	Fe
hierro ferroso	Fe ⁺²
hora	h
Intensidad de Corriente (mili amper)	I
Intensidad de salida del ánodo (mili amper)	Ia

Intensidad requerida (mili Amper)	Ir
Intensidad total (mili Amper)	It
Kilogramos	Kg
Kilogramos sobre Amper Año	Kg / A – año
Longitud (m)	L
Longitud del ánodo con relleno de coque (ft)	La
Longitud que une el rectificador con la tubería (m)	LrtVII
Longitud que une el rectificador con la caja de distribución de los ánodos (m)	Lrcda
Magnesio	mg
masa requerida de ánodos (Kg)	Wt
metros	m
metros cuadrados	m ²
milímetros	mm
mili Amper	m A
mili Voltios	m V
numero	N
Numero de ánodos (constante)	Na
Numero de electrones	n
Ohmios	Ω
peso atómico del metal (g)	P. A
peso de ánodo a instalar (Kg)	Wa
pH de la disolución	pH
Pi (3,1416)	π

Porcentaje	%
Resistencia del ánodo (Ω)	Ra
Resistencia del Cable positivo (Ω)	RC (+)
Resistencia del Cable negativo (Ω)	RC (-)
Resistencia de Cables Total (Ω)	RCT
Resistencia del Lecho (Ω)	RL
Resistencia del Lecho Vertical (Ω)	RLV
Resistencia Vertical (Ω)	RV
Resistencia Total (Ω)	RT
Resistividad ($\Omega - \text{cm}$)	ρ
Separación entre ánodos (m)	S
tiempo (seg)	t
Voltaje	V
Voltaje del ánodo (Va)	Va
Voltaje del cátodo (Vc)	Vc
Zinc	Zn

CAPITULO I

1.1	Planteamiento del Problema	1, 2
1.2	Objetivos de la Investigación	2
1.2.1	Objetivos Generales	2,3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Justificación	3

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1	Características Físicas del Tubo de Acero	4
2.1.1	El Tubo de Acero	4
2.1.2	Ductilidad y Resistencia de Cedencia	4, 5
2.1.3	Esfuerzo y Deformación	5, 7
2.2	Fundamentos Teóricos de Corrosión	7
2.2.1	Corrosión	7, 9
2.2.2	Corrosión Galvánica	9, 12
2.2.3	Severidad de la Corrosión	12
2.2.4	Protección contra la Corrosión	12
2.3	Recubrimiento de la Estructura	12
2.3.1	Introducción	13
2.3.2	Recubrimiento de Pinturas	13
2.3.3	Constituyentes de una Pintura	14,15
2.3.4	Capas de Recubrimientos	15,16
2.3.5	Fundamentos de Protección Catódica	16
2.3.6	Protección Catódica con Ánodos Galvánicos o de Sacrificio	16
2.3.7	Protección Catódica con Corriente Impresa	17
2.3.8	Criterios de Protección Catódica	17,18
2.3.9	Diagrama de Pourbaix	18,19
2.3.10	Medición de la Resistencia de Suelo	19,20
2.4	Técnicas de Medición	20
2.4.1	Otros Criterios de Protección Catódica	20, 23

2.4.2	Mediciones de Potencial	23, 27
2.4.3	Potenciales del Acueducto	27,28
2.4.4	Densidad de Corriente	28,29
2.5	Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio	29
2.5.1	Propiedades de un Material Anódico	29, 30
2.5.2	Características Electroquímicas del Zinc, Magnesio y Aluminio	30, 31
2.5.3	Vida del Ánodo	31,32
2.5.4	Calculo del Numero de Ánodos	32
2.5.5	Fijar los Ánodos	32, 33
2.5.6	Ventajas y Limitaciones de la Protección con Ánodos Galvánicos	33, 34
2.6	Protección Catódica por Corriente Impresa	34
2.6.1	Origen de Protección Catódica por Corriente Impresa	34, 35
2.6.2	Fuentes de Corriente	35, 36
2.6.3	Rectificadores	36, 37
2.6.4	Ánodos Auxiliares	37, 39
2.6.5	Calculo de Protección y Distribución de los Ánodos	39, 41
2.6.6	Procedimiento para el Cálculo de Protección Catódica por el Método de Corriente Impresa	31, 46
2.6.7	Ventajas y Limitaciones de la protección catódica por corriente impresa	46

CAPITULO III: METODO

3.1	Mediciones	47, 48
3.2	Mediciones de Resistividad	48

3.2.1	Proceso de Medición de Resistividad	48, 50
3.3	Mediciones de Potenciales	50
3.3.1	Mediciones	50,51
3.4	Cálculos	51
3.4.1	Aplicación de Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio	51, 56
3.5	Conclusiones y Recomendaciones	56
3.5.1	Conclusiones	56
3.5.2	Recomendaciones	56
	REFERENCIAS	57
	ANEXO	58

CAPITULO I

1.1 Planteamiento del problema

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, cuya aplicación se ha ido generalizando por todo el mundo con mucho éxito sobre todo en las instalaciones de ductos para transportar petróleo y agua; aplicado a tanques de almacenamiento, cables eléctricos y telefónicos enterrados así como a otras instalaciones.

Los conceptos relacionados con el control de la corrosión por la protección catódica presentan sus primeros avances en el año 1824 cuando se aplicó para la protección del cobre de las embarcaciones, uniéndose con hierro o zinc; se obtuvo así una apreciable reducción del ataque al cobre.

En Venezuela, el control de corrosión mediante sistemas de protección catódica constituye una de las técnicas más usadas en la industria petrolera nacional, y se considera la técnica más efectiva para el control de la corrosión de las estructuras metálicas; el empleo de esta práctica ha aumentado mucho a pesar de lo poco difundido de su aplicación. (García, E. 2010. Protección Catódica. <http://www.Pandeo.com/cahe.asp?idres=2799>).

Toda estructura de acero enterrada o sumergida está expuesta al fenómeno de la corrosión, la cual dependerá principalmente del fenómeno de la agresividad del ambiente que la rodea; por tal razón se protegen estas estructuras contra la corrosión controlando algunos de los factores o variables que se mencionan a continuación: selección de los materiales más resistentes a la corrosión; utilización de bridas aislantes; modificación del ambiente; aplicación de revestimientos protectores y protección catódica.

Todas las tuberías enterradas se protegen con un revestimiento, pero no existe ningún revestimiento perfectamente impermeable para protegerlas porque siempre quedan micro poros por donde se infiltra la humedad; por otro lado como la superficie no es homogénea en su composición química, y entre un punto y otro pueden existir diferencias, ya sea por concentración de impurezas o por variaciones en la composición, esta situación genera pilas galvánicas de acción local y la corriente que sale de las áreas anódicas trata de

escapar y emerger justamente por esos micro poros produciendo en estos sitios corrosión por picadura

Este tipo de corrosión es de alta peligrosidad, debido a que el ataque avanza hacia dentro. Cuando la tubería no está revestida, la corriente saldría sin barreras por no tener impedimentos físicos y se distribuiría en toda la extensión de la celda produciendo un tipo de corrosión generalizada que no es tan crítica como las picaduras, por ser estas localizadas y específicas. De lo expuesto se concluye que una estructura revestida, solo está protegida cuando esta recibe una protección adicional complementaria. Esta protección se consigue mediante la aplicación de los sistemas de aplicación catódica. La Ciudad Universitaria de Caracas dispone de una red de tuberías de agua tratada que abarca una longitud considerable de kilómetros en toda su extensión; del estado físico de esta red, la información que se tiene es de los tramos sustituidos y reparados, razón que obliga a pensar sobre el estado de conservación de los tramos enterrados. En el sector de Edificación Nueva en Construcción (ubicación de la Tanquilla Principal) hasta la (Tanquilla Secundaria) ubicada entre la fachada posterior del Edificio de Salones de La Facultad de Ciencia y la pared de ladrillos rojos que sirve de cerca a dicha Facultad en La Ciudad Universitaria de Caracas, hay una aducción que tiene las siguientes características, material de acero dúctil A – 36 y diámetro 6 pulgadas con una longitud de 133 metros. Es de hacer notar que la mayoría de las tuberías instaladas en el recinto universitario son de hierro fundido, muchas cuya longitud están cubiertas con capas de concreto gran parte de su distancia, de ahí la escogencia de esta aducción que cumple con las condiciones del terreno (no está bajo concreto) y el metal (acero) es apto para la aplicación del método de protección catódica. En el marco de estas consideraciones se pueden aprovechar las características de esta aducción para la aplicación del Método de Protección Catódica.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo genera

Evaluar el estado físico de la tubería enterrada entre el sector Edificación Nueva en Construcción, partiendo de la Tanquilla Principal hasta la Tanquilla Secundaria

- 1) situada entre la fachada posterior del Edificio de Salones de la Facultad de Ciencias y la pared de ladrillos rojos
- 2) Proponer la aplicación del Método de Protección Catódica para la protección de dicha tubería.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Medir la distancia de la aducción entre las dos tanquillas.
- 2) Medir potenciales en suelo de la estructura con un electrodo de referencia.
- 3) Medir la resistencia del suelo.
- 4) Calcular la densidad de corriente de protección de un acero en función de la resistividad eléctrica del medio.
- 5) Calcular la eficiencia del recubrimiento.
- 6) Calcular la corriente requerida para proteger la estructura.
- 7) Calcular la intensidad de la corriente anódica, vida útil de los ánodos y número de ánodos.

1.3 Justificación

La ciudad Universitaria de Caracas es un conjunto arquitectónico con rango de Patrimonio Universal de la Humanidad y toda su planta física debe conservarse en buen estado, es el caso de estructuras físicas como galpones, edificios etc, cuyas fallas es más fácil de localizar para los técnicos de la especialidad por estar a la vista en la mayoría de los casos. Cuando se trata de tuberías de agua potable estas en su casi totalidad se encuentran enterradas y cuando se advierte una falla generalmente es producto de una filtración que por lo general tarda tiempo en aflorar, por ello estas aducciones deberían estar sometidas a un proceso de mantenimiento mediante el método de Protección Catódica. A objeto de que conserven su vida útil por más tiempo.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Características físicas del tubo de acero.

Es importante para la mejor comprensión de este trabajo determinar varios conceptos que son de importancia, ya que los mismos forman parte de las definiciones, formulaciones y conclusiones que justifican el mismo.

2.1.1 El tubo de acero.

El tubo de acero se ha usado en la conducción de agua en los Estados Unidos desde, aproximadamente 1852, y ha resuelto ingentes problemas de ingeniería especialmente cuando el fluido y la presión eran grandes y existían obstáculos difíciles, naturales o artificiales, en el trayecto de la línea.

Las propiedades del acero que lo hacen tan útil son: primeramente su gran resistencia; segundo, su capacidad de deformarse o flexionarse bajo una carga, sin dejar de ofrecer resistencia total a la carga; tercero, su capacidad de doblarse sin romperse; y cuarto, su resistencia al impacto.

Los datos que siguen se aplican al acero de tipo suave, intermedio de grado estructural, según se encuentran cubiertas en las normas AWWA para el tubo de acero en conducción de agua. Los datos se aplican en la operación a temperatura atmosférica ordinaria (lo que es habitual en instalaciones de distribución de agua) y no a operaciones bajo temperaturas elevadas. (Tubería de Acero, Manual AWWA MII, V 56 Nov. 1964).Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia Para el Desarrollo Internacional (AID). México.

2.1.2 Ductilidad y Resistencia de Cedencia

Como una base para comprender el tema, conviene diferenciar entre dos clases de materiales, los “dúctiles” y los “frágiles”. Un material “dúctil” es aquel que exhibe una deformación o flujo plástico marcado, a un nivel de esfuerzo (punto de cedencia o resistencia de cedencia) y que muestra una elongación, deformación plástica o alargamiento total antes de su rotura final. Un material “frágil” es aquel en el cual la deformación plástica (punto de cedencia o resistencia de cedencia) no está bien definida y la elongación total, o ultima, antes de su rotura es pequeña. El acero suave, como el que se emplea en tubería de agua, es típico de los materiales dúctiles. En la práctica, estas dos clases de

materiales deben considerarse en forma diferente, debido a que, bajo carga, actúan en forma distinta. Todo lo expuesto aquí no tiene ninguna relación con los materiales frágiles.

La propiedad de ductilidad en el acero que le permite ceder o flexionarse pero no romperse, la explica también, por que el tubo de acero de pared delgada aun cuando se reduce en su diámetro vertical en un 12,5 por ciento por las presiones de la carga, opera satisfactoriamente cuando se entierran en trincheras profundas o bajo rellenos altos, siempre y cuando haya sido incorporada al diseño la verdadera resistencia requerida.

Las propiedades físicas del acero (resistencia de cedencia y resistencia última a la tensión) usadas como base para su adquisición, se determina de pruebas de tensión efectuadas sobre una probeta normal, que se sujeta a prueba a una máquina de tensión. Las propiedades así medidas forman también la base de diseño.

La “resistencia” de los materiales dúctiles, hablando en función de un diseño, se define por la resistencia de cedencia medida por el punto de cedencia inferior (cuando este existe), o por el esfuerzo de cedencia de desplazamiento de la Sociedad Americana para prueba de Materiales (American Society for Testing Materials, ASTM), cuando no existe un punto de cedencia. Para el acero que generalmente se usa en tuberías para aguas, la resistencia de cedencia está fijada por especificación, como el esfuerzo debido a una carga que cause una extensión de 0,5 por ciento de las longitudes de vibración. El punto se ilustra en la figura 1. La resistencia de cedencia del acero se considera la misma para cargas de tensión o compresión.

La “ductilidad del acero” se mide como una elongación o alargamiento bajo una carga de tensión en una máquina de prueba. La “elongación” es cambio de medida de longitud bajo esta carga y se expresa como porcentaje de la longitud de calibración original de la probeta. (Manual AWWA MII).

2.1.3 Esfuerzo y Deformacion

Un diagrama Esfuerzo – Deformacion, para cualquier material es una grafica que muestra la deformacion (o alargamiento por unidad de longitud) que ocurre cuando el material esta sujeto a una carga o esfuerzo dado. Por ejemplo considerese una barra de acero estirada en una maquina de prueba con instrumentacion adecuada para medir la carga e indicar los cambios de dimension. Se encuentra que cuando la barra esta sometida a la carga, se ha alargado. El cambio en longitud bajo carga por unidad de longitud, se llama “deformacion” o “deformacion unitaria”, que se expresa, generalmente, como porcentaje de elongacion. Los valores de la deformacion se trazan a lo largo del eje horizontal del

diagrama de esfuerzo – deformacion. Para trazar la curva, la carga se convierte a unidades de esfuerzo, en kilogramo por centimetro cuadrado, dividiendo la carga en kilogramos por el area original de la barra, en centimetros cuadrados. Los valores del esfuerzo se trazan a lo largo del eje vertical del diagrama. El resultado es un diagrama convencional esfuerzo – deformacion. Debido a que el esfuerzo se obtiene dividiendo la carga siempre por el area

original de la barra, el esfuerzo parece alcanzar un valor maximo y luego disminuir al alcanzar la carga.

La figura 1 muestra varias partes de una curva esfuerzo – deformacion a tension pura, para acero de bajo carbon, como el que se usa en tuberia de distribucion de agua. El cambio de la forma de la probeta durante la prueba esta señalado por las barras que se observan dibujadas bajo la curva. Al alargarse la barra, la seccion transversal disminuye en area hasta la resistencia maxima a la tension y, en este punto, tiene lugar la reduccion local de areas o “formacion de cuello”.

Los esfuerzos y deformaciones que se encuentran en la porcion recta de la linea ascendente, se dice que se encuentran en el rango elastico. Los aceros que se cargan para crear esfuerzos o deformaciones dentro de ese rango, regresan precisamente a su longitud original cuando se retira la carga.

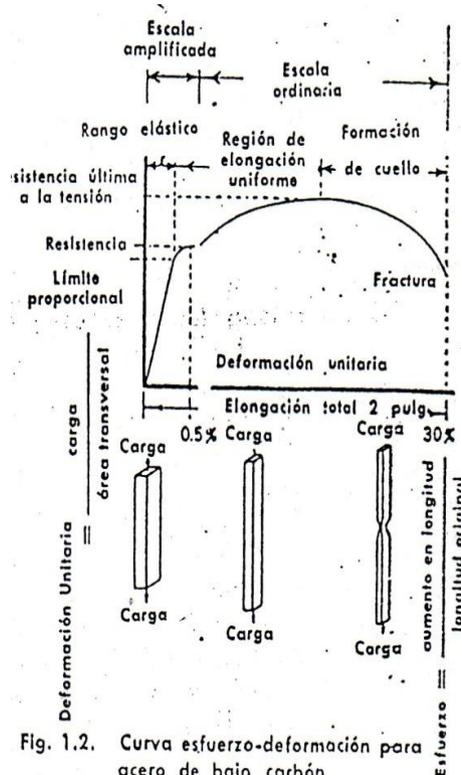


Fig. 1.2. Curva esfuerzo-deformación para acero de bajo carbono.

Figura 1. Curva esfuerzo – deformación para acero de bajo carbón.

$$\text{Esfuerzo} = \text{Carga} \div \text{Área Transversal. (Kg/cm}^2\text{)}.$$

$$\text{Deformación Unitaria} = \text{Aumento en Longitud} \div \text{Longitud Original. (\% de elongación)}.$$

(Manual AWWA MII).

2.2 Fundamentos teóricos de corrosión

2.2.1 Corrosión

La corrosión se define como el deterioro de los metales por reacciones químicas y electroquímicas entre el metal y su medio ambiente, cuyo resultado es la pérdida de metal. La pérdida de la resistencia mecánica o ductilidad para el componente mecánico en su conjunto es generalmente el cambio más importante en sus propiedades. El control de la reacción de corrosión se basa en la práctica de actuar sobre el propio medio ambiente o sobre el metal. El control sobre el medio ambiente significa controlar su composición, reducir la humedad en la atmosfera, desairar los electrolitos, cambiar la acidez o alcalinidad a valores más moderados, eliminar las bacterias, reducir las temperaturas o añadir sustancias químicas específicas para inhibir la acción de corrosión. Estos son los medios más importantes empleados en la lucha contra la corrosión. (D. R. Gabe, Fundamentos del Tratamiento y Protección de Superficies Metálicas, Primera Edición Española 1975, Editorial ALHAMBRA, S.A, R.E. 182 Madrid – 1. Claudio Coello, 76).

Como ya se dijo se entiende por corrosión la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. La característica fundamental de este fenómeno, es que solo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas ANODICAS y CATODICAS: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal.

Este mecanismo que es analizado desde un punto de vista termodinámico electroquímico, indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, siendo la corrosión por lo tanto la causante de grandes perjuicios económicos de instalaciones enterradas. Por esta razón, es necesario la oportuna utilización de la técnica de Protección Catódica.

Se designa químicamente CORROSION POR SUELOS, a los procesos de degradación que son observados en estructuras enterradas. La intensidad dependerá de varios factores tales como el contenido de humedad, composición química, pH del suelo, etc. En la práctica se suele utilizar comúnmente el valor de la Resistividad Eléctrica del suelo como índice de su agresividad; por ejemplo un terreno muy agresivo, caracterizado

por presencia de iones tales como cloruros, tendrán resistividades bajas, por la alta facilidad de transportación iónica.

La protección catódica es un método electroquímico cada vez más utilizado hoy en día, el cual utiliza el mismo principio electroquímico de la corrosión, transportando un gran cátodo a una estructura metálica, ya sea que se encuentre enterrada o sumergida. Para este fin será necesario la utilización de fuentes de energía externa mediante el empleo de ánodos galvánicos, que difunden la corriente suministrada por un transformador rectificador de corriente.

El mecanismo, consecuentemente implicara una migración de electrones hacia el metal a proteger, los mismos que viajaran desde ánodos externos que estarán ubicados en sitios plenamente identificados, cumpliendo así su función.

A esta protección se debe agregar la ofrecida por los revestimientos, como por ejemplo las pinturas, casi la totalidad de los revestimientos en instalaciones enterradas, aéreas o sumergidas, son pinturas industriales de origen orgánico, pues el diseño mediante ánodo galvánico requiere del cálculo de algunos parámetros, que son importantes para proteger estos materiales, como son: **La corriente eléctrica de protección necesaria, la resistividad del medio electrolítico, la densidad de corriente, el número de ánodos y la resistencia eléctrica que finalmente ejercen influencia en los resultados.** (<http://www.pandeo.com> cache.asp? IDR es = 2799). 05/06/2010.

Se reconocen varios tipos generales de corrosión, como son: galvánica o bimetálica, electrolítica, de esfuerzo, bioquímica, uniforme o de ataque general, por

picaduras e intergranular. Hay que hacer mención a la corrosión galvánica por ser la más, emblemática.

2.2.2 Corrosión galvánica.

Esta ocurre cuando se unen metales diferentes en un circuito eléctrico y en presencia de un electrolito. Un ejemplo se tiene en la figura 2. La corriente va del zinc (ánodo) al electrolito, llevando consigo partículas de zinc. Las partículas de zinc reciben el nombre de iones. Tan pronto como estos iones de zinc se disuelven en el electrolito, son cambiados por iones de hidrogeno. El flujo de iones (corriente eléctrica) es a través del electrolito a la varilla de carbón (cátodo). Allí, los iones de hidrogeno se depositan sobre la varilla de carbón, como gas hidrogeno. Si el gas hidrogeno permanece en el cilindro de carbón, actúa como aislante y tiende a hacer cesar el flujo de corriente. La formación de la película recibe el nombre de Polarización, su remoción Despolarización. El flujo de corriente luego es del ánodo de zinc al electrolito, a la barra de carbón que constituye el cátodo y nuevamente al zinc, a través del conducto externo a las terminales de la batería. Al

circular corriente en este circuito el zinc se destruye, pero el carbón no sufre daño. En otras palabras el ánodo se destruye, pero el cátodo está protegido.

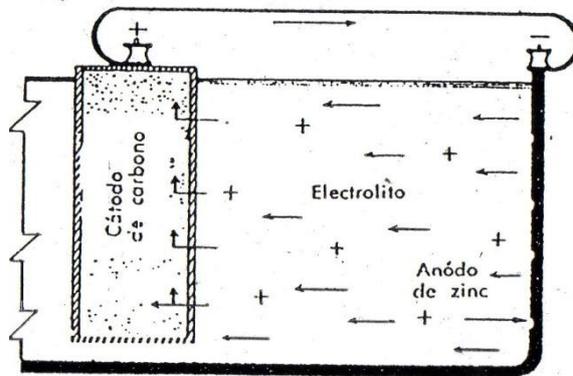


Figura 2. Celda galvánica con metales disimiles.

Según se ha señalado antes, se forma una película de hidrogeno sobre la varilla de carbón (cátodo) que aísla al cátodo del electrolito y hace cesar el flujo de corriente.

Mientras se mantenga la película de hidrogeno sobre la superficie del cátodo, la corriente cesara; pero la remoción o destrucción de la película de hidrogeno permitirá la reiniciación de la corrosión igual que antes. Las celdas de corrosión que se forman normalmente en suelos o aguas altamente corrosivos son tales que el hidrogeno formado sobre el cátodo se escapa como gas, se combina con el oxígeno disuelto en el electrolito o es eliminado por movimiento del electrolito frente a la superficie del cátodo.

En la batería, la cubierta de zinc es atacada, pero no así el carbón. Esto es solo un caso. Cualquier metal puede ser atacado cuando está formando circuito con un metal, y no ser atacado cuando lo forma con otro.

Un metal de los que aparecen en la lista de la tabla 1 será atacado si se coloca en un circuito con otro de la lista debajo de el en un medio electrolito común; por ejemplo agua o tierra húmeda.

	Reacción	Potencial V (EEH)
↑ Noble	$\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$	+1.498
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	+1.200
	$\text{Pd}^{2+} + 2e^- = \text{Pd}$	+0.987
	$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.799
	$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- = 2\text{Hg}$	+0.788
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^-$	+0.401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.337
	$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0.000
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.136
	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^- = \text{Co}$	-0.277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.403
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.440
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.744	
Activo ↓	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.763
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.363
	$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2.714
	$\text{K}^+ + e^- = \text{K}$	-2.925

Tabla 1. Serie de fuerza electromotriz para metales.

El orden en la tabla 1 se conoce como serie galvánica y, generalmente, esto rige en condiciones normales. Los cambios en la composición de la temperatura del electrolito, sin embargo, pueden causar el cambio de posición de ciertos metales, hasta el punto de invertir algunas posiciones en la tabla. Por ejemplo el zinc está colocado debajo del hierro en la tabla mostrada (Tabla 1) y sufrirá corrosión cuando se conecte con hierro en agua fresca a la temperatura normal. Pero, cuando la temperatura del agua es superior 65.56 C (a 150 F), el hierro se corroerá, protegiendo al zinc. Así pues, la tabla no se puede utilizar ciegamente para predecir el comportamiento de metales bajo todas las condiciones, y debe usarse con precaución. (Manual AWWA II).

La serie electromotriz: Es una disposición ordenada de los potenciales de oxidación o reducción de los metales, si la tabla está colocada con las reacciones en forma reducida, mientras más negativos sean los valores más reactivos son los metales, si están en forma oxidada, los valores más positivos corresponden a lo más activos. De los metales que formen parte de una pila, el ánodo es el metal más activo en la serie electroquímica.

De la tabla se puede deducir, que cuanto más separados estén entre si dos elementos mayor es su tendencia a combinarse uno con otro bajo los efectos redox (oxido-reducción). (Suarez, 2002).

2.2.3 Severidad de la corrosión

La severidad de la corrosión en un caso dado dependerá de muchos factores, algunos de los cuales pueden ser más importantes que otros. Los factores que más tienden a afectar la rapidez de la corrosión son:

- 1) Posiciones relativa de los metales en la serie galvánica.
- 2) Tamaño del área anódica con respecto al área catódica.
- 3) Localización del ánodo con respecto al cátodo.
- 4) Resistencia del circuito metálico.
- 5) Tipo y composición del electrolito.
- 6) Conductividad o resistividad del electrolito.
- 7) Uniformidad del electrolito.
- 8) Condiciones de despolarización. (Manual AWWA II).

2.2.4 Protección contra la corrosión

Dentro de las medidas utilizadas industrialmente para combatir la corrosión se incluyen cuatro de las más aplicadas, y haremos énfasis de las dos últimas que son más utilizadas:

- a) Uso de materiales de gran pureza.
- b) Presencia de elementos de adición en aleaciones, ejemplo aceros inoxidable.
- c) Recubrimiento superficial: pinturas, capas de óxido, recubrimientos metálicos.
- d) Protección catódica. (González ,2010).

2.3 Recubrimiento de la estructura.

2.3.1 Introducción

El papel de recubrimiento no metálico en la protección contra la corrosión es el de aislar al metal base del medio ambiente. Puede que le proporcione un aislamiento eléctrico, resistencia al calor y algo de resistencia a las altas de temperaturas, siendo a la vez estable e inerte.

En principio, el campo de aplicación es amplio, aunque en la práctica es evidente que el empleo de pinturas bituminosas es más fácil que el vidrio o termoplásticos, reduciéndose así más las posibilidades de aplicación. Cada material no metálico tiene

aplicaciones específicas que lo hacen particularmente valioso para ciertos empleos, y este factor puede ser muy importante al hacer el balance económico excesivo.

2.3.2 Recubrimiento de pinturas

Un recubrimiento, puede definirse como: Tratamiento superficial que se aplica a los materiales para protegerlos de los ataques del medio o para mejorar su comportamiento a la fricción, erosión y desgaste. Su función es separar del medio los metales y así evitar el ataque de agentes corrosivos tales como humos industriales, líquidos y gases.

La efectividad de un recubrimiento, va a depender de la preparación adecuada de la superficie metálica. Este factor es por lo común más importante que la calidad del recubrimiento a aplicar. Los objetivos principales que cumple la preparación superficial son:

- 1) Eliminar la suciedad, grasa y aceite de la superficie; esto se logra con el empleo de solventes minerales y ciertas soluciones alcalinas.
- 2) Eliminar en forma completa la herrumbre y cascarillas de laminación; esto se logra con el decapado con ácidos, tales como H_2SO_4 , HCL a los cuales se les agrega un inhibidor. También es utilizado el método de sand – blasting u el método de granallado, estos dos métodos se conocen como decapado mecánico, y se basan en la eliminación de la herrumbre por la acción de partículas de arena o acero impulsadas a gran velocidad sobre la superficie a limpiar.
- 3) Crear un perfil de anclaje, el cual creara la adhesión del recubrimiento sobre el sustrato. (Suarez, 2002).

2.3.3 Constituyentes de una pintura

1) El aglomerante o vehículo determina las propiedades físicas de la estructura y puede ser aceite, por ejemplo, el aceite de linaza (empleados en las pinturas inhibidoras), barniz, resina, epóxido, poliuretano, etc. Así mismo, determina la velocidad de secado, pero la cantidad de lustre y dureza depende del tipo de pigmento empleado.

2) El pigmento influye en el carácter y las propiedades químicas de la pintura. Una pintura de imprimación contendrá pigmentos inhibidores, como el minio, óxido de zinc o polvo metálico, mientras que una pintura de acabado tendrá agentes colorantes estables. Los pigmentos inhibidores están unidos por el aceite de linaza, y entre los más importantes se encuentran el minio y el plomo metálico para el acero y el cromito de zinc.

3) El disolvente puede también actuar como aglomerante, para un barniz, betún o laca es simplemente un disolvente orgánico. El disolvente puede ser un hidrocarburo (benceno), un alcohol o Ester (acetato de amilo).

4) Puede emplearse varios aditivos, ya sea para diluir el disolvente (diluyentes), modificar el pigmento principal o aumentar la cohesión al formarse un polímero o celulosa en el secado.

El objeto de aplicar un recubrimiento es para inhibir simultáneamente las reacciones anódicas o catódicas o cada una de ellas, en el proceso corrosivo, y como una pintura, recubrimiento no metálico, no participa directamente en las reacciones de electrodo, se creía tradicionalmente que esto ocurría por la exclusión mecánica del electrolito. Sin embargo, las películas de pintura se comportan como membranas permeables, a través de las cuales puede difundir el oxígeno y el agua a velocidades significantes, y, por lo tanto, cualquier inhibición de la reacción se debe a su gran resistencia eléctrica y electrolítica.

El fallo de un recubrimiento de pintura puede atribuirse a varias causas bien definidas, en principio cada una de las cuales puede eliminarse. La descomposición de la película de pintura puede ser debido al medio corrosivo inmediato, pero con frecuencia se debe a la simple oxidación y a los efectos de la luz solar (el efecto decolorante de la luz ultravioleta sobre la estabilidad del color es bien conocido). La humedad en particular, puede causar al principio hinchamiento y formación de ampollas cuando se ha iniciado la corrosión subyacente.

El agrietamiento de la película de pintura puede ser debido a estas causas, pero puede ser producido también por una mala adhesión y un envejecimiento de las pinturas a base de aceite, disminuyendo la elasticidad. Por tanto, la importancia de una preparación previa de la superficie no hace falta subrayarla. (Gabe, 1976).

2.3.4 Capas de recubrimiento

Los sistemas de recubrimientos pueden ser de dos o tres capas de acuerdo a las especificaciones del trabajo y del recubrimiento a aplicar, las capas deben de ser compatibles entre ellas para obtener una buena adherencia y cada una debe de poseer propiedades determinadas de acuerdo a la posición en que se encuentran.

Las capas son:

Primera capa o fondo

- Buena adhesión
- Buena resistencia a la corrosión
- Pigmentos anticorrosivos
- Debe ser compatible con la intermedia

Capa intermedia

- Da el espesor
- Mayor pigmentos / vehículos
- Alta resistencia a la velocidad de transferencia de la humedad
- Alta resistencia eléctrica

Capa final o acabado

- Sellado
- Resistencia a los agentes químicos
- Bajo pigmento / vehículo
- Alta resistencia a la humedad. (Suarez, 2002).

Está comprobado que si el 95 % de una tubería está bien revestida, esta puede estar prácticamente libre de corrosión, pero no existe un material de recubrimiento que sea un aislante perfecto y siempre conducirá cierta cantidad de corriente. De lo expuesto se concluye que una estructura revestida, solo está protegida cuando recibe una protección

adicional complementaria. Esta se consigue mediante la implementación de los sistemas de protección catódica.

2.3.5 Fundamentos de la protección catódica

Bien conocido es que, para que exista la corrosión electroquímica o húmeda, es necesaria la existencia en funcionamiento de una pila galvánica que está formada de un ánodo, un cátodo y un electrolito. En el instante que uno de estos elementos falle, esta dejara de funcionar y por tanto se detendrá la corrosión.

Los sistemas de protección contra la corrosión basan su criterio en la eliminación de algunos de estos elementos o en hacerlos inoperantes. La manera de eliminar todos los ánodos de la superficie metálica haciéndola toda catódica, se reconoce con el nombre de Protección Catódica. Y se consigue volviendo catódica toda la superficie de dos formas diferentes o soluciones que son. La protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio y La protección catódica con corriente impresa.

2.3.6 Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio

Conectando el metal que se quiere 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 sencillamente en la creación de una pila galvánica en que el metal a proteger actué obligatoriamente como cátodo (polo positivo de la pila) y por consiguiente el metal anódico se sacrifica, es decir se disuelve. El metal utilizado en la práctica por su bajo costo y alta resistencia mecánica es el acero, los

metales que trabajan con él y que tienen un potencial más negativo quedan limitados al magnesio, zinc y aluminio. (Figura 3). (Suarez, 2002).

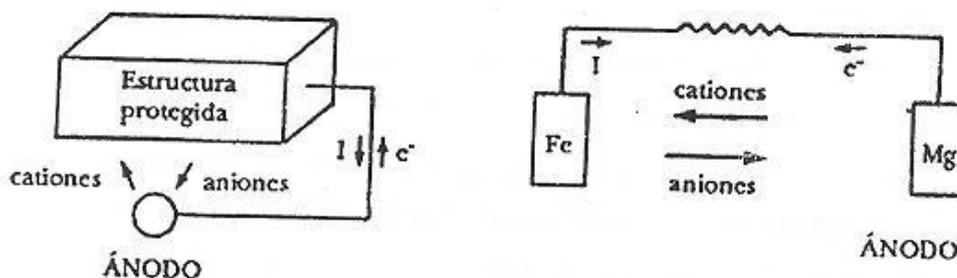


Figura 3. Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio.

2.3.7 Protección catódica con corriente impresa

En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria en la protección de una estructura. Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se quiere proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferro silicio grafito, titanio platinado, etc. Es completamente la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico. (Figura 4). (<http://bibliotecadigital/10>).

Figura 4. Protección catódica con corriente impresa.

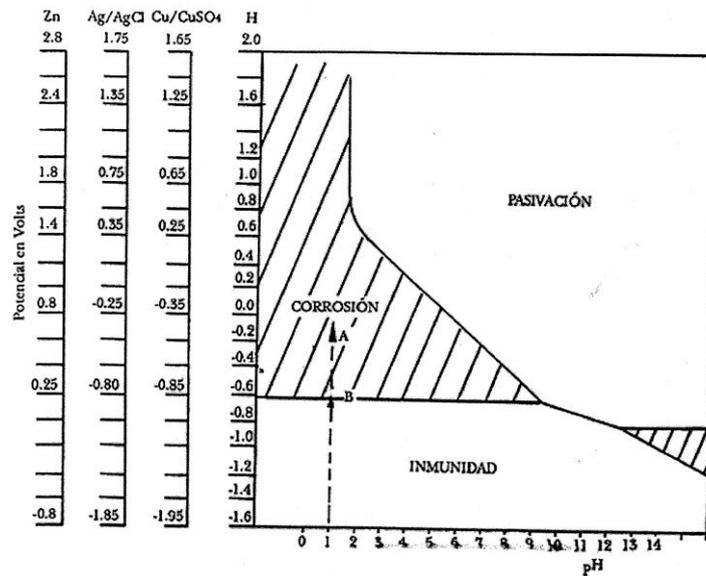
2.3.8 Criterios de protección catódica

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

Varios criterios pueden ser adoptados para comprobar que la estructura en mención está exenta de riesgo de corrosión, basados en unos casos en función de la densidad de corriente de protección aplicada y otros en función de los potenciales de protección obtenidos.

Sin embargo el criterio más apto y universalmente aceptado es el potencial mínimo que debe existir entre la estructura y el terreno, medición que se realiza con un electrodo de referencia. El criterio de potencial mínimo se basa en los estudios realizados por el Profesor Michael Pourbaix, en 1939, quien estableció a través de un diagrama de potencial de electrodo vs pH del medio, un potencial mínimo equivalente a -850 mV con relación al electrodo de referencia cobre / sulfato de cobre, observando una zona indefinida por la inmunidad del acero.

Los potenciales usuales son de — respecto al Cu / como mínimo y recomendar así máximo protección que entre los 1200 mV, sin valores más puesto que se riesgo de sobre que afecta manera el



Los criterios de mínimo que 850 mV SO₄Cu permitiendo mismo, un potencial de puede estar mV a 1300 permitir negativos, corre el protección, sobre

recubrimiento de la pintura, ya que hay riesgo de protección catódica de reducción de hidrogeno que se manifiesta como un ampollamiento de la pintura. (<http://www.pandeo.com/cache.asp?IDRes=2779>)(05/06/2010).

2.3.9 Diagrama de Pourbaix

Consideremos un espécimen de acero al carbono sumergido en ácido clorhídrico (HCL) de concentración 0.1 M. El acero se disolverá con desprendimiento de hidrogeno (H₂). El potencial de corrosión de espécimen quedara entre los potenciales de equilibrio correspondientes al electrodo de H₂ y Fe (puntos A y B de la figura).

De acuerdo con el diagrama, hay un camino para prevenir la corrosión mediante un cambio de potencial. Aplicando una corriente catódica, el potencial del espécimen de acero se desplazara en la dirección negativa, hacia la zona de inmunidad, en la cual el metal, termodinámicamente, se encuentra estable (no se puede corroer). Para lograr este desplazamiento del potencial en la dirección negativa, el objeto que se corroe se une eléctricamente a un metal más negativo en la serie electroquímica, un ánodo, formando una serie galvánica en la que actuara como cátodo. Para que el metal este protegido catódicamente, el valor de su potencial de electrodo tiene que quedar por debajo de su potencial de corrosión en la solución mencionada. Su disolución será así prevenida totalmente (protección catódica incompleta). Como consecuencia de la corriente que circule en la cerda galvánica formada, en el metal protegido catódicamente tendrá desprendimiento de hidrogeno o la reducción de oxígeno. (Suarez, 2002).

Figura 5. Diagrama Potencial pH para el Hierro (Fe) de acuerdo a los electrodos de referencia.

2.3.10 Medición de la resistencia de suelo

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

En la práctica de ingeniería de la corrosión se requiere medir la resistividad de una extensión, a una cierta profundidad. Para ello se utiliza el método de Wenner más conocido como el método de los cuatro pines, o de los cuatro electrodos.

Los detalles de la operación varían de acuerdo con el instrumento particular empleado, pero el principio es común a todos. Se entierran cuatro varillas de cobre equidistantes, y se conectan las dos externas C1 y C2 a los terminales de la fuente de corriente, y las dos internas P1 y P2 que miden el potencial. Las dos varillas externas sirven para introducir corriente en el suelo.

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

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

La corriente de la prueba fluye a través de una semi esfera de suelo de diámetro igual a la separación entre las 2 barras, y se considera la resistividad medida hasta esa profundidad.

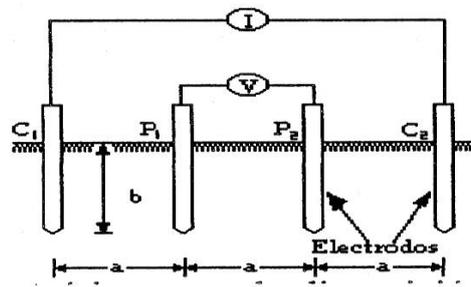
Aplicando la ley de ohm y la geometría del cuerpo, se puede calcular la resistividad, según la ecuación. (D . R. © 1995, Fondo de Cultura Económica)

Carretera Picacho – Ajusco 227; 14200 Méjico, D.F.

ISBN 968 – 16 – 3153 – 6.

Fig. 6. Esquema de instalación para medir la resistividad del suelo por el método de Wenner.

2.4 Técnicas de
2.4.1 Otros
catódica



medición
criterios de protección

Para proteger
estructuras enterradas

catódicamente las
o sumergidas se debe

cumplir, como mínimo, con uno de los criterios indicados en las Normas Nace Estándar RP01969 – 92 (o la última revisión) “Control de corrosión externa de sistemas de tuberías metálicas subterráneas o sumergidas”, sección 6, y la NACE Standard RP0193 – 93 (o última revisión).

For steel and cast iron structures

Norma NACE Standard RP0169 – 92.

Section 6

- Se alcanza protección cuando se obtiene, con la protección catódica aplicada, **un potencial negativo (catódico) mínimo de 850 mv**, medido respecto a un electrodo de referencia Cu / CuSO₄ saturado en contacto con el electrolito. Se deberán considerar caídas de voltaje distintas a aquellas a través del límite

estructura – a – electrolito para la interpretación válida de esta medición de voltaje.

- Un potencial Polarizado negativo de por lo menos 850 mv, relativo a un electrodo de referencia Cu / CuSO₄ saturado.
- Se alcanza protección cuando se obtiene **un mínimo de 100 mv de polarización catódica** entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. Este Potencial se determina al interrumpir la corriente protectora y establecer la caída instantánea del potencial.

For steel and cast iron structures

Norma NACE Standard RP0169-92

Sección 6

Condiciones especiales

- En algunas situaciones, como en presencia de sulfuros, bacterias, temperaturas elevadas, medios ambientes ácidos y metales disímiles, puede que los criterios anteriores no sean suficientes
- Cuando una tubería está envuelta en concreto o enterrada en suelo seco o muy aireado de alta resistividad, pueden ser suficientes valores menos negativos que los criterios citados anteriormente.

Notas de precaución

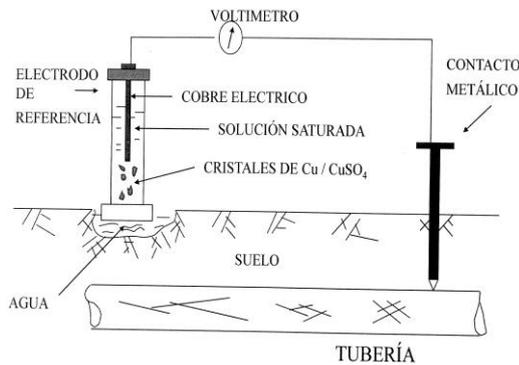
- Se advierte precaución contra el uso de potenciales polarizados menos negativos de $-0,850$ V, para protección catódica de tuberías cuando las presiones y condiciones operativas conducen a agrietamiento debido a corrosión por esfuerzo.

El uso de potenciales excesivamente polarizados en tuberías revestidas se debería evitar para minimizar el desprendimiento catódico del revestimiento.

Se deberían evitar potenciales polarizados que resulten en generación excesiva de hidrogeno en todos los metales, particularmente en los aceros de mayor resistencia, algunos grados de acero inoxidable, titanio, aleaciones de aluminio y tubería de concreto pretensado.

Medición de Potenciales

Las siguientes provenientes de la campo de B. HUSOCK aplicadas a tuberías de sin influencias externas y metálicos pueden ser cierta prudencia al caso áreas urbanas y sirven más ampliamente los potenciales medidos en situ.



consideraciones experiencia de aunque son acero enterradas efectos bi – utilizadas con de tuberías en para interpretar

- Los potenciales de tuberías más nuevas son más negativos que aquellos de tuberías más viejas.
- Los potenciales de tuberías revestidas son más negativos que aquellos de tuberías desnudas.
- La variación de potenciales con respecto a la distancia es generalmente mayor a lo largo de una línea desnuda que a lo largo de una línea revestida.
- Los potenciales normales en tuberías revestidas caen el rango de -0.65 a -0.75 V.
- Tuberías nuevas recién instaladas pueden tener valores negativos más altos y tuberías muy viejas pueden tener potenciales negativos menores.
- En los suelos de alta alcalinidad, los potenciales naturales serán menos negativos que aquellos medidos en suelos neutros o ácidos.
- Los potenciales naturales estructuras / suelo de tuberías u otras estructuras de acero sin protección caerán generalmente entre -0.30 a -0.70 V.
- Con la ayuda de evaluaciones de potenciales es posible saber si una estructura metálica y tubería enterrada o sumergida está sujeta a corrosión por corrientes vagabundas. Si los registros de potenciales medidos en cierto lapso de tiempo muestran fluctuaciones apreciables, esto indica que estamos tratando con corriente que llega desde equipos rodantes eléctricos. En cambio, las corrientes que llegan a la estructura desde otro sistema de protección catódica no fluctúan y la identificación requiere de otro análisis.

(Fundación Instituto de Mejoramiento Profesional. Colegio de Ingenieros de Venezuela. Corrosión y Protección Catódica. Instructor: Ing. Naddord Zambrano, Caracas, Abril 2013).

Fig. 7. Medición del potencial de la estructura con respecto al electrodo de referencia.

2.4.2 Mediciones de potencial.

Generalidades.

Las determinaciones de potenciales de estructuras o tuberías de acero al suelo son mediciones de voltaje entre una estructura enterrada, en contacto con el suelo o sumergida y un electrodo de referencia. Las mediciones se utilizan para determinar áreas de la estructura mecánica que está experimentando corrosión y el efecto de sistemas de protección catódica sobre una estructura metálica.

De acuerdo a la Norma NACE RP – 01– 69, la definición de potencial reza como sigue: “Potencial de la estructura – a – suelo: la diferencia de potencial entre estructuras metálicas en un electrolito común”. La diferencia de potencial entre una estructura metálica enterrada y la superficie del suelo que se mide con una semi – celda o electrodo de referencia en contacto con el suelo”.

Cuando determinamos el potencial de un metal sumergido o enterrado en un electrolito, el suelo casi nunca está seco, pero contiene agua del subsuelo o capilar, estamos midiendo el potencial de una celda que consta de un metal y la solución como un electrodo y la semi – celda como otro, ambas unidades entre sí por el puente electrolítico. En la electroquímica teórica el electrodo o semi – celda patrón utilizado es el de hidrogeno, pero en los trabajos de campo se usan electrodos más fuertes y prácticos. En el control corrosión

de tuberías o equipos de producción de petróleo, la semi – celda de cobre el sulfato de cobre saturado es la más usada.

En trabajos de control de corrosión y protección catódica el potencial de estructura – suelo medido con la semi – celda de Cu / CuSO₄ saturado es casi siempre de polaridad negativa, y en general se dice que un potencial es más negativo cuando el

valor absoluto del potencial es mayor, y menos negativo o de menor valor negativo cuando los valores negativos son inferiores.

Cuando se toman potenciales en el terreno los valores se deben analizar tomando en consideración todas las condiciones vecinas. Se deberá tener especial cuidado en determinar si el mecanismo es galvánico o electrolítico. Para la siguiente discusión se ha consultado y usado ampliamente un artículo de B. Husock sobre el tema. Aunque se trata de potenciales para tuberías enterradas las consideraciones son válidas adaptándolas para fondos de tanques sobre el suelo.

La corrosión electrolítica o por corrientes vagabundas se debe a corrientes que se introducen al suelo por fuentes de corriente continua en la vecindad de la estructura bajo estudio. Estas fuentes pueden entre otras ser sistemas de protección catódica para proteger otras estructuras cercanas, sistemas eléctricos de tranvías, metros, transportes rápidos masivos o equipos rodantes en minas de carbón.

La corriente galvánica es la actividad electroquímica natural que ocurre sobre estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Este tipo de corrosión incluye todas las corrosiones debido a actividad local, de línea larga y actividad bi – metálica (celda formada cuando se unen eléctricamente dos metales diferentes en la serie galvánica).

Con la ayuda de evaluaciones de potenciales es posible saber si una estructura metálica o tubería enterrada o sumergida está sujeta a corrosión por corrientes vagabundas. Si los registros de potenciales medidos en cierto lapso de tiempo muestran fluctuaciones aplicables, esto indica que estamos tratando con corrientes que llegan desde equipo rodante eléctrico.

En cambio las corrientes que llegan a la estructura desde otro sistema de protección catódica no fluctúan y deben ser identificadas o detectadas levantando perfiles de potencial con la semi – celda de $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$ saturado sobre la tubería enterrada y luego separada a cierta distancia lateralmente de la tubería (potenciales remotos).

En situaciones galvánicas, las áreas anódicas se encuentran donde los potenciales “ sobre el tubo” son más negativos que aquellos medidos en las áreas catódicas. En la

condición de corrientes vagabundas las zonas anódicas están ubicadas donde los potenciales son menos negativos que aquellos medidos en las áreas catódicas.

Las siguientes proposiciones pueden servir para tener una interpretación más comprensiva de mediciones de potencial.

- a) Los potenciales de tuberías más nuevas son más negativos que los potenciales de tuberías más viejas.
- b) Los potenciales de tuberías revestidas (alquitrán de hulla, asfáltico, plástico, etc., son más negativos que aquellos de tuberías desnudas o no revestidas.
- c) La variación de potenciales con respecto a la distancia es generalmente mayor a lo largo de una línea desnuda que a lo largo de una tubería revestida.
- d) Los potenciales normales medidos a lo largo de tuberías desnudas caen en el rango de $-0,50$ a $-0,60$ V. Tuberías nuevas tendrán potenciales más negativos y tuberías muy viejas pueden presentar potenciales muchos más bajos.
- e) Los potenciales normales en tuberías revestidas caen en el rango de $-0,65$ a $-0,75$ V. Tuberías nuevas recién instaladas pueden tener valores negativos más altos y tuberías muy viejas pueden tener potenciales negativos menores.
- f) En suelos de alta alcalinidad, los potenciales naturales serán, menos negativos que aquellos medidos en líneas en suelos neutro o ácidos.
- g) En tuberías desnudas hay usualmente una correlación entre medidas de resistividad y potenciales (localidades con suelos de mayor resistividad corresponden a sitios con potenciales negativos más bajos).

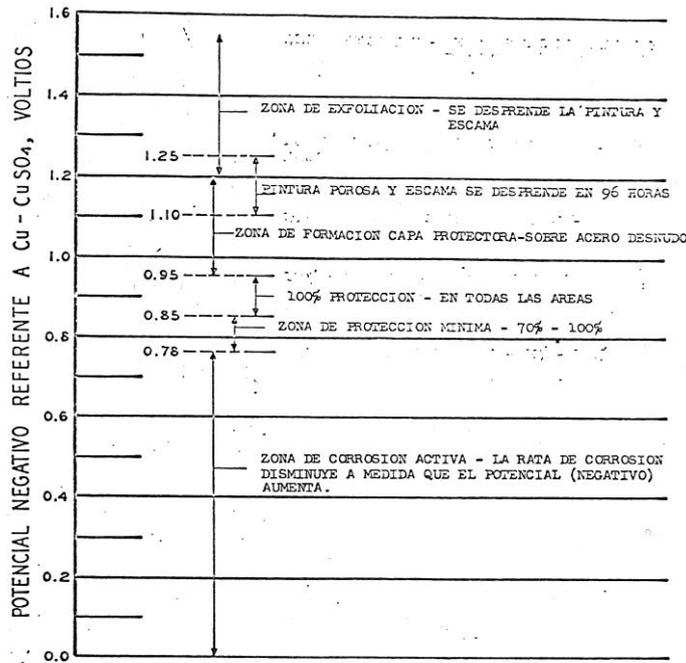
Las proposiciones antes mencionadas son generales para tuberías de acero en áreas sin corrientes vagabundas y exentas de influencia bi – metálica o de sistemas extraños de protección catódica. Tienen la intención de servir como una guía para interpretar las mediciones de potencial y no deben considerarse como principios científicos y no serán válidos bajo todas las condiciones. Son meramente un resumen de la experiencia de campo de Hudson y no son derivaciones de un razonamiento rígido o experimentos controlados.

También incluye una escala de potenciales que cubren el rango de las mayorías de las mediciones de potenciales de protección catódica, tomados del manual de Control de Corrosión de la empresa “Humble Oil & Refining Co”.

Los potenciales naturales “estructura / suelo” de tuberías u otras estructuras de acero sin protección caerán generalmente entre $-0,30$ y $-0,70$ V. Las tuberías protegidas catódicamente con una protección en todas sus áreas tendrán potenciales de $-0,85$ a $-0,95$ V. Más allá de estos valores se comienzan a formar capas protectoras en los

tubos, pero a ciertos valores pueden presentar problemas con revestimiento e mismo metal.

potencial a lo largo de una línea eléctrica una caída de entre puntos, lo hay un flujo de través del suelo catódicas, cuya depende de las electroquímicas, y la resistencia de circuito de la celda galvánica.



RELACION CON RESPECTO A POTENCIALES DE ACERO PROTEGIDO CATODICAMENTE (MANUAL DE CONTROL DE CORROSION, HUMBLE OIL & REFINING CO. 1963)

partir de altos se presentar el incluso con el

Diferencias de largo de una continuidad presentaran potencial que indica que corriente a entre zonas intensidad condiciones

SI LOS POTENCIALES TUBERIA / SUELO A LO LARGO DE UNA LINEA TUVIERAN IGUALES VALORES NO FLUIRIA CORRIENTE GALVANICA Y LA ESTRUCTURA NO SUFRIRIA DE CORROSION.

Cuando se aplica suficiente contra - corriente a la sección o área de la estructura que está sufriendo de corrosión para anular o igualar a cero las corrientes galvánicas, los potenciales en los puntos anódicos de la estructuras serian iguales a los de los puntos catódicos y no habría caída de potencial entre los distintos puntos y por consiguiente se paralizaría la corrosión.

Tabla 2. Relación con respecto a potenciales de acero protegido catódicamente.

2.4.3 Potenciales del Acueducto.

Al relacionar El Acueducto con los potenciales obtenidos, usaremos como patrón de comportamiento la tubería desde el punto de vista de la corrosión, por lo tanto tomaremos los valores de la tabla 2, y las proposiciones de B. Husock. Los potenciales medidos son de la tubería / suelo referidos a la semi – celda de Cobre / Sulfato de Cobre, medidos cercanos a la tubería. (Instituto Nacional de Obras Sanitarias: Evaluación y Estudio de Control de Corrosión. Acueducto Sistema Costanero: Barlovento, Edo Miranda. Informe: Datos de Campo, Recomendaciones. ENOSA, Valencia, Marzo 1981).

Valores potenciales naturales medidos en el campo:

- 1) Tanquilla ubicada en el Edificio en construcción de la Facultad de Ciencias.
– 0.088 V.

- 2) Tanquilla ubicada detrás del Edificio de aulas de la Facultad de Ciencias.
— 0.066 V.

De estos valores medidos en el terreno, comparándolos con la Tabla 2, ninguno se acerca y menos sobre pasa el valor de protección catódica — 0.85 V. Lo cual indica que la tubería está pasando por un proceso de corrosión activo en aquellas zonas donde falla el revestimiento y las zonas de los suelos están en la escala corrosiva.

2.4.4 Densidad de Corriente.

A fin de poder suplir la corriente necesaria a la superficie metálica de una tubería enterrada o sumergida, ya sea desnuda o revestida se requiere conocer la densidad de corriente para el caso particular.

Por cualquier método que pueda ser empleado, la densidad de corriente de protección ha sido determinada en función del estado superficial del acero, que puede estar pintado o no o recubierto con un sistema pasivo de protección. Algunos resultados prácticos se agrupan en la Tabla 3.

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

Condición	mili Amper/pie²
Acero desnudo en agua salada en movimiento	10 - 15
Acero desnudo en agua salada estancada	5 - 8
Acero desnudo enterrado	1 - 3
Acero con revestimiento pobre enterrado o sumergido	0,1
Acero con revestimiento bueno enterrado o sumergido	0,003
Acero con revestimiento muy bueno enterrado o sumergido	0,0003 ó menos

Tabla 3. Densidades de corrientes necesarias para protección

2.5 Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio.

Ejecutar la Protección Catódica con ánodos de sacrificio o galvánicos se lleva a cabo normalmente con tres metales característicos; Zinc (Zn), Magnesio (Mg), Aluminio (Al) y sus aleaciones. El zinc ha sido 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 los dos otros metales, que en los últimos años han tenido un gran desarrollo.

2.5.1 Propiedades de un material anódico

En la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico con respecto a otro si se encuentra a un potencial más negativo que otro. Ejemplo, el hierro será

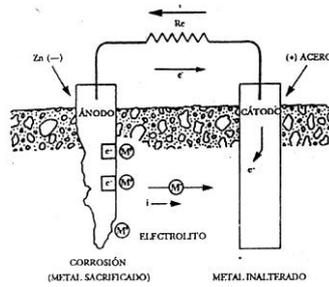


Fig. 8 Mecanismo de Protección Catódica con Ánodo de Sacrificio

ánódico con relación al cobre y catódico con respecto al zinc. El metal que actúa como ánodo se sacrifica es decir se disuelve a favor del metal que actúa como cátodo; por esta razón el sistema se conoce como protección catódica con ánodos de sacrificio.

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

- 1- Debe tener un potencial 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 y -1.70 V.
- 2- Cuando el metal actúe como ánodo debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, no puede presentar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- 3- El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amper – hora por Kg de material (A – h/Kg) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente
- 4- En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
- 5- El metal debe ser de fácil adquisición y deberá poderse fundir en diferentes formas y tamaños.

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

2.5.2 Características Electroquímicas del Zinc, Magnesio y Aluminio

Las propiedades que deben reunir los materiales anódicos para que puedan ser utilizados como tales en la práctica, remiten, pues, al **Zn**, **Al** y al **Mg** como metales seleccionados. En una reacción electroquímica, un metal se disuelve de acuerdo con las leyes de Faraday, las cuales dicen que, prácticamente, el paso de una cantidad de corriente de 96500 coulomb (número de Faraday) disuelve una cantidad equivalente de cualquier equivalente de cualquier elemento químico. Por tanto, si una cantidad de electricidad de **Q** coulomb pasa, la cantidad de metal disuelto será:

$$Q \times 1 \text{ equiv} / (96500 \times C) \times 1 \text{ mol} / (n \text{ equiv}) \times P.A \times g / 1 \text{ mol} = p.g.$$

Además,

$$Q = I \times t$$

(coulomb = ampere \times 1segundo). Por tanto.

$$p = I \times t \times P.A / (n \times 96500)$$

Donde:

p = gramos de material disuelto.

I = intensidad de corriente en amper.

t = tiempo en seg.

P.A = peso atómico del metal en g.

n = valencia del elemento, numero de electrones que pierde el metal al disolverse.

El cociente $P.A / (96500 \times n)$ es el equivalente electroquímico.

De esta forma se puede calcular la cantidad de metal consumido para suministrar la cantidad determinada de corriente. Estos datos se presentan en la tabla 3.

Propiedades	Mg	Zn	Al
Peso atómico (g)	24,32	65,38	26,97
Peso específico a 20 ⁰ C, g/cm ³	1,74	7,14	2,70
Punto Fusión (0 ⁰ C)	651	419,4	660,1
Resistencia Eléctrica (Ω/cm)	4,46x10 ⁻⁶	6x10 ⁻⁶	2,62x10 ⁻⁶
Valencia	2	2	3
Equivalente - gramo	12,16	32,69	9
Equivalente electroquímico (mg/C)	0,12601	0,3387	0,0931
Capacidad eléctrica teórica (A/kg)	2204	820	2982
Capacidad eléctrica teórica (A - h/dm ³)	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 ³ /A - año)	2,3	1,5	1,1
Potencial normal a 25 ⁰ 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

Tabla 4. Propiedades físicas y electroquímicas del magnesio, zinc y aluminio

Estos valores consideran que el metal no sufre auto corrosión, es decir, que se utiliza íntegramente para producir corriente. Para un rendimiento de corriente para el 100 % el aluminio es el que sufrirá la pérdida de peso más pequeña ya que, según la tabla 4, es el que proporciona mayor capacidad eléctrica, es decir el mayor número de coulomb por Kg de metal disuelto. Siguiendo el razonamiento, para suministrar una misma intensidad de corriente, sobre la base de un rendimiento en corriente del 100 % (digamos 2982 amp – h), necesitaríamos 1 Kg de aluminio, 3,64 Kg de zinc y 1,35 Kg de magnesio, lo cual implica, en porcentajes, un rendimiento practico para el zinc de 27.5 % y para el magnesio 74 % de corriente aproximadamente.

Ahora bien los rendimientos prácticos no alcanzan nunca el 100%, ya que en la práctica industrial no se pueden fabricar ánodos galvánicos puros, porque resultan incosteables. Los rendimientos normales están entre 50 % y 90 % del rendimiento teóricamente considerado. En la tabla 4 se presentan valores teóricos y prácticos de la capacidad eléctrica para los metales comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio.

<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

Tabla 5.
Valores

electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos.

2.5.3 Vida del ánodo.

Vida = (cap de corr (A – año /kg) × p. ánodo (kg) × Rend (%) × Fact de útil (%)) ÷ I(A).

Por ejemplo, la vida de un ánodo de Zn de 14 Kg de peso, capaz de suministrar una intensidad de corriente de 0,1 A, será;

Capacidad de corriente (Tabla 4)

$$820 \text{ A – h / kg}$$

Teniendo en cuenta que un año tiene 8760 horas

$$0,094 \text{ A – año / kg}$$

Rendimiento : 90%

Factor de utilización : 85%

Tenemos que :

$$\text{Vida} = (0,094 \times 14 \times 0,9 \times 0,85) \div 0,1 = 10,07 \text{ años}$$

2.5.4 Cálculo del número de ánodos

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

Y como se conoce la intensidad que es capaz de generar un ánodo, tendremos entonces:

$$\text{Numero de Ánodos} = I(t) \div I \text{ ánodo.}$$

2.5.5 Fijar los ánodos

Los ánodos se pueden colocar en la estructura a proteger con distintos procedimientos, pero siempre con la ayuda del alma que los atraviesa que suele ser redonda y de acero. Los extremos que sobresalen del alma pueden doblarse ligeramente y soldarse, que es el caso más común. Pero también se utilizan con frecuencia sistemas de grapas o espárragos o simplemente se atornillan.

Cuando van enterrados se introducen en una bolsa de tela, conocido como “ Backfill “ el cual consiste en 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. (D.R. ©, Fondo de Cultura Economica).

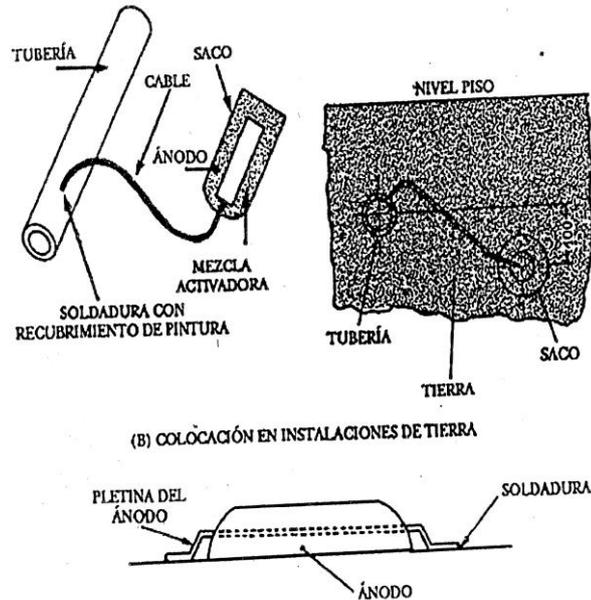


Figura 9. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio.

2.5.6 Ventajas y limitaciones de la protección con ánodos galvánicos.

Ventajas.

- 1) Fácil de instalar.

- 2) No se necesita de una fuente de corriente continua, ni de un regulador de voltaje.
- 3) No provoca problemas de interferencia.
- 4) Tiene un bajo costo de mantenimiento.
- 5) Permite obtener una distribución de corriente uniforme.
- 6) Se puede aumentar el número de ánodos, con el sistema en operación.

Limitaciones.

- 1) La corriente suministrada es limitada.
- 2) Es ineficaz en ambientes de corriente elevada.
- 3) Su costo inicial es alto.
- 4) Su consumo en ánodos es alto para estructuras enterradas mal revestidas y sin revestimiento en agua de mar.

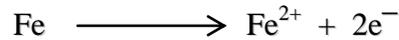
2.6 Protección Catódica por Corriente Impresa

2.6.1 Origen de Protección Catódica por Corriente Impresa

El sistema de protección catódica por corriente impresa se llevó a cabo cien años después que el de ánodos de sacrificio. En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para suministrar la corriente necesaria para la protección de una estructura. Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificadora) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico. Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material

anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que este suministra.

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



y por lo tanto el ánodo se consume con el tiempo.

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

Un ánodo dispersor, una fuente de corriente continua, y el cable protector de la corriente. (Suarez 2002).

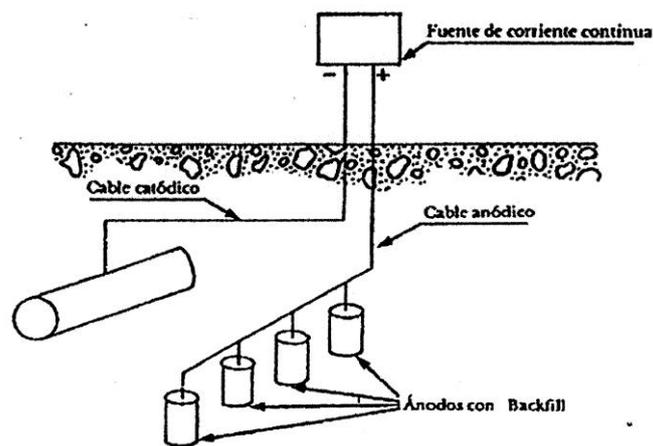


Figura 10. Protección Catódica con Corriente Impresa de una Tubería Enterrada.

2.6.2 Fuentes de Corriente

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo.

Un sistema de corriente impresa debe poder funcionar de forma permanente al menos durante 10 años.

2.6.3 Rectificadores

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

Estos aparatos se alimentan con corriente alterna. Si se trata de rectificador monofásico, estará constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario de 110 a 220 v (tensión de red de distribución), La tensión de salida puede ajustarse según las necesidades. Un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica. El selenio es más barato, pero también es más frágil que el silicio. (Figura 11).

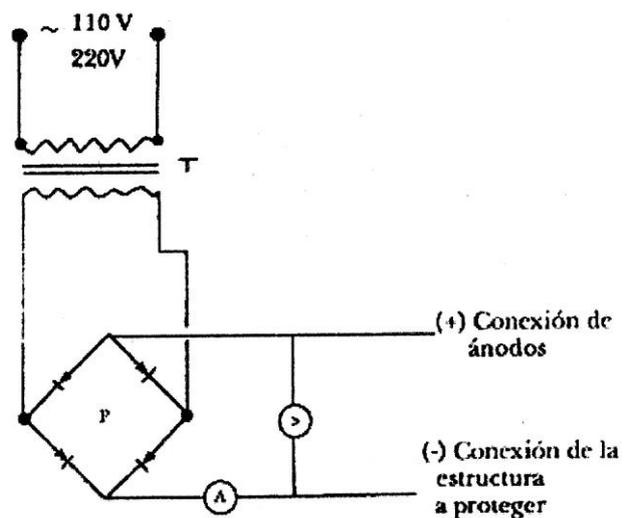


Figura 11. Esquema de un Transformador Monofásico.

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

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

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

2.6.4 Ánodos Auxiliares

Todos estos ánodos van consumiéndose a mayor o menor velocidad con el paso de la corriente. Así, por ejemplo, la chatarra de hierro se consume muy rápidamente y el titanio platinado a un ritmo muy lento. Algunos de estos electrodos se detallan brevemente.

Chatarra de hierro

Por ser lo más económico, la chatarra de hierro es utilizada con frecuencia como ánodo auxiliar. Dentro de los perfiles es el carril viejo el más utilizado y, dentro de las fundiciones la tubería.

Puede ser aconsejable la utilización de este tipo de ánodos en terreno de resistividad elevada, y es recomendable también que se le rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque (con un diámetro medio de partícula de 10 mm).

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

Ferrosilicio

El ánodo de Ferrosilicio es recomendable en terreno de media y baja resistividad. Se coloca hincado o tumbado, en el suelo, y normalmente rodeado de un relleno de carbón de coque.

A intensidades bajas de corrientes (1A), su vida es prácticamente ilimitada, y su capacidad máxima de salida de corriente es de unos 12 a 15 amp por ánodo. Su consumo oscila, a intensidades de corriente altas, entre 0.1 y 0.3 kg/ – año.

Sus dimensiones más normales corresponden a 1500 mm de longitud y 75 mm de diámetro, con un peso aproximado de 60 kg

El ferrosilicio es muy frágil en virtud de su estructura cristalina, por lo que se ha de tener un extremo cuidado en su embalaje y También existen los ánodos de Grafito, Titanio platinado, Tántalo platinado, Plomo plata, Titanio, oxido de titanio y Oxido de rutenio.

Ánodos Auxiliares: Propiedades

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

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

- a) Bajo consumo.
- b) Densidad de corriente erogada.
- c) Pequeñas dimensiones.
- d) Baja resistividad.
- e) Buena resistencia mecánica.
- f) Elevado potencial de ruptura.

Los ánodos que se utilizan en la corriente impresa pueden dividirse, en cuanto a su consumo, en: a) ánodos solubles, b) semi inertes y c) inertes. Actualmente se prefieren los inertes ya que, pese a su costo es más alto, tienen mejores características. En la tabla 4 se resumen las propiedades principales de los ánodos utilizados en la corriente impresa, clasificados según su consumo. En el mismo cuadro se incluye el medio en el cual pueden utilizarse.

Tipo	Peso específico g/cm ³	Consumo kg/A-año	Densidad de corriente A/m ²		Utilización (medio)
			máxima	práctica	
Acero Chatarra	7.8 7.0	~9. 4.5-1	5	1	todos
Grafito	1.6	0.1-1	10-100	2.5-40	terreno, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Ferro-silicio: 0.95%C, 16%Si, 0.75% Mn	~7	0.25-1	30-40	10-100	agua dulce, terreno
Fe-Cr-Si: 0.95%C, 0.75% Mn, 4.5%Cr, 14.5%Si	7	0.25-1	270		terreno, agua de mar, fondo marino
Pb-Ag (2% Ag)	11.3	~0.2	300	90-65	sólo agua de mar; excluido el fondo marino
Pb-Ag-Sb (1%Ag, 6%Sb)	11	~0.5	300	50-200	
Titanio platinado	4.5	8.10 ⁶	400 por cada micra de platino de espesor	500-1000	terreno no salino con backfill, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Niobio platinado	8.4			500-700	
Tántalo platinado	16.6			500-1100	
Titanio-óxido de rutenio (DSA)	4.5	5.10 ⁷	1100	700-1100	todos

Tabla 6. Características de los ánodos empleados en protección catódica con corriente impresa.

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

En el terreno, los ánodos pueden ser instalados en un lecho de bentonita o polvo de coque, lo cual crea un medio homogéneo, húmedo y de baja resistividad alrededor del ánodo, con lo que se aumenta su diámetro aparente y las dimensiones efectivas del ánodo, y se disminuye de esta forma la resistencia ánodo – suelo, se evitan los problemas de corrosión localizadas que pueden romper el ánodo y reducir el consumo del material anódico.

2.6.5 Cálculo de la protección y distribución de los ánodos.

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

Al establecer la corriente total de protección, se elige el tipo de ánodo con base en los criterios examinados en el párrafo anterior y, teniendo en cuenta la densidad de corriente máxima que puede suministrar cada ánodo, se determina su número por exceso con respecto al teórico.

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

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

En la ubicación de los ánodos o del lecho anódico es muy importante conocer la posición de posibles estructuras que pudieran estar presentes en las vecindades, con la finalidad de evitar fenómenos de interferencia que puedan provocar ataques graves de corrosión. Por ejemplo, si se debe proteger una tubería que cruza a otra, disponiendo los ánodos como aparece en la Figura 12, se interfiere la tubería extraña. Esta, de hecho, representa el camino preferible (de menor resistencia) para la corriente suministrada por los ánodos. Aquella zona de la tubería extraña que recibe la corriente queda protegida catódicamente, mientras que en las zonas de la cual sale la corriente, hay corrosión. Como la mayoría de las tuberías enterradas, está además protegida con algún tipo de recubrimiento aislante, la corriente está relacionada con algún defecto de recubrimiento, por lo cual la densidad de corriente local puede resultar muy elevada y por ahí producir un

ataque particularmente severo.([http:// bibliotecadigital.ilice.edu.mx / sites / ciencia / volumen2/ciencia 3/079/htm/sec – 8.htm](http://bibliotecadigital.ilice.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec-8.htm)).

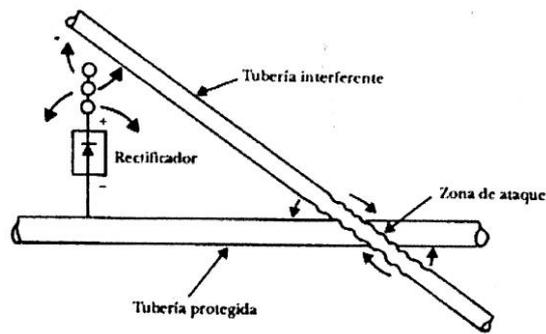


Figura 12. Interferencia provocada por una tubería extraña situada en la proximidad de una tubería protegida catódicamente.

2.6.6 Procedimiento para el cálculo de protección catódica por el método de corriente impresa.

Método.

En este caso, cada ánodo, está conectado de forma individual a la caja de distribución de los ánodos.

Con los datos del Área a proteger, Diámetro y Longitud de la tubería, además de la Densidad de corriente ($J = m A / m^2$ o $m A / ft^2$), se puede proceder a realizar los cálculos.

1) Calcular el Área a proteger de la tubería mediante la fórmula:

$$A_p = \pi \times \emptyset \times L = m^2$$

Dónde:

$$\pi = 3,1416$$

\emptyset = Diámetro de la tubería en pulgadas.

L = longitud de la tubería en metros.

2) Estimar un % del Área a proteger, para obtener el Área efectiva.

$$A_e = \% \times A_p = m^2.$$

3) Calcular la intensidad requerida.

$$I_r = A_e \times J \times f_s = m A.$$

Dónde:

f_s = factor de seguridad

4) Calcular el número de ánodos mediante la fórmula.

$$N \text{ ánodos} = I_r \div I_a.$$

Dónde:

I_a = intensidad de salida del ánodo (m A).

5) Calcular la Resistencia del lecho.

$$R_L = R_V \div N_a + (\partial \times P) \div S = \Omega.$$

Dónde:

$$R_V = \text{Resistencia vertical} = (\partial \times K) \div I_a = \Omega.$$

∂ = Resistividad del suelo = $\Omega - \text{cm}$.

$K =$ Viene dada en función de $(l \div \varnothing a)$, para entrar en la tabla Factor de Forma y hallar su valor.

l/d	K
5	0,0140
6	0,0150
7	0,0158
8	0,0165
9	0,0171
10	0,0177
12	0,0186
14	0,0194
16	0,0201
18	0,0207
20	0,0213
25	0,0224
30	0,0224
35	0,0242
40	0,0249
45	0,0255
50	0,0261
55	0,0266
60	0,0270

Tabla 7. Factor de Forma

$P =$ Factor de paralelismo se halla entrando en la tabla 8, con el Número de Ánodos.

$S =$ Separación en metros que debe haber entre los ánodos.

n	P
2	0,00281
3	0,00289
4	0,00283
5	0,00288
6	0,00252
7	0,00237
8	0,00224
9	0,00212
10	0,00201
12	0,00162
14	0,00168
16	0,00155
18	0,00145
20	0,00135
22	0,00128
24	0,00121
26	0,00114
28	0,00109
30	0,00104

Tabla 8. Factor de Paralelismo.

6) Calcular la Resistencia total del circuito en ohmios.

$$RT = RL + RCT$$

Dónde:

RL = Resistencia del lecho (calculada).

$$RCT = RC (+) + RC (-).$$

$$RC (+) = Lrcda \times fr = L (m) \times fr (\Omega / ft).$$

Dónde:

Lrcda = Longitud que une el rectificador con la caja de distribución de los ánodos.

fr = Es el valor de la resistencia del cable de cobre, y va a depender de su diámetro y se obtiene de la tabla 9.

$$RC (-) = L_{rt} \times fr = L (m) \times fr (\Omega / ft).$$

L_{rt} = Longitud que une el rectificador con la tubería.

7) Obtenidos los valores de I_r y R_T podemos aplicar la Ley de Ohm y obtener el Voltaje de salida.

$$V = I_r \times R_T.$$

Uso general	Resistencia de cables conductores de cobre en ohm por pie Desde 10^{-3} a 25^0 C	
	Conductor Tamaño (Awg)	
Grupos de lechos para corriente impresa	4/0	0,0509
	3/0	0,0642
	2/0	0,0811
	1/0	0,102
	1	0,129
	2	0,162
	4	0,259
	6	0,410
Instalación de Ánodos Galvánicos	8	0,654
	10	1,04
Puntos de Pruebas - tubería	12	1,65
	14	2,62
Instrumentos de plomo	16	4,18
	18	6,66
	20	10,8

Tabla 9. Resistencias de cables de cobre

(Fundación Instituto de Mejoramiento Profesional. Colegio de Ingenieros de Venezuela. Corrosión y Protección Catódica. Instructor Ing. Naddord Zambrano. Caracas, Abril 2013).

2.6.7 Ventajas y limitaciones de la protección catódica por corriente Impresa.

Ventajas.

- 1) Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.
- 2) Un ánodo o un lecho anódico puede suministrar una gran corriente.
- 3) Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.
- 4) El potencial y la corriente son muy variables.
- 5) Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.
- 6) Es eficaz para proteger estructuras no recubiertas y mal recubiertas.

Limitaciones.

- 1) Puede causar problemas de interferencia.
- 2) Está sujeto a rotura de la fuente de corriente.
- 3) Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.
- 4) Requiere de una fuente de corriente continua.
- 5) Posibilidad de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrogeno.
- 6) Conexiones y cables sujetos a rotura.
- 7) Tiene un costo elevado.

CAPITULO III: METODO

3.1 Mediciones.

Una vez ubicados en el sector de la tubería enterrada, se pudo recorrer el trayecto de la aducción y medir la distancia entre las dos tanquillas. Se tomaron fotos durante el recorrido y también desde la parte más alta del edificio en construcción. Ya con todos los datos necesarios, se pudo proceder a calcular las diferentes operaciones que integran el proyecto.



Figura 13. Lugar de la tubería instalada.

En las fotos que aparecen de izquierda a derecha, se puede ver la Tanquilla Principal tomada a nivel del terreno, en la segunda y tercera foto, tomadas desde lo alto del Edificio en Construcción, se puede apreciar la distancia que va desde la Tanquilla Principal hasta el final del Edificio, para unirse a un codo que va en línea perpendicular

hasta la Tanquilla Secundaria y en la cuarta se puede apreciar a nivel del terreno la distancia que codo y la Secundaria.



del terreno la hay entre el Tanquilla

3.2 de Resistividad.

3.2.1 Proceso de resistividad

Mediciones

de medición



Figura 14. Mediciones por el Método de Wenner o de los cuatro pines.

Figura 15. Lecturas arrojadas en las mediciones.



Figura 16. Aparato GEOHM C utilizado en las mediciones.

En el terreno se realizaron tres mediciones de resistencia en puntos diferentes:

$$R1 = 2,77 \Omega$$

$$R2 = 3,88 \Omega$$

$$R3 = 0,63 \Omega$$

Con la aplicación de la fórmula de Resistividad de Suelos a cada una de las mediciones, podemos calcular la Resistividad Promedio.

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R$$

$$\rho_1 = 2 \times \pi \times 1\text{m} \times 2,77\Omega = 17,4048 (\Omega - \text{m})$$

$$\rho_2 = 2 \times \pi \times 1\text{m} \times 3,88\Omega = 24,379 (\Omega - \text{m})$$

$$\rho_3 = 2 \times \pi \times 1\text{m} \times 0,63\Omega = 3,958 (\Omega - \text{m})$$

$$\rho_p = (17,404 + 24,379 + 3,958) (\Omega - \text{m}) \div 3 = 15,247 (\Omega - \text{m}) = 1525 (\Omega - \text{cm}).$$

3.3 Mediciones de Potenciales.

3.3.1 Mediciones.

El aparato GEOHM C es un aparato compacto diseñado para la medida de Resistencias de puesta a tierra en instalaciones eléctricas. El aparato es adecuado para calcular la resistencia específica de puesta a tierra, importante para el dimensionamiento de instalaciones de puesta a tierra. También se puede utilizar para sondeos de suelo geológicos simples y para la planificación de puesta a tierra. Además, puede medir las resistencias óhmicas de conductores sólidos y líquidos o las resistencias interiores de resistencias galvánicos, siempre cuando estén libres de inducción y capacidad.

Con el aparato GEOHM C se puede medir y comprobar:

- 1) Tensión
- 2) Frecuencia
- 3) Resistencia de puesta a tierra
- 4) Resistencia específica de puesta a tierra.



Figura 17. Lecturas de Potenciales tomadas en las dos Tanquillas.

El primer potencial en tomar fue el de la Tanquilla Secundaria cuya lectura arrojó un valor de -0.066 V, y el valor de la Tanquilla Principal -0.088 V.

Estos valores se tomaron haciendo conexión de la tubería al aparato de medición de voltaje y de este al electrodo de referencia cobre sulfato de cobre saturado ($\text{Cu} / \text{CuSO}_4$) al electrolito, como se puede apreciar en las fotos mostradas, dando los valores arriba mencionados.

3.4 Cálculos.

3.4.1 Aplicación del método de Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

La distancia del terreno entre las dos Tanquillas es de 133 metros, una tubería de acero dúctil A – 36 y 6 pulgadas de diámetro. Con una Resistividad Promedio medida de 15,247 ($\Omega - m$) = 1525 ($\Omega - cm$).

1) Área a proteger (A_p)

Fórmula para calcular el área a proteger

$$A_p = \pi \times \emptyset \times L.$$

Dónde: A_p = Área a proteger (m^2)

$$\pi = 3,1416.$$

\emptyset = Diámetro de la tubería (6 pulgadas)

L = Longitud de la tubería (133 m)

J = Densidad de corriente (10 m A / m^2)

$$A_p = 64 m^2$$

2) Área efectiva (A_e)

Se consideró un Área desnuda por defectos de revestimiento y deterioros a futuros, un 20% del área a proteger.

$$A_e = 20 \% (A_p)$$

$$A_e = 12.80 m^2$$

3) Calculo de intensidad requerida

$$I_r = A_e \times J \times fs$$

Dónde:

I_r = Intensidad requerida (m A)

A_e = Área efectiva (m^2)

$J =$ Densidad de corriente (m A / m²)

$f_s =$ Factor de seguridad (1.2)

$I_r = 154$ m A

4) Cálculo de la masa requerida Para determinar la masa requerida de ánodos, necesaria para proteger el tramo de tubería, durante un periodo de 20 años, se emplea la siguiente relación.

$W_t = (I_r \times Vida \times 8760 \text{ (h / años)}) \div (\text{Capacidad} \times \text{Eficiencia} \times \text{Factor de utilización} \times 1000 \text{ (m A / A)})$.

Dónde :

$I_r =$ Intensidad requerida (m A)

$Vida =$ Tiempo de duración de los ánodos (años)

8760 (horas / años)

$\text{Capacidad} = 1100 \text{ (A} \times \text{h / Kg)}$

$\text{Eficiencia} = 50\%$

$\text{Factor de utilización} = 85\%$

1000 m A / A

$W_a = 14,40 \text{ Kg}$.

$W_t = 57,56 \text{ Kg}$

5) Cálculo de ánodos

$N_a = W_t \div W_a$

Dónde :

$N_a =$ Numero de ánodos

$W_t =$ Masa total requerida de ánodos (Kg)

$W_a =$ Peso del ánodo a instalar (Magnesio de 14,40 Kg)

$N_a = 3.99 = 4 \approx 5$ ánodos.

Tomando en consideración la cercanía de esta aducción con la línea del Metro, y a objeto de compensar las posibles fugas de corriente hacia otras estructuras cercanas o que pudieran cruzar con esta, se decide colocar la cantidad de 5 Anodos, para una mejor distribución de la corriente protectora del tramo.

6) Separación de ánodos

$$S_a = L \div N_a$$

Donde ;

$S_a =$ Separación de ánodos (m)

$L_t =$ Longitud total de la tubería (m)

$N_a =$ Numero de ánodos

$$S_a = 26,6 \text{ m}$$

7) Calculo de la resistencia del ánodo

$$R_a = ((0.00521 \times \rho) \div L_a) \times (2,3 \log (8 \times L_a \div \varnothing_a) - 1))$$

Dónde:

$R_a =$ Resistencia del ánodo (Ω)

$\rho =$ Resistividad del suelo = 1525 ($\Omega - \text{cm}$)

$L_a =$ Longitud del ánodo con relleno de coque (ft)

$\varnothing =$ Diámetro del ánodo (ft)

$$R_a = 8.36 \Omega$$

8) Salida de corriente estimada del ánodo

$$I_a = (V_a - V_c) \div R_a$$

Dónde :

I_a = Salida de corriente estimada del ánodo (m A)

V_a = voltaje del ánodo = 1500 (m V)

V_c = voltaje del cátodo = 850 (m V)

R_a = Resistencia del ánodo (Ω)

I_a = 77.75 m A.

9) Corroboración de la vida del ánodo.

$Vida = (Cap \text{ de Corr} \times W_a \times Rend \times fu) \div I_a.$

Dónde :

Capacidad de Corriente (A-año / Kg).

W_a = Peso del Ánodo = 14.40 Kg.

Rendimiento = 50 %

Factor de utilización = 85 %

I_a = Intensidad del ánodo = 0,077 A.

Vida = 20 años.

Una vez obtenida la intensidad de salida del ánodo, se puede calcular la vida del mismo, lo que demuestra que el valor asumido es correcto.

A fin de poder suplir la corriente necesaria a la superficie metálica de una tubería enterrada o sumergida, ya sea desnuda o revestida se requiere conocer la densidad de corriente en el caso particular.

Cuando no se tienen valores de campo se deben asumir algunos valores fijados por distintos autores.

Según la Harco Corporación en un artículo sobre Protección Catódica para control de corrosión en equipos de obras hidráulicas se pueden asumir los siguientes valores, pero no para diseño. Ver Tabla 3, pag 26. Densidades de corriente necesarias para protección .

En este problema se asumió una densidad de corriente $10 \text{ m A} / \text{m}^2$, así también en base a la práctica de compañías como Odebrecht S.A y El Sistema Metro Caracas, que en sectores como Coche y El Valle han usado este valor en tramos cortos y diámetros de 4 y 8 pulgadas en la aplicación de sistemas de protección catódica.

3.5 Conclusiones y Recomendaciones.

3.5.1 Conclusiones.

Los potenciales medidos en las tanquillas indican valores que denotan actividad corrosiva en un alto porcentaje de la línea, ya que están muy por debajo del potencial de protección catódica de -0.85 V . Referido a la semi – celda de $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$, que se puede observar en la tabla 2, pag (27). Relación con respecto a Potenciales de Acero protegido Catódicamente Vs Potencial negativo referente a $\text{Cu} / \text{Cu SO}_4$, Voltios.

3.5.2 Recomendaciones.

Se recomienda colocar bridas aislantes en los extremos de la aducción a fin de evitar las corrientes parasitarias que pudieran afectarla, debido a su cercanía con el metro, y aplicar el método de protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio, para conservarla en buen estado por mucho tiempo, ya que esta tubería tiene poco tiempo de haber sido instalada.

REFERENCIAS

- [http:// bibliotecadigital / 10](http://bibliotecadigital/10). Sin autor.
- (D.R. © 1995, Fondo de Cultura Económica)
Carretera Picacho – Ajusto 227; 14200 Méjico, D.F. ISBN 968 – 16 – 3153 – 6
Impreso en Méjico.
- Gabe, D. R. Fundamentos del Tratamiento y Protección de Superficies Metálicas. Primera Edición Española 1975. Editorial ALHAMBRA, S.A.
R.E. 182
Madrid – 1. Claudio Coello, 76.
García, E. Protección Catódica.
([http // www.pandeo.com / cahe . asp ? idres = 2799](http://www.pandeo.com/cache.asp?idres=2799)). 05/ 06/ 2010.
- González, Oscar. CORROSION [http: // www. Monografías. Com / trabajos 3/ corrosión.shtml](http://www.Monografías.Com/trabajos3/corrosión.shtml). (2010).
- Instituto Nacional de Obras Sanitarias: Evaluación y Estudio de Control de Corrosión.
Acueducto Sistema Costanero : Barlovento; Edo Miranda.
Informe: Datos de campo, Recomendaciones. ENOSA, Valencia, Marzo 1981.
([http: // www. Pandeo. com / cache. asp ? IDRes = 2779](http://www.Pandeo.com/cache.asp?IDRes=2779)). 05/ 06/ 2010.
- Suarez, Maribel. Curso de Protección Catódica de Estructuras Metálicas.
Universidad Central de Venezuela.
Facultad de Ingeniería.
Septiembre 2002.
- TUBERIA DE ACERO, MANUAL AWWA MII, vol. 56, Nov. 1964.
American Wáter Works Association, inc. centro regional de ayuda técnica.
Agencia para el desarrollo internacional (A. I. D). México.
- Zambrano, Naddord: Fundación Instituto de Mejoramiento Profesional.
Colegio de Ingenieros de Venezuela. Corrosión y Protección Catódica.
Caracas, Abril 2013.

ANEXO

Sitio de ubicación de la tubería enterrada en su totalidad y objeto de estudio del método de Protección Catódica.

Pared de ladrillos rojos que limita La Facultad de Ciencia

