

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN FONDOS EXTERNOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO CON ÁNODOS DE TITANIO**

Presentado Ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar el Título  
de Ingeniero Metalúrgico  
Por el Br. Guilarte Silva, Eric Alexander

Caracas, 2002

## **ACTA**

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado intitulado:

**“Análisis Técnico Económico de los Sistemas de Protección Catódica en Fondos Externos de Tanques de Almacenamiento con Ánodos de Titanio”**

presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por el Br. Eric Alexander Guilarte Silva, dejan constancia de lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de los cual se levanta la presente acta en Caracas a los veinte días del mes de mayo de 2002.

---

Prof. Maribel Suárez

Tutor

---

Prof. Alfonso Bencomo

Jurado

---

Prof. Milton Bujosa

Jurado

**Guilarte S. Eric A.**

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE LOS SISTEMAS DE  
PROTECCIÓN CATÓDICA EN FONDOS EXTERNOS DE TANQUES  
DE ALMACENAMIENTO CON ÁNODOS DE TITANIO**

**Tutor académico: Prof. Maribel Suárez. Tutor Industrial: Ing. Alfredo Álvarez. Tesis.  
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia  
de los Materiales. Año 2002. 94 pag.**

Palabras Claves: Protección Catódica, Ánodos de Titanio, Análisis de Costos

**RESUMEN**

El siguiente trabajo dará una descripción general de la corrosión y sus principios termodinámicos y fundamentos electroquímicos, los sistemas de protección contra la corrosión, para después exponer de manera específica el método que se emplea para la protección contra la corrosión de tanques: corriente impresa.

Por otra parte se darán a conocer los elementos básicos implementados en un sistema de protección catódica por corriente impresa y de forma particular el elemento más importante: los ánodos inertes empleados en los diferentes sistemas a estudiar. También se establecerá la metodología a seguir en el diseño de un sistema de protección catódica, incluyendo en ésta, los cálculos necesarios para cada parte de este diseño.

Finalmente se describirán los pasos que se utilizaron para la elaboración de un programa informático de cálculo matemático, que permitió establecer por medio de un análisis de costos los criterios de selección entre los sistemas de protección catódica utilizados en fondos externos de tanques, y así saber cual de ellos es el más rentable bajo determinadas condiciones de trabajo.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo especial de grado lo dedico especialmente al creador de todas las cosas, mi Dios Jehová, quien a sido una columna de apoyo en todos los momentos difíciles de mi vida y en quien he cifrado mi confianza, arrojando mis cargas sobre Él. También porque nunca me abandono y pude tener la seguridad que podría llevar esta tesis a feliz término en el tiempo pautado para ello, a Él se dirija la gloria y alabanza.

A mis padres Alberto Guilarte y Antonieta de Guilarte, quienes han estado a mi lado y no perdieron la fe en mí, al prestarme su apoyo incondicional a pesar de los obstáculos que se presentaron durante mi carrera profesional. Por orientarme a la hora de tomar las decisiones más importantes de mi vida y por animarme a seguir adelante hasta lograr este objetivo. Gracias padres.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero Alfredo Álvarez por su colaboración prestada al iniciarme en este fascinante mundo del área de la Corrosión y la Protección Catódica y darme las pautas para la realización de este trabajo especial de grado.

A mi tutora académico la Profesora Maribel Suárez, quien de forma desinteresada colaboró para que este informe fuera una realidad y me orientó en cuanto los puntos más importantes de este trabajo, para que pudiera enfocarse de forma adecuada y así sacarle el máximo provecho al análisis aquí realizado.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, que con su instrucción académica y conocimientos impartidos, pudieron hacer posible la formación profesional que requerimos para el buen desempeño en nuestro futuro campo laboral.

A los ingenieros Omar Hernández y Claudio Perli quienes me ayudaron y dieron guía valiosa en cuanto a los lineamientos y pautas a seguir para la realización de este trabajo.

A mis compañeros de clases, quienes estuvieron conmigo a lo largo de mi carrera, apoyándome y animándome a seguir adelante hacia la culminación de este gran sueño.

A todos ustedes gracias.

## INDICE

RESUMEN.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
1. INTRODUCCIÓN .....	4
3. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	6
3.1 CORROSIÓN .....	6
3.2 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS .....	6
3.2.1 INTRODUCCIÓN .....	6
3.2.2 FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS.....	7
3.3 METODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN .....	8
3.3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES .....	8
3.3.2 INHIBIDORES .....	8
3.3.3 RECUBRIMIENTOS .....	9
3.3.4 PROTECCIÓN CATÓDICA.....	9
4. PROTECCIÓN CATÓDICA.....	10
4.1 PRINCIPIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	10
4.2 SISTEMAS DE APLICACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	13
4.2.1 PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO .....	14
4.2.2 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.....	17
5. ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA .....	19
5.1 ÁNODOS CERÁMICOS DE TITANIO CON RECUBRIMIENTO DE MMO .....	20
5.2 RECTIFICADOR .....	21
5.3 CABLES CONDUCTORES .....	23
5.4 ELECTRODOS O CELDAS DE REFERENCIA PERMANENTES .....	24
6. METODOLOGÍA A SEGUIR EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.....	26
6.1 REQUERIMIENTOS Y/O CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO.....	27

6.2 MEDICIÓN PREVIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO .....	28
6.3 SELECCIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE.....	31
6.4 VIDA ÚTIL DEL SISTEMA.....	32
7. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	33
7.1 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA FONDOS EXTERNOS DE TANQUES .....	33
7.1.1 ÁNODOS TUBULARES INSTALADOS EN LA PERIFERIA DEL TANQUE EN FORMA VERTICAL.....	34
7.1.2 ÁNODOS REQUERIDOS PARA TANQUES EQUIPADOS CON BARRERA DE CONTENCIÓN Ó DOBLE FONDO .....	36
7.1.2.1 ÁNODOS TIPO ALAMBRE INSTALADOS EN FORMA DE CÍRCULOS CONCÉNTRICOS EN EL FONDO DEL TANQUE .....	37
7.1.2.2 ÁNODOS TIPO CINTA INSTALADOS EN FORMA DE MALLA EN EL FONDO DEL TANQUE .....	39
7.2 FÓRMULAS NECESARIAS PARA LA ELABORACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO .....	41
7.2.1 ÁREA TOTAL A PROTEGER .....	42
7.2.2 CANTIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN .....	43
7.2.3 ÁNODOS TUBULARES .....	44
7.2.3.1 CANTIDAD DE ÁNODOS TUBULARES .....	44
7.2.3.2 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS LECHOS DE ÁNODOS TUBULARES .....	44
7.2.3.3 RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CIRCUITO DE ÁNODOS TUBULARES .....	45
7.2.4 ÁNODOS TIPO ALAMBRE .....	46
7.2.4.1 CANTIDAD Y LONGITUD DE LOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE .....	46
7.2.4.2 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE .....	48
7.2.5 ÁNODOS TIPO CINTA.....	50
7.2.5.1 CANTIDAD Y LONGITUD DE LOS ÁNODOS TIPO CINTA .....	50
7.2.5.2 CANTIDAD DE SOLDADURAS ENTRE LOS ÁNODOS TIPO CINTA Y LOS CONDUCTORES .....	56

7.2.6 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS CABLES .....	58
7.2.7 RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DEL SISTEMA .....	59
7.2.8 PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR.....	60
7.3 DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO PARA LA COMPARACIÓN DE LOS TRES SISTEMAS .....	61
8. RESULTADOS OBTENIDOS .....	71
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	76
10. CONCLUSIONES .....	79
11. RECOMENDACIONES .....	81
12. GLOSARIO .....	82
13. BIBLIOGRAFIA .....	84
14. ANEXOS .....	86



## 1. INTRODUCCIÓN

En Venezuela, el control de la corrosión mediante sistemas de protección catódica constituye una de las prácticas usualmente implementadas dentro de la industria petrolera nacional, pudiéndose considerar como la técnica más efectiva en la prevención de la corrosión de estructuras metálicas, al ser usada en la protección de sistemas de almacenaje y conducción de hidrocarburos en zonas de alto riesgo dentro de las áreas de explotación y refinación o aquellas densamente pobladas.

Se debe resaltar, que en el transcurso de la última década y enmarcado dentro de la política de mantenimiento y maximización de la producción, emprendida por Petróleos de Venezuela (PDVSA), el empleo de la protección catódica ha aumentado significativamente, a pesar de que el manejo de las nuevas técnicas de protección catódica y en general de los sistemas de control de corrosión se encuentra poco difundido.

En los últimos años, como consecuencia de las crecientes exigencias en el campo del saneamiento ambiental en el ámbito mundial, se han adoptado exigentes normas y medidas sobre sistemas de contención de derrames y métodos anticorrosivos, lo que ha requerido la implementación de sistemas de protección catódica de fondos externos de tanques destinados al almacenamiento de combustible, y otros productos relacionados con la industria petrolera.

Por lo anteriormente dicho es necesario el estudio sistemático de todos los factores involucrados en el diseño, instalación e implementación de los sistemas antes mencionados, para definir de esta manera los criterios de selección en función del tamaño de tanque, por medio de un estudio de costos para cada uno de estos diseños.

Para ello se diseñarán tres sistemas de protección catódica por corriente impresa para fondos externos de tanques utilizando para ello ánodos de titanio, dando a conocer sus

elementos básico y estableciendo la metodología a seguir para su aplicación, incluyendo en ésta, los cálculos necesarios para cada parte de este diseño.

Por otra parte se diseñará un programa de cálculo para cada uno de los sistemas a estudiar, que permitirá el desarrollo matemático de los parámetros de diseño y de costos. Esto permitirá que al ingresar los datos generales de los sistemas, se obtenga de forma automática y de manera instantánea, el resultado de cada fórmula genérica definida para el cálculo de las variables, de forma que se observará el comportamiento de los factores involucrados sin necesidad de calcular uno por uno sus parámetros de forma manual, lo que logrará también economizar tiempo de hora-hombre en el diseño de estos sistemas en futuros proyectos.

Finalmente se compararán los sistemas a estudiar por medio de un análisis de costos, estableciendo un criterio de evaluación normalizado que permita unificar los parámetros de estudio. Con esta comparación se podrán obtener los criterios de selección entre estos sistemas, y así saber cual de ellos es el más rentable bajo determinadas condiciones de trabajo.

### **3. FUNDAMENTO TEÓRICO**

#### **3.1 CORROSIÓN**

Razones termodinámicas, motivan que los metales que se han obtenido a partir de sus minerales en la naturaleza, tiendan en su uso normal, a volver al estado combinado o de mínima energía, interaccionando con el medio que lo rodea. El fenómeno que conduce al deterioro o degradación progresiva de las propiedades metálicas (tanto físicas como químicas) queda designado por el término corrosión.

#### **3.2 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS**

##### **3.2.1 INTRODUCCIÓN**

En los procesos de obtención de los metales puros o aleaciones a partir de los minerales en los cuales están presentes, existe un gran suministro de energía para que pueda ocurrir dicha transformación. Esto implica la modificación de la condición de mayor estabilidad termodinámica que poseen los compuestos metálicos tal como se encuentran en la naturaleza, hasta alcanzar un estado metaestable o refinado, en donde pueden ser aprovechados como materia prima.

La termodinámica nos indica que parte de esta energía adicional suministrada al sistema (metal puro o aleación), quedará almacenada y disponible para potenciar cualquier cambio o reacción que conduzca hacia un nivel menor de energía, siendo el fenómeno de corrosión, en la mayoría de los casos, la forma más fácil de regresar al estado de mayor estabilidad.

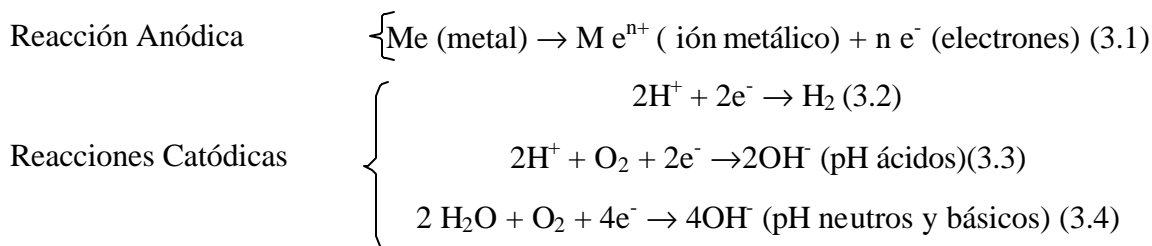
### 3.2.2 FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS

La corrosión es de naturaleza electroquímica, pudiendo explicarse con ayuda de una celda galvánica “un dispositivo en el cual una reacción química puede ocurrir solamente en la misma medida en que los electrones son transferidos al circuito externo” <sup>(1)</sup>. En estas celdas existen cuatro elementos fundamentales, estos son: el cátodo, el ánodo, una solución llamada electrolito y un puente metálico que una los dos electrodos y permita la conducción de corriente. Estos elementos permiten que una corriente eléctrica circule y se forme en conjunto, micro o macro pilas en las que la zona anódica es la que sufre los efectos de la corrosión.

Cuando las corrientes que llegan al ánodo fluyen desde el metal hacia la solución electrolítica exterior (suelo o agua), se corroe su superficie (disolución del metal), ya que sus átomos se disuelven para formar iones metálicos positivos y electrones libres.

En el cátodo la corriente fluye desde el electrolito hacia la superficie del metal, y es donde se reduce considerablemente la corrosión (inmunidad del metal), ya que los electrones libres dejados por el ánodo pasan al cátodo a través de la masa metálica y allí neutralizan a los iones positivos liberados por el cátodo. Frecuentemente hay desprendimiento de hidrógeno gaseoso y esto puede dar origen a través de reacciones secundarias, a la formación de otros compuestos tales como hidróxidos, carbonatos y cloratos <sup>(2)</sup>.

La corrosión, por tanto, es sostenida por procesos simultáneos anódicos y catódicos, determinados por las siguientes expresiones:



### **3.3 METODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN**

En cualquier área industrial, las pérdidas económicas que reflejan una acción directa de los procesos corrosivos, alcanzan valores muy elevados, por lo que se han establecido diferentes métodos empleados contra la corrosión, para minimizar de esta forma los costos ocasionados por el mantenimiento posterior de las estructuras afectada. Entre los métodos preventivos más utilizados tenemos los siguientes:

#### **3.3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES**

Para aplicaciones específicas, se tiene que tener presente que una aleación puede ser más resistente a los efectos de la corrosión que otra, por lo que se establecen criterios de selección de materiales, no solo evaluando este factor, sino otros parámetros tales como: costos, soldabilidad, propiedades mecánicas, disponibilidad, compatibilidad con otros materiales en uso, etc.

#### **3.3.2 INHIBIDORES**

Se trata de la utilización de sustancias que disminuyen la velocidad del proceso corrosivo, ofreciendo así una adecuada protección contra la corrosión. Estas sustancias son aplicadas en pequeñas cantidades al medio que rodea la superficie metálica, pero deben dosificarse en la cantidad precisa requerida, ya que al añadir una cantidad insuficiente se acelera el proceso corrosivo y al añadir cantidades superiores a las necesarias, podría generarse una pérdida económica representativa, ya que el costo de estas sustancias suele ser elevado.

### **3.3.3 RECUBRIMIENTOS**

Tratamiento que consiste en la aplicación de una capa aislante sobre toda la superficie del metal en contacto directo con el medio electrolítico, estableciendo así una barrera protectora contra los ataques corrosivos del medio y mejorando además su comportamiento frente a la fricción, erosión y desgaste.

### **3.3.4 PROTECCIÓN CATÓDICA**

Es el método más efectivo para el control del fenómeno de corrosión y el único capaz de detener el proceso de oxidación. Cabe destacar, que a pesar de estas características, el método esta limitado a la aplicación en metales que se encuentren en contacto o inmersos en algún electrolito.

## 4. PROTECCIÓN CATÓDICA

### 4.1 PRINCIPIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es quizás el método electroquímico más importante para conseguir el control de la corrosión, en los casos en que su aplicación es posible. Consiste en contrarrestar las pilas de corrosión formadas por las celdas galvánicas mencionadas en el capítulo anterior, mediante el empleo de una corriente externa que permita un flujo iónico en el sistema.

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

Marcel Pourbaix, precisa la zona de inmunidad, como aquella en la cual la concentración del ion metálico presente en el electrolito y que está en contacto eléctrico con el metal, es inferior o igual a  $10^{-9}$  g /m<sup>3</sup>, referido a los sistemas metal / agua y metal / solución acuosa <sup>(3)</sup>, (ver diagrama de Pourbaix para el hierro).

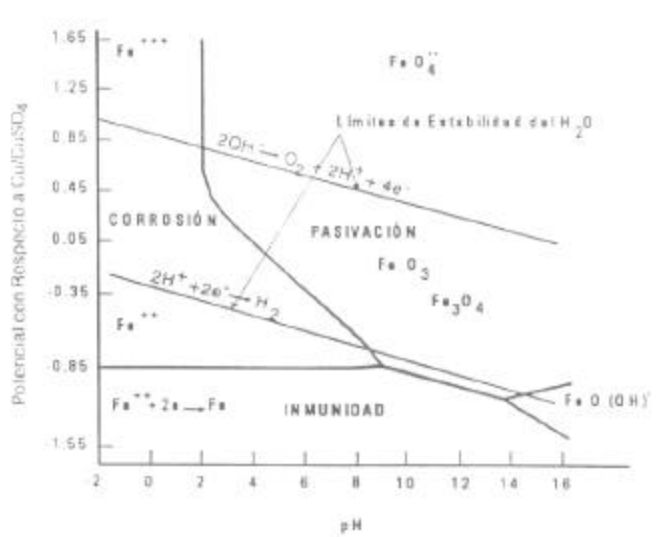
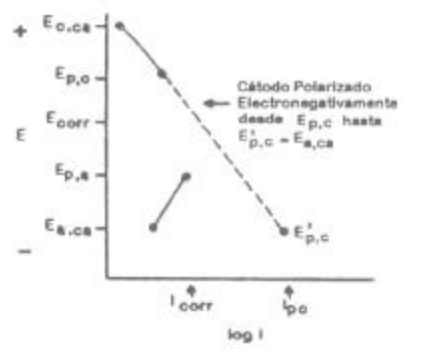


Figura N° 1. Diagrama de Pourbaix (Diagrama Tensión-pH) para el Hierro <sup>(4)</sup>

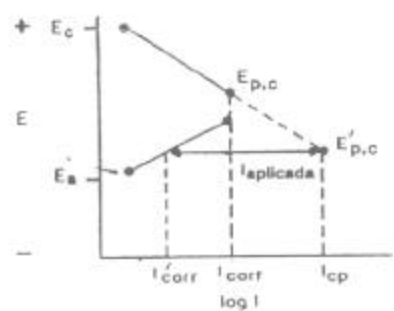
Para que ocurra la polarización catódica en el metal a proteger, se recurre a la aplicación de una corriente externa conocida, esto con el fin de elevar el potencial de la estructura metálica hasta el potencial de equilibrio del metal.

Como ya sabemos, la corriente de corrosión fluye en una celda de corrosión como resultado de las diferencias de potenciales entre los sitios anódicos y los sitios catódicos; si esa diferencia de potencial fuese igual a cero, entonces no habría flujo de corriente y por consiguiente no habría proceso de corrosión <sup>(5)</sup>. Esto se puede lograr mediante la polarización electronegativa del cátodo en la celda de corrosión, de tal manera que el potencial del cátodo ( $E_{p,c}$ ) sea igual al potencial del ánodo ( $E_{a,ca}$ ), tal como lo demuestra la figura N° 2. La polarización del cátodo se logra a través de la aplicación de una corriente externa ( $I_c$ ).



**Figura N° 2. Cátodo Polarizado al Potencial del Ánodo**

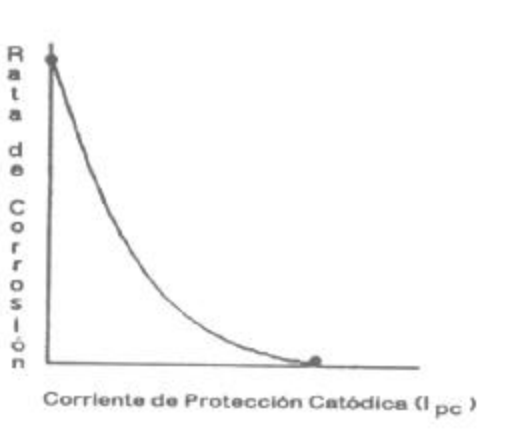
Si se aplica cierta cantidad de corriente de protección catódica ( $I_{pc}$ ), como se ilustra en la Figura N° 3, se reduce la corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) a una corriente residual de corrosión ( $I'_{corr}$ ) de menor magnitud, disminuyendo la tasa de corrosión de la estructura.



**Figura N° 3. Corriente de Corrosión Reducida por la Aplicación de Corriente de Protección Catódica**



La relación entre la corriente de protección catódica aplicada y la tasa de corrosión no es lineal, como se muestra en la Figura N° 4



**Figura N° 4. Corriente de Protección Catódica vs. Tasa de Corrosión**

El primer incremento en la protección catódica aplicada, produce la disminución más significativa en la tasa de corrosión. Por consiguiente, la protección catódica puede ser considerada como una protección segura, ya que aunque no se logre una completa protección, de todos modos se reduce la tasa de corrosión. Por otro lado, la polarización catódica a potenciales más electronegativos que el potencial anódico, no trae ningún beneficio y hasta puede ser perjudicial para la estructura y/o revestimiento.

Un sistema de protección catódica es una celda o batería. Requiere de un ánodo, un metal a ser protegido, un electrolito y un camino metálico para el flujo de corriente de protección catódica. “La corriente de protección catódica sale del ánodo, entra en el electrolito, pasa a través del electrolito en forma de cationes hacia la superficie del metal. Simultáneamente, los aniones fluyen hacia el ánodo de protección catódica y los electrones fluyen desde el ánodo de protección catódica hacia el metal que está siendo protegido a través del paso metálico” <sup>(6)</sup>.

Esto hace que las zonas anódicas presentes en el metal a proteger (donde se presenta la corrosión) se transfieran y concentren hacia los ánodos (punto donde se descarga la

corriente eléctrica hacia el electrolito), los cuales son los que se corroerán y protegerán el metal de interés.

La protección catódica no elimina la corrosión, lo que hace es que evita el progreso o acción de la misma, reduciendo virtualmente su velocidad a cero. De esta manera se puede mantener la superficie metálica a ser protegida, en un medio corrosivo sin sufrir deterioro durante un largo periodo de tiempo. Esta técnica está siendo empleada cada día con mayor éxito en el mundo entero. Su campo clásico de aplicación es la protección externa de estructuras metálicas sumergidas o enterradas como: conductos para transportar diferentes tipos de productos, en protección externa de tanques de almacenamiento, etc.

En la práctica se puede aplicar protección catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón, y aluminio, contra la corrosión en todos los suelos y en casi todos los medios acuosos. De igual manera, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones, corrosión intergranular, o picaduras generalizadas.

## **4.2 SISTEMAS DE APLICACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA**

Existen dos métodos bien diferenciados en la implementación del control de la corrosión por protección catódica. En ambos existe un suministro de corriente continua exterior en una cantidad tal que permite eliminar las pilas de corrosión presentes en el metal <sup>(7)</sup>. En la práctica la aplicación de uno u otro sistema depende del análisis técnico y económico, según cada caso en particular.

Uno de estos métodos es la protección catódica por ánodos de sacrificio, utilizando para ello un material distinto al material a proteger, en donde se genera una corriente inducida por la diferencia entre sus potenciales estándares de oxidación, y el otro método es la protección catódica por corriente impresa donde existe una aplicación directa de corriente eléctrica por medio de una fuente de energía externa.

### 4.2.1 PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO

El método de protección catódica por ánodos de sacrificio está basado en la aplicación del fenómeno de corrosión galvánica, es decir, en el aprovechamiento de la tendencia que tiene un metal de corroerse en presencia de otro menos activo o más noble. Consiste simplemente en hacer contacto eléctrico entre el ánodo o metal activo y la superficie de la estructura a proteger, de esta manera se garantiza la corrosión preferencial del metal más activo <sup>(8)</sup>.

Este sistema se utiliza normalmente cuando se requiere de poca cantidad de corriente para lograr una efectiva protección, ya sea para proteger una estructura que tiene un revestimiento de buena calidad, para proteger superficies poco extensas, o cuando la resistividad del electrolito es bastante elevada. Se emplean normalmente ánodos de magnesio para estructuras enterradas y ánodos de aleaciones de aluminio y cinc para estructuras inmersas en agua. En la tabla N° 1 se presentan las características electroquímicas de estos ánodos.

**TABLA N° 1**  
**CARACTERÍSTICAS ELECTROQUÍMICAS DE LOS ÁNODOS DE**  
**SACRIFICIO<sup>(9)</sup>**

CARACTERÍSTICAS ELECTROQUÍMICAS	MATERIAL ANÓDICO		
	ALUMINIO	CINC	MAGNESIO
SUMINISTRO TEÓRICO DE CORRIENTE (A . h /Kg)	2976	820	2198
SUMINISTRO REAL DE CORRIENTE (A . h /Kg)	2400-2800	780	1050-1250
RENDIMIENTO (%)	80-95	95	47-57
CONSUMO (Kg / A . Año)	2,94	10,64	3,98
POTENCIAL (V) REFERIDO AL ELECTRODO DE Ag / AgCl	-1,05 / -1,15	-1,05	-1,5 / -1,7
POTENCIAL DE TRABAJO (V) REFERIDO AL ELECTRODO DE Ag / AgCl	-0,80 / -1,10	----	-1,35 / -1,50

Los ánodos de sacrificio actúan como fuentes de energía portátiles, por lo que son muy útiles cuando no se puede disponer fácilmente de una fuente de corriente continua, o

cuando el tendido de una línea para tal aplicación hace antieconómica la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa.

Para que un metal pueda utilizarse convencionalmente como ánodo de sacrificio, debe cumplir las siguientes condiciones:

- Su potencial debe ser suficiente para polarizar el metal a proteger hasta el potencial de protección.
- No debe desarrollar películas de pasivación; debe suministrar una corriente constante
- La disminución del ánodo debe ser uniforme (ataque de toda la superficie)
- Debe tener alto suministro de corriente ( $A \cdot s / Kg$ )
- Se debe vigilar que el reparto de corriente sea uniforme sobre la estructura a proteger, lo cual resulta bastante difícil en medios de resistividad muy elevada y en estructuras geométricas complicadas

Las ventajas de este método son las siguientes:

- No requiere de suministro de corriente por una fuente externa
- Los costos de instalación y mantenimiento del sistema son mínimos
- Rara vez se presentan problemas de interferencia con otras estructuras

Por otra parte presenta las siguientes desventajas:

- La cantidad de corriente suministrada al sistema está limitada según la diferencia de potencial entre el ánodo y el metal correspondiente a la estructura, el cual es usualmente bajo
- La aplicación de este sistema se recomienda sólo en electrolitos cuyos valores de resistividad sean suficientemente altos (mayores a 3.000  $\Omega\cdot\text{cm}$ )
- En el caso de que la estructura presente una superficie extensa o el recubrimiento aplicado no sea de buena calidad, la aplicación de este método resultaría muy costosa.

### **4.2.2 PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA**

El otro método de aplicación en la protección catódica, es el que se realiza mediante el suministro de energía eléctrica al sistema por medio de una fuente generadora de energía externa regulable, conocido con el nombre de corriente impresa <sup>(10)</sup>.

Este sistema está conformado por una fuente de corriente continua, que alimentada por corriente alterna ofrece una corriente continua de salida apta para la protección de la estructura (las fuentes más utilizadas son los rectificadores), necesaria para la eliminación de las pilas de corrosión existentes en la superficie del metal que se va a proteger.

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

A continuación se describen algunas ventajas de la aplicación de este método:

- Se puede suministrar grandes cantidades de corriente a las estructuras, dependiendo de la capacidad del rectificador seleccionado
- Control preciso de la cantidad de corriente suministrada
- Se puede aplicar en cualquier electrolito
- Puede ser aplicado con bastante economía en superficies extensas

Por otra parte presenta las siguientes desventajas:

- Limitado por alimentación eléctrica
- Dada la naturaleza de los equipos empleados, su mantenimiento es más frecuente y costoso
- La instalación del lecho de ánodos debe estar limitada a las zonas con menor resistividad, lo cual puede influir de manera representativa en la distribución de la corriente eléctrica
- En caso de sobrepasar los valores de potencial recomendados, genera daños al recubrimiento

En el caso del presente trabajo nos especificaremos al estudio de los diferentes factores involucrados en la instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa, por ser este sistema el más indicado para trabajar con superficies extensas como las que se observan en los fondos externos de tanques, ya que mientras los sistemas de sacrificio pueden ser usados, los sistemas de corriente impresa han probado ser más efectivos y fácil de instalar para los nuevos tanques de almacenamiento con o sin forros contenedores y viejos tanques mejorados con un fondo de tanque adicional.

## **5. ELEMENTOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA**

Para la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa, se tienen ya establecidos los elementos básicos para su puesta en marcha. Para esto se realizará una descripción breve de los elementos más importantes, entre los cuales se encuentran:

5.1 Ánodos de titanio con recubrimiento de MMO (Mezcla de Óxidos de Metales)

5.2 Rectificador

5.3 Cableado de los circuitos positivos y negativos y sus interconexiones eléctricas

5.5 Celdas de referencia permanente



## **5.1 ÁNODOS CERÁMICOS DE TITANIO CON RECUBRIMIENTO DE MMO**

Los ánodos son empleados como materiales que aportan o distribuyen la corriente eléctrica hacia la estructura a proteger, por esta razón son los elementos más importantes dentro de un sistema de protección catódica.

Los ánodos utilizados con mayor frecuencia en la implementación de sistemas de protección catódica son generalmente los de Fe-Si-Cr pero en los últimos años se han desarrollado otros tipos de ánodos con innovadora tecnología que los han ido desplazando del mercado. Estos ánodos son: ánodos cerámicos fabricados de titanio, ánodos de óxidos férricos, ánodos de metales nobles (platino), etc. En este informe estudiaremos solo las nuevas tecnologías de ánodos cerámicos fabricados de titanio con recubrimiento de MMO.

Estos ánodos cerámicos se basan fundamentalmente en una sección central o alma de titanio bien sea en forma de alambre, lámina o tubo conductor, recubierta con una capa cerámica de óxidos de metales nobles mezclados como: titanio, telurio, niobio y platino, llamada MMO por sus siglas en inglés: “Mixed Metal Oxides”.

Esta mezcla de óxidos de metales nobles (MMO) es una capa inerte altamente conductora, la cual activa al titanio y le permite drenar fácilmente la corriente de salida necesaria. También hace que se obtenga una baja tasa de consumo, medida en términos de miligramos por año, por lo que las dimensiones del ánodo permanecen constantes durante todo el periodo de vida útil. Además, demuestra una alta estabilidad química, incluso en ambientes con bajos valores de pH y protege al ánodo contra la generación de cloro.

## 5.2 RECTIFICADOR

Son los equipos más utilizados en el empleo de los sistemas de protección catódica por corriente impresa. Es un dispositivo diseñado para proveer las necesidades de potencial y corriente requeridas en el sistema.

Consiste fundamentalmente de un mecanismo de transformación de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Tienen como componentes: un transformador de reducción del voltaje de alimentación en la línea de corriente alterna, un puente rectificador construido por diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio, y sistemas de control manual o automático como voltímetros y amperímetros, a fin de regular el voltaje y la corriente según las necesidades del sistema a proteger <sup>(11)</sup>.

Los rectificadores pueden dividirse según el número de fases en monofásicos o trifásicos y pueden ser utilizados para su construcción elementos como el silicio o el selenio, presentando una eficiencia de 90% y 60% respectivamente, la decisión de elegir uno u otro, se toma en función de la eficiencia y costo.

Según su forma de refrigeración se dividen en: sistemas de enfriamiento por aire (uso general) o sistemas de enfriamiento en el cual son sumergidos en aceite (los más empleados en atmósferas corrosivas), y generalmente, por estar ubicados en áreas exteriores, se usan rectificadores para instalación a la intemperie, a prueba de agua y resistentes a la corrosión.

Según su forma de control de salida se dividen en: manuales por barra, manuales por selectores, automáticos por tensión constante y automáticos por corriente constante.

La corriente drenada por los rectificadores es suministrada a electrodos auxiliares (ánodos), mediante una interconexión eléctrica entre el terminal positivo del rectificador y los ánodos, esto para forzar la descarga de corriente de protección y ocurra una migración de

cargas iónicas hacia la estructura a través del electrolito del medio. El terminal negativo del rectificador se conecta a la estructura a proteger para cerrar el circuito eléctrico.

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

- Características constructivas del rectificador básicamente en el medio ambiente donde va a operar (rectificador por aire o por aceite)
- Características de la corriente alterna disponible en el área (Voltaje, frecuencia, número de fases)
- Requerimiento máximo de salida en corriente directa (Intensidad de corriente y Voltaje)
- Máxima temperatura de operación
- Sistema de seguridad, control y monitoreo: alarmas, interruptores, sistemas de monitoreo remoto, etc.
- Instrumentación: voltímetros y amperímetros, sistemas de regulación

La selección del rectificador estará en función de los parámetros requeridos en cuanto al voltaje y corriente de salida en corriente directa (DC), que serán definidos por variables de cálculo como la resistencia total del circuito eléctrico. Por eso es de gran importancia la determinación de criterios de selección de todos estos factores involucrados. Estos equipos pueden conseguirse en un amplio rango de dimensiones con valores de salida para voltajes que va desde 12 a 240 Voltios y de corriente que varía entre 3 a 200 Amperios.

## 5.3 CABLES CONDUCTORES

La función de los cables conductores dentro de un sistema de protección catódica, es la de transmitir o conducir la corriente por todo el circuito eléctrico, que es suministrada por el rectificador para energizar a los ánodos, formando de esta manera el circuito positivo, y por otra parte, conectar el fondo y/o pared del tanque al punto negativo del rectificador, para garantizar un retorno adecuado de corriente.

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

Hay que resaltar que, como todos los cables conectados al terminal positivo del rectificador representan un potencial positivo con respecto a la tierra (suelo), el aislamiento del cable tiene que estar en buenas condiciones, debido a que si éste tiene alguna parte descubierta, puede descargar corriente hacia la tierra (actúa como un ánodo), factor que conduciría a la corrosión del propio cable y a una rápida falla del sistema de protección catódica.

Por esto todos los cables positivos del sistema deben ser instalados cuidadosamente tomando las precauciones necesarias durante el relleno y compactación de las zanjas, para inspeccionar que el material de relleno debe estar libre de piedras puntiagudas y todos aquellos que puedan dañar el aislamiento de los cables.

En aquellas áreas donde se realizan frecuentes excavaciones, o donde el aislamiento de los cables puede ser dañado por roedores, los cables deben ser instalados en tuberías conduits protectoras.

## 5.4 ELECTRODOS O CELDAS DE REFERENCIA PERMANENTES

Cuando se aplica protección catódica a una estructura, es extremadamente importante saber si esta se encontrará realmente protegida contra la corrosión en toda su plenitud. Varios criterios pueden ser adoptados para comprobar que la estructura en mención está exenta de riesgo de corrosión, basados unos, en función de la densidad de corriente de protección aplicada y otros en función de los potenciales de protección obtenidos.

No obstante, el criterio más apto y universalmente aceptado es el de potencial mínimo que debe existir entre la estructura y terreno, medición que se realiza con un electrodo o celda de referencia. El criterio de potencial mínimo se basa en los estudios realizados por el profesor Marcel Pourbaix, en 1939, quién estableció a través de un diagrama de potencial de electrodo vs. pH del medio, un potencial mínimo estructura-suelo medidos con las diferentes celdas según los siguientes valores:

**TABLA N° 2**  
**POTENCIAL MÍNIMO ESTRUCTURA SUELO PARA QUE NO OCURRA EL**  
**FENÓMENO DE CORROSIÓN <sup>(12)</sup>**

<b>ELECTRODO DE REFERENCIA</b>	<b>LECTURA</b>
Plata-Cloruro de Plata (Ag-AgCl)	-800 mv
Cobre-Sulfato de Cobre (Cu-SO <sub>4</sub> Cu)	-850 mv
Hidrogeno (H <sup>+</sup> -H <sub>2</sub> )	-770 mv
Zn puro (Zn-Zn <sup>++</sup> )	+250 mv

mv= mili voltios

El electrodo de Hidrógeno tiene aplicación práctica a nivel de laboratorio por lo exacto y delicado. También existen instrumentos para aplicación de campo, constituida por solución de mercurio, cloruro mercurioso, en contacto con una solución saturada de cloruro de potasio que mantiene contacto con el suelo.

El electrodo de Zinc puro para determinaciones en suelo, siendo condición necesaria para el uso un grado de pureza de 99.99%, es utilizada en agua bajo presiones que podrían causar problemas de contaminación en otras soluciones y también como electrodos fijos.

El electrodo de Plata-Cloruro de Plata de poco uso pese a ser muy estable, se utilizan especialmente en instalaciones marinas.

Más comúnmente utilizadas en los análisis de eficiencia de la protección catódica son los electrodos de Cobre-Sulfato de Cobre ( $\text{Cu-SO}_4\text{Cu}$ ) debido a su estabilidad y su facilidad de mantenimiento, donde el criterio de potencial mínimo de protección que se utiliza es de -850 mV como mínimo y permitiendo recomendar así mismo, un máximo potencial de protección que pueda estar entre los -1200 mV a -1300 mV, sin permitir valores más negativos, puesto que se corre el riesgo de sobre protección, que puede afectar al recubrimiento o capa de pintura, ya que hay riesgos de reacción catódica de reducción de hidrógeno gaseoso que se manifiesta como un ampollamiento en la pintura.

Para el monitoreo de los potenciales debajo del fondo del tanque, se instalan celdas de referencia permanente de cobre sulfato de cobre ( $\text{Cu/CuSO}_4$ ) bajo las láminas del fondo del tanque, aproximadamente a 40 cm de profundidad, las cuales están específicamente diseñadas para el ambiente de trabajo del sistema de protección catódica a instalar.

## **6. METODOLOGÍA A SEGUIR EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA**

En la elaboración del diseño de un sistema de protección catódica se deben establecer un conjunto de pasos a seguir, para llevar a cabo de forma satisfactoria todas las etapas de instalación y puesta en marcha del sistema, y así obtener los resultados esperados de protección y minimizar también los costos. Entre los pasos más importantes tenemos:

6.1 Requerimientos y/o condiciones generales de diseño

6.2 Medición previa de la resistividad del suelo

6.3 Selección de la densidad de corriente

6.4 Vida útil del sistema

## **6.1 REQUERIMIENTOS Y/O CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO**

Primeramente es necesario recopilar información general de las características intrínsecas de la estructura a proteger y del medio corrosivo, entre las cuales tenemos:

- Servicio que presta o prestará la estructura a proteger (tanque)
- Localización y características de otras estructuras metálicas, enterradas y/o conectadas o no al tanque de interés, localizadas en sus adyacencias (planos, materiales, dimensiones, etc.)
- Información sobre todas las fuentes de corriente continua en las proximidades que pueden originar interferencias al sistema
- Sondeo de las fuentes de corriente alterna, que podrían alimentar al rectificador
- Revisar los planos de ubicación y especificaciones detalladas que contengan información suficiente de la estructura a proteger, para la adecuada ubicación y disposición de todos los elementos del sistema
- Se debe elegir la utilización de un sistema de protección con los más bajos costos (diseño, instalación, alimentación y mantenimiento), que cumplan a cabalidad los cálculos ya nombrados y asegurare la protección adecuada
- Todos los materiales a ser utilizados en la instalación del sistema de protección catódica deberán estar en perfecto estado, sin defectos que puedan interferir en su buen funcionamiento



## 6.2 MEDICIÓN PREVIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Cuando se diseña un sistema de protección catódica es necesario investigar las características del medio, y entre las que se relaciona más directamente con el fenómeno corrosivo se encuentra la resistividad eléctrica del electrolito, que determina de forma sencilla las condiciones de corrosión a que estará sometida la estructura.

La resistividad no es una propiedad del electrolito, sino un indicador de sus propiedades, las cuales dependen del contenido químico, de humedad, temperatura, etc., y se define como el producto entre la resistencia y el cociente entre la sección transversal de un hilo metálico y su longitud <sup>(13)</sup>, lo que se puede expresar de la siguiente forma:

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (6.1)$$

Donde:

$\rho$ : Resistividad de la sustancia ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

R: Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )

A: Área de la sección transversal ( $\text{cm}^2$ )

L: Longitud (cm)

La resistividad es la recíproca de la conductividad o capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica, y las áreas cuyo valor de resistividad es bajo, son las que tienden a acelerar el proceso de corrosión.

Los suelos que presentan alta resistencia al flujo de corriente y por lo tanto alta resistividad, permitirán menor paso de corriente corrosiva y suelen considerarse ambientes no críticos. De igual manera, si el electrolito presenta baja resistencia al paso de la corriente (baja resistividad), se considera un electrolito bastante corrosivo, ya que permite el paso de flujo de corriente corrosiva con mayor facilidad.

El nivel de corrosividad de los electrolitos clasificar según su resistividad. La siguiente tabla de la “American Water Works Association”<sup>(14)</sup> muestra las actividades de corrosión de los electrolitos vs. los rangos de resistividad:

**TABLA N° 3**  
**CORROSIVIDAD DE LOS DIFERENTES ELECTROLITOS DEPENDIENDO DE**  
**LOS VALORES DE RESISTIVIDAD**

RESISTIVIDAD (W. cm)	CORROSIVIDAD
Menor a 250	Extremadamente corrosivo
250-1.000	Muy corrosivo
1.000 a 2.500	Corrosivo
2.500 a 7.500	Moderadamente corrosivo
7.500 a 15.000	Medio corrosivo

En la práctica se ejecutan medidas de resistividad de grandes masas de material y se calcula un valor promedio para el mismo. Se realiza esta medida utilizando generalmente el método de “Wenner” o de “Las Cuatro Barras o Pines”.

En este procedimiento, se introducen directamente en el suelo cuatro barras a aproximadamente a 10 cm de profundidad, separadas entre sí por espaciamientos iguales sobre una línea recta en el suelo que se va a medir, las cuales se conectan a un instrumento medidor de resistencias del suelo, que introducirá una corriente eléctrica en el suelo entre las dos barras externas. La separación entre las barras (D) representa la profundidad hasta lo que se desea conocer la resistividad, que se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 * \pi * D * R \quad (6.2)$$

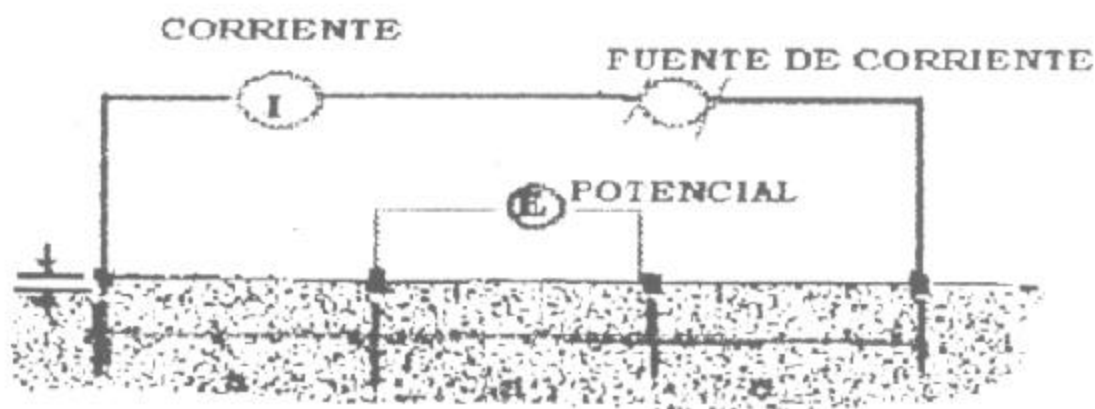
Donde:

$\rho$ : resistividad ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

D: Separación entre los pines (cm)

R: Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )

La resistencia del suelo se obtiene midiendo la caída de potencial entre los dos pines centrales y aplicando la ley de Ohm ( $V = I \cdot R$ ), (ver Figura N° 8).



**Figura N° 8 Método de Wenner o de los 4 Pines para Medir Resistividad del Suelo**

Existen en el mercado diversos instrumentos que dan lecturas directas en Ohmios ( $\Omega$ ), o sea, en valores de resistencia. Entre estos se pueden citar: Megger, Vibroground, Nilsson, Norma, etc. El valor medio de resistencia debe ser multiplicado por un factor para obtener valores de resistividades en  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Este método es bastante preciso para la separación de barras hasta 40 metros.

La resistividad medida corresponde a la franja de suelo contenido desde la superficie hasta una profundidad igual a la separación de las barras. Todo el suelo contenido allí, sea arcilloso o arenoso, seco o húmedo o que posea piedras, desechos, etc., afectará el valor de la medición. Por tal razón, es de gran importancia seleccionar la ubicación más conveniente en el suelo para la prueba y seleccionar la distancia entre las barras, de acuerdo a la profundidad de la estructura metálicas enterradas en las áreas sometidas a estudio.

La resistividad obtenida es en realidad un valor promedio de la resistividad del suelo en el área inmediata desde la superficie hasta la profundidad seleccionada mediante el espaciamiento entre los pines y no la resistividad de muestras específicas del suelo a profundidades específicas, que podrán provenir de distintos estratos.

### 6.3 SELECCIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE

La densidad de corriente es la magnitud de la corriente eléctrica requerida dividida entre el área total de la superficie metálica desnuda a proteger, que debe aplicarse al metal para llevarlo al potencial de protección.

La densidad de corriente depende entre otros factores de las condiciones del medio, tales como: temperatura, humedad, agitación, aireación, composición, etc., de la capacidad de la fuente de corriente continua empleada, así como también, de la presencia de recubrimientos en la estructura, su estado de conservación, existencia de capas calcáreas, etc.

La densidad de corriente es quizás el parámetro más importante a considerar al momento de aplicar protección catódica a una estructura determinada, debido no solamente a que con ella se consiguen los niveles de protección apropiados, sino que su magnitud incide directamente en la economía del sistema. Pero a la vez la densidad de corriente es el parámetro más controversial y subjetivo de todos, excepto que se trate de una estructura ya instalada y se hagan pruebas de simulación y requerimiento de corriente, en cuyo caso se obtienen valores ajustados a la realidad.

La determinación de la densidad de corriente se hace de manera empírica, basándose en experiencias previas y en una serie de parámetros tabulados en la bibliografía especializada en corrosión. Por ejemplo en la zona del Complejo Criogénico JOSE en el Estado Anzoátegui, se han especificado rangos entre 15 a 20 mA/m<sup>2</sup> por superficie desnuda, y en áreas como El Tigre y Maturín, se ha especificado una densidad de 5 a 0,5 mA/m<sup>2</sup>.

En la tabla N° 4, se recogen los valores correspondientes a los requerimientos de densidad de corriente observados durante la realización de diversos diseños de control de corrosión, en varias condiciones del medio. Estos valores pueden tomarse como una primera indicación sobre la densidad de corriente mínima previsible. Naturalmente, cada caso requiere un estudio particular para la determinación de la densidad de corriente adecuada.

**TABLA N° 4**  
**DENSIDADES DE CORRIENTE NECESARIAS PARA PROTECCIÓN**

<b>CONDICIÓN</b>	<b>DENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA (mA/m<sup>2</sup>)</b>
Acero desnudo en agua salada en movimiento	110 - 200
Acero desnudo en agua salada estancada	50 - 90
Acero desnudo enterrado	10 - 30
Acero con revestimiento pobre enterrado en zonas poco corrosivas	1,0
Acero con revestimiento bueno enterrado en zonas poco corrosivas	0,1
Acero con revestimiento muy bueno enterrado en zonas no corrosivas	< 0,03

## 6.4 VIDA ÚTIL DEL SISTEMA

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

## **7. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **7.1 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA FONDOS EXTERNOS DE TANQUES**

Para el análisis comparativo entre los sistemas de protección catódica por corriente impresa para fondos externos de tanques se diseñarán tres sistemas utilizando para ello las diferentes presentaciones de los ánodos de titanio, como son en forma tubular, en forma de alambre y en forma de cinta. Se darán a conocer sus elementos básicos y se establecerá la metodología a seguir para su aplicación en forma genérica, incluyendo en ésta, los cálculos necesarios para cada parte de este diseño. Los sistemas antes mencionados son los siguientes:

7.1.1 Ánodos tubulares instalados alrededor de la periferia del tanque en forma vertical

7.1.2 Ánodos requeridos para tanques equipados con barrera de contención ó doble fondo

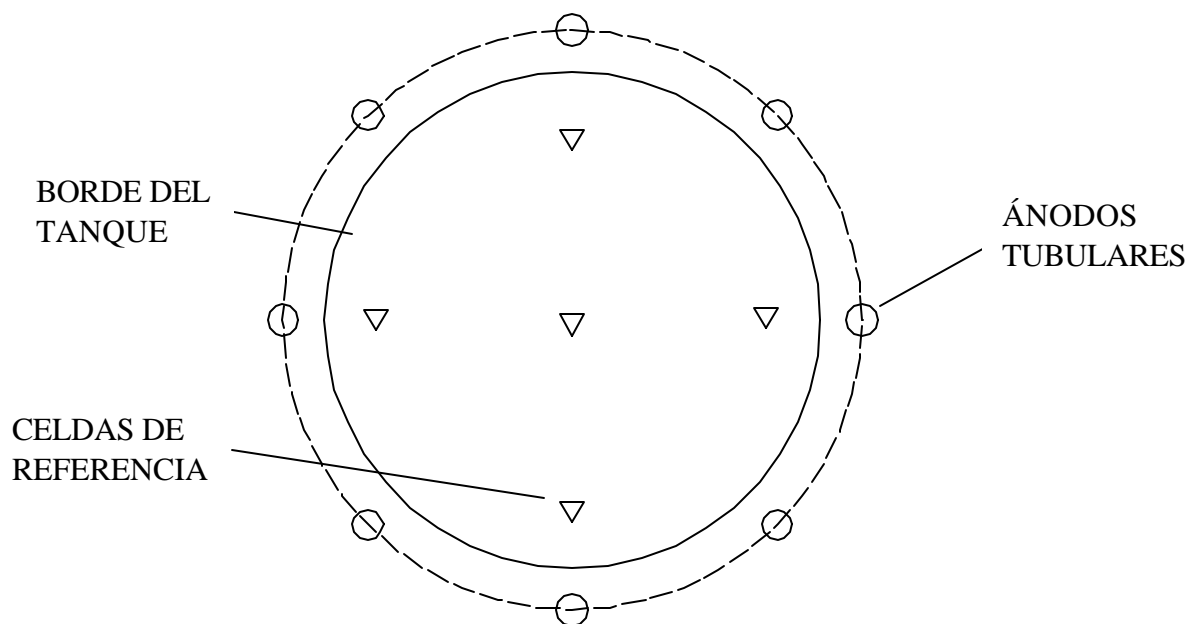
7.1.2.1 Ánodos tipo alambre instalados directamente debajo del fondo del tanque en forma de círculos concéntricos

7.1.2.2 Ánodos tipo cinta instalados de forma directa debajo del fondo del tanque en forma de malla o cuadrícula

### 7.1.1 ÁNODOS TUBULARES INSTALADOS EN LA PERIFERIA DEL TANQUE EN FORMA VERTICAL

Los ánodos tubulares son elaborados de titanio y recubiertos con óxidos de metales mezclados (MMO), pueden venir solos en tubo cerámico con su cable, o encapsulados dentro de un tubo metálico conduit galvanizado. Debido a la alta capacidad de drenaje de estos ánodos, se deposita en el interior del encapsulamiento cisco de coque especial de alta calidad.

Estos ánodos son dispuestos en lechos, alrededor del perímetro del tanque de manera que la corriente drenada se distribuya de forma apropiada por todo el área del fondo del tanque, como lo indica la figura N° 5. Estos lechos son pozos o perforaciones verticales de profundidad variable, según los requerimientos de corriente que se necesite.



VISTA SUPERIOR DEL TANQUE

**Figura N° 5. Instalación de los ánodos tubulares en la periferia del tanque en forma vertical**

Para realizar la instalación de los ánodos, se procede a las perforaciones de los pozos verticales, realizadas con equipos rotativos alrededor del tanque en los sitios que establezca el diseño. Para establecer la ubicación de los ánodos se define un círculo alrededor del tanque separado de 5 a 10 metros, por donde pasarán los cables de los ánodos y se fija la distancia de separación según los cálculos.

Se recomienda establecer valores de profundidad utilizados con frecuencia en los diseños de los sistemas de protección catódica de fondos de tanque, como por ejemplo entre 10 y 15 metros.

La distancia de separación entre lechos de ánodos se pueden establecer, tomando en cuenta el perímetro del círculo donde serán instalados los ánodos, que se separa del tanque de 5 a 10 metros y se divide este perímetro entre el número de ánodos.

Una vez realizadas las perforaciones, se agrega a cada una de ellas cierta cantidad de cisco de coque y se introduce el ánodo en el pozo con la ayuda de ganchos centradores, que permiten que el ánodo quede justamente en el centro. Luego se termina de rellenar el orificio con cisco de coque hasta cubrir por completo el ánodo, con el objetivo de:

- Aumentar la eficiencia operativa y vida útil del ánodo
- Aumentar la superficie de contacto entre el ánodo y el terreno
- Aumentar la capacidad de drenaje de corriente por unidad de superficie de los ánodos, haciendo que la distribución de corriente sea más uniforme
- Ayudar a que la disolución del ánodo sea más homogénea

El alto de la columna de cisco de coque depende de la cantidad de ánodos instalados en un mismo lecho y de la resistividad del suelo.



### **7.1.2 ÁNODOS REQUERIDOS PARA TANQUES EQUIPADOS CON BARRERA DE CONTENCIÓN Ó DOBLE FONDO**

Muchos tanques nuevos tienen ahora una barrera de contención: un fondo secundario o membrana antiderrame que suele ser de polietileno de alta densidad (HDPE), de 60 milésimas de pulgadas de grosor, situado a unos 15 a 30 cm del fondo del tanque. Puesto que el HDPE tiene alta resistencia dieléctrica, el forro podría evitar que la corriente protectora llegue al fondo metálico si el sistema es de ánodos convencionales.

Los tanques equipados con doble fondo o forros secundarios de contención requieren protección catódica para evitar la corrosión del fondo del metal. Aunque el forro esté completamente sellado alrededor de la pared del tanque, la diferencia de temperatura hace que la condensación se acumule en el fondo del tanque con la consiguiente formación de un ambiente corrosivo.

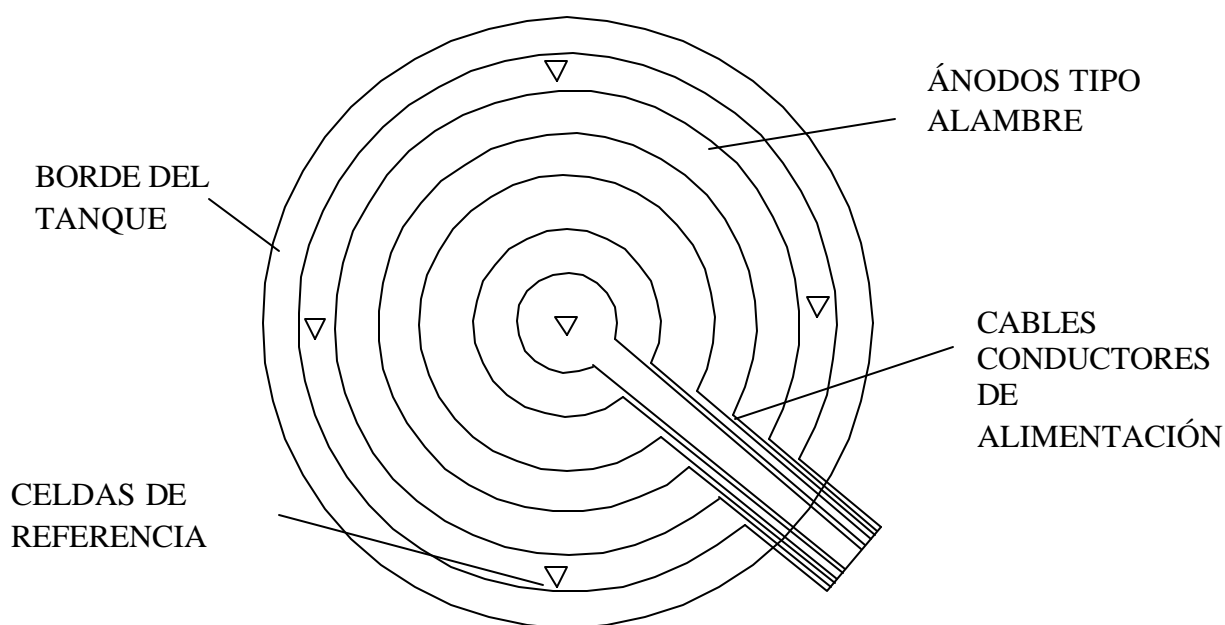
Por lo anterior se ve que era necesario desarrollar nuevos sistemas protectores de corriente impresa que tuviera la capacidad necesaria para proteger fondos de tanques grandes y cuya duración efectiva sea de hasta 50 años. Por consiguiente, se desarrollaron económicos sistemas de esa naturaleza, que se basan en el uso de ánodos instalados directamente debajo del fondo del tanque. Estos sistemas son los ánodos tipo alambre instalados en forma de círculos concéntricos y los ánodos en forma de cinta instalados en forma de cuadrícula o malla, ambos fabricados de titanio y recubiertos con óxidos metálicos mezclados (MMO).

Estos ánodos también son utilizados en tanques que no requieran membrana de contención y en viejos tanques mejorados con la instalación de un fondo secundario de tanque, donde se instalará, entre el nuevo fondo del tanque (fondo de reemplazo) y el fondo original.

### 7.1.2.1 ÁNODOS TIPO ALAMBRE INSTALADOS EN FORMA DE CÍRCULOS CONCÉNTRICOS EN EL FONDO DEL TANQUE

Los ánodos tipo alambre son ánodos cerámicos de titanio revestidos con óxidos de metales mezclados (MMO) que pueden ser de 1,5 y 3 mm de diámetro y largo variable. Poseen una capacidad de drenaje de corriente de 60 mA / mL.

Estos ánodos son dispuestos directamente debajo del fondo del tanque en lechos circulares y concéntricos con respecto al centro del fondo del tanque bajo la totalidad de su superficie a una profundidad de 45 cm, como se aprecia en el esquema de instalación de este tipo de ánodos representado en la figura N° 6



VISTA SUPERIOR DEL TANQUE

**Figura N° 6. Instalación de los ánodos tipo alambre debajo del fondo del tanque en forma de círculos concéntricos**

Para la colocación de los ánodos circulares se debe tener presente la separación que se dejará entre los círculos o anillos de ánodos. Esta distancia oscila entre 1y 3 metros y dependerá de las dimensiones del fondo del tanque. También se debe establecer la distancia

de separación entre el primer anillo o círculo y la base de concreto del tanque. Todas estas distancias se tienen que tomar en cuenta a fin de garantizar una distribución uniforme de corriente de protección drenada.

Junto a este alambre de titanio, es provisto un cable de alimentación paralelo, con aislamiento tipo TTU para enterramiento directo, que transmite la corriente continua (DC) al ánodo. El cable estará conectado al ánodo, a través de empalmes aislantes en tramos de 10 a 30 m según las dimensiones del tanque.

La instalación de estos ánodos se lleva a cabo después que se halla realizado la construcción del anillo de concreto del tanque. Para esto se procede a cavar zanjas de aproximadamente 30 cm de ancho por 50 cm de profundidad en el lugar donde estarán los círculos.

A continuación se procede a poner una capa de arena (libre de cloruros) de aproximadamente 10 cm de espesor y a colocar en el centro de la zanja el ánodo correspondiente, cuidando que tanto éste como su cable de alimentación queden alojados en el fondo de la zanja. Luego de esto, se procederá a cubrirlos con otra capa de arena de 10 cm de espesor.

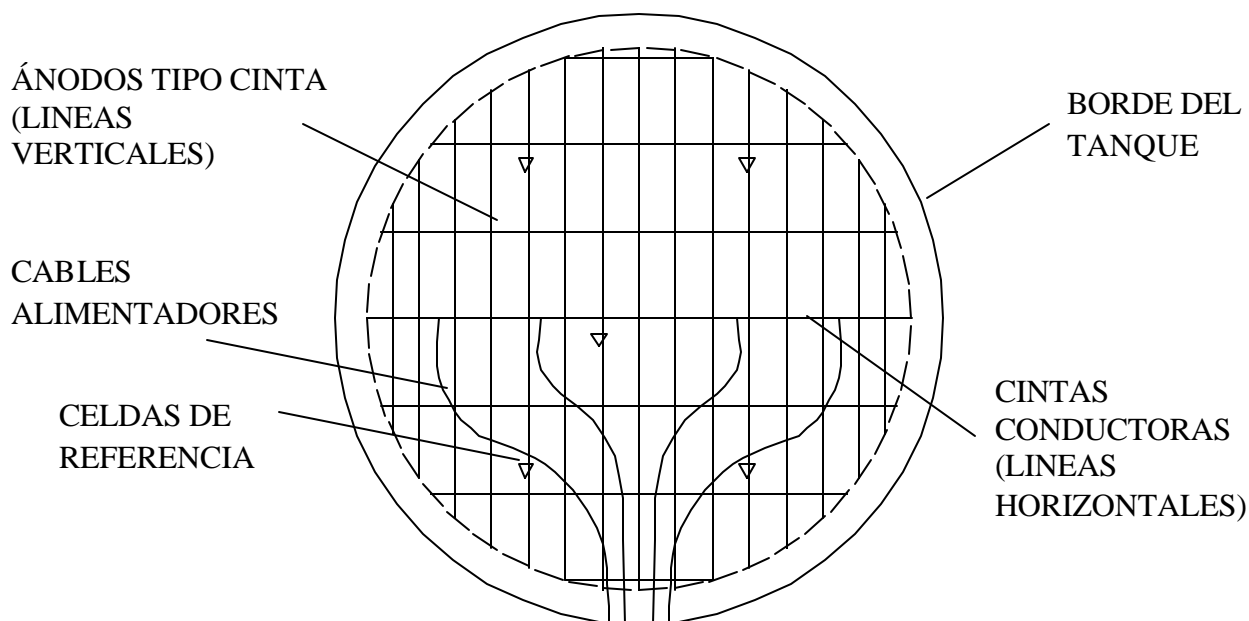
Posteriormente se dirigen los cables correspondientes de cada una de las circunferencias de ánodos, hacia un orificio de 10 cm de diámetro ubicado en la base de concreto del tanque, realizado para tal fin, y finalmente se procede a rellenar las zanjas hasta el nivel del fondo del tanque.

La ventaja de estos ánodos es que su instalación es sumamente rápida y se obvian importantes problemas técnicos y de durabilidad, ya que no existen soldaduras ni conexiones hechas en sitio.

### 7.1.2.2 ÁNODOS TIPO CINTA INSTALADOS EN FORMA DE MALLA EN EL FONDO DEL TANQUE

Los ánodos tipo cintas son ánodos cerámicos de titanio revestidos con óxidos de metales mezclados (MMO) con forma de láminas cuyas dimensiones son de 0,6 mm de espesor por 6,4 mm de ancho y largo variable. La capacidad de drenaje de corriente de estas láminas es de 16 mA/mL.

Estas láminas son colocadas en forma paralela y cruzadas a su vez por otras cintas o barras de titanio de 1 mm de espesor por 12,7 mm de ancho y largo variable, que hacen las veces de conductores, formando en conjunto un patrón de cuadrículas, malla o enrejado, para así distribuir uniformemente la corriente por toda la superficie del fondo del tanque. Este conjunto será instalado por debajo de la cota del fondo del tanque a corta distancia, a una profundidad de aproximadamente 45 cm, para asegurar niveles adecuados de protección, como se muestra en la figura N° 7



VISTA SUPERIOR DEL TANQUE

**Figura N° 7. Instalación de los ánodos tipo cinta debajo del fondo del tanque en forma de cuadrículas o malla**

Para el establecimiento de los ánodos en malla se debe considerar la separación que se dejará entre las láminas paralelas tanto de las que serán los ánodos (de 1 a 3 metros) como los conductores (de 5 a 7 metros), y dependerán de las dimensiones del fondo del tanque. También se debe dejar cierta distancia de separación entre los bordes de las láminas y la base de concreto del tanque, todo esto para garantizar una adecuada distribución de corriente de protección drenada.

El sistema debe ser instalado luego de ser construido el anillo de concreto del tanque, previamente relleno con una capa de arena compactada (usualmente con 10 cm de espesor).

Se deberá extender las cintas de ánodo de sus carretes y posteriormente las barras conductoras, colocándolas según el espaciamiento requerido. Para estos se mantienen en su lugar con sacos de arena como contrapeso para evitar que se levanten de la arena. Este proceso de enderezado y colocación de las láminas en sitio, exigen un cuidado e inspección rigurosas, para evitar que no haya contacto eléctrico entre el ánodo (láminas) y el fondo del tanque.

Estas cintas son conectadas a las barras de distribución (conductores de titanio) mediante soldadura por resistencia eléctrica mediante un equipo de soldadura por puntos de al menos 1,5 Kva., para realizar las uniones de los diferentes puntos de intersección entre los ánodos y sus conductores, haciendo un chequeo de cada soldadura con la verificación de su resistencia mecánica durante todo el proceso.

Posteriormente se dirigen los cables de alimentación de las cintas de ánodos hacia un orificio de  $\phi$  10 cm ubicado en la base de concreto del tanque y finalmente, se procederá a cubrir la malla de ánodos con otra capa de arena de 10 cm de espesor, hasta el nivel superior del anillo de concreto.

## **7.2 FÓRMULAS NECESARIAS PARA LA ELABORACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO**

Con el objetivo de garantizar una adecuada distribución de corriente sobre toda la superficie exterior del fondo del tanque y definir como será la instalación de todos los equipos a utilizar en el sistema de protección catódica, es necesario realizar de antemano el diseño de ingeniería mediante el cálculo de los parámetros específicos involucrados.

A continuación se presentarán las fórmulas matemáticas que se emplearon para la elaboración y diseño del programa informático, que servirá para la comparación de los tres sistemas de protección catódica por corriente impresa de fondos externos de tanques. Entre las fórmulas expuestas, estarán aquellas definidas por la literatura y otras que se diseñaron de acuerdo a la geometría desarrollada en cada sistema, entre las que tenemos las siguientes:

### **7.2.1 Área total a proteger**

### **7.2.2 Cantidad de corriente total de protección**

### **7.2.3 Ánodos tubulares**

#### **7.2.3.1 Cantidad de ánodos tubulares**

#### **7.2.3.2 Resistencia eléctrica de los lechos de ánodos tubulares**

#### **7.2.3.3 Resistencia eléctrica del circuito de ánodos tubulares**

#### 7.2.4 Ánodos tipo alambre

##### 7.2.4.1 Cantidad de ánodos tipo alambre

##### 7.2.4.2 Resistencia eléctrica de los ánodos tipo alambre

#### 7.2.5 Ánodos tipo cinta

##### 7.2.5.1 Cantidad de ánodos tipo cinta

##### 7.2.5.2 Cantidad de soldaduras entre los ánodos tipo cinta y los conductores

##### 7.2.5.3 Resistencia eléctrica de los ánodos tipo cinta

#### 7.2.6 Resistencia eléctrica de los cables

#### 7.2.7 Resistencia total del circuito eléctrico del sistema

#### 7.2.8 Parámetros del rectificador

### **7.2.1 ÁREA TOTAL A PROTEGER**

En este punto, es muy importante recalcar la diferencia entre el área de toda la estructura y el área que se requiere proteger. En ingeniería suele utilizarse la expresión de área desnuda, constituida precisamente por todas aquellas porosidades, fallas o resquebrajamientos presentes en las pinturas o revestimientos existentes en la estructura, las cuales representan un porcentaje del área total y varía dependiendo de las condiciones en que se encuentre el sistema. Aquí en esta área desnuda es donde existe la posible actividad corrosiva, y es la que se toma en cuenta para evaluar el requerimiento de corriente en un sistema de protección catódica.

En el caso de fondos externos de tanques, por medidas de seguridad ambas áreas son iguales, independientemente del tipo de tanque, y de la presencia o no de la capa de asfalto (R3) sobre las cuales se apoya el fondo del tanque, es decir, que el área desnuda a ser considerada para los cálculos de requerimiento de corriente será el 100 % del área del fondo del tanque. Para el cálculo del área del fondo del tanque se utilizará la siguiente formula:

$$A_{TOTAL} = \pi * R^2 \quad (7.1)$$

Donde:

$A_{TOTAL}$  : Área del fondo del tanque

R: Radio del fondo del tanque

## 7.2.2 CANTIDAD DE CORRIENTE TOTAL DE PROTECCIÓN

Para el cálculo de la corriente requerida se debe establecer de antemano cual será el factor de seguridad que se requiere. Esto se realiza debido a que gran parte de la energía drenada por los ánodos se disipa en otras estructuras metálicas cercanas, por lo que se requiere de un factor o coeficiente de seguridad particular para que el sistema alcance los niveles de corriente exigidos y exista una reserva de energía adicional.

La cantidad de corriente requerida se establece mediante el producto del área total descubierta ( $A_{TOTAL}$ ) y la densidad de corriente requerida ( $\delta$ ), mediante la siguiente formula:

$$I_{TOTAL} = \delta * A_{TOTAL} * Fs \quad (7.2)$$

Donde:

$I_{TOTAL}$ : Cantidad de corriente requerida

$\delta$ : Densidad de corriente

$A_{TOTAL}$ : Área total del fondo del tanque.

Fs: Factor de seguridad



## 7.2.3 ÁNODOS TUBULARES

### 7.2.3.1 CANTIDAD DE ÁNODOS TUBULARES

Para seleccionar la cantidad de ánodos, se debe tener presente que la corriente drenada por los mismos sea suficiente para proteger toda la estructura del fondo del tanque. El número de ánodos será establecido mediante la división entre la cantidad de corriente requerida y la corriente drenada por ánodo mediante la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} \text{ } \dot{A} = \frac{I_R}{I_A} \quad (7.3)$$

Donde:

$N^{\circ} \text{ } \dot{A}$ : Número total de ánodos tubulares requeridos

$I_R$ : Intensidad de corriente requerida para la protección del tanque

$I_A$ : Intensidad de corriente drenada por cada ánodo

Siendo los valores de corriente drenada para ánodos tubulares de titanio con recubrimiento de MMO 5, 8 y 10 amperios.

### 7.2.3.2 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS LECHOS DE ÁNODOS TUBULARES

La resistencia eléctrica de un lecho vertical (compuesto por uno o más ánodos en una perforación vertical) se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$R_v = \frac{\tilde{n} * K}{L} \quad (\Omega) \quad (15) \quad (7.4)$$

Donde:

$R_v$ : Resistencia eléctrica de uno o varios ánodos en una misma perforación ( $\Omega$ )

$\rho$ : Resistividad del suelo ( $\Omega.cm$ )

L: Longitud del cisco de coque (pie)

K: Función de forma ( $K = f(L/D)$ ) que es función del diámetro (D) y la longitud (L) del cilindro de coque (ANEXO 1)

Nota: La función de forma K incluye las unidades de conversión para obtener el valor de la resistencia en  $\Omega$ .

### 7.2.3.3 RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL CIRCUITO DE ÁNODOS TUBULARES

La resistencia eléctrica del circuito anódico, conformado por varios lechos verticales se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$R_l = \frac{R_v}{n} + \rho^* \frac{P}{S} \quad (\Omega) \quad (16) \quad (7.5)$$

Donde:

$R_l$ : Resistencia eléctrica del circuito (conjunto de ánodos) ( $\Omega$ )

$\rho$ : Resistividad del suelo ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$R_v$ : Resistencia eléctrica de uno o varios ánodos en un mismo lecho anódico (perforación) ( $\Omega$ )

n: Número total de ánodos del lecho

P: Factor de paralelismo que es función del número de ánodos ( $P = f(n)$ ) (ANEXO 2)

S: Distancia de separación entre ánodos (pies)

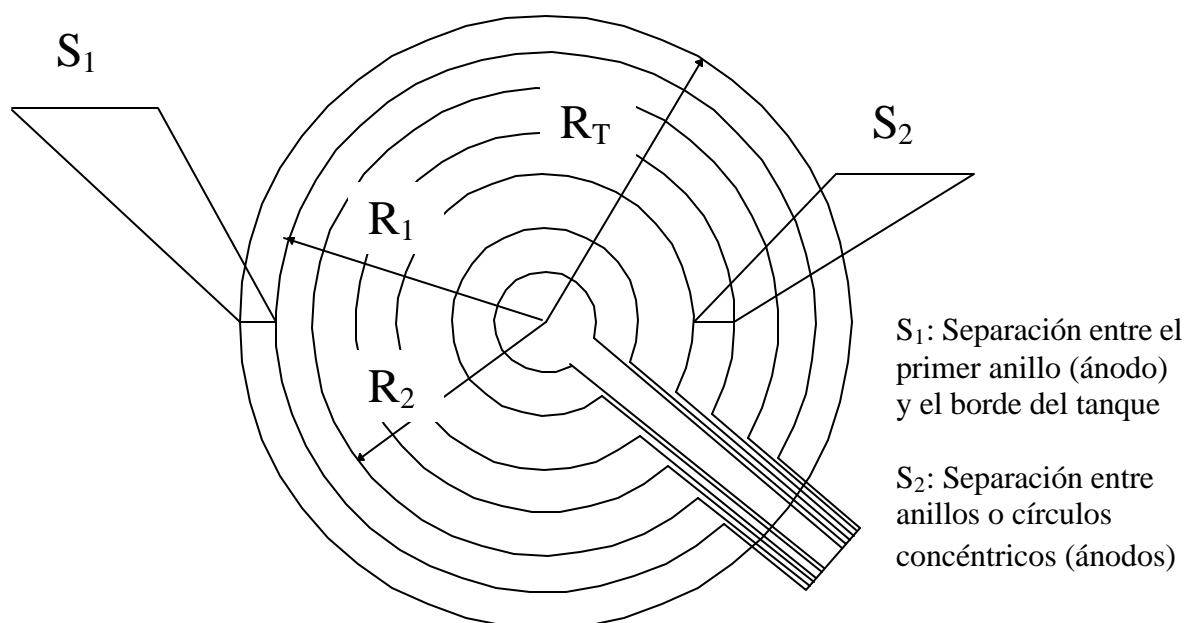
Nota: El factor de paralelismo (P) incluye las unidades de conversión para obtener el valor de la resistencia en  $\Omega$ .

## 7.2.4 ÁNODOS TIPO ALAMBRE

### 7.2.4.1 CANTIDAD Y LONGITUD DE LOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE

Para conocer la cantidad y longitud de los ánodos tipo alambre que se utilizarán en un tanque con un diámetro determinado, primeramente se debe establecer la separación que existirá entre los diferentes círculos concéntricos requeridos para abarcar toda la estructura del fondo del tanque. Esta separación oscila entre 1 y 3 metros según el tamaño del tanque. También se tiene que considerar la separación que se dejará entre el primer anillo y el borde del tanque, que por lo general es de 1 a 2 metros (ver figura N° 8)

Para la elaboración del programa informático, se asumió la separación entre los diferentes ánodos instalados en forma de círculos concéntricos en 2 metros y la distancia de separación entre el primer anillo y el borde del tanque en 1 metro.



**Figura N° 8. Distancias implicadas en la instalación de los ánodos tipo alambre en forma de círculos concéntricos**

Con estos valores determinados, se calcula el número de ánodos mediante la división entre el radio del fondo del tanque y la separación establecida entre los diferentes círculos concéntricos que se colocarán en toda el área del tanque, mediante la siguiente fórmula:

$$N_A = \frac{R_T}{S_2} \quad (7.6)$$

Donde:

$N_A$ : Número de ánodos en forma de anillos concéntricos

$R_T$ : Radio del tanque

$S_2$ : Separación entre ánodos (anillos)

Luego se procede a calcular el radio de los diferentes anillos. Primeramente para el cálculo del radio del primer anillo, el anillo más externo, se elaboró la siguiente fórmula:

$$R_1 = R_T - S_1 \quad (7.7)$$

Donde:

$R_1$ : Radio del primer anillo o ánodo en forma de círculo concéntrico

$R_T$ : Radio del tanque

$S_1$ : Separación entre el borde externo del tanque y el primer anillo

Para el cálculo del radio de los demás anillos se estableció la siguiente fórmula:

$$R_n = R_{n-1} - S_2 \quad (7.8)$$

Donde:

$R_n$ : Radio del anillo n (ánodo n)

$R_{n-1}$ : Radio del anillo anterior

$S_2$ : Separación entre anillos

Posteriormente, después de tener el valor del radio de los diferentes anillos, se procede a determinar la longitud de cada uno de ellos mediante la fórmula de superficie de una circunferencia mostrada a continuación:

$$L_n = 2 * \pi * R_n \quad (7.9)$$

Donde:

$L_n$ : Longitud del círculo formado por el ánodo n

$R_n$ : Radio en el cual será colocado el ánodo n

Una vez encontrada la longitud de cada ánodo se procede al cálculo de la longitud total requerida de los ánodos tipo alambre mediante la suma de las longitudes de los diferentes ánodos calculados, mediante la siguiente fórmula:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (7.10)$$

Donde:

$L_T$ : Longitud total de los ánodos tipo alambre

$L_1, L_2, \dots, L_n$ : Longitudes individuales de cada ánodo

#### **7.2.4.2 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE**

Estos ánodos tipo alambre se colocan en forma de anillos circulares concéntricos debajo de la lámina exterior del fondo del tanque y para el cálculo de la resistencia de cada circunferencia de ánodo formada por el alambre de titanio, se utiliza la fórmula de Dwight para ánodos circulares, representada a continuación:

$$R_A = \frac{\tilde{n}}{2 * \delta^2 * D} * \ln\left(\frac{8 * D}{d}\right) + \ln\left(\frac{8 * D}{s}\right)^{(10)} \quad (7.11)$$

Donde:

$R_A$ : Resistencia del ánodo ( $\Omega$ )

$\rho$ : Resistividad del suelo ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$d$ : Diámetro del ánodo (cm)

$D$ : Diámetro de la circunferencia formada por el ánodo (cm)

$s$ : Profundidad de instalación del ánodo, es decir la separación entre el plano de ubicación de los ánodos y la superficie o lámina externa del fondo del tanque (cm).

La resistencia total del circuito anódico se calcula usando la fórmula para la resistencia en paralelo, la cual representamos a continuación:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (7.12)$$

Donde:

$R_T$ : Resistencia total ( $\Omega$ )

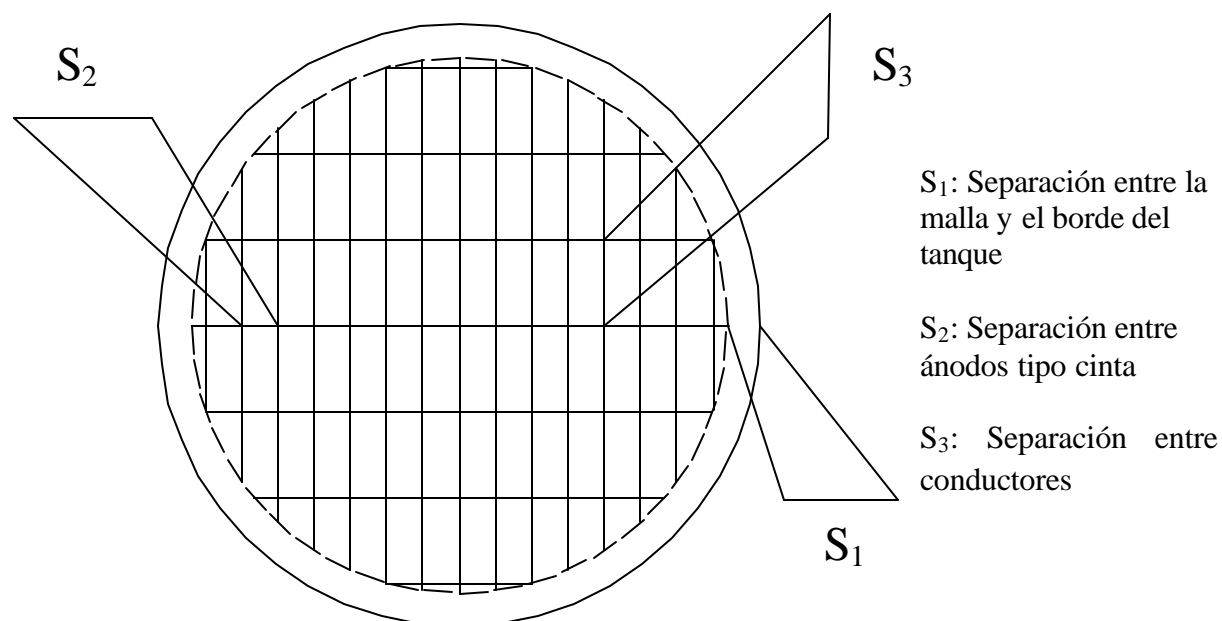
$R_1$ ,  $R_2$  y  $R_n$ : Resistencias de los distintos circunferencias formadas por los ánodos.

## 7.2.5 ÁNODOS TIPO CINTA

### 7.2.5.1 CANTIDAD Y LONGITUD DE LOS ÁNODOS TIPO CINTA

Para conocer la cantidad y longitud de los ánodos tipo cinta que se utilizarán en un tanque con un diámetro determinado, primeramente se debe establecer la separación que existirá entre las cintas colocadas entre sí en forma paralela, la cual oscila entre 1 y 5 metros, y la distancia que existe entre los conductores colocados de igual forma paralelos entre sí, que oscila entre 5 y 7 metros (estas dos separaciones según el tamaño del tanque hasta abarcar toda la estructura). También se tiene que considerar la separación que se dejará entre la malla y el borde del tanque, que por lo general es de 1 a 2 metros, esto para evitar contacto con el anillo de concreto (ver figura N° 9).

Para la elaboración del programa informático, se asumió la separación entre los diferentes ánodos en 2 metros, la separación entre los diferentes conductores en 6 metros y la distancia de separación entre la malla y el borde del tanque en 1 metro.



**Figura N° 9. Distancias implicadas en la instalación de los ánodos tipo cinta en forma de malla**

Con estos valores determinados, se calcula el número de ánodos mediante la división entre el diámetro del fondo del tanque y la separación establecida entre las cintas colocadas en forma paralela que se distribuyen en toda el área del tanque, mediante la siguiente fórmula:

$$N_A = \frac{D_T}{S_2} \quad (7.13)$$

Donde:

$N_A$ : Número de ánodos colocados de forma paralela

$D_T$ : Diámetro del tanque

$S_2$ : Separación entre ánodos tipo cinta

Luego se procede a calcular la longitud de los diferentes ánodos tipo cinta. Primeramente para el cálculo de la longitud del ánodo central, se elaboró la siguiente fórmula:

$$L_1 = D_T - 2 * S_1 \quad (7.14)$$

Donde:

$L_1$ : Longitud del ánodo central

$D_T$ : Diámetro del tanque

$S_1$ : Separación entre el borde externo del tanque y la malla

Para el cálculo de la longitud de los demás ánodos se tomó en cuenta la fórmula del calculo de una circunferencia en coordenadas rectangulares, dada a continuación:

$$R^2 = X^2 + Y^2 \quad (7.15)$$

Donde:

R: Radio de la circunferencia

X: Distancia en el eje de las abscisas

Y: Distancia en el eje de las ordenadas



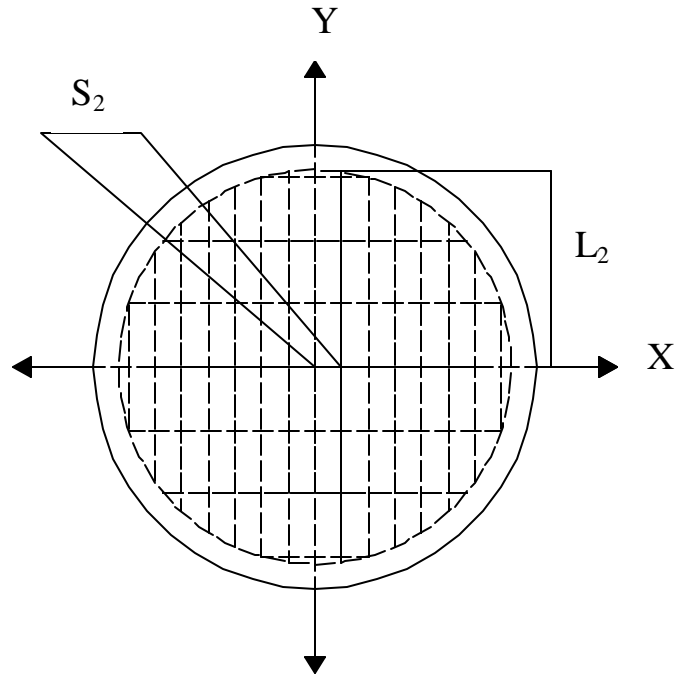
Asumiendo que:

$R$  = Radio del tanque menos la distancia de separación entre la malla y el anillo de concreto

$$(R = R_T - S_1)$$

$X$  = Separación entre el ánodo  $n$  y el eje  $Y$  ( $X = S_2(N^\circ_A - 1)$ )

$Y$  = Longitud del ánodo  $n$  en el primer cuadrante ( $Y = L_{(n)}$ )



**Figura N° 10. Longitud del ánodo número 2 en el primer cuadrante**

Se tiene que de la ecuación 7.15 obtenemos:

$$(R_T - S_1)^2 = (S_2 (N^\circ_A - 1))^2 + (L_{(n)})^2 \quad (7.16)$$

Despejando la longitud se tiene que:

$$L_{(n)} = \sqrt{(R_T - S_1)^2 - (S_2 (N^\circ_A - 1))^2} \quad (7.17)$$

Donde:

$L_n$ : Longitud del ánodo  $n$  en el primer cuadrante

$R_T$ : Radio del tanque

$S_1$ : Separación entre el borde externo del tanque y la malla

$S_2$ : Separación entre ánodos

$N^\circ_A$ : Número del ánodo en cuestión

La longitud total del ánodo n es igual a:

$$L_{T(n)} = 2 * L_{(n)} \quad (7.18)$$

Entonces de la ecuación 7.17 nos queda:

$$L_{T(n)} = 2 * \sqrt{(R_T - S_1)^2 - (S_2 (N^\circ_A - 1))^2} \quad (7.19)$$

Esta fórmula aplicará hasta que:

$$R_T - N^\circ_A * S_2 \geq 1 \quad (7.20)$$

Una vez encontrada la longitud de cada ánodo se procede al cálculo de la longitud total requerida de los ánodos tipo cinta mediante la suma de las longitudes de los diferentes ánodos calculados, mediante la siguiente fórmula:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (7.21)$$

Donde:

$L_T$ : Longitud total de los ánodos tipo cinta

$L_1, L_2, \dots, L_n$ : Longitudes individuales de cada ánodo

Luego se calcula el número de conductores de forma similar que el cálculo de los ánodos, mediante la división entre el diámetro del fondo del tanque y la separación establecida entre los diferentes conductores colocados en forma paralela en toda la extensión del área del tanque, mediante la siguiente fórmula:

$$N_c = \frac{D_T}{S_3} \quad (7.22)$$

Donde:

$N_C$ : Número de conductores colocados de forma paralela

$D_T$ : Diámetro del tanque

$S_3$ : Separación entre conductores tipo cinta

A continuación se procede a calcular la longitud de los diferentes conductores tipo cinta. Primeramente para el cálculo de la longitud de los conductores central, se tomo en cuenta la fórmula de la longitud del ánodo central ya que poseen la misma magnitud:

$$L_{c1} = D_T - 2 * S_1 \quad (7.23)$$

Donde:

$L_{c1}$ : Longitud del conductor central

$D_T$ : Diámetro del tanque

$S_1$ : Separación entre el borde externo del tanque y la malla

Para el cálculo de la longitud de los demás ánodos se tomó en cuenta la fórmula del calculo de una circunferencia en coordenadas rectangulares, dada a continuación:

$$R^2 = X^2 + Y^2 \quad (7.24)$$

Donde:

R: Radio de la circunferencia

X: Distancia en el eje de las abscisas

Y: Distancia en el eje de las ordenadas

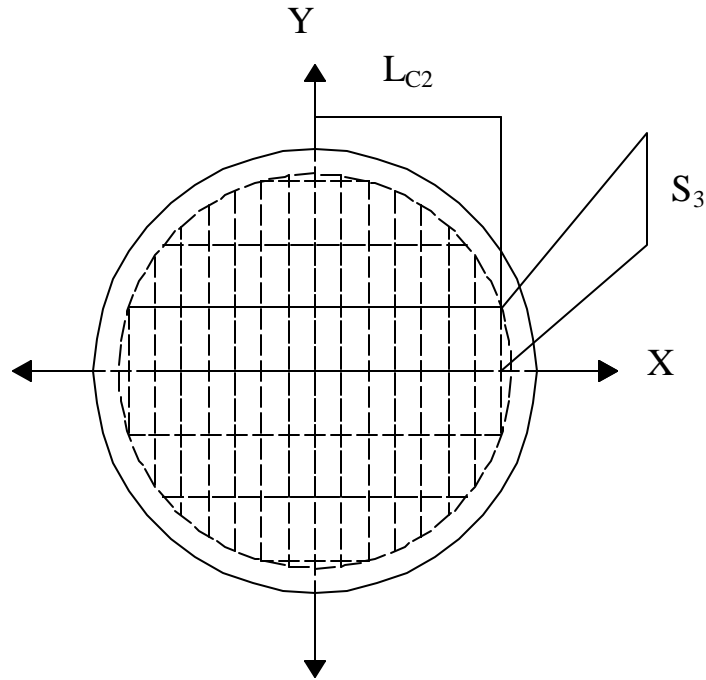
Asumiendo que:

R = Radio del tanque menos la distancia de separación entre la malla y el anillo de concreto

$(R = R_T - S_1)$

Y = Separación entre el conductor n y el eje X  $(Y = S_3(N_C - 1))$

X = Longitud del conductor n en el primer cuadrante  $(Y = L_{C(n)})$



**Figura N° 11. Longitud del conductor número 2 en el primer cuadrante**

Se tiene que de la ecuación 7.24 obtenemos:

$$(R_T - S_1)^2 = (S_3 (N^{\circ}_C - 1))^2 + (L_{C(n)})^2 \quad (7.25)$$

Despejando la longitud se tiene que:

$$L_{C(n)} = \sqrt{(R_T - S_1)^2 - (S_3 (N^{\circ}_C - 1))^2} \quad (7.26)$$

Donde:

$L_{C(n)}$ : Longitud del conductor n en el primer cuadrante

$R_T$ : Radio del tanque

$S_1$ : Separación entre el borde externo del tanque y la malla

$S_3$ : Separación entre conductores

$N^{\circ}_C$ : Número del conductor en cuestión

La longitud total del conductor n es igual a:

$$L_{TC(n)} = 2 * L_{C(n)} \quad (7.27)$$

Entonces de la ecuación 7.17 nos queda:

$$L_{TCn} = 2 * \sqrt{(R_T - S_1)^2 - (S_3(N^{\circ}_C - 1))^2} \quad (7.28)$$

Esta fórmula aplicará hasta que:

$$R_T - N^{\circ}_C * S_3 \geq 1 \quad (7.29)$$

Una vez encontrada la longitud de cada conductor se procede al cálculo de la longitud total requerida de los conductores tipo cinta mediante la suma de las longitudes de los diferentes conductores calculados, mediante la siguiente fórmula:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \quad (7.30)$$

Donde:

$L_T$ : Longitud total de los conductores tipo cinta

$L_1, L_2, \dots, L_n$ : Longitudes individuales de cada ánodo

### **7.2.5.2 CANTIDAD DE SOLDADURAS ENTRE LOS ÁNODOS TIPO CINTA Y LOS CONDUCTORES**

Para obtener el número de soldaduras que serán necesarias para la unión de los conductores con los ánodos tipo cinta, y formar de esta manera el patrón tipo malla en un determinado tamaño de tanque, se debe conocer primero cual será el tamaño de cada conductor para luego dividir esta longitud entre la distancia de separación entre los ánodos, obteniéndose así, el número de soldaduras en ese conductor. Esto se muestra mediante la siguiente fórmula:

$$N^{\circ}_{Sn} = \frac{L_c}{S_2} \quad (7.31)$$

Donde:

$N^{\circ}_{Sn}$ : Número de soldaduras en el conductor n

$L_c$ : Longitud del conductor n

$S_2$ : Separación entre ánodos

Luego para obtener el número de soldaduras totales requeridas en toda la extensión del fondo del tanque se utiliza la siguiente fórmula:

$$N^{\circ}_{ST} = N^{\circ}_{S1} + N^{\circ}_{S2} + N^{\circ}_{S3} + \dots + N^{\circ}_{Sn} \quad (7.32)$$

Hasta completar el número total de conductores según el tamaño del tanque.

## 7.2.6 RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS CABLES

La resistencia eléctrica de los cables conductores se establece por la resistencia específica del tipo de cable a utilizar dependiendo de su tamaño (tabla N° 5) y la longitud total de los mismos. Esta resistencia eléctrica estará definida por la siguiente fórmula:

$$R_{\text{CABLE}} = L_{\text{CABLE}} * R_{\text{ESPEC}} \quad (7.33)$$

Donde:

$L_{\text{CABLE}}$ : Longitud total del cable en cuestión

$R_{\text{ESPEC}}$ : Resistencia específica del cable por metro lineal según su tamaño.

**TABLA N° 5**  
**PROPIEDADES DE CONDUCTORES DE COBRE**

TAMAÑO AWG	TAMAÑO Métrico	DC Resistencia Ohm /1000'	Área transversal SQ, mm	Peso de Cobre lb. / 1000'	Corriente (Amp)
12	4	1,650	3,308	20,16	20
		1,410	3,972	24,37	24
10	6	1,020	5,260	32,06	30
		0,939	5,950	36,56	31
8	10	0,640	8,370	50,97	40
		0,558	10,020	60,95	42
6	16	0,410	13,300	81,05	55
		0,351	15,890	97,49	56
5		0,284	16,768	102,2	63
4		0,259	21,140	128,9	70
2	25	0,222	25,180	152,3	73
		0,162	33,650	204,9	90
1	35	0,160	34,990	213,3	92
		0,129	42,400	258,4	120
1/0	50	0,118	49,990	304,7	130
		0,102	53,44	325,8	135
2/0		0,079	67,45	410,9	165
4/0		0,050	107,16	653,3	230

FUENTE: A. W. Peabody, Control of Pipeline Corrosion, (Houston, TX: NACE, 1967),  
p 97

AWG = American Wire Gauge (Ø del cable)

La resistencia eléctrica total de los cables se calcula usando la fórmula para la resistencia en paralelo, que establece que el inverso de la resistencia total de los cables es igual a la suma de los inversos de las resistencias de los cables de alimentación de los ánodos individuales, la cual representamos a continuación:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (7.34)$$

Donde:

$R_T$ : Resistencia total ( $\Omega$ )

$R_1, R_2$  y  $R_n$  : Resistencias de los distintos cables según su longitud

### 7.2.7 RESISTENCIA TOTAL DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DEL SISTEMA

La resistencia total del circuito eléctrico de un sistema de protección catódica viene dado por la suma de la resistencia de sus elementos, o sea:

$$R_t = R_l + R_c + R_s + R_{estr.} \quad (7.35)$$

Donde:

$R_t$  = Resistencia total del circuito

$R_l$  = Resistencia del lecho de ánodos

$R_c$  = Resistencia de todos los cables eléctricos del sistema (cables de alimentación (positivos) y cables de retorno (negativos))

$R_s$  = Resistencia del suelo

$R_{estr.}$  = Resistencia de la estructura en sí

**Nota:**  $R_s$  y  $R_{estr.}$  generalmente son de bajo valor, por lo que son despreciable en comparación con  $R_l$



### 7.2.8 PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR

La selección de los parámetros del rectificador a utilizar, como por ejemplo el tipo de rectificador, su rendimiento, capacidad nominal de salida, accesorios de protección y control apropiados, estará basada en el cálculo del voltaje total ( $V_{TOTAL}$ ) que vendrá determinado por la intensidad de corriente total del sistema ( $I_{TOTAL}$ ) y por la resistencia total del circuito eléctrico ( $R_{TOTAL}$ ). Para el cálculo de este voltaje utilizaremos la ley de Ohm.

$$V_{TOTAL} = I_{TOTAL} \cdot R_{TOTAL} \quad (7.36)$$

La capacidad de cada rectificador deberá ser diseñada un 25 % por encima de los valores requeridos, para que de esta manera el rectificador trabaje por debajo de su capacidad nominal para su buen funcionamiento, y previniendo eventuales cambios de resistividad del suelo y el efecto de futuros trabajos de ampliación de estructuras instaladas en el área.

### **7.3 DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO PARA LA COMPARACIÓN DE LOS TRES SISTEMAS**

Para el análisis comparativo de los diferentes sistemas de protección catódica para fondos externos de tanques, se diseñó un programa informático con el fin de obtener de forma directa y automática los valores de cálculos necesarios, mediante un desarrollo matemático de diseño y de costos para cada uno de los sistemas a estudiar.

Para esto se correlacionaron las distintas fórmulas genéricas, es decir, se enlazaron en una secuencia de fórmulas afines con la ayuda de instrucciones de programación, lo que permitió el cálculo simultaneo de los parámetros involucrados en cada sistema.

Esto hizo posible que al ingresar los datos generales de cada uno de los sistemas en las fórmulas genéricas ya definidas en el programa, se obtuviera de manera instantánea el resultado de cada fórmula. De forma que se observó el comportamiento de los factores involucrados sin necesidad de calcular uno por uno sus parámetros de forma manual.

Es de hacer resaltar que se establecieron parámetros estándares que facilitaron la comparación entre los tres sistemas, para unificar de esta forma los criterios de selección. Esto debido a que existen muchos factores en juego que varían, y que si no se definen de igual forma para los tres sistemas no se podrían observar las ventajas de un sistema sobre otro.

Primeramente, se agruparon los parámetros comunes a los tres sistemas, como por ejemplo el diámetro del fondo del tanque, la densidad de corriente a aplicar, el coeficiente de seguridad requerido, la resistividad del suelo, el tipo de cable a utilizar, la distancia entre el rectificador y la caja junto al lecho de ánodos y la distancia entre el rectificador y el fondo del tanque. A continuación se dará un ejemplo de un cálculo específico de estos parámetros comunes:

**TABLA N° 6**  
**DATOS COMUNES A LOS TRES SISTEMAS**

VARIABLE	VALOR
DIAMETRO DEL FONDO DEL TANQUE (m)	25,2
RADIO DEL FONDO DEL TANQUE (m)	12,6
ÁREA TOTAL DEL TANQUE (m <sup>2</sup> ):	499
DENSIDAD DE CORRIENTE A APLICAR, mA/m <sup>2</sup>	20
CORRIENTE REQUERIDA (DENSIDAD DE CORRIENTE * ÁREA TOTAL) (Amp):	10
COEFICIENTE DE SEGURIDAD A APLICAR, %	
RESERVA ADICIONAL CORR.= CORR. REQUERIDA * COEF. SEGURIDAD (Amp):	10
RESISTIVIDAD DEL SUELO ( $\Omega$ . cm):	500
TIPO DE CABLE A UTILIZAR (AWG N°)	AWG4
RESISTENCIA ESPECÍFICA DEL CABLE	0,259
DISTANCIA ENTRE EL RECTIFICADOR Y LA CAJA JUNTO AL LECHO (m)	5
RESISTENCIA DEL CABLE DE ALIMENTACIÓN DE LA CAJA JUNTO AL LECHO ( $\Omega$ )	0,004
DISTANCIA ENTRE EL RECTIFICADOR Y EL FONDO DEL TANQUE (m) (RETORNO)	80,0
RESISTENCIA TOTAL DEL CABLE DE RETORNO ( $\Omega$ )	0,068

Esta tabla representa todos los valores comunes a los tres sistemas, que deben ser iguales, para hacer la comparación en un mismo plano de estudio. Esto se llevó a cabo para que se simplificarán los cálculos y para que las condiciones que rigen el proyecto sean unificadas y no se tomaran criterios diferentes de comparación.

Luego se tomaron en cuenta los cálculos técnicos específicos de cada sistema, introduciéndole los valores necesarios para que el programa calculara todas las variables involucradas en el diseño y estructura del desarrollo matemático requerido para cada uno de los métodos de este estudio. Entre los cálculos técnicos previstos están los siguientes:

**TABLA N° 7**  
**CÁLCULOS TÉCNICOS DEL SISTEMA DE ÁNODOS TUBULARES**

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>
CORRIENTE SUMINISTRADA (ÁNODOS) (Amp)	8
PROFUNDIDAD DEL LECHO (m)	10
ALTURA DE LA COLUMNA DE CISCO DE COQUE (m):	5
ALTURA DE LA COLUMNA DE CISCO DE COQUE (Pie):	16,4
CANTIDAD DE CISCO DE COQUE (m3)	1,25664
CANTIDAD DE ÁNODOS	2
CANTIDAD DE ÁNODOS POR LECHO (POR PERFORACIÓN)	1
CANTIDAD DE LECHOS ANÓDICOS (PERFORACIONES)	2
SEPARACIÓN ENTRE LECHOS ANÓDICOS (PERFORACIONES) (m):	55,29
SEPARACIÓN ENTRE LECHOS ANÓDICOS (PERFORACIONES) (Pie):	181,36
VALOR DEL FACTOR DE FORMA ( $K = F(L/D)$ )	0,0190
VALOR DEL FACTOR DE PARALELISMO ( $P = F(N^{\circ} \text{ ÁNODOS})$ )	0,00261
$R_v$ = RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS LECHOS (Ohmios):	0,58
$R_L$ = RESISTENCIA ELÉCTRICA TOTAL DEL CIRCUITO ANÓDICO (Ohmios):	0,30
LONGITUD TOTAL DE LAS ZANJAS	190,58
<b>CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DE LOS CABLES</b>	
LONGITUD TOTAL DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE LOS ÁNODOS (m)	83
FACTOR DE MULTIPLICACIÓN DE LA LONGITUD DEL CABLE	1,5
RESISTENCIA DE LOS CABLES DE LOS ÁNODOS (Ohmios)	0,11
RESISTENCIA TOTAL DE LOS CABLES (Ohmios)	0,18
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA (Ohmios)	0,47
<b>CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR</b>	
CAPACIDAD TOTAL INSTALADA (Amp)	16,00
VOLTAJE CALCULADO DEL RECTIFICADOR (Volt)	7,60
<b>PARÁMETROS DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR</b>	
CORRIENTE DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR (Amp)	20,00
VOLTAJE DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR (Volt)	10,00

**TABLA N° 8**  
**CÁLCULOS TÉCNICOS DEL SISTEMA DE ÁNODOS TIPO ALAMBRE**  
**INSTALADOS EN FORMA DE CÍRCULOS CONCÉNTRICOS**

VARIABLE										VALOR
CORRIENTE SUMINISTRADA POR METRO LINEAL (ÁNODO) (mA/mL)										65
SEPARACIÓN ENTRE EL PRIMER ÁNODO Y EL ANILLO DE CONCRETO (m)										1,00
SEPERACIÓN ENTRE ÁNODOS (m)										2,0
SEPARACIÓN DE LOS EMPALMES DEL TANQUE (m)										2
ANCHO DEL ANILLO DE CONCRETO (m)										0,60
PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO DE LOS ÁNODOS (cm)										40
DIÁMETRO DEL ÁNODO (cm)										0,3
CANTIDAD DE ÁNODOS (CÍRCULOS CONCÉNTRICOS)										7
LONGITUD TOTAL ÁNODOS SEGÚN DISEÑO DE CONSTRUCCION (m)										251
RESISTENCIA ELECTRICA TOTAL DE LOS ÁNODOS (Ohms)										0,80
CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DE LOS CABLES										
LONGITUD TOTAL DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE LOS ÁNODOS (m)										818
RESISTENCIA DE LOS CABLES DE LOS ÁNODOS (Ohmios)										0,014
RESISTENCIA TOTAL DE LOS CABLES (Ohmios)										0,086
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA (Ohmios)										0,891
CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR										
CAPACIDAD TOTAL INSTALADA (Amp)										16,30
VOLTAJE CALCULADO DEL RECTIFICADOR (Volt)										14,51
PARÁMETROS DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR										
CORRIENTE DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR (Amp)										21
VOLTAJE DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR (Volt)										19
ÁNODOS						CABLES				
Nº LOOP	RADIO DEL ÁNODO (m)	DIÁMETRO DEL ÁNODO (m)	LONGITUD DEL ÁNODO (m)	RESIST. ÁNODOS (Ohms)	INVERSO RESIST. ÁNODOS	LONGITUD CABLE ÁNODOS (m)	LONGITUD CABLE EXTERNO (m)	LONGITUD TOTAL CABLES (m)	RESIST. CABLES (Ohm)	INVERSO RESIST. CABLES
1	11,60	23,20	72,88	6,2603	0,1597	73	81	154	0,1307	7,6495
2	9,60	19,20	60,32	6,0937	0,1641	60	81	141	0,1201	8,3297
3	7,60	15,20	47,75	5,8938	0,1697	48	81	129	0,1094	9,1426
4	5,60	11,20	35,19	5,6447	0,1772	35	81	116	0,0987	10,1315
5	3,60	7,20	22,62	5,3168	0,1881	23	81	104	0,0880	11,3602
6	1,60	3,20	10,05	4,8754	0,2051	10	81	91	0,0774	12,9280
7	0,30	0,60	1,88	5,5996	0,1786	2	81	83	0,0704	14,2020

**TABLA N° 9**  
**CÁLCULOS TÉCNICOS DEL SISTEMA DE ÁNODOS TIPO CINTA**  
**INSTALADOS EN FORMA DE MALLA**

VARIABLE			VALOR		
CORRIENTE SUMINISTRADA POR METRO LINEAL (ÁNODO) (mA/mL)			75		
SEPERACIÓN ENTRE LOS ANODOS Y EL ANILLO DE CONCRETO (m)			1,0		
SEPERACIÓN ENTRE ÁNODOS (m)			2,0		
SEPERACIÓN ENTRE CONDUCTORES (m)			6,0		
ANCHO DEL ANILLO DE CONCRETO (m)			0,60		
PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO DE LOS ÁNODOS (cm)			40		
CANTIDAD DE ÁNODOS TIPO CINTA			11		
LONGITUD TOTAL DE LOS ÁNODOS TIPO CINTA SEGÚN DISEÑO (m)			210		
RESISTENCIA ELECTRICA TOTAL DE LOS ÁNODOS (Ohms)			1,1		
CANTIDAD DE CONDUCTORES Ti			3		
LONGITUD TOTAL DE LOS CONDUCTORES Ti			63		
RESISTENCIA ELECTRICA TOTAL DE LOS CONDUCTORES (Ohms)			1,4		
NÚMERO DE SOLDADURAS			29		
CÁLCULO DE LA RESISTENCIA TOTAL DE LOS CABLES					
LONGITUD TOTAL DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE LOS ÁNODOS (m)			249		
RESISTENCIA DE LOS CABLES DE LOS ÁNODOS (Ohmios)			0,212		
RESISTENCIA TOTAL DE LOS CABLES (Ohmios)			0,284		
RESISTENCIA TOTAL DEL SISTEMA (Ohmios)			0,284		
CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR					
CAPACIDAD TOTAL INSTALADA (Amp)			15,75		
VOLTAJE CALCULADO DEL RECTIFICADOR (Volt)			4,47		
PARÁMETROS DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR					
CORRIENTE DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR (Amp)			20		
VOLTAJE DE DISEÑO DEL RECTIFICADOR (Volt)			6		
ÁNODOS TIPO CINTA			CONDUCTORES TIPO CINTA		
Nº DE ÁNODO	LONGITUD DE CADA ÁNODO EN UN CUADRANTE (m)	LONGITUD DE CADA ÁNODO EN UNA MITAD DEL TANQUE (m)	Nº DE CONDUCTOR	LONGITUD DE CADA CONDUCTOR EN UN CUADRANTE (m)	LONGITUD DE CADA CONDUCTOR EN UNA MITAD DEL TANQUE (m)
1	11,6	23,2	1	11,6	23,2
2	11,4	22,9	2	9,9	19,9
3	10,9	21,8			
4	9,9	19,9			
5	8,4	16,8			

Todos estos cálculos permiten conocer el resultado de los cómputos de la cantidad de materiales que se requerirían para la construcción, instalación e implementación de los tres sistemas a estudiar, obteniéndose los siguientes valores:

Sistema de ánodos tubulares:

- Número de ánodos verticales y sus respectivos accesorios
- Número de perforaciones de los lechos
- Longitud de las zanjas para el cableado de los ánodos
- Longitud total de los cables del circuito eléctrico

Sistema de ánodos tipo alambre instalados en forma de círculos concéntricos:

- Cantidad de círculos concéntricos y la longitud de cada uno de ellos
- Longitud total de los ánodos tipo alambre
- Número de accesorios para las conexiones entre ánodos
- Longitud total de los cables del circuito eléctrico

Sistema de ánodos tipo cinta instalados en forma de malla:

- Cantidad y longitud de los ánodos en forma de cinta
- Cantidad y longitud de las barras conductoras
- Número de soldaduras realizadas en campo

- Longitud total de los cables del circuito eléctrico
- Número de accesorios requeridos para la instalación del sistema

Posteriormente se elaboraron tablas para el cálculo de costos, mediante la estimación de los precios unitarios que poseen cada uno de los materiales involucrados en la instalación de los tres sistemas, que por medio de los resultados obtenidos de la cantidad de materiales se pudiera determinar cual sería el costo total de los sistemas a estudiar, según un tamaño de tanque específico. Con esta comparación se podrán obtener los criterios de selección entre estos sistemas, y así saber cual de ellos es el más rentable bajo determinadas condiciones de trabajo. Estas tablas de cálculo son presentadas a continuación:



**TABLA N° 10**  
**CÁLCULOS DE COSTOS DEL SISTEMA DE ÁNODOS TUBULARES**

<b>MATERIALES</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO \$</b>	<b>PRECIO TOTAL \$</b>
ÁNODO TUBULAR DE TITANIO CON MMO ENCAPSULADO CON CAPACIDAD DE 8 A	Un	2	390,00	780,00
ACCESORIOS PARA INSTALAR LOS ÁNODOS TUBULARES DE TITANIO CON MMO ENCAPSULADO:	Set	2	200,00	400,00
CISCO DE COQUE TIPO LORESCO	m3	1,25664	900,00	1.130,98
CABLES PARA TODO EL SISTEMA ELÉCTRICO	mL.	83	1,50	124,41
<b>INSTALACIÓN</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO \$</b>	<b>PRECIO TOTAL \$</b>
INSTALACIÓN DE ÁNODOS DE CORRIENTE IMPRESA DE TITANIO DE 8 A DE CAPACIDAD	Un.	2	5,00	10,00
PERFORACIONES DE AGUJEROS DE 10 METROS DE PROFUNDIDAD Y 40 cm DE DIÁMETRO	m	20	80,00	1.600,00
INSTALACIÓN DE CABLES EN ZANJAS DEL CIRCUITO POSITIVO	mL	190,58	15,00	2.858,76
APERTURA, RELLENO Y COMPACTACIÓN DE ZANJAS DE 0,3 m DE ANCHO, 0,9 m DE PROFUNDIDAD, CON UN COLCHON DE ARENA	mL	190,58	40,00	7.623,36
<b>TOTAL</b>				<b>14.527,51</b>

**TABLA N° 11**  
**CÁLCULOS DE COSTOS DEL SISTEMA DE ÁNODOS TIPO ALAMBRE**  
**INSTALADOS EN FORMA DE CÍRCULOS CONCÉNTRICOS**

<b>MATERIALES</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO \$</b>	<b>PRECIO TOTAL \$</b>
ANODOS DE Ti MMO TIPO ALAMBRE DE 3 mm DIÁMETRO	mL.	251	31,00	7.771,67
ACCESORIOS PARA LA INSTALACIÓN DE LOS ANODOS DE Ti MMO TIPO ALAMBRE DE 3 mm DIÁMETRO	set	13	60,00	752,10
CABLES PARA TODO EL SISTEMA ELÉCTRICO	mL.	818	1,97	1.610,87
<b>INSTALACIÓN</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO \$</b>	<b>PRECIO TOTAL \$</b>
INSTALACIÓN DE ÁNODOS DE LOS ÁNODOS Ti MMO TIPO ALAMBRE DE 3 mm DIÁMETRO	Un.	1	1.750,00	1.750,00
INSTALACIÓN DE CABLES EN ZANJAS DEL CIRCUITO POSITIVO	mL	80	20,00	1.600,00
<b>TOTAL</b>				<b>13.484,64</b>

**TABLA N° 12**  
**CÁLCULOS DE COSTOS DEL SISTEMA DE ÁNODOS TIPO CINTA**  
**INSTALADOS EN FORMA DE MALLA**

<b>MATERIALES</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO \$</b>	<b>PRECIO TOTAL \$</b>
ÁNODO EN FORMA DE CINTAS DE TITANIO CON MMO DE 0,25" ANCHO x 0,025" DE ESPESOR	Un	210	13,50	2.835,00
BARRAS ALIMENTADORAS (CONDUCTORES)	Un	63	10,00	630,00
ACCESORIOS PARA INSTALAR LOS ÁNODOS EN FORMA DE CINTAS DE TITANIO CON MMO:	Set	3	120,00	360,00
SOLDADURAS ENTRE EL ÁNODO Y EL CONDUCTOR	Set	29	70,00	2.030,00
CABLES PARA TODO EL SISTEMA ELÉCTRICO	mL.	249	1,97	490,53
<b>INSTALACIÓN</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO \$</b>	<b>PRECIO TOTAL \$</b>
INSTALACIÓN DE ÁNODOS EN FORMA DE CINTAS DE TITANIO	Un.	1	2.500,00	2.500,00
INSTALACIÓN DE CABLES EN ZANJAS DEL CIRCUITO POSITIVO	mL	80	20,00	1.600,00
<b>TOTAL</b>				<b>10.445,53</b>

## 8. RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez elaborado todo el programa informático, se procedió a introducir los diferentes valores de diámetros de tanques, para obtener para cada diámetro de tanque un valor de costo total correspondiente y así observar el comportamiento que tienen los diferentes sistemas, con esta variación del tamaño del tanque, obteniéndose los siguientes resultados:

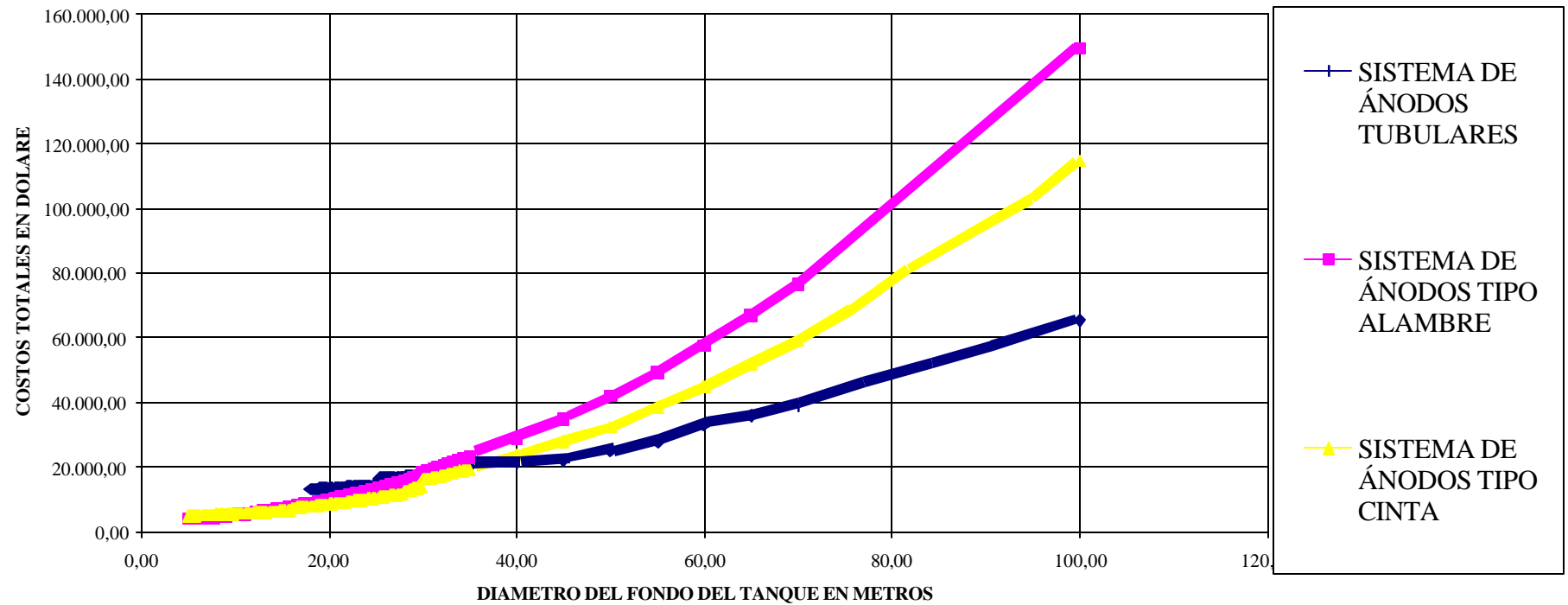
**TABLA N°13**  
**COSTOS TOTALES VS. TAMAÑO TANQUE**

DIÁMETRO (m)	COSTOS ÁNODOS TUBULARES (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO CINTA (\$)	DIÁMETRO (m)	COSTOS ÁNODOS TUBULARES (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO CINTA (\$)
5,00	#N/A	4.075,95	5.021,03	11,20	#N/A	5.591,56	5.751,53
5,20	#N/A	4.098,55	5.044,53	11,40	#N/A	5.659,36	5.765,03
5,40	#N/A	4.143,75	5.044,53	11,60	#N/A	5.727,16	5.778,53
5,60	#N/A	4.166,35	5.044,53	11,80	#N/A	5.794,96	5.778,53
5,80	#N/A	4.211,55	5.044,53	12,00	#N/A	5.862,77	5.954,03
6,00	#N/A	4.234,16	5.184,53	12,20	#N/A	5.930,57	5.977,53
6,20	#N/A	4.279,36	5.208,03	12,40	#N/A	5.998,37	5.991,03
6,40	#N/A	4.301,96	5.208,03	12,60	#N/A	6.270,94	6.018,03
6,60	#N/A	4.347,16	5.208,03	12,80	#N/A	6.338,74	6.031,53
6,80	#N/A	4.369,76	5.208,03	13,00	#N/A	6.429,15	6.045,03
7,00	#N/A	4.347,16	5.208,03	13,20	#N/A	6.496,95	6.068,53
7,20	#N/A	4.392,36	5.231,53	13,40	#N/A	6.587,35	6.082,03
7,40	#N/A	4.437,56	5.231,53	13,60	#N/A	6.655,15	6.109,03
7,60	#N/A	4.482,76	5.231,53	13,80	#N/A	6.745,56	6.122,53
7,80	#N/A	4.527,96	5.231,53	14,00	#N/A	6.813,36	6.346,03
8,00	#N/A	4.573,16	5.423,03	14,20	#N/A	6.903,76	6.369,53
8,20	#N/A	4.618,37	5.446,53	14,40	#N/A	6.971,56	6.383,03
8,40	#N/A	4.663,57	5.460,03	14,60	#N/A	7.061,96	6.396,53
8,60	#N/A	4.913,54	5.473,53	14,80	#N/A	7.129,77	6.423,53
8,80	#N/A	4.958,74	5.473,53	15,00	#N/A	7.152,37	6.437,03
9,00	#N/A	5.026,54	5.487,03	15,20	#N/A	7.242,77	6.460,53
9,20	#N/A	5.071,74	5.510,53	15,40	#N/A	7.333,17	6.474,03
9,40	#N/A	5.139,55	5.510,53	15,60	#N/A	7.423,57	6.487,53
9,60	#N/A	5.184,75	5.524,03	15,80	#N/A	7.513,98	6.501,03
9,80	#N/A	5.252,55	5.537,53	16,00	#N/A	7.604,38	7.147,03
10,00	#N/A	5.297,75	5.677,53	16,20	#N/A	7.694,78	7.184,03
10,20	#N/A	5.365,55	5.701,03	16,40	#N/A	7.785,18	7.207,53
10,40	#N/A	5.410,75	5.714,53	16,60	#N/A	8.080,36	7.524,53
10,60	#N/A	5.478,56	5.714,53	16,80	#N/A	8.170,76	7.561,53
10,80	#N/A	5.523,76	5.728,03	17,00	#N/A	8.283,76	7.588,53
11,00	#N/A	5.523,76	5.741,53	17,20	#N/A	8.374,17	7.625,53

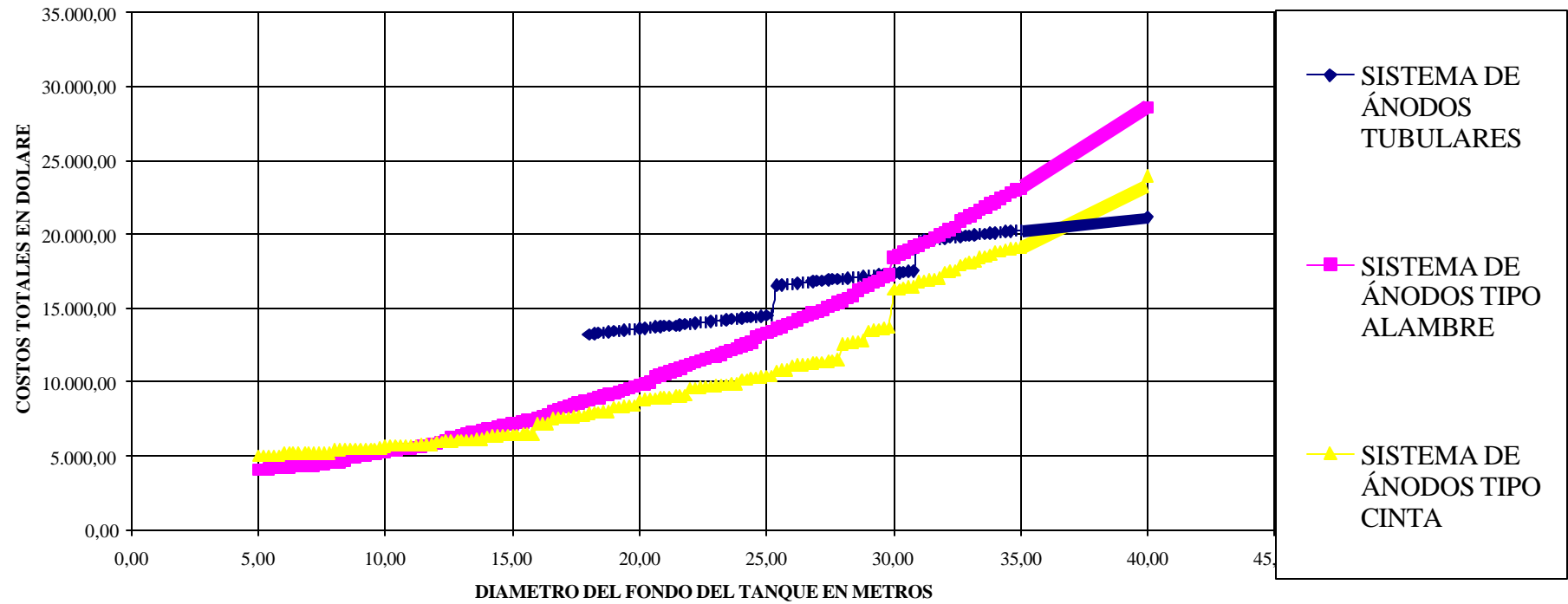
DIÁMETRO (m)	COSTOS ÁNODOS TUBULARES (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO CINTA (\$)	DIÁMETRO (m)	COSTOS ÁNODOS TUBULARES (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO ALAMBRE (\$)	COSTOS ÁNODOS TIPO CINTA (\$)
17,40	#N/A	8.487,17	7.649,03	26,20	16.692,75	14.230,46	11.164,53
17,60	#N/A	8.577,57	7.686,03	26,40	16.728,17	14.366,06	11.191,53
17,80	#N/A	8.690,57	7.723,03	26,60	16.763,59	14.524,26	11.242,03
18,00	13.257,99	8.780,98	7.886,53	26,80	16.799,01	14.659,87	11.292,53
18,20	13.293,25	8.893,98	7.913,53	27,00	16.834,43	14.750,27	11.333,03
18,40	13.328,52	8.984,38	7.950,53	27,20	16.869,86	14.908,48	11.370,03
18,60	13.363,78	9.097,39	7.974,03	27,40	16.905,28	15.066,68	11.420,53
18,80	13.399,05	9.187,79	8.011,03	27,60	16.940,70	15.224,88	11.447,53
19,00	13.434,31	9.232,99	8.328,03	27,80	16.976,12	15.383,09	11.498,03
19,20	13.469,58	9.345,99	8.341,53	28,00	17.011,54	15.541,29	12.578,53
19,40	13.504,84	9.459,00	8.378,53	28,20	17.046,96	15.699,50	12.629,03
19,60	13.540,10	9.572,00	8.402,03	28,40	17.082,38	15.857,70	12.703,03
19,80	13.575,37	9.685,00	8.439,03	28,60	17.117,81	16.220,68	12.763,53
20,00	13.610,63	9.798,00	8.752,03	28,80	17.153,23	16.378,88	12.827,53
20,20	13.645,90	9.911,01	8.802,53	29,00	17.188,65	16.559,69	13.448,03
20,40	13.681,16	10.024,01	8.839,53	29,20	17.224,07	16.717,89	13.512,03
20,60	13.716,43	10.341,78	8.876,53	29,40	17.259,49	16.898,70	13.572,53
20,80	13.751,69	10.454,79	8.917,03	29,60	17.294,91	17.056,90	13.636,53
21,00	13.786,95	10.590,39	8.954,03	29,80	17.330,33	17.237,70	13.697,03
21,20	13.822,22	10.703,39	8.991,03	30,00	17.365,76	18.445,91	16.238,06
21,40	13.857,48	10.839,00	9.031,53	30,20	17.401,18	18.626,71	16.288,56
21,60	13.892,75	10.952,00	9.068,53	30,40	17.436,60	18.784,92	16.362,56
21,80	13.928,01	11.087,61	9.105,53	30,60	17.472,02	18.965,72	16.413,06
22,00	13.963,28	11.200,61	9.552,53	30,80	17.507,44	19.123,93	16.473,56
22,20	13.998,54	11.336,21	9.603,03	31,00	19.567,75	19.236,93	16.804,06
22,40	14.033,81	11.449,22	9.640,03	31,20	19.603,49	19.417,74	16.868,06
22,60	14.069,07	11.584,82	9.677,03	31,40	19.639,22	19.598,54	16.928,56
22,80	14.104,33	11.697,82	9.704,03	31,60	19.674,96	19.779,35	16.979,06
23,00	14.139,60	11.765,62	9.741,03	31,80	19.710,70	19.960,15	17.029,56
23,20	14.174,86	11.901,23	9.778,03	32,00	19.746,43	20.140,96	17.447,06
23,40	14.210,13	12.036,83	9.818,53	32,20	19.782,17	20.321,76	17.521,06
23,60	14.245,39	12.172,43	9.855,53	32,40	19.817,90	20.502,57	17.585,06
23,80	14.280,66	12.308,04	9.892,53	32,60	19.853,64	20.888,14	17.929,06
24,00	14.315,92	12.443,64	10.162,53	32,80	19.889,37	21.068,95	18.003,06
24,20	14.351,18	12.579,25	10.213,03	33,00	19.925,11	21.272,35	18.067,06
24,40	14.386,45	12.714,85	10.263,53	33,20	19.960,85	21.453,16	18.131,06
24,60	14.421,71	13.055,22	10.304,03	33,40	19.996,58	21.656,56	18.475,06
24,80	14.456,98	13.190,83	10.354,53	33,60	20.032,32	21.837,37	18.549,06
25,00	14.492,24	13.349,03	10.405,03	33,80	20.068,05	22.040,77	18.613,06
25,20	14.527,51	13.484,64	10.445,53	34,00	20.103,79	22.221,58	18.817,06
25,40	16.551,06	13.642,84	10.776,03	34,20	20.139,52	22.424,98	18.881,06
25,60	16.586,48	13.778,44	10.813,03	34,40	20.175,26	22.605,79	18.955,06
25,80	16.621,90	13.936,65	10.853,53	34,60	20.210,99	22.809,19	19.005,56
26,00	16.657,33	14.072,25	11.114,03	34,80	20.246,73	22.990,00	19.069,56

Estos resultados se graficaron para observar cual es el comportamiento que tendrán cada uno de los sistemas en cuanto al costo total según el tamaño del tanque, para luego determinar cual será el intervalo de aplicación de cada sistema conforme al que resulte más económico, y evaluar de esta manera las razones técnicas y económicas que llevaron a estos resultados. Estas gráficas se presentan a continuación:

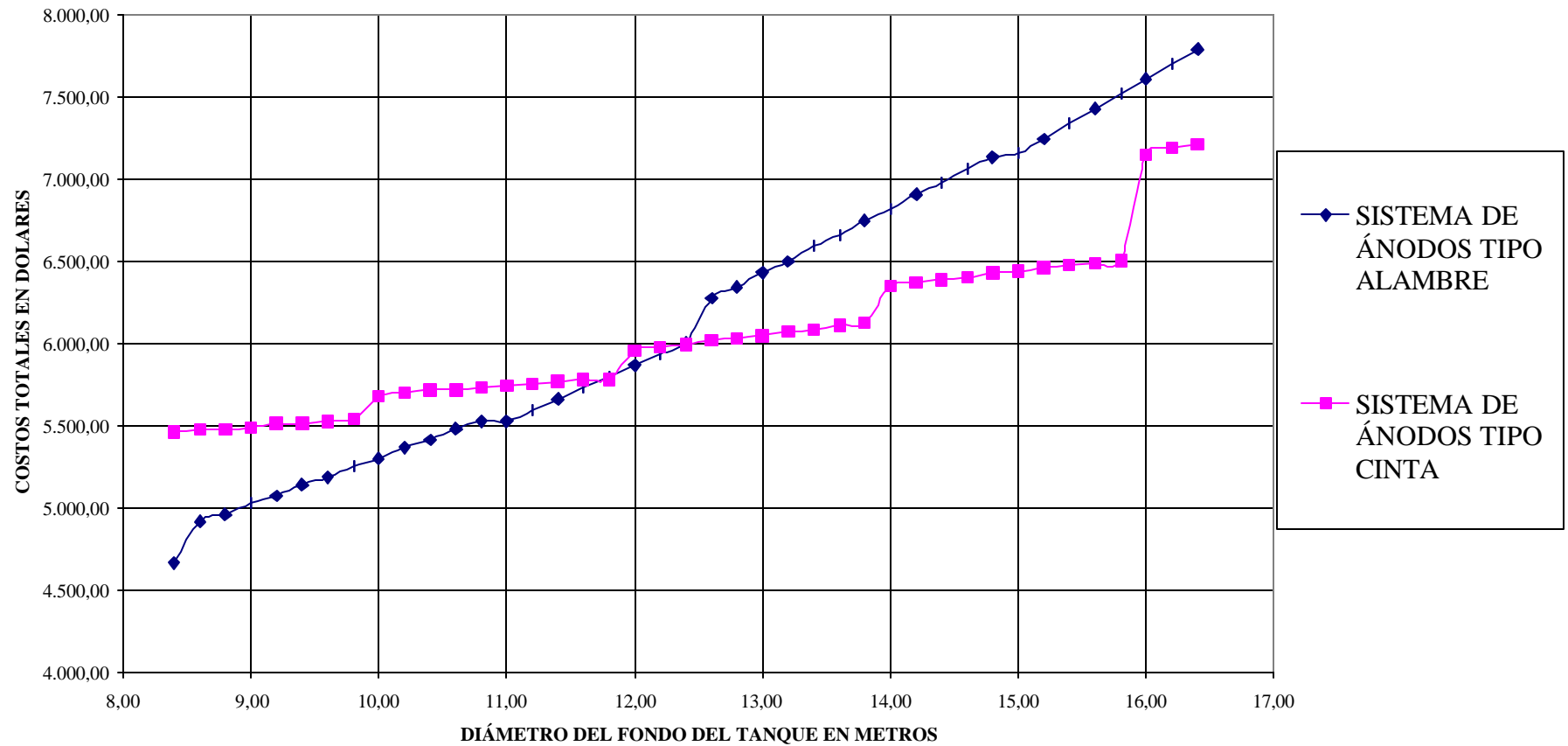
**GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE LOS TRES SISTEMAS  
COSTOS TOTALES DE CADA SISTEMA VS. EL TAMAÑO DEL TANQUE**



**GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE LOS TRES SISTEMAS  
COSTOS TOTALES DE CADA SISTEMA VS. EL TAMAÑO DEL TANQUE**





**GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL SISTEMA DE ÁNODOS TIPO ALAMBRE Y EL SISTEMA DE ÁNODOS TIPO CINTA**

## 9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos podemos establecer que para garantizar un costo mínimo en la instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa en fondos externos de tanques se deben tener presente que para tanques cuyo diámetro es menor que 12 metros el sistema que ofrece los costos más bajos es el sistema de ánodos tipo alambre instalados debajo del fondo del tanque en forma de círculos concéntricos ya que se puede notar la gran diferencia entre los costos de este sistema comparado con los otros dos sistemas.

Es de hacer notar que la diferencia de costos entre los dos sistemas a valores de diámetro de tanque menores de 12 metros no es muy marcada, pero debido a la facilidad de instalación del sistema de ánodos tipo alambre en comparación al sistema de ánodos tipo cinta, se prefiere este para la aplicación del sistema de protección catódica.

Por otra parte para tanques cuyo valor del diámetro se encuentra entre 12 y 35 metros, se tiene que el sistema más económico es el sistema de ánodos tipo cinta instalado directamente debajo del fondo del tanque en forma de malla.

En el sistema de ánodos tipo cinta, a pesar de ser un proceso más laborioso para su instalación, se puede observar que el número de soldaduras hechas en campo no representa un costo significativo, por lo que este factor no es determinante como se pensaba.

Otro punto de interés es que el sistema de ánodos tubulares instalados alrededor de la periferia del tanque, a partir de valores de diámetro de tanques mayores a 35 metros genera los menores costos en comparación a los otros dos sistemas, pero se debe tener precaución en escogerlo, debido a que, además de no garantizar la protección contra la corrosión en toda la extensión del fondo del tanque, el proceso de instalación requiere muchas etapas cuyo tiempo de ejecución es grande en comparación de la instalación de los sistemas tipo alambre y tipo cinta.

El sistema de ánodos tipo alambre presenta costos mayores que el sistema de ánodos tipo cinta por encima de diámetros de tanque mayores a 12 metros, debido a que el precio unitario de estos ánodos por metro lineal (31 \$) es mucho mayor que el de los ánodos tipo cinta (13,5 \$), y que la configuración en forma de círculos concéntricos requiere mucho más longitud de ánodos que la configuración en forma de malla.

Por otra parte, otro factor determinante para el incremento de los costos en el sistema de ánodos tipo alambre, es la cantidad de cables conductores que se requieren ya que como los ánodos requieren que se le coloque en forma paralela un cable conductor, la longitud de estos cables es superior a la de los cables en el sistema de ánodos tipo cinta, donde solamente se necesitan de 3 a 5 cables conductores conectados a la barra conductora central, lo que reduce enormemente la longitud total de los cables del circuito eléctrico.

## 10. CONCLUSIONES

1. La protección catódica por corriente impresa es un medio económico y eficaz para controlar la corrosión de fondos de tanques. El éxito de tales sistemas depende de lo adecuado que sean su diseño, tipo de instalación y planificación del proyecto
2. Los sistemas de instalación directa debajo del fondo del tanque, como son: el sistema de ánodos tipo cinta instalados en forma de malla y el sistema de ánodos tipo alambre colocados en forma de anillos concéntricos:
  - 2.1 Son los únicos procedimientos factibles de cumplir su función de protección de fondos de tanques, para aquellos tanques nuevos provistos de doble fondo de polietileno de alta densidad (membrana de contención)
  - 2.2 Introducen ventajas técnicas y económicas comparativas sobre la instalación de los ánodos clásicos instalados en forma vertical en la periferia del tanque sin la membrana de contención para tanques menores a 35 metros de diámetro
3. El estudio realizado permitió tener de manera precisa los lineamientos de planificación que debe tener un ingeniero para la escogencia de un sistema en particular, para así tomar buenas decisiones y realizar las obras de ingeniería en el menor tiempo posible y con el menor costo
4. Sobre la base del estudio comparativo de costos realizado, se demuestra que para tanques cuyo tamaño sea inferior a 12 metros de diámetro es más económico el sistema de ánodos tipo alambre en forma de anillos concéntricos
5. Para tanques cuyo valor del diámetro se encuentra entre 12 y 35 metros, el sistema de ánodos tipo cinta instalados en forma de malla o cuadrícula es más rentable.

6. Para tanques cuyo valor del diámetro es superior a los 35 metros el sistema más económico es el sistema de ánodos tubulares instalados en la periferia del tanque, ya que al incrementarse el diámetro, el costo de los otros dos sistemas se incrementa muy por encima del costo generado por este sistema.
7. El sistema de ánodos tubulares queda descartado para ser aplicado en tanques con membrana contenedora (fondo de polietileno de alta densidad (HDPE)), puesto que el mismo tiene alta resistencia dieléctrica, lo que hace que la corriente protectora no llegue al fondo metálico
8. Para tanques existentes sin doble fondo, el único sistema que puede ser implementado para su protección, es el sistema tradicional de ánodos verticales instalados alrededor de la periferia del tanque

## 11. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos se considera oportuno recomendar en tanques que estén en proceso de construcción, la instalación del sistema de ánodos tipo cinta en forma de malla para aquellos tanques mayores a 12 metros de diámetro y por debajo de este valor aplicar el sistema de ánodos tipo alambre en forma de anillos concéntricos, ya que estos sistemas son los que ofrecen las mayores ventajas técnicas y económicas según las condiciones ya establecidas.

Se recomienda en estudios posteriores, para una comparación más exhaustiva entre los sistemas de ánodos tipo alambre y tipo cinta, incluir dentro del análisis de costos, los restantes parámetros involucrados, como por ejemplo los tiempos de instalación y la mano de obra, que en este trabajo no se pudieron incluir, para así delimitar con mayor exactitud los rangos en los que pueden ser aplicados en función del tamaño del tanque.

Elaborar mejoras en el programa de cálculo de los sistemas que permitan reducir al máximo los parámetros de diseño que son considerados en un proyecto de protección catódica, para de esta manera realizar un análisis más detallado, que se centre en puntos que por motivos de tiempo no pudieron considerarse en este trabajo.

Para futuros estudios, se propone analizar cual sería el costo y las implicaciones técnicas de la implementación de un doble fondo de tanque para la aplicación de los sistemas de anillos concéntricos y de malla, en tanques ya existentes, comparándolo nuevamente con el sistema tradicional de ánodos verticales instalados en la periferia del tanque.

## **12. GLOSARIO**

### **12.1 CORROSIÓN**

Es la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal, y el medio ambiente, la cual produce un deterioro del material y sus propiedades.

### **12.2 ÁNODO**

Es el electrodo de una celda electrolítica, en la cual la oxidación es la reacción principal (un flujo de electrones viaja desde el ánodo hacia el circuito externo). Es el electrodo donde ocurre la corrosión y los iones del metal pasa al electrolito circundante.

### **12.3 CÁTODO**

Es el electrodo de una celda electrolítica, en la cual la reducción es la reacción principal (un flujo de electrones llega al cátodo desde el circuito externo o electrolito).

### **12.4 ÁNODO INERTE**

Es un electrodo capaz de transmitir corriente directa, la cual le es entregada desde una fuente externa, hacia un medio electrolítico, sin disolución apreciable en su masa.

### **12.5 ÁNODOS CERÁMICOS**

Son ánodos inertes normalmente fabricados utilizando como sustrato metales altamente resistentes a la corrosión, tales como titanio, tántalo o platino. Estos ánodos son tratados con un recubrimiento conductor de Óxidos Cerámicos de Iridio, Platino Rutenio, etc.

## **12.6 CELDA ELECTROQUÍMICA**

Es un sistema electroquímico que está formado por un ánodo y un cátodo en contacto metálico e inmerso en un electrolito.

## **12.7 POTENCIAL ELECTROQUÍMICO**

Es el potencial de un electrodo tomado en comparación con una celda de referencia. Representa el trabajo necesario y reversible para trasladar una carga unitaria desde la superficie del electrodo a través de la solución hasta la celda de referencia.

## **12.8 LECHO DE ÁNODOS**

Es el conjunto, conformado por uno o más ánodos del sistema de protección catódica que proporciona una corriente de protección catódica (DC) a las estructuras que están en contacto con el electrolito.

## **12.9 CORROSIÓN POR CORRIENTE PARÁSITA**

Es la corrosión causada por una corriente eléctrica, proporcionada por una fuente externa ajena, al circuito eléctrico en cuestión.

## **12.8 ELECTROLITO**

Es el medio que está en contacto con la superficie a proteger.



### 13. BIBLIOGRAFIA

- 1) BUIS, L., "Improved Design for Corrosion Control". Materials Performance, Noviembre 1989, pp. 37-39
- 2) <http://www.wilsonwalton.es/wilsonwalton/protecci.htm>
- 3) LUNA, Carmen M.; Universidad Central de Venezuela; Díaz B. Rubén A. "Diseño de Protección Catódica para un Patio de Tanques y Tuberías, pp. 63-65, 74-76
- 4) FONTANA, M "Corrosion Engineering" McGraw Hill. New York. Tercera edición, 1994, pp. 39-42
- 5) KROON, D., "Cathodic Protection for Above Ground Tank Bottoms". Pipe Line Industry, Junio 1992, pp. 23-28.
- 6) ÁLVAREZ A., "Curso Intensivo de Protección Catódica Avanzada", 1997, pp. 18-24.
- 7) GARRITY-URBAS, "Cathodic Protection of External Tank Bottoms". Materials Performance, Abril 1998, pp. 32-35
- 8) BARHAN-STEPHNS, "Designing Impressed Current Cathodic Protection Systems with Durco Anodes", Ohio, 1970, pp. 5, 49-60
- 9) <http://www.matcor.com/spldesignguide1.htm>
- 10) LEIGHTON B. "Estabilidad de Materiales", segunda parte. Departamento de Ciencias de los Materiales, Universidad Simón Bolívar, 1993, pp. 1-9,

- 11) TIÑACOS Katina, Curso taller “Inspección y Análisis de Protección Catódica I”, Centro de Transferencia de Experiencias en Transmisión y Distribución de Gas (CETREX) Corpoven S. A., Septiembre 1997 pp. 4/9 – 4/12
- 12) RIALS-KIEFER, “Evaluation of Corrosion Prevention Methods for Aboveground Storage Tank Bottoms”. Materials performance, 1993, pp. 20-25.
- 13) MORELAND, P., “ Electrochemicals Principles of Electrolytic Corrosion”. Process Industries Corrosion. NACE, Houston, TX, 1986, pp. 11-19.
- 14) UGLIG H. “Corrosión y Control de Corrosión” Ediciones Urmo”. Espartero 10. Bilbao, 1994, pp. 39-41
- 15 y 16) AMERICAN SOCIETY ASM HANDBOOK. Formerly Ninth Edition, Volumen 13 Corrosion Editorial Assistance. Pp 470, 473, 474

## **14. ANEXOS**

### ANEXO 1. FUNCIÓN DE FORMA

L/D	K
5	0,0140
6	0,0150
7	0,0158
8	0,0165
9	0,0171
10	0,0177
11	0,0182
12	0,0186
13	0,0190
14	0,0194
15	0,0198
16	0,0201
17	0,0204
18	0,0207
19	0,0210
20	0,0213
21	0,0215
22	0,0217
23	0,0219
24	0,0221
25	0,0224
26	0,0226
27	0,0228
28	0,0230
29	0,0232
30	0,0234
31	0,0236
32	0,0238
33	0,0240
34	0,0241
35	0,0242
36	0,0243
37	0,0244
38	0,0245
39	0,0246
40	0,0249

L: Longitud del cisco de coque

D: Diámetro del cisco de coque

K: Función de forma

## ANEXO 2. FACTOR DE PARALELISMO

N	P
2	0,00261
3	0,00289
4	0,00283
5	0,00268
6	0,00252
7	0,00237
8	0,00224
9	0,00212
10	0,00201
11	0,00191
12	0,00182
13	0,00175
14	0,00168
15	0,00162
16	0,00155
17	0,00150
18	0,00145
19	0,00140
20	0,00135
21	0,00132
22	0,00128
23	0,00125
24	0,00121
25	0,00118
26	0,00114
27	0,00111
28	0,00109
29	0,00107
30	0,00104

N: Número de ánodos

P: Factor de paralelismo

**ANEXO 3. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DE SISTEMA DE ÁNODOS  
DIRECTAMENTE DEBAJO DEL FONDO DEL TANQUE**

