

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

"CORROSION"

PROTECCION CATODICA DE ESTRUCTURAS METALICAS

LINEA DE TRANSPORTE DE PETROLEO

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL
TITULO DE INGENIERO ELECTRICO -
DE LA FACULTAD DE INGENIERIA E-
LECTRICA DE LA ESCUELA POLITEC-
NICA NACIONAL

Quito, Noviembre de 1971

CERTIFICO QUE EL PRESENTE TRABAJO
HA SIDO DESARROLLADO EN SU TOTALI
DAD POR EL SEÑOR JUAN BOLAÑOS -
GRANDA.



Ing. Alfredo Mena P.,

DIRECTOR DE TESIS

A MI ESPOSA

A MIS PADRES

I N D I C E

CAPITULO I.-

PAGINA

INTRODUCCION Y ESPECIFICACIONES

Generalidades: naturaleza e influencia de - la corrosión en los metales.	1
Naturaleza electroquímica de la corrosión.	3
Cómo prevenir y eliminar la corrosión en -- las líneas de transporte o estructura metá- lica en general.	9
Investigaciones preliminares: La línea, el medio de reposo, factibilidad del diseño.	15a
Tipos de corrosión.	20
Potenciales de los metales.	20
Curva de polarización	21
Intensidad mínima de corriente.	25
Especificaciones.-Características generales del Oleoducto Transecuatoriano.	31
Justificación del Proyecto.	35
Combinación de revestimientos protectores y protección catódica para oleoductos.	39
Anexos y Diagramas de campo.	42
Características de los suelos en los cuales va enterrado el Oleoducto.	47

...../...

PAGINA

Mediciones del Potencial Tubo-suelo 48

CAPITULO II.-

IIa.-TENTATIVAS DE DISEÑO

Generalidades	56
Cálculo de la densidad mínima de corriente.	59
ALTERNATIVA I.- Protección mediante los Anodos de Sacrificio.	60
Materiales para ánodos de sacrificio: Aleaciones de Magnesio, zinc, aluminio.	61
Eficiencia de los ánodos de sacrificio.	64
Determinación de la corriente de salida.	65
Corriente de salida de los ánodos de magnesio para la Protección Catódica.	66
Anodos de sacrificio: cálculo y consideraciones técnicas.	67
Instalación del sistema: procedimiento, equipos y materiales.-Detalles constructivos.	71
ALTERNATIVA II.- Protección mediante la Corriente Impresa.-Generalidades.	76
Materiales para ánodos auxiliares: acero, -	

...../..

PAGINA

hierro fundido, tuberías de desecho, grafito, etc.	79
Diseño del sistema de protección por corriente impresa.- Determinación de las variables que intervienen en el diseño.	83
Cálculo de las variables del circuito de corriente continua y tensión de alimentación.	85
Rango de operación de equipos rectificadores para protección catódica.	91
Protección Catódica por corriente impresa del tramo de 35 Km.	93
Requerimientos y características de los materiales a emplear en la instalación del sistema de protección catódica mediante corriente impresa; equipos, materiales y accesorios.	98
Bridas aislantes y juntas resistentes.	104
Empleo de las bridas aislantes y juntas resistentes.	107
Resultados y conclusiones.	108
Cuadro comparativo de datos obtenidos del diseño de las dos Alternativas.	110

...../....

II.b.- ANALISIS TECNICO ECONOMICO Y ADOPCION DEL DISEÑO DEFINITIVO.-	
Generalidades y datos económicos comparativos de la aplicación de los ánodos de sacrificio y corriente impresa.	113
Adopción del diseño definitivo: protección por Corriente Impresa.	118
Rectificadores para protección catódica.	119
Circuitos rectificadores.	121
Operación del sistema de protección catódica	127
IIc.- ANEXOS, ESPECIFICACIONES FINALES Y PLANOS DEFINITIVOS	
Especificaciones y lista de materiales para sistemas de protección catódica por corriente impresa.	132
Detalles constructivos	
Indice de cuadros y tablas	
Indice de gráficos y planos	
Bibliografía	

CAPITULO I

INTRODUCCION Y ESPECIFICACIONES

I. a.- Generalidades; naturaleza e influencia de la corrosión en los metales .- Es conocido que los metales, sumergidos enterrados, o expuestos a la intemperie, se ven afectados por el fenómeno conocido como corrosión, debido a un proceso electroquímico - natural, -que será detallado y analizado más adelante- dependiendo la cantidad de corrosión y su velocidad de ataque de diversos factores, en particular: el tipo de metal empleado, el grado de protección debido al espesor o naturaleza de la cubierta protectora - -pintura, cemento, breas, alquitranes, etc.-; y el contenido químico del elemento sobre el que reposa la estructura.

En cualquiera de las condiciones mencionadas y de modo inevitable, se hará presente la corrosión, variando como es de suponer su intensidad de acuerdo con la protección natural o artificial que tenga o se haya dado a la estructura metálica y a menos que se prevean medidas protectoras adecuadas, el grado de descomposición y la velocidad de ataque se irán incrementando paulatina y continuamente, provocando en consecuencia el debilitamiento de la estructura y la discontinuidad por ahucamiento de los depósitos o líneas de transporte.

...../..

Si se permite que cualquier elemento metálico, enterrado, sumergido o expuesto a ambientes corrosivos -alcanze etapas avanzadas de descomposición es lógico suponer que el costo de su reparación o reemplazo será elevado; de modo similar, la localización de las áreas afectadas en mayor grado requiere de operaciones arduas y a la vez costosas; las pérdidas por dispersión en depósitos y líneas de transporte no pueden ser detectadas sino luego de un tiempo considerable, con la correspondiente pérdida de tiempo y, dinero y suspensiones temporales de servicio. Estas consideraciones adquieren mayor importancia - como sucede a menudo - si las estructuras, tuberías o depósitos están ubicada en localidades geográficamente remotas.

Además, la gran mayoría de proyectos que requieren de metales ya sea sumergidos, enterrados o a la intemperie, para su finalidad, desafortunadamente necesitan emplear precisamente aquellos más predispuestos a la descomposición electroquímica, y, a pesar de que se ha logrado mejorar notablemente la técnica de las cubiertas protectoras, ésta última no puede por si sola y dentro de las posibilidades económicas, ofrecer una protección permanente.

En tal virtud, es pues necesario e indispensable buscar un camino o método, para aliviar o eliminar - de ser esto posi

...../..

ble - este fenómeno que técnica y económicamente es lesivo a cualquier tipo de empresa, que para el desarrollo de sus actividades - específicas no puede prescindir del empleo de metales o estructuras que por su naturaleza tarde o temprano se verán sujetas a los efectos de la corrosión.

NATURALEZA ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION.-

A temperaturas atmosféricas la corrosión de los metales es un proceso electroquímico, en el cual la superficie del metal es tá en contacto con un electrolito. Este último puede ser una película de una mezcla que puede contener sales disueltas - como el caso de la corrosión en la atmósfera -, o puede constituir una parte o todo el medio que lo rodea, - como en el caso cuando un metal es sumergido en agua dulce, salada, o enterrado en el suelo-. En este último caso, el electrolito es el agua del suelo, que contiene sales disueltas.

Ahora bien, para explicación del fenómeno electroquímico que produce la corrosión en los metales, podemos servirnos de una analogía muy conocida y de aplicación universal: la batería. Partiremos haciendo un análisis elemental de este dispositivo, al formularnos la pregunta: Qué se necesita para hacer una batería?

...../...

Como es conocido, se precisa de cuatro elementos para conformar una batería: ánodo, cátodo, electrolito y circuito externo. El ánodo y el cátodo son dos piezas de metales diferentes -el zinc y el carbón, en una pila de linterna-; el electrolito es una solución, que por lo general contiene agua, -como la pasta de la pila de linterna, o el ácido sulfúrico de un acumulador-; y el circuito externo, cualquier conexión entre ánodo y cátodo, y por el cual circula una corriente, una vez que se haya cerrado el circuito.

Al cerrar el circuito, empiezan a suceder fenómenos interesantes: a) fluye la corriente, b) hay diferencia de potencial en los extremos, y c) y lo que resulta fundamental: al ánodo se corroe debido a los cambios químicos que se producen y son perceptible entre éste y el cátodo.

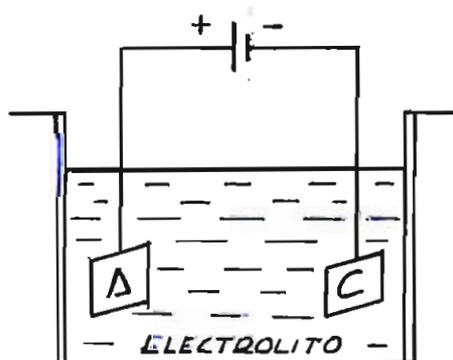


Fig. 1

En el ánodo hay evolución de oxígeno y hay corrosión, en el cátodo hay evolución de hidrógeno y no es atacado por la misma.

Lo que sucede luego, depende de la composición o disposición de la batería. Así, en

...../...

la pila de linterna tanto el oxígeno como el hidrógeno son absorbidos inmediatamente por compuestos químicos colocados deliberadamente con este fin, y en ocasiones sucede una cosa similar en los acumuladores.

Es necesario aclarar que la corrosión que tiene lugar en un acumulador es reversible, puesto que al volver a cargar la batería, se retorna a su condición original. Este mismo fenómeno o "corrosión" en la pila de linterna destruye el zinc, y cuando éste se ha consumido, la vida de la pila ha terminado.

Análogamente, cuando enterramos una estructura metálica, una tubería, un cable eléctrico blindado, etc, en el suelo o en el agua, tenemos una pieza de metal en un electrolito en potencia. Para completar la analogía necesitamos de tres elementos: el ánodo, el cátodo y el circuito externo.

Examinando la tubería o estructura metálica, podemos observar que algunas partes o regiones de la misma actúan como ánodos y otras como cátodos, el circuito externo vendría a constituir la tubería o estructura misma, puesto que por continuidad está uniendo ambos electrodos.

Para explicación de por qué algunas zonas de la estructura actúan unas como ánodos y otras como cátodos, se puede mencio

...../..

nar lo que sucede en un acumulador - a pesar de haber anotado que para la composición de una batería es necesario dos electrodos de metales diferentes -. En el acumulador, como es conocido, ambas placas o electrodos, son de plomo o de algún compuesto de él; a más de esto, es sabido que aquellas partes del metal que se encuentran a un potencial eléctrico inferior, actúan como ánodos -debido al fenómeno de la polarización - respecto a aquellas partes que están a un potencial relativamente superior y que actúan como cátodos.

De este modo, y aparte del fenómeno de la polarización, que explicaremos más adelante, se han completado los elementos indispensables para la obtención de una pila electroquímica.

Cabe anotar aquí, que la distribución en una estructura metálica de las zonas anódicas y catódicas, depende de la superficie del metal en contacto con el electrolito - impurezas, películas de óxido, variaciones de su estado físico, etc.-, y también de la naturaleza o composición del medio circundante, el mismo que puede afectar en más o en menos a la estructura.

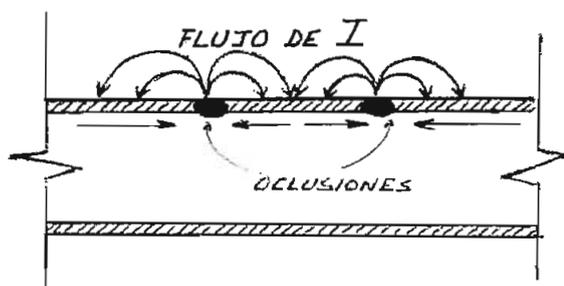
Una vez establecida la analogía entre la estructura metálica y una pila o batería, podemos establecer que debido a las diferencias de potenciales existentes entre las zonas anódicas y catódicas de la estructura, los iones de metal cargados positivamente
...../....

dejan la superficie del mismo en los ánodos, mientras que los electrones dejan la superficie del metal en los cátodos,. En consecuencia y por la evolución del oxígeno, la corrosión se hace presente en las regiones anódicas, pero la disolución del metal no ocurre en las regiones catódicas. En las zonas anódicas los iones del metal reaccionan con el electrolito para formar los productos típicos de la corrosión.

Como complemento, si la superficie de una estructura metálica enterrada o sumergida, se encuentra parcialmente cubierta por escamas o láminas de productos extraños a su naturaleza, estas escamas resultan catódicas respecto a las áreas circulantes de acero o metal desnudo, y en consecuencia la corrosión ocurrirá en las zonas de metal desnudo y que tienen un potencial eléctrico relativamente bajo; esto se puede apreciar en la Fig. 1, y será particularmente severa si el área de las láminas escamosas es más grande en relación con las áreas de metal desnudo.

De modo similar, si existen impurezas incrustadas en la superficie del metal, puesto que estas resultan anódicas respecto al metal, se hará presente la corrosión, en aquellos puntos de contacto o incrustación, en forma de oclusiones. Fig. 2.

También, cuando metales diferentes se encuentran en -



TUBERIA DE ACERO

contacto y rodeados por un electrolito, es característico, que el más noble sea protegido por aquél. Un ejemplo clásico de este fenómeno podemos observar en la deteriorización de la capa protectora de zinc de una tubería galvanizada, cuando se la conecta con una tubería de acero desnuda.

Fig. 2

Fig. 3.

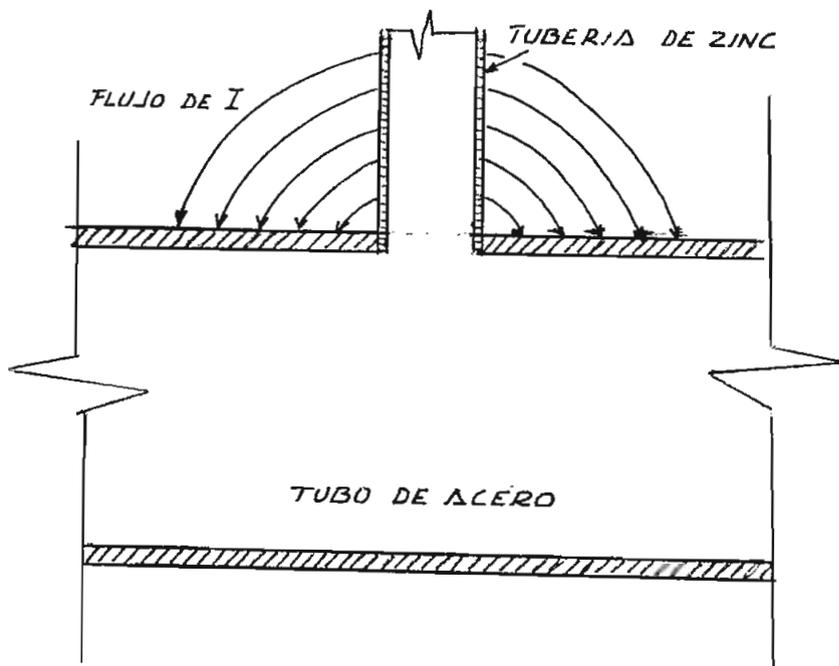


Fig. 3

...../.

I. b.- COMO PREVENIR Y ELIMINAR LA CORROSION EN LAS LINEAS METALICAS DE TRANSPORTES O ESTRUCTURAS METALICAS EN GENERAL .-

Como es de suponer de todo lo anteriormente anotado, se hace imprescindible a toda industria que tenga que hacer uso de metales para su desenvolvimiento, el empleo de algún procedimiento que proteja sus instalaciones de este fenómeno tan común y tan poco controlado en especial en nuestro medio.

Se puede proteger contra la corrosión a una instalación o estructura metálica, empleando medios muy conocidos como son las cubiertas protectoras que pueden ser a su vez, capas de cemento, hormigón, pintura anticorrosiva, brea, alquitrán, o algunos otros medios o compuestos químicos que evitan en mayor o menor grado la corrosión. Estos elementos indudablemente elevan en grado - sumo el costo de una instalación -salvo el caso de depósitos pequeños, estructuras poco importantes, líneas de transporte de corto alcance, etc.-, sobre todo y como es generalizado en oleoductos, muelles, depósitos de gran capacidad, líneas de transporte de flujos submarinas, todas las cuales por tener que atravesar regiones remotas, asentarse en medios sumamente corrosivos e inaccesibles o para mantenimientos periódicos costosos, precisan de otro tipo de protección, la que a la vez que ofrece una protección más efectiva

...../.....

y económica, sea también técnicamente recomendable a revisiones y mantenimiento lo suficientemente espaciado, para hacer su instalación o estudio aceptables económicamente a la empresa que reconozca su bondad.

Este método o procedimiento es conocido como "PROTECCION CATODICA" y es empleado con gran aceptación y resultados satisfactorios, por la gran mayoría de empresas petroleras, petroquímicas, de astilleros, eléctricas, etc., en todo el mundo.

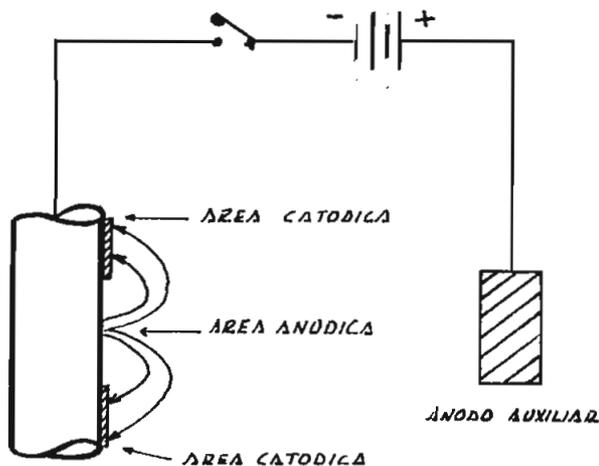
Es técnica común además, el empleo de la protección catódica, como una protección adicional y eficaz, al de las cubiertas protectoras y por lo general se incluye en el diseño original de estructuras metálicas o líneas de transporte, ambos tipos de protección.

El principio fundamental de la Protección Catódica, se reduce a la conversión o transformación de toda la superficie de una estructura metálica, en un cátodo efectivo respecto al medio circundante. Al conseguir esto, y recordando lo expuesto acerca de la analogía entre una batería y una estructura metálica-expuesta a un medio corrosivo, se consigue proteger a la estructura, puesto que es el ánodo el que sufre los efectos de la co-

...../.

rrosión, y éste puede ser un elemento extraño a la estructura o a su vez se puede eliminar las regiones anódicas de la estructura, para una efectiva protección. Esto indudablemente se consigue al forzar a circular una corriente eléctrica a través del electrolito y hacia la superficie del metal a proteger -cátodo - lo cual se traduce en una eliminación de las posibles regiones o áreas anódicas. La corriente necesaria obviamente la conseguimos de una fuente exterior, sea una batería, una fuente de corriente alterna rectificada, un generador de corriente continua, o por acción galvánica.

Este principio, se ilustra en la Fig. 4, en la cual la batería aparece conectada a la estructura a ser protegida y a



un ánodo auxiliar que está sumergido en el electrolito. Este ánodo auxiliar debe ser de tal naturaleza que deberá tener un potencial superior al de la estructura a proteger, de modo que la corriente fluya en el sentido tradicional. El circuito eléctrico se completa con un cable que une la estructura con la fuen-

te de corriente. De este modo la corrosión se dice que es transferida al ánodo auxiliar.

Para que el sistema trabaje apropiadamente, la estructura a ser protegida, debe constituir una unidad eléctrica. En consecuencia antes de proceder a instalar cualquier sistema de protección catódica, se debe asegurar que exista continuidad eléctrica entre todas las partes de la estructura. Por ejemplo, en una línea de transporte enterrada y sujeta con acoplamientos Johnson, es necesario localizar cada unión y dotarla de un vínculo eléctrico.

Ahora bien, existen dos métodos para proveer a una estructura metálica de la adecuada protección catódica :

a).- Método del ánodo de sacrificio : Con este método se hace uso de la acción galvánica para proveer de la corriente de protección catódica. La superficie del metal o estructura a proteger, es hecha catódica, conectándola eléctricamente a una masa de metal menos noble que el de la estructura, y que va sumergido o enterrado de igual modo que el más noble a un electrolito común. De esta manera y como ya se explicó, el metal menos noble se corroe, es decir se convierte en ánodo. Generalmente se emplean aleaciones de magnesio o zinc para conseguir este propósito. Estos tipos de ánodos se conocen con el nom

...../..

bre de Anodos de sacrificio, porque la protección de la estructura viene acompañada con la consumición simultánea del ánodo por la corrosión electroquímica. Fig. 5

b).- Método de la Corriente continua impresa : Cuando la protección catódica es provista por medio de la corriente continua impresa, se emplean como ánodos pedazos de hierro fundido, grafito, rieles, tubería vieja, etc., que se entierran en el suelo y a una misma distancia a lo largo de la estructura o tubería. El polo positivo de la fuente de corriente continua externa, se conecta el ánodo y el polo negativo al cátodo o estructura. Dependiendo de la longitud de la estructura o tubería, se pueden colocar varios ánodos conectados a una misma fuente de C.C.; el flujo resultante de corriente es desde el ánodo, a través del suelo hacia la tubería o estructura. Debido a que se libera calor y se consume agua en los ánodos, es necesario colocarlos en lugares húmedos, a fin de que su resistencia eléctrica permanezca en el mínimo valor. Fig. 6.

Protección por el ánodo de sacrificio

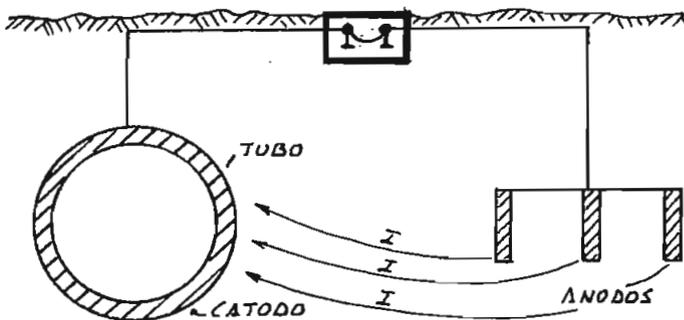
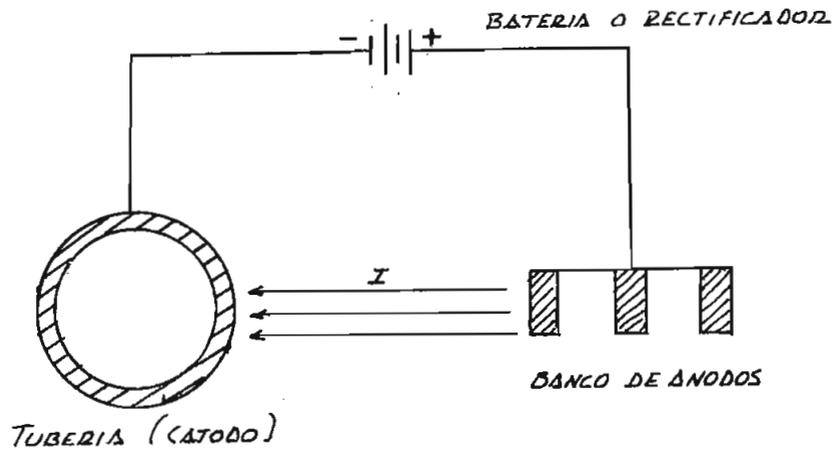


Fig. 5

...../...



Protección por la corriente impresa.

Fig. 6

Es indudable que la aplicación de cualquiera de los dos métodos enunciados anteriormente, requiere de un estudio detenido del medio sobre el cual reposará la estructura. Estos factores desconocidos en principio, tienen que ser sometidos a pruebas, análisis y cálculos, para solo de esta manera disponer del material sobre el cual se pueda pensar en iniciar el diseño y la protección de la estructura de una manera más eficaz y técnica a la vez.

Para una línea de transporte por ejemplo, serán ne-

...../.

cesarios hacer investigaciones que pueden incluir, análisis quí--
micos del suelo, para determinar la concentración de sales, tomas
de diversas muestras del suelo, para determinar el valor pH de ca
da uno de ellos, y a lo largo de la ruta de la línea; resistivi--
dad del suelo, naturaleza y composición del mismo; humedad locali
zación de posibles corrientes de agua subterráneas, etc., Con to
dos estos datos a la mano y las especificaciones de la estructura,
ración se puede hacer una tentativa de cálculo, para determinar -
la cantidad o forma de ataque de la corrosión, y proceder luego a
iniciar el diseño del sistema de protección más adecuado.

Teóricamente, sabemos ya que para mantener una es--
tructura metálica sometida a una protección catódica completa, es
necesario que haya una carga negativa en cada punto a lo largo de
la superficie de la estructura, disponible para neutralizar los -
iones de hidrógeno que se encuentran en el suelo o en el agua. A
su vez, esta carga debe mantenerse a nivel tal, que sea suficien
te para neutralizar todos los iones de hidrógeno que puedan prove
nir del medio de reposo y también aquellos que pudieran ser atra
ídos por la carga misma.

En otras palabras, la protección catódica se reduce
a un sistema de introducción de corriente en la tierra, agua o me

...../..

por dicho en el medio que actúa como electrolito, desde una fuente externa y bajo la presión de un potencial lo suficientemente fuerte para superar los potenciales corrosivos de la estructura. Esto asegura que en cada punto, la dirección del flujo de la corriente será desde el suelo, agua, o electrolito, hacia la estructura.

I. c.- INVESTIGACIONES PRELIMINARES : La línea, el medio de reposo externo, factibilidad del diseño .-

Para una estructura sumergida o enterrada y en nuestro caso específico, una línea de transporte enterrada en buena parte y expuesta al medio ambiente, con variaciones notables en la naturaleza y constitución del suelo, como es la humedad, concentración de sales, enrarecimiento de la atmósfera en localidades que superan los tres mil metros, con la correspondiente disminución de oxígeno del aire, etc., la investigación preliminar más importante es la medición de la resistividad del suelo en diversos puntos de referencia.

La Electroquímica señala que la resistividad generalmente varía inversamente con el contenido de sales disueltas. De esto deducimos que una estructura de metal se verá más seriamente afectada por la corrosión, cuando su recorrido sea sobre suelos de baja resistividad, y por lo tanto

...../.....

to las medidas de la resistividad tomadas en diversos puntos de su trayectoria, indicarán la utilidad de localizar los ánodos de protección en los lugares que fuesen necesarios. Por supuesto, para efectuar las mediciones de campo necesarias, se puede emplear cualquiera de los métodos que se indican a continuación : método de los dos electrodos, empleo del medidos de resistividad tipo Shepard-Cane, o por los métodos de dos o cuatro electrodos, empleando un medidor de resistividad del suelo de corriente alterna.

Es natural que la resistividad del suelo variará o puede variar grandemente de acuerdo al contenido de agua, o a la disolución del electrolito en agua. De tal suerte que la resistividad de determinada localidad, puede variar de una estación a otra y con el valor promedio de la lluvia.

La medición o determinación de la resistividad de ciertos suelos o mejor dicho de los que hemos llamado puntos de referencia, no es por si sola la indicación definitiva de la corrosividad del suelo; son como ya se verá más adelante, necesarios ciertos datos adicionales ya mencionados, para tener la indicación más aproximada de este factor. Sin embargo de experiencias realizadas por investigadores y empresas interesadas, se ha establecido cierta relación por investigadores y empresas interesadas, se ha estableci-

...../...

do cierta relación entre estas dos propiedades y anotamos a continuación, puesto que servirá de referencia para cuando se establezca el diseño.

Resistividad del suelo	Corrosividad del suelo
<u>Ohm. cm</u>	<u></u>
Bajo 1.500	Muy corrosivo
1.500 a 3.000	Moderadamente corrosivo
sobre 3.500	Ligeramente corrosivo

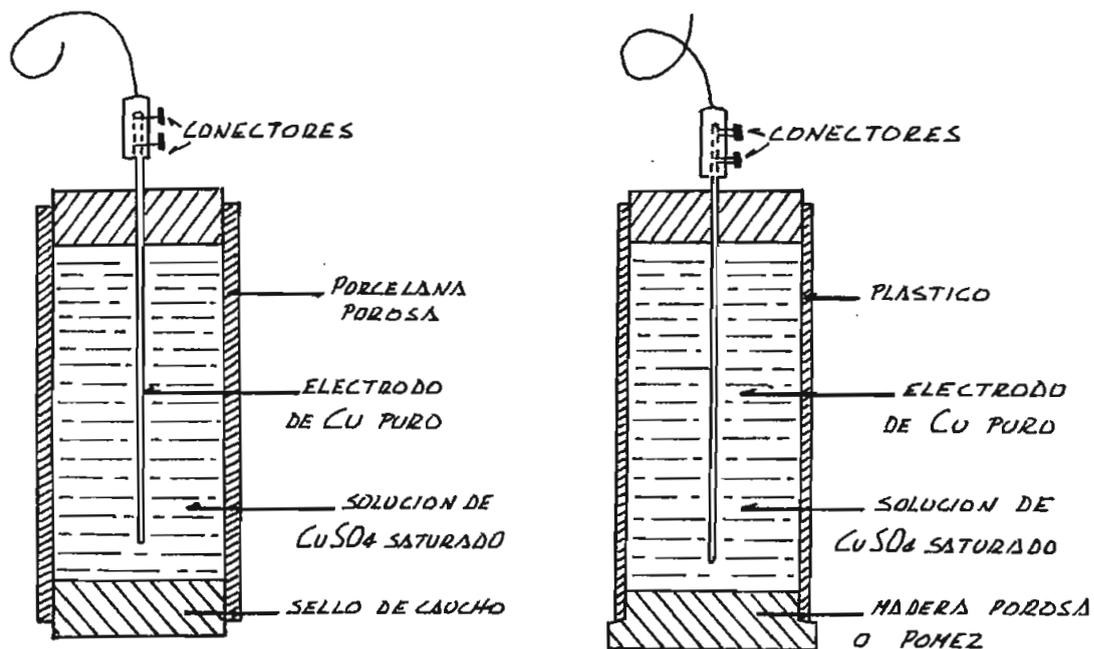
Otro aspecto fundamental para el diseño de un sistema de protección catódica, puesto que de él deriva la adopción de un criterio definido para el diseño, es la medición del potencial existente entre la línea (concentrándonos ya en nuestro problema) y el suelo.

Para la medición de la diferencia de potencial entre superficies metálicas y el electrolito de contacto, sea éste agua o tierra, etc., es muy generalizado emplear el principio de formar una celda electroquímica, en la cual la una mital de la misma la constituyen el suelo y el electrolito, y la segunda mital un electrodo standar de referencia, como el muy conocido y formado por el cobre y sulfato de cobre. Por lo tanto, si el potencial de una línea de transporte quiere investigarse, tendrá que medirse la f.-

...../..

e. m. de la celda entre los electrodos :

Estructura/electrolito (suelo) solución de sulfato de Cu saturado/Cu en la Fig. 7 se puede apreciar dos modelos-típicos de electrodos de referencia. L.1



ELECTRODO DE PAREDES DE
PORCELANA POROSA PARA
CONTACTO CON EL SUELO

ELECTRODO CON BASE POROSA
PARA CONTACTO CON EL SUELO

Fig. 7

En la medición de la f.e.m. de esta celda, el flujo-

...../...

de corriente debe mantenerse restringido al mínimo valor practica-
ble, pues de otra manera, podría presentarse la polarización, y -
el objetivo por lo tanto es medir la f.e.m. a circuito abierto. -
Asimismo para este tipo de medidas, se pueden emplear indiferentee
mente un voltímetro de bobina móvil de alta resistencia, con una-
resistencia no menor de 50000 Ohms/voltios o un voltímetro de vál
vula. L.2

Mediante la protección catódica, es posible disminuir el espesor de paredes de líneas de 225 millas (360 Km) de longitud, 8 pulgadas (20,32 cm) de diámetro, desde 0,322 pulg. (0,82 cm) a 0,25 pulg. (0,64 cm). Es decir mediante este sistema de protección, se evita una disminución del espesor de la línea, en unos 0,0072 pulg. (0,18 cm), que equivalen a un ahorro de : aproximadamente 3.700 ton. de acero, o sea unos 4.600 dólares por año, y con un aumento simultáneo de la capacidad de conducción de orden del 5%. L.3

Tipos de corrosión :

Corrosión atmosférica

Corrosión por el agua

Corrosión por soluciones acuosas

Corrosión por productos inorgánicos concentrados

Corrosión por productos orgánicos

Corrosión por el suelo

Corrosión por gases. L.4

Potenciales de los metales :

M e t a l	Potencial (voltios)
Aluminio Al	- 1,69
Magnesio Mg	- 2,40
Zinc Zn	- 0,76
Cromo Cr	- 0,51

...../...

	Metal	Potencial (voltios)
Hierro	Fe	- 0,44
Niquel	Ni	- 0,25
Estaño	Sn	- 0,16
Plomo	Pb	- 0,13
Cobre	Cu	- 0,35
Plata	Ag	- 0,81
Hidrógeno	H ²	- 0,00

L.5

Curva de polarización : Cuando a los ánodos locales, p. ej. por conexión a un elemento innoble como el zinc, o por introducción de una corriente catódica; se pueden suministrar más electrones negativos, se suprime la disolución de las regiones dichas de la superficie del metal (efecto protector) o se reprime; la protección se logra cuando pueden llevarse al acero, tanto electrones como los que equivalen a las moléculas de oxígeno que alcanzan su superficie. Lo que hay que conseguir es una pila galvánica en que el metal protegido sea el cátodo. Esto se logra en el caso del hierro, enlazándole eléctricamente con un metal o electrodo más innoble como el zinc, aluminio, magnesio, en el caso del hierro, y en caso del cobre con el hierro y los mencionados. -

L.6

El electrodo innoble se disuelve, por lo que los -

...../..

gastos del proceso son la cantidad de metal protector consumida y los costos de instalación. En lugar de ánodos solubles se pueden emplear electrodos insolubles como el caso del grafito, sin más -- que introducir una corriente eléctrica continua procedente de un manantial externo, por lo que han de concentrarse como cátodos las piezas a proteger. Hay que anotar que el grafito no se disuelve -- cuando es o actúa como ánodo.

En la Representación gráfica del proceso de corrosión mediante las curvas de polarización de ánodos y cátodos locales, se obtienen en la intersección de éstas el potencial de corrosión y la corriente de corrosión. Para una explicación más explícita, podemos hacer un análisis más explícito y detenido de lo que sucede durante el proceso de corrosión: cuando el potencial de corrosión desciende, como ocurre en las superficies polarizadas anódicamente, entonces disminuye con arreglo a la curva de polarización anódica la intensidad de corriente anódica. Estas relaciones las podemos expresar gráficamente en la siguiente figura: Fig. 8 en la que, tomando como metal de referencia el hierro, K es la curva de polarización catódica y a. la anódica del metal a proteger, en nuestro caso el hierro. Esta última curva es la que verdaderamente interesa en lo que se refiere a la protección catódica, puesto que -- la polarización catódica, aún en la corrosión controlada por oxf--

...../.

geno, sólo afecta a la magnitud de la corriente a emplear.

K es el punto que representa la corrosión normal, y define en consecuencia el potencial de corrosión E_c , y a la corriente de corrosión I_c ; si para la protección vamos a emplear por ejemplo el zinc como metal menos noble y en consecuencia como el metal protector, a_{zn} representa la polarización anódica del metal protector, a_{zn} representa la polarización anódica del metal protector, y S el punto de intersección de esta última con la curva de polarización K. Al determinar la magnitud de la corriente protectora I_s , podemos determinar los puntos de trabajo de los metales a proteger y protector, siendo estos S_1 y S_2 y por tanto el segmento S_1S_2 representará la cida de potencial en el electrolito, y que

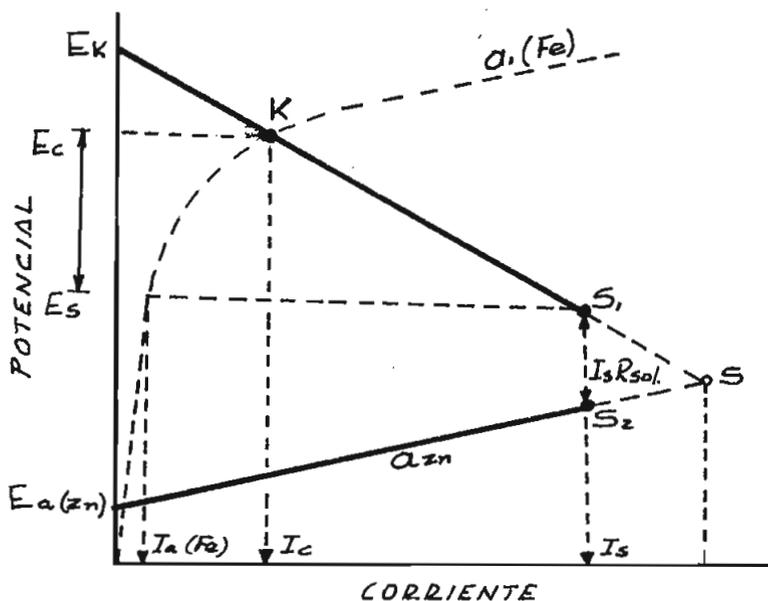


Fig. 8

...../..

vendrá dada por el producto $I_s R_s - R_s$ es la resistencia eléctrica - del electrolito entre las superficies, incluida la existente sobre las superficies.- El punto S_1 corresponde al potencial E_s del metal protegido y su situación en el plano cartesiano determina el efecto-protector alcanzado. Como se puede observar que del carácter asintótico de la curva de polarización X a no se puede lograr una protección total, sino reducir a un mínimo la corrosión. Siempre pues, se mantendrá una disolución correspondiente a la corriente I_a ; es decir se sostendrá una corrosión en potencia y proporcional al valor de I_a , que podrá ser eliminada a un mínimo, mediante el empleo de otros sistemas de protección adicionales a la protección catódica, como las cubiertas protectoras, constituidas, por pinturas, capas de concreto, breas, alquitranes, etc.

Haciendo un análisis detenido del gráfico anterior, podemos deducir o más bien dicho llegar a concluir que el potencial de corrosión se debe hacer descender en una cantidad igual a $E_e - E_s$. Asimismo se puede observar que la corriente I_s es mayor que la I_c y depende esencialmente del curso de la polarización catódica K es decir, mientras más próximo es el eje de potenciales se encuentre el punto de intersección de las curvas catódicas y anódicas de la polarización del hierro K - en nuestro caso el punto K ha llegado a su valor mínimo- mayor será la diferencia entre las dos corrientes. Asimismo para la determinación del punto de trabajo del hierro S_1 ,

...../...

se emplea como criterio el potencial E_s , que para el hierro es usualmente de -865mV- determinado experimentalmente frente a un electrodo de referencia Cobre-Sulfato de Cobre.

Intensidad mínima de corriente.-

De la representación gráfica empleada anteriormente, se desprende que la intensidad de la corriente que fluye entre el metal anódico y el protegido, depende de las polarizaciones anódica y catódica en la solución en la que se encuentren y a la vez también de la resistencia del electrolito y/o sobre las superficies metálicas a la intensidad mínima de corriente corresponde un potencial que se sobrepasa muy pocas veces, pues al aumentarlo se hace menos económico el proceso por el mayor gasto de los ánodos solubles. Los factores que determinan la corriente mínima, son los mismos que afectan a la corrosión tanto por el lado catódico (despolarización, resistencia, velocidad de difusión), como por el anódico (formación de capas protectoras). Es asimismo muy fundamental la determinación de la corriente mínima, la resistencia del electrolito, y otros factores, puesto que con el transcurso del tiempo pueden presentarse variaciones sea de las superficies o de la concentración de los agentes despolarizantes.

Según una deducción, que parte de la compensación de-

...../..

las corrientes en las pilas locales, se ha llegado a la expresión:

$$I_s = 1 + \frac{R_a}{R_c} \frac{E_a - E_c}{R_a + R_c}$$

en la que E_a es el potencial de los ánodos, E_c el de los cátodos, R_a y R_c la resistencia de ánodos y cátodos respectivamente, e I_s la corriente mínima a emplear L.P. SUDRABIN, Chem. Eng. 60, pag - 196. El factor $\frac{E_a - E_c}{R_a + R_c}$ corresponde a un desgaste de 1mm/año u- na densidad de corriente 0,0872 mA/cm², pero tal valor medio no - puede ser empleado para una estimación solamente,. Se debe tener muy en cuenta la diferencia en condiciones locales, que dan lugar a corrosiones más o menos intensas.

La velocidad de corrosión del acero en suelos o so- luciones, se puede determinar en función de la polarización, pu- diéndose relacionar con el potencial del metal corroible o con la corriente externa. L.7

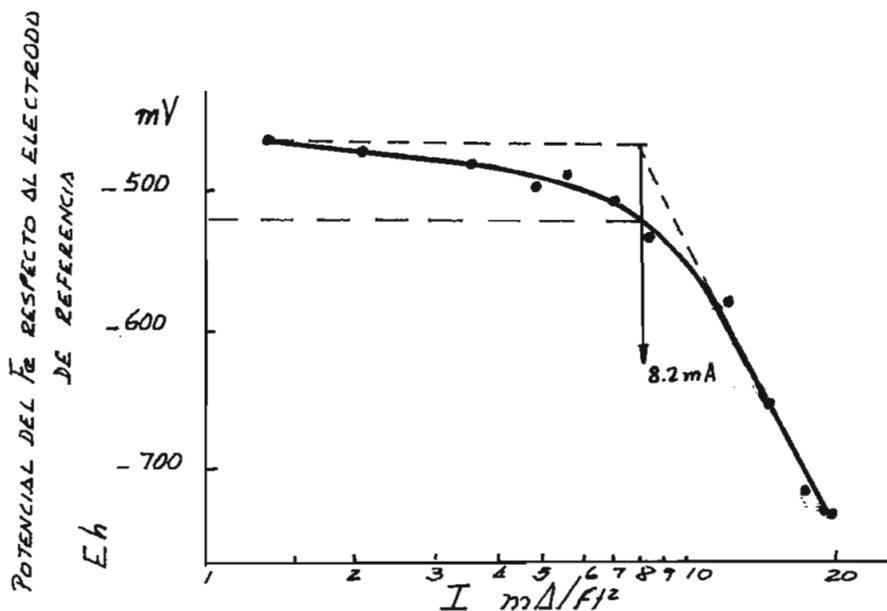
Ahora bien, para llegar a la determinación de la co rriente mínima necesaria, que es diferente para las varias solu- ciones, según la naturaleza de los aniones y de la concentración- se puede interpolar el punto en que se acoda la curva de polariza ción anódica Fig. anterior. Esta curva da para potenciales que - descienden densidades de corrientes equivalentes cada vez más pe- queñas, pero que no llegan a cero. El paso a la parte de la cur-

...../...

va -más vertical- en que la dependencia es marcada, nos muestra la región de potencial o corriente en que es eficaz la protección catódica. L.8

valor de la densidad de corriente mínima 8,2 mA/ft² (88mA/m²)

Fig. 9



Densidad de corriente mA/ft²

Curva de Britton

El punto de intersección de las tangentes a ambas ramas de la curva, o mejor el de la tangente de la rama más horizontal con el eje de ordenadas o de potenciales indica la situación de la inversión de las superficies anódicas completas a funciones-

...../....

catódicas. L.9

El punto interpolado o encontrado por intersección de la tangente, corresponde a la densidad mínima de corriente, por que aumentando aún más la densidad de corriente catódica no se disminuye más la disolución.

Khen y Wilhelm han llegado mediante experimentos, y empleando para ello acero en solución de sulfato sódico con 500 mg/lt, a la representación gráfica de la curva tensión-corriente, con la densidad de corriente en las abscisas y en escala logarítmica y en las ordenadas los potenciales en mV. L.10

Esta curva es muy empleada sobre todo en los EE.UU.- para el diseño de protección catódica y es conocida como la curva de BRITTON. En esta curva, la rama catódica descendente y correspondiente al desprendimiento de hidrógeno se puede extrapolar linealmente y corta a la tangente de la rama horizontal en un punto que corresponde al mismo valor de la densidad de corriente mínima- 8.2 mA/ft^2 (88 mA/m^2).

El potencial del hierro a proteger en la solución de referencia debería ser de por lo menos del valor

$$E_n = -500 \text{ mv}$$

...../....

Para el níquel, monel y aceros inoxidables (tipos americanos 302 y 316) se disminuye efectivamente la corrosión por tensiones y el ataque local del agua del mar, con densidades de corriente de un valor de $0,323 \text{ a/m}^2$. En los aceros inoxidables de los tipos americanos 410 y 430 también se puede lograr disminuir la corrosión por tensiones, y la picadura, mediante la protección catódica, pero sucede que se desprende fácilmente hidrógeno gaseoso. L.11

Se ha comprobado que es conveniente y vigilar con--
tínua y frecuente la corriente que fluye entre los ánodos y las -
superficies protegidas, con el fin de prevenirse contra variacio--
nes electroquímicas o del ambiente,. Cuando se emplea la protec--
ción mediante corriente impresa o externa. Cuando se usan ánodos
solubles, la regulación de la densidad de corriente exige un indi--
cador o un circuito de control conveniente.

A continuación se incluyen tablas empleadas por la--
Royal Dutch/Shell Group England y aceptadas por una gran mayoría--
de empresas y Organismos internacionales como aptas para diseño -
de protección catódica efectiva.

Tabla válida para el acero desnudo en diversos am--

...../.....

bientes y a temperaturas ambiente de 59°F a 77°F (15°C a 25°C).

Medio ambiente	Densidad de corriente	
	mA / ft ²	mA / m ²
Suelo	0,5 a 3	55 a 32
Agua dulce	1 a 3	11 a 32
Agua dulce móvil	6	64
Agua salada	4 a 5 (15)	43 a 54 (161)
Agua salada móvil	15	161
Zonas pantanosas saladas	1 a 3	11 a 32

En el agua de mar o salada la protección catódica se arranca con una densidad de corriente de 15 mA/ft². La cantidad de corriente requerida aumenta con la temperatura por ejemplo a temperaturas de agua de 50° a 70°C es aproximadamente el doble -- que la necesaria de 15° a 25°C.

Se puede notar que en esta tabla la densidad de corriente se refiere a la corriente por unidad de área de la superficie del acero desnudo. Para tuberías cubiertas o estructuras, es necesario en consecuencia calcular el área de la superficie total sobre la cual la cubierta protectora no es eficaz.

...../...

Para tuberías de acero con cubierta de asfalto, la densidad de corriente requerida es aproximadamente 0.01 mA/ft^2 -- (100 mA/m^2), y para acero cubiertos por concreto o capas de él - 0.1 mA/ft^2 (1.0 mA/m^2).

ESPECIFICACIONES :

Características generales del Oleoducto Transecuatoriano

El Oleoducto, que no es otra cosa que el medio de transporte del crudo obtenido o recolectado de los pozos de desarrollo o en producción de la región oriental -concesión correspondiente al Consorcio Texaco-Gulf arranca desde la Estación de recolección y Bombeo ubicada en el lugar determinado como el más apropiado para esta función: Lago Agrio, y avanza hasta la estación terminal de Esmeraldas. Tiene una longitud de 506 Km. y partiendo desde una elevación de 297 m. sobre el nivel del mar, cruza la Cordillera Oriental alcanzando una altura máxima de 4.026 mts. en el llamado paso de Guamaní y continúa por el Callejón Interandino siguiendo la ruta Pifo-Hda. Itulcahe-La Merced-San Rafael-Conocoto-Sur de la ciudad de Quito, hasta llegar a las estribaciones de la Cordillera Occidental, desde donde prosigue siguiendo una trayectoria más o menos paralela a la antigua carretera Quito-Santo Domingo vía Chiriboga, hasta llegar a Santo Domingo de Los Colorados, desde donde sigue una trayectoria paralela en lo posible a la carretera Santo Domingo-Quinindé-Esmeraldas, finalizando en el

sitio denominado Balao localizado al sur de la ciudad de Esmeraldas, y que tiene una altura sobre el nivel del mar de 180 mts. -- donde está ubicada la terminal. En esta terminal se almacena el crudo transportado en tanques de una capacidad de 322.000 barriles (42 US Gal/8) cada uno, es decir como al momento actual se es tán construyebdo 6 tanques, la capacidad de almacenamiento es de aproximadamente 2'000.000 de barriles. De esta terminal se abastecerá en el momento de operación del proyecto a los barcos tanqueros que transportarán el producto hacia los mercados consumido res.

El proyecto en si, y puesto que tiene que superar - presiones enormes debido a la altura, contempla la construcción - de cinco estaciones de bombeo, las que sucesivamente van superando la presión de la columna y que se encuentran ubicadas en Lago-Agrio, Lumbaquí, El Salado, Baeza y Papallacta. Esta última esta ción imprime una presión a la columna de fluido de 1.760 lb/pie^2 , presión suficiente para superar la columna de contrapresión entre esta estación y la parte más alta de la Cordillera Occidental, en donde y para contrarrestar la enorme presión que tendría el fluido al iniciar el descenso se construye una estación reductora de presión, que alivia la presión a límites tolerables y así sucesiva mente a través de 4 estaciones reductoras ubicadas en San Juan, -

...../..

Chiriboga, La Palma y Santo Domingo, estación ésta última que imprime la presión de salida suficiente para que la columna de fluido alcance su meta, es decir llegue al terminal de Esmeraldas con una presión capaz de vencer la presión atmosférica en los tanques de almacenamiento y llenarlos. Desde aquí y por gravedad se entregará el crudo a los tanqueros a través de una línea submarina diseñada convenientemente.

La tubería que transporta este fluido y que tiene que superar problemas especiales debido a las características del proyecto, debe en consecuencia cumplir con ciertos requerimientos y especificaciones.

Puesto que este elemento, o mejor dicho la protección anticorrosiva del mismo, es el objetivo principal de este estudio, es necesario conocer y analizar sus características, tanto mecánicas, como físicas, y sus especificaciones de diseño.

ESPECIFICACIONES DE LA TUBERIA (del tramo a proteger catódicamente)

Material: Acero, Spec. X60 -API 5LXX60

Diámetros: 26" OD. 20" OD.

Espesor: 0.625-0.812" (26") - 0.344"-0.750"(20") Diámetros variables según presión.
...../..

Ro (Resistencia Eléctrica): 0.01609/km(resistividad específica del
acero)

Longitud de un tramo: 40' (12,2 mts.) Longitud promedio.

Presión máxima de operación: Para 26": 3.350 PSI a 4.360 PSI (según
espesores)

Para 20": 1.240 PSI a 2.925 PSI (se--
gún espesores)

Pesos: Para 26" :

Costo:	espesor (plg)	Peso (PSI)	Peso (Ton/km)	Costo US\$/km
	0.625	169.38	252.5	80.800
	0.688	185.99	277.5	88.800
	0.750	202.25	302.0	96.640
	0.812	218.45	325.5	104.160

Pesos y costos para tubería de 24"

0.344	86.91	129.2	41.344
0.500	125.49	186.8	59.776
0.625	156.03	232.5	74.000
0.750	186.23	277.5	88.800
0.812	201.09	300.0	96.000

Costos de construcción de tubería: (para análisis económico)

Diámetro Costos de construcción (incluidos todos los valores)

20"	70.000	US \$/km
22"	80.000	
24"	90.000	

...../....

26" 90.000

Protección anticorrosiva (solo recubrimiento, que es lo que estipula el contrato)

Primera capa: Texaco está construyendo la línea con un recubrimiento anticorrosivo, compuesto de: Pintura anticorrosiva PRIMER 105 color negro.

Segunda capa: Banda protectora POLYKEM (Polietileno de alta densidad) de 18" de ancho 20 milésimas de espesor y 800-pies de largo. Translapada cada 2".

Longitud del tramo en estudio: Desde el Km. 195 (laguna de Papallacta) hasta el Km. 230 (La Merced) Total: 35 Km.

Justificación del Proyecto.-

Se ha explicado ampliamente en capítulos anteriores los efectos y daños que produce la corrosión en estructuras metálicas; en nuestro caso particular la estructura por atravesar o - mejor dicho reposar sobre un medio corrosivo, cuya intensidad de ataque varía grandemente en proporción con la resistividad y acidez de los suelos tiene que ser sometida a un estudio asimismo especial, es necesario hacer ciertas aclaraciones técnico-prácticas que justifiquen su diseño.

Hagamos mención de los métodos tradicionales y bá-

...../..

sicos para combatir la corrosión de estructuras metálicas y de oleoductos en particular:

1.- Substitución del material de la Tuberfa :

Se podría pensar en que el método más viable de evitar la corrosión, es emplear materiales no corrosibles, o en caso de tener ya construída una estructura, en cambiarla por estos materiales (asbesto-cemento, cemento, plásticos, etc.), pero esto es prácticamente imposible, sea porque estos materiales no resisten a presiones muy altas de operación o porque el costo de la substitución del material de una estructura entera resultaría impracticable.

2.- Modificando el medio de reposo .-

Esto equivale a sustituir el material en que reposa la tuberfa, por otro que tenga por ejemplo una resistividad muy alta (arena, roca desnuda, etc.) pero esto significa también una elevación excesiva en el costo, puesto que han que pensar en rubros tales como transporte, elaboración, colocación, etc., y además ebido a que son materiales permeables y dejarían pasar la acidez del suelo. Se ha demostrado que este método es impracticable.

3.- Separación del metal del medio de reposo . -

...../...

Se consigue esto, empleando los recubrimientos protectores, que pueden ser orgánicos y inorgánicos y aún metálicos. Estos elementos aíslan la estructura del contacto con el electrolito (medio de reposo) por poseer alta resistencia eléctrica y -- son además resistentes al ataque de compuestos químicos, penetración del agua, impactos, etc. Se puede mencionar los más comunes en la industria petrolera: Esmalte asfáltico, esmaltes carbonados, bandas plásticas, grasas, cemento, hormigón, ceras, etc., además se pueden pensar en un recubrimiento metálico, empleando metales anticorrosivos o dando un tratamiento galvánico a la tubería misma, pero esto es excesivamente costoso. El empleo de estos recubrimientos protectores es universal, aunque se ha evidenciado en la práctica que ningún aislamiento o revestimiento de este tipo -- está libre de imperfecciones o deformaciones, sea en la fabricación como en la instalación de los mismos. En consecuencia, se -- ha hecho siempre indispensable el proveer de una protección suplementaria a la estructura metálica, para defenderla de la corrosión.

4.- Protección Catódica . -

Este proceso electroquímico, coadyuvado con la naturaleza electroquímica de la corrosión del suelo, ha llegado a ser de aplicación universal en oleoductos y en estructuras metálicas--

...../..

en general. Aunque teóricamente es capaz por si sola de proteger una estructura metálica, es aplicada siempre en conjunto con los revestimientos protectores y por lo general se logra un considerable ahorro en el costo total de la obra.

La combinación de estos dos métodos protectores produce en consecuencia el mejor camino conocido hasta la fecha para combatir la corrosión en un oleoducto. Es lógico el suponer, que si en el diseño de una obra, se anticipa la duración de la misma, se deducirá si es o no aplicable este método de protección, pues no sé justificaría su empleo, en obras que tienen una vida útil calculada de unos cinco años. Cuando la vida útil de una estructura se calcula en periodos relativamente largos, una solución económica, podría ser enterrar desnuda la tubería y aplicar protección catódica localizada, es decir aplicada solamente en los lugares "calientes" o de muy baja resistividad a lo largo de la trayectoria. Finalmente en estructuras grandes cuyo costo exige una vida útil prolongada (como el caso del Oleoducto Transecuatoriano) que justifique la inversión, se debe exigir la protección combinada, es decir, un revestimiento completo de la estructura con cubiertas protectoras más la protección suplementaria: protección catódica.

A continuación, se anota un cuadro explicativo, basa

...../...

do en la vida útil para la cual son apropiados estos métodos de protección y relacionados con la severidad de la corrosión, para lo cual se toma como índice la resistividad del suelo. Esta tabla indica el tratamiento adecuado para diversos valores de vida útil calculada en diversos suelos o resistividades:

COMBINACION DE REVESTIMIENTOS PROTECTORES Y PROTECCION CATODICA

RESISTIVIDAD Ω/cm	PARA OLEODUCTOS					
	Vida útil estimada (años)					
	1	2	5	10	20	50
30	C	C	C	C	C	C
100	B	H	H	C	C	C
300	B	B	H	C	C	C
1000	B	B	H	H	C	C
3000	B	B	B	H	C	C
10000	B	B	B	B	C	C
30000	B	B	B	B	B	C

B: Líneas enterradas desnuda, sin protección catódica.

H: Línea desnuda enterrada, pero aplicada protección catódica localizada (Hot-spot)

C: Línea revestida y aplicada protección catódica suplementaria.-

R.12

...../..

Un análisis detenido de la mencionada tabla, puede dar una idea más clara de lo beneficiosa que resulta la Protección Catódica, sola o combinada con los revestimientos protectores. En nuestro caso y para el tramo que se pretende proteger contra la corrosión, es de suponer, dada la magnitud de la obra y la importancia e incidencia que tendrá en el desarrollo económico del país, que no se puede pensar en una vida útil medida inferior a los treinta años. Este criterio tiene mayor validez si conforme a lo que estipula el contrato de operación del Oleoducto Transcuatoriano, tomamos en cuenta que las Compañías Contratistas Concesionarias operan el mismo por un período de veinte años, para amortizar la inversión. En consecuencia, no se debe dejar de pensar que una vez que este proyecto, pase a poder del Estado para su operación y mantenimiento, su estado o conservación en lo que a vida útil se refiere, tiene que ser tal, que permita operar y explotar el mismo por un período racional y beneficioso.

Además, y de acuerdo a lo que se puede observar directamente en el sistema de trabajo de la tubería y principalmente en lo que a protección anticorrosiva se refiere, la Compañía constructora procede como sigue:

Una vez lista o soldada la tubería, la limpian sea utilizando una máquina de chorro de arena o manualmente (empleando cepillos de alambre), para luego pintarla con la primera capa

...../..

o sea el Primer 105. Cuando se ha secado la capa de pintura se fo
rra la tubería con el revestimiento plástico Polyken, dejando unos
traslapes de unas dos pulgadas. Cuando se producen desgarres del
forro plástico un hombre que va siguiendo el trabajo de la máquina
procede al parchar la falla con el mismo revestimiento y así hasta
cuando se ha terminado un tramo listo para su recubrimiento. Una
vez que han determinado que el forro plástico se ha adherido conve
nientemente a la tubería se procede a enterrarla en el ducto, em--
pleando una máquina especial para este trabajo y que una vez depo-
sitada en el suelo, inmediatamente la cubre del mismo tipo de te--
rreno sacado al hacer el ducto.

INCONVENIENTES Al ser colocada la tubería en el ducto, la máquina
que lo deposita indudablemente que lastima el abri
miento, ya que tiene que asirla con unas cadenas y como el revesti
miento, es delgado, sino se produce debilitamiento del recubrimien-
to, se produce desgarramiento que deja al descubierto la tubería -
desnuda y sin ninguna protección. Como inmediatamente se la cubre
de tierra, lo menos que puede suceder es que en estas zonas debili
tadas o descubiertas se tengan ya, zonas anódicas en potencia, de-
pendiendo su intensidad del tipo de suelo y resistividad local.

Además, se nota cierto descuido en la limpieza de la
tubería (sobre todo cuando tiene que ser hecha manualmente) pues--

...../...

siempre quedan superficies no bien limpias o no se quita todo el polvo que deja la oxidación una vez que se la ha rasquetado. Al aplicar encima la capa de pintura, es lógico suponer que estos residuos de corrosión se desarrollarán y tenderán a forzar su salida hacia la superficie, resquebrajando la pintura y debilitando en el mejor de los casos el revestimiento plástico. Con esto, las zonas anódicas se multiplicarían a lo largo de las superficies no bien limpias.

Estos conceptos, conseguidos de la observación directa en el terreno y los que podemos colegir de la tabla de Combinación de Revestimientos y Protección Catódica, justifican lo suficiente un estudio más detenido de una protección eficaz de una obra tan trascendental para el país.

I/.d.- ANEXOS Y DIAGRAMAS DE CAMPO.-

Se ha mencionado anteriormente, que para iniciar cualquier tentativa de diseño, es necesario previamente coleccionar ciertos datos básicos, sobre los cuales se pueda especular, hacer análisis y extractar conclusiones que sean útiles para el cálculo del sistema de protección propuesto.

Para el caso presente -tramo Papallacta La Merced-,

...../..

según se desprende de los perfiles y planimetrías adjuntas, por a travezar la estructura suelos diversos y de características espe-
ciales cada uno de ellos, se hizo necesaria la medición de resisti-
vidad -basada en el método de cuatro electrodos- de 14 puntos di-
ferentes a lo largo de la tubería y empleando para esto un medi-
dor de resistividad NORMA, facilitado por la Escuela Politécnica-
Nacional para el efecto. El procedimiento llevado para la medi-
ción fue el siguiente:

Basado en el principio Wenner de los cuatro electro-
dos, se colocan las cuatro varillas-electrodos alineadas entre --
ellas y manteniendo un espacio fijo "a" entre cada una. El Ins-
trumento se conecta a las varillas de acuerdo con la Fig.10 Las va-
rillas más cortas se las numera 1 y 4 y las largas 2 y 3 respecto
al instrumento. La profundidad a que deben ir enterradas las va-
rillas no debe exceder del valor $a/20$.

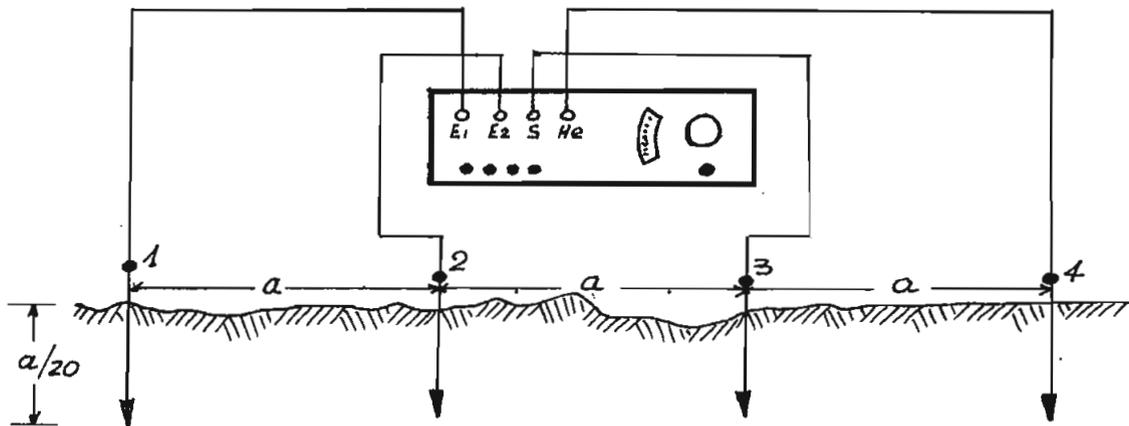


Fig. 10

...../.....

Una vez efectuada una lectura, se asegura su exactitud repitiendo la misma pero en una escala diferente, y así sucesivamente para cada lectura. El instrumento nos da el valor del parámetro R, y para el cálculo definitivo de la resistencia real del suelo se empleó la fórmula:

$$\rho = 2\pi Ra \quad (\Omega - \text{cm})$$

en la cual:

R= Resistencia específica del suelo medida con el instrumento

a= distancia entre los electrodos de prueba (en metros)

ρ = Resistividad específica del suelo (Ω - cm) -Dato básico para el diseño. L.13.

Es necesario aclarar aquí, que la resistividad específica medida de acuerdo a este procedimiento, determina la resistencia del suelo entre los electrodos de prueba 1 y 2 (según fig, 10) a la profundidad de un metro, y que para nuestro problema en particular es más que suficiente, puesto que la tubería va enterrada normalmente a una profundidad de 45" (1m).

Con estas mediciones, se ha elaborado un cuadro, en el que se incluye los factores pH de estos suelos típicos y que fueron determinados en la Facultad de Ing. Química de la Politéc-

...../..

nica Nacional (Ing. M. Paz)(y otros factores que aclaran un poco los conceptos de corrosividad del terreno, como es la acidez total del terreno analizado, y rangos de pérdida de peso y rangos de penetración promedio y máximo prorrateadas del Corrosion Engineer Handbook, para materiales como el Acero x60 API que es la materia prima del Oleoducto.

La determinación de los lugares o suelos en los cuales habfa que efectuar la medición de resistividad, se la hizo con el criterio de variedad en la constitución de los mismos, es decir ubicando a lo largo del tramo en estudio los suelos que presentaban características diferentes respecto a otros sobre los cuales se asienta la tuberfa. Los electrodos se colocaron a tres metros de la tuberfa, alineados y a una distancia de 2 metros entre sí. En suelos similares o mejor dicho en un vano de unos 100 metros y que más o menos presentaba características iguales, se repetían hasta tres lecturas, con el fin de determinar una resistividad media para un tipo de suelo, y son estas lecturas promedio las que se anexan en el cuadro explicativo adjunto. Asimismo, los valores prorrateados de las Tablas del Corrosion Engineer Handbook, se han deducido de datos obtenidos por los investigadores autores de las Tablas, y quienes han basado sus datos en pruebas de penetración y pérdida de peso llevadas a cabo durante doce

...../..

años, en aceros especialmente empleados para oleoductos, acueductos o poliductos.

Del cuadro mencionado arriba, se ha elaborado un perfil de resistividades y factor pH vs. localización (Km), el cual permite (Dg. N° 10) visualizar de un modo más objetivo, los lugares o zonas anódicas comprobadas y en los cuales se hace necesaria la protección suplementaria -catódica-. Sirviéndonos de este diagrama podremos señalar aproximadamente en un principio, los requerimientos o tipos de protección, dependientes de los factores de los que se disponga en el terreno o los que precise la estructura. Es más, de aquí podemos partir para determinar, una vez bosquejando el proyecto, si la cantidad de corriente que precisa la protección de esos tramos anódicos, bastaría para proteger efectivamente aquellos que aparecen como catódicos, y que por las razones que -- hemos señalado más arriba y debido a los defectos del revestimiento actual, son desde ya zonas anódicas en potencia,. Esto desde luego y por ejemplo si el equipo, cubre los requerimientos del tramo comple y abastece las necesidades del mismo, en cuanto a protección se refiere.

...../....

CARACTERISTICAS DE LOS SUELOS EN LOS CUALES VA ENTERRADO

EL OLEODUCTO

Y PORCENTAJES DE PERDIDA DE PESO Y PENETRACION DEL ACERO X60 - API

Suelo	Tipo de suelo	Localización	pH	Acidez total	Resistividad Ω -cm.	Pérdida de peso	Penetración promedio
Nº		Km.				Kg/m ² /año	
1	Marga arenosa	195	6.05	11.6	32.800	1,11	0.53
2	Tierra-negra	198	5.55	11.0	1.120	2,37	0.79
3	Roca-sólida	200	6.15	----	38.100	0,36	0.12
4	Roca-arenosa	202	6.05	10.7	27.600	0,45	0.19
5	Barro-adobe	205	5.35	6.2	3.140	1.53	0.79
6	Tierra-negra	208	4.4	5.4	2.100	1.95	1.00
7	Tierra-negra	210	5.9	5.0	4.070	1.83	0.92
8	Cong.-rocoso	215	7.0	12.7	40.300	0.24	0.11

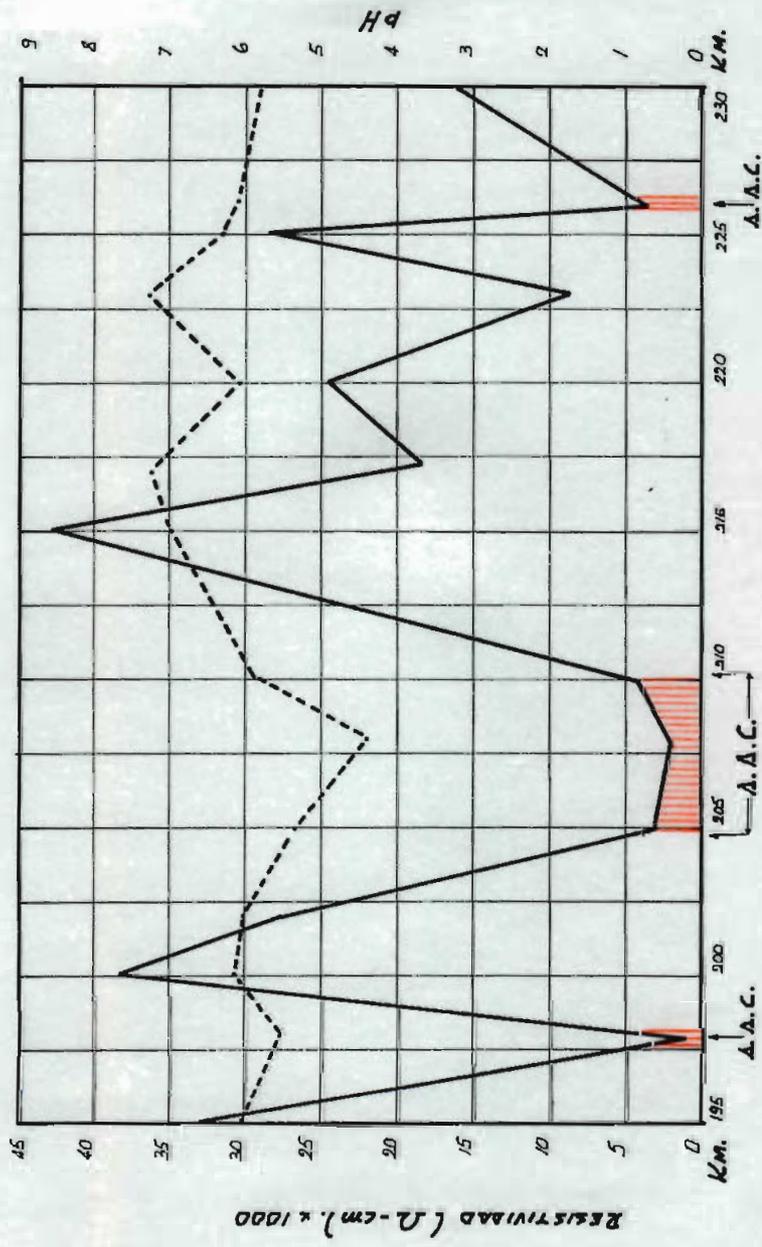
...../.....

Suelo	Tipo de suelo	Localización	pH	Acidez total	Resistividad Ω -cm.	Pérdida de peso	Penetración	
Nº	Km.	Cota				de	promedio	
						kg/m ² /		
						año		
9	Areno-arcill.	217	3.400	7.25	12.1	18.500	0.78	0.31
10	Roca-arenosa	220	3.125	6.1	10.9	24.900	0.36	0.39
11	Cancahua	223	2.875	7.3	5.7	8.700	1.71	0.69
12	Marga-arenosa	225	3.800	6.3	10.9	28.600	0.33	0.29
13	Barro-arcillos.	226	2.600	6.1	5.2	3.750	1.62	0.76
14	Roca-arenosa	230	2.660	5.8	11.3	16.700	0.30	0.33

MEDICIONES DE POTENCIALES TUBO - SUELO .-

En párrafos anteriores se mencionó ya en que consiste y la finalidad específica de la medición de los potenciales tubo-suelo; sin embargo es necesario aclarar en este capítulo que en la Ingeniería de corrosión, siempre se hacen indispensables las mediciones

...../....



LEYENDA:

- RESISTIVIDAD Ω-cm.
- - - FACTOR pH
- A.A.C. AREA ANODICA COMPROBADA

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL	
TESIS DE GRADO	
PROTECCION CATORICA	
RESISTIVIDAD Y FACTOR pH	De.
PROYECTO: T.O.S. P.	DIBUJO: J.D.G. P.
ESCALAS: VERT. 1cm = 5KM. HORIZ. 1:20000	

de potenciales, corriente y resistividad, para poder o estar en condiciones de acometer el problema de controlar la corrosión. -- Los potenciales D-C, que se han encontrado, (sometiendo un cátodo de acero parcialmente sumergido en una solución de cloro.- prueba- → de Evans-Britton, demostraron que el potencial del cátodo de acero no cambia cuando la densidad de corriente se aumenta, sino que basta una densidad crítica, ante la cual la corrosión cesa. Asimismo Bauer y Vogel demostraron en laboratorio que no debe excederse una densidad mínima de corriente para prevenir la corrosión. L.14

En pruebas similares y sometiendo un ánodo de acero suave vs. un cátodo de acero de tubería normal ambos del mismo tamaño, Liller demostró que la densidad de corriente requerida para la protección varía entre 1 a 20 mAmp/30,5 cm² dependiendo de las condiciones. Todos estos conceptos servirán desde luego para adoptar un criterio definido acerca de la densidad de corriente requerida por la instalación, pero en lo que a potenciales se refiere, al efectuar las mediciones en el terreno y analizar sus valores, se podrá determinar casi con exactitud las zonas anódicas, debido a que mediante estas lecturas se puede dar el cuenta el investigador del sentido de flujo de la corriente, es decir, si fluye desde la tubería hacia el suelo o viceversa, en cuyo caso si la tubería es anódica en esa región el flujo será desde el tubo hacia el suelo y si es catódica la estructura el flujo será suelo - tubo.//..

Antes de efectuar las mediciones en el terreno, se tomó en cuenta ciertos datos obtenidos en investigaciones hechas por científicos o Compañías y que demuestran que en la mayoría de éstas, los valores de potenciales tubo-suelo obtenidos varían desde el orden de $1mV$. hasta decenas de volts; es indudable que algunos de estos valores se encontrarán en suelos de alta o baja resistividad; otros dependerán del grado de precisión que requiera la investigación y finalmente otros cuyos valores se tomarán con cierto criterio de diseño, según las características del mismo.

Ya en la medición normal de potenciales, que realmente es la lectura de potencial d-c entre el tubo - u otra estructura metálica - que va conectado al terminal negativo del instrumento de medida, y un electrodo de referencia -normalmente el de cobre que ya se mencionó en el Capítulo I- conectado al terminal positivo dan resultados ampliamente investigados y que se encuentran entre los 0.3 y 3.0 volts, con valores especialmente concentrados entre 0.6 y 1.0 volts. L.15

Para las pruebas realizadas en el tramo de Oleoducto, materia de este estudio, y siguiendo el procedimiento mencionado en el Capítulo I, se empleó como instrumento de medida, un Milivoltímetro RCA - Mod. KL-STIQ, de $100.000 \Omega/volt$. de escala -

...../...

variable entre 10mV a 1500v. D.C. 8 escalas, \pm 3% exactitud en D.C.

Para las pruebas realizadas en este tramo, se han tomado lecturas laterales del potencial tubo-suelo, es decir midiendo a ambos lados de la tubería y efectuando lecturas en el instrumento en dos escalas; una apropiada y otra superior, para hallar el valor correcto promedio del potencial.

Para la corrección del potencial se empleó la igualdad :

$$V_c = \frac{V_b V_a (R - 1)}{R V_b - V_a} \quad (\text{mV})$$

L.16

en la cual:

V_c : potencial corregido

V_b : potencial leído en la escala inferior

V_a : potencial leído en la escala superior

R : Relación entre escalas.

En la Fig. 11, se puede apreciar gráficamente el procedimiento de medición, y en la misma, se puede ya determinar las zonas anódicas existentes entre la tubería y el suelo debido al sentido de flujo de la corriente (desde el ánodo hacia el cátodo). Se puede notar que los puntos marcados con las letras X, Y, o Z, o sea

...../....

donde el potencial tubo-suelo es más negativo, son anódicas y en consecuencia por lo enunciado anteriormente serán las que se verán afectadas en mayor o menor grado -dependiendo de la resistividad- por la corrosión.

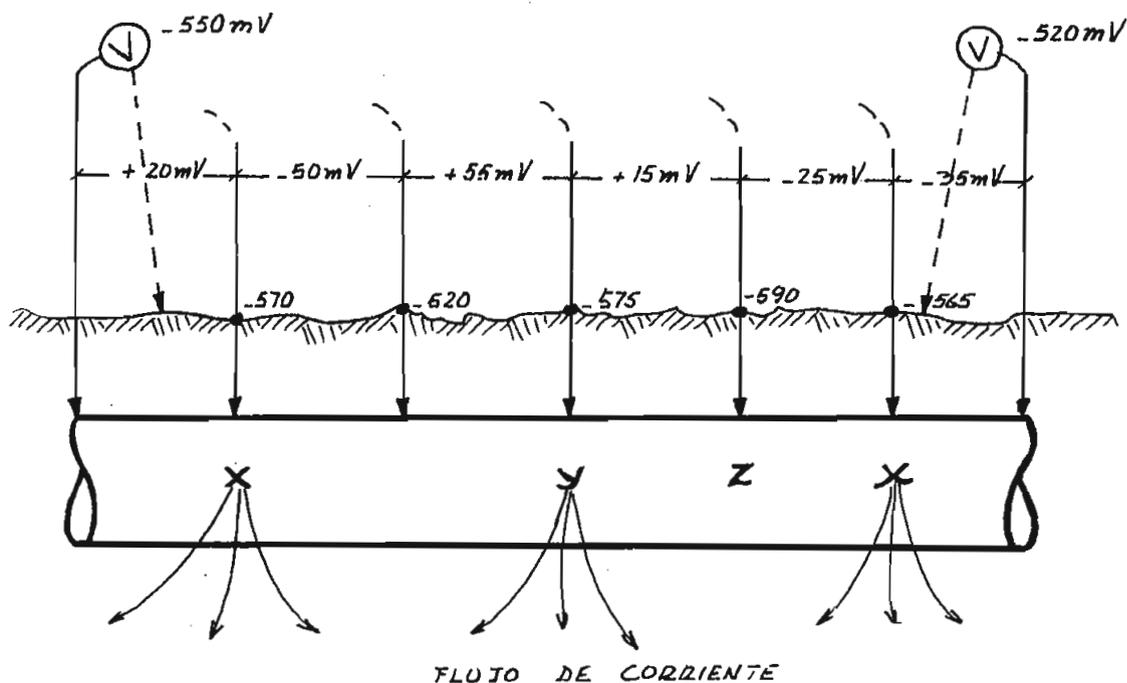


Fig. 11

En el cuadro adjunto, se anotan las lecturas efectuadas y los valores corregidos calculados a partir de la igualdad V_c , correspondientes a los diferentes puntos en los cuales se realizó la medición.

...../...

LOCALIZACION	POTENCIAL Vb	POTENCIAL Va	R	Potencial Corregido
Km.	mV.	mV.		mV.
195	-560	-552	10	-550
198	-565	-569	10	-570
200	-515	-518	10	-520
202	-525	-528	10	-530
205	-580	-576	10	-575
208	-590	-590	10	-590
210	-570	-568	10	-565
215	-515	-521	10	-520
217	-535	-528	10	-530
220	-540	-540	10	-540
223	-518	-522	10	-520
225	-565	-565	10	-565
226	-517	-522	10	-520
230	-515	-521	10	-520

A partir de los gráficos de resistividades y medicio
nes de potenciales, recién podemos aclarar un poco el panorama ge-
neral del problema que tenemos entre manos, y si aplicamos racio--
→ nalmente los diversos criterios que emplean otros diseñadores de -
sistemas de protección catódica -que citaremos luego-, estaremos -

...../...

en condiciones de adoptar un criterio válido para nuestro caso y lo suficientemente técnico para recomendar su aplicación.

En el Capítulo I, se hace mención de una Tabla utilizada por la Royal Dutch Shell, filial de la Shell International Petroleum, en la cual se anotan valores de densidades de corriente - recomendables para el diseño; ésta tabla recomienda una densidad - de 0,5 a 3 mAmp/pie² (5,5 a 32 mAmp/m²) para proteger al acero desnudo, sometido a la corrosión del suelo y entre temperaturas ambiente de 15 a 25°C. Asimismo y como para casos parecidos al presente, recomienda una densidad de corriente de aproximadamente 0.01 mAmp/pie² (0.1 mAmp/m²) para proteger tuberías recubiertas previamente con pinturas asfálticas; de la misma forma que para tuberías recubierta con capa de concreto o cemento una densidad de 0.1 mAmp/pie² (1,0 mAmp/m²).

Es práctica común el aplicar el criterio muy aproximado por cierto, de que crece la demanda de corriente conforme decrece la resistividad, de manera exponencial. Esto como se puede deducir de todo lo enunciado anteriormente, es lógico; pero ya de una manera práctica se establece que si por ejemplo el requerimiento es de 2 mAmp/pie² ante 1.000 Ω -cm de resistividad, se necesitará el doble de corriente por cada 1/10 parte de decrecimiento de la resistividad, y, la mitad de corriente por cada 1/10 de creci-

....//..

miento de la resistividad,. Esto resultaría equivalente a la ex--
presión:

$$i = \left(\frac{10.000}{\rho} \right)^{0,3}$$

que es el lugar geométrico de una recta trazada en papel logarft--
mico. L.17

También se puede emplear la curva de polarización, -
para la determinación de la densidad de corriente necesaria para -
la protección efectiva, es decir determinar mediante el empleo de-
los potenciales tubo-suelo, y las caídas de potencial a lo largo -
de un tramo, para encontrar el punto de quiebre de la curva, y que
indicará el valor de la corriente mínima para proveer de protección
a una línea.

...../...

CAPITULO II.-

T E N T A T I V A S - D E - D I S E Ñ O

Una vez que se han determinado las características - del Oleoducto, en particular del tramo en estudio, como son: especificaciones de material de la tubería, perfil y medición de resistividades, medición de potenciales, particularidades y especificaciones del revestimiento anticorrosivo que se va dando a la tubería, y anticipando ciertos criterios sobre densidad de corriente recomendables para el diseño de un sistema de protección catódica de oleoductos revestidos, se está en condiciones de atacar el problema desde un punto de vista práctico.

Del análisis conjunto del perfil de resistividades y medidas de potenciales del tramo en estudio, se desprende que las zonas que evidentemente requieren de una protección adicional contra la corrosión, son aquellas que tienen una resistividad muy baja (bajo $5.000 \Omega\text{-cm}$) y potenciales más negativos. En el Capítulo I, I.C.- se establece un criterio para juzgar la severidad de la corrosión en relación con la resistividad del suelo; establece que suelos cuya resistividad es inferior a $1.500 \Omega\text{-cm.}$, se consideran altamente corrosivos; aquellos con valores de entre 1.500 y $3.500 \Omega\text{-cm.}$ relativamente corrosivos, y para valores superiores a 3.500

...../..

Ω -cm. ligeramente corrosivos.

Examinando el perfil de resistividades, notaremos que existen tres zonas cuya localización es en Km. 198, 205 a 210 y -- 226, que tienen una resistividad que oscila entre los 1.120 y --- 4.070 Ω -cm.; además, las pérdidas de peso y rango de penetración - promedio correspondientes a estos puntos son los más altos entre - todos los registrados. Asimismo los potenciales tubo-suelo, que - constan en la tabla de potenciales y que corresponden a estos mis- mos puntos, son también los más negativos. Todas estas particula- ridades definen a estos lugares como ánódicos comprobados.

Adoptando el criterio utilizado por The Pipeline En- gineer, que considera que los suelos cuya resistividad sea inferior a 5.000 Ω -cm. son altamente corrosivos, y que las zonas registradas con valores inferiores al mencionado constituyen un 30% del tramo - total, sin incluir un 5% que alcanzarían las zonas averiadas o mal revestidas, tendríamos que un porcentaje respetable del tramo, es- taría sujeto indefectiblemente a la corrosión. L.18

En tal virtud, y basándonos en la Tabla de vida útil vs. resistividad y si tomamos como valor promedio de la resistivi- dad de las zonas anódicas 3.000 Ω -cm., podemos deducir ciertos da- tos interesante, que servirán para adoptar un criterio definitivo-

...../...

de diseño.

Según la Tabla mencionada, un oleoducto que atravie-
ze suelos con una resistividad promedio de 3.000 Ω -cm, y no tenga
revestimiento protector alguno tendrá una vida útil estimada de 5
años; si es desnuda y tiene protección catódica localizada, alcan-
zará los 10 años, y , finalmente si viene revestido totalmente -ca-
so presente- y se aplica protección catódica completa (todo el tra-
mo), alcanzará una vida útil promedio entre 20 y 50 años, dependien-
do del grado o calidad del revestimiento y de la protección catódi-
ca.

Para el caso del Oleoducto Transecuatoriano, no cabe
pensar en una vida útil menor a 40 años, puesto que durante los pri-
meros 20 años administrará la obra el Consorcio Texaco-Gulf y los-
posteriores el Estado Ecuatoriano. Por tanto y por todo lo enun-
ciado anteriormente, un criterio racional de diseño será el de dar
protección catódica completa lo cual indudablemente protegerá y --
contrarrestará los efectos de corrosión incluso en aquellos luga--
res en los que se ha debilitado el revestimiento.

Con estas consideraciones finales, podemos iniciar -
el cálculo de la densidad mínima de corriente de protección del --
tramo en consideración.

...../...

CALCULO DE LA DENSIDAD MINIMA DE CORRIENTE.-

Habíamos mencionado diversos criterios acerca de la densidad mínima de corriente necesaria para proteger un oleoducto-revestido totalmente y enterrado en el suelo. Por ejemplo, la Shell International Petroleum, recomienda 0.1 mAmp/m^2 a 3 mAmp/m^2 - según la resistividad del terreno. Si tomamos $0,5 \text{ mAmp/m}^2$ para una resistividad promedio en las zonas anódicas de $3.000 \Omega\text{-cm.}$, necesitaremos una corriente igual a:

$$L = \text{Longitud del tramo} = 35.000 \text{ mts.}$$

$$D = \text{Diámetro de la tubería} = 26" (67.3 \text{ cm})$$

$$A = \text{Superficie del tramo} = \pi \cdot D \cdot L.$$

$$A = 3.14 \times 0,673 \times 35.000 \text{ m.}$$

$$A = 73.600 \text{ m}^2$$

La corriente necesaria para un tramo de tubería re-vestida totalmente y que se decide necesitará una densidad mínima de corriente de 0.5 mAmp/m^2 será :

$$I_p = 0,0005 \text{ A/m}^2 \times 73.600 \text{ m}^2$$

$$I_p = 36.8 \text{ Amp.}$$

Esta corriente que es el valor mínimo necesario, sirve para el diseño sea por ánodos de sacrificio o por corriente impresa, pues de ella partiremos para hacer los cálculos. / ...

Tenemos pues, dos alternativas para iniciar la protección de la tubería. Llamaremos al Sistema de Protección que emplea ánodos de sacrificio, la Alternativa 1 y al que emplea la corriente impresa como medio de protección la Alternativa 2,. Analizemos la Alternativa 1.-

ALTERNATIVA I.-

PROTECCION CATODICA MEDIANTE LOS ANODOS DE SACRIFICIO .-

Es necesario antes de proceder al diseño, conocer -- las características de estos elementos, para estar en condiciones - de elegir el más adecuado, tanto en el aspecto técnico, como de ope- ración y económico.

Para la protección mediante este sistema, con emplea- dos generalmente como ánodos de sacrificio: el aluminio, el magne-- sio y el zinc.

La razón? -Se ha descrito ya en el Capítulo I., que cuando dos metales no similares, se sumergen en un electrolito y -- se conectan mediante un conductor, fluye una corriente eléctrica - desde el uno hacia el otro a través del electrolito. El menos no- ble (anódico) se corroe, mientras el más noble (catódico) permane-- ce inalterable o protegido de la corrosión, merced a la corriente-

...../...

galvánica generada. Esto constituye en síntesis la base de la protección catódica mediante los ánodos de sacrificio.

Las estructuras metálicas ~~de~~acero en nuestro caso son protegidas, mediante la conexión a ellas, de ánodos de aleaciones de magnesio, zinc o aluminio, que son menos nobles que el acero, y que son materiales que se encuentran disponibles en el mercado a precios racionalmente económicos.

ALEACIONES DE MAGNESIO .- Estas aleaciones son por lo general las más recomendables como material para ánodos, por las siguientes razones:

a).- La diferencia de potencial entre la aleación de magnesio y el acero, es mayor que la que hay entre el zinc y el aluminio con el acero. En consecuencia, por unidad de peso de metal aplicado, la aleación de magnesio entrega más corriente que los otros metales. A continuación, anotamos los potenciales de estos metales respecto al electrodo de referencia cobre/sulfato de cobre:

Aleación de Magnesio	- 1.45 V
Zinc	- 1.1 V
Aluminio	- 1.1 V

Estos potenciales, son desde luego medidos en una lf-

...../..

nea de acero protegida catódicamente y que se encuentra a un potencial de -0.85 V.

b).- Los ánodos de aleación de magnesio son atacados en menor forma por la polarización de modo que hay muy poca probabilidad de que la diferencia de potencial respecto al acero, baje a un nivel inferior al requerido por la protección.

c).- Estos ánodos además, entregan o poseen una capacidad mayor de amp-hora de salida por unidad de peso de metal. En uso normal esta es aproximadamente del orden de 500 amp-hora/lb. -- (1.100 amp-hora/kg.), contra solamente 335 Amp-hora/lb. del zinc (740 amp/hora/Kg.)

Las aleaciones de magnesio generalmente usadas en protección catódica, es una aleación de magnesio con aluminio (5,3 a 6,7% en peso) y zinc (2,5 a 3,5% en peso) con algo de *manganeso* (0.15 %); además siempre es recomendable que contenga a lo más un 0.30% de impurezas, a fin de tener una vida útil satisfactoria del ánodo.

ZINC .-

Se requieren ánodos de zinc de alta pureza (99,99%) a fin de garantizar una corriente protectora efectiva. El zinc -

...../..

además produce una relativamente baja cantidad de corriente de salida, debido a que la diferencia de potencial respecto al acero protegido, es de solamente 0.25 V, comparada con 0.60 V de diferencia de potencial del magnesio. Sin embargo y debido a su pequeña corriente de salida, tiene como ánodo una duración más prolongada que el magnesio, de lo que se desprende que su empleo se limita sólo a instalaciones que requieren pequeña corriente protectora y larga vida de servicio.

ALUMINIO .-

El aluminio, conteniendo un 5,5% de zinc y 0.17% de hierro tiene un uso limitado a la protección en el agua de mar. Debido además a que tiene una diferencia de potencial similar a la del zinc respecto al acero protegido, su aplicación es también similar, aunque en la práctica no se ha llegado todavía a ampliar, su uso.

En resumen, se tiene:

MATERIAL	Diferencia de potencial respecto al acero (V.)	Dif.Potencial resp.al electrodo de ref. (V.)	Corriente de salida real.Amp-h /Kg.
----------	--	--	-------------------------------------

MATERIAL	Diferencia de po- tencial respecto- al acero (-0.85) V.	Dif.Potencial resp. al electrodo de ref. V.	Corriente de sa- lida real Amp-- h/Kg.
Aleación	0.6	-1.45	1.100 Amp-H/Kg
Magnesio			
Zinc	0.25	-1.10	335 "
Aluminio	0.25	-1.10	2.200 "

EFICIENCIA DE LOS ANODOS .-

En la práctica, no toda la capacidad de corriente de un ánodo es disponible puesto de que aparte de que éste se consume al proteger una estructura, también se consume por autocorrosión, debido a la acción del electrolito sobre él.

La eficiencia de un ánodo es entonces, la relación existente entre los amp-h teóricos del mismo, y los amp-h aplicados realmente, por unidad de peso de metal consumido.

Los ánodos de magnesio tienen una eficiencia real de un 50%, pues su capacidad de corriente teórica de salida es de --

...../...

2.200 amp-h/Kg de metal consumido. Es lógico que la eficiencia dependerá también del medio de reposo; así en suelos de moderado o bajo contenido de sales, la corriente de salida será baja, y por tanto la autocorrosión del ánodo será alta. Para contrarrestar esto, se rodea al ánodo de un relleno conocido como "backfill", lo cual permite que brinde una alta corriente de salida y mejora la eficiencia. La eficiencia real del zinc es de un 90%, pero tiene una baja salida de corriente por unidad de peso de metal consumido; pero en definitiva es el precio del amp-h aplicado para protección, lo que determina la elección de uno u otro ánodo. A veces la combinación de los dos materiales resulta lo más conveniente.

DETERMINACION DE LA CORRIENTE DE SALIDA DE LOS ANODOS .-

a).- En aleaciones de magnesio .- La salida de estos ánodos, conectados a una estructura protegida completamente (a un potencial de -0.85 V) puede estimarse, empleando la Tabla usada por la Shell International Petroleum, para protección Catódica.

...../..

CORRIENTE DE SALIDA DE ANODOS DE MAGNESIO PARA PROTECCION CATODICA
 → OLEODUCTOS

ALEACION DE MAGNESIO Anodos cilíndricos (peso)	CORRIENTE DE SALIDA APROXIMADA EN mAmp.
17.1 Lbs. (7.7Kg)	18×10^4
22 lbs. (14.5 Kg)	Resistividad media (Ω -cm)
32 lbs. (14.5 Kg)	19.5×10^4
	Resistividad media (Ω -cm.)
50 lbs. (22.7 Kg)	20.4×10^4
	Resistividad media (Ω -cm.)

L.20

Se toman, para el empleo de esta Tabla, los valores medios de la resistividad de un terreno, o de un tramo determinado.

Los ánodos de magnesio son por lo general fabricados en forma cilíndrica, con un diámetro variable de 4" a 6" (10a 15 cm) o de base cuadrada de 10 x 10 cm. Los ánodos standard de magnesio, empleados en oleoductos tienen un peso de 10 Kg, de forma cilíndrica de 11.0 cms. (4 1/2") y 53 cm. (21") de longitud, rodeados de un relleno "backfill" de gypsum/betonita.

b).- En ánodos de zinc .- Como se indicó, tiene menos capacidad de corriente de salida. Vienen contruídos para protección catódica en suelos, en forma de varillas rectas de

4 x 4 cm. por 150 cm. de largo, con un peso de 15.5 Kg. Tiene el mismo tipo de relleno "backfill" que los ánodos de magnesio.

Su corriente de salida se calcula, mediante la expresión :

$$I_p = \frac{50.000}{\text{Resistividad media } (\Omega\text{-cm})}$$

En las figuras, 14 y 15, se indican las características típicas de los ánodos de magnesio y zinc (detalles constructivos).

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION CON ANODOS DE SACRIFICIO .-

Como la instalación de ánodos de sacrificio equivale a formar baterías locales en los lugares más corrosivos a lo largo de un oleoducto, lo apropiado en nuestro caso será proteger la estructura en los tramos "calientes", o sea los que tienen resistividad media por debajo de los 5.000 Ω -cm. En este caso analizemos el tramo que parte del Km. 205 hasta el Km. 210, que tienen una resistividad promedio de más o menos 3.000 Ω -cm.

Este tramo requerirá una corriente protectora igual a:

$$I_p \text{ (para 5.000 mts)} = 36,8 \text{ amp. } \times \frac{5.000}{35.000} \\ = 5,2 \text{ Sup}$$

$$I_p = 6 \text{ Amp.}$$

...../...

Si calculamos la corriente de salida de un ánodo de magnesio de 22,7 Kg:

$$I_s = \frac{20.4 \times 10^4}{3.000 \text{ cm.}} = 66 \text{ mAmp.}$$

Si adoptamos una densidad mínima de corriente (puesto que el oleoducto es completamente revestido) de 0.5 mAmp/m²,. Ver párrafo de densidad mínima de corriente Cap. II.

cada ánodo protegerá: $I_s/0.5 = 132 \text{ m}^2$ de tubería

Puesto que este tramo tiene una superficie igual a :

$$L_t/7 = 35.000 \times D/7 = 73.600/7 = 10.514.4 \text{ m}^2$$

Luego el número de ánodos indispensables para proteger todo este tramo será :

$$N. = 10.514.4/132 = 80$$

$$N. = 80 \text{ ánodos de magnesio de 22.7 Kg.}$$

Estos ánodos deberán instalarse paralelamente a lo largo del oleoducto (tramo calculado) manteniendo una distancia de 3 o 5 Mts respecto a la tubería. Pet. Transp. Handbook. Ver Fig. 18. Y proveerá una corriente total para el tramo de:

$$I_p = 80 \times 0,066 = 5,28 \text{ Sup} \quad 5.7 \text{ Sup.}$$

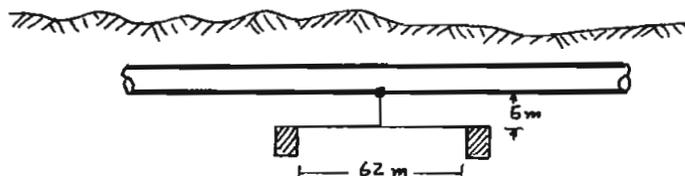


Fig. 12

...../...

→ Este tipo de protección aplicaremos, en cada lugar ca
liente" y de acuerdo al perfil de resistividades, básico para el di
seño de este sistema, encontramos que necesita protección catódica, -
el tramo comprendido entre los Km. 196 y 198 y Km 226 a 227, es de-
cir 2.000 mts, por tramo.

Si empleamos el mismo tipo de ánodos, peso, etc, y -
puesto que la resistividad promedio en estos tramos también es simi
lar a la del tramo detallado antes, solo necesitaremos hacer propor
ciones para determinar el número de ánodos indispensables en estos-
tramos. Llamemos tramo C, y D. que son ambos iguales.

Superficie de estos tramos : $S = 73.600/17.5 = 4.200 \text{ m}^2$

número de ánodos : $N_{23} = 4.200 \text{ m}^2/132 \text{ m}^2 = 32.$

$N_{23} = 32$ ánodos de magnesio de 22.7 Kg.

Número total de ánodos para proteger los tramos calien
tes, del sector del oleoducto que parte del Km. 195 a 230:

$$N_t = 80 + 32 + 32 = 144$$

Refiriéndonos nuevamente al tramo A-B (km. 205-210) -
que precisaba de 80 ánodos de 22.7 Kg c/u el distanciamiento entre-
ellos será igual y proporcional a los 132 m^2 que protege cada ánodo.

...../..

OSEA:

$$5000 \text{ mts} = N \times E$$

Siendo E el espaciamiento entre ánodos e igual a:

$$E = \frac{132 \text{ m}^2}{D} = 62.5 \text{ mts.}$$

$$E = \frac{5000}{80} = 62.5 \text{ mts.}$$

Estando separadas esta distancia, cada ánodo de magnesio de 22,7 Kg. de peso protegerá un tramo o superficie de 132 m² a una densidad de corriente de 0,5 mAmp./m² y con corriente de salida de cada ánodo de 66 mAmp., manteniendo la estructura a un potencial de -. 85V. respecto al electrodo de referencia cobre/sulfato de cobre.

Para aclarar mejor lo enunciado arriba, se incluye la figura 12.

Ahora como hemos determinado en 66 mAmp/. la corriente de salida de un ánodo de 22 Kg. (50lbs) podemos calcular el tiempo de duración de uno de éstos, tomando en cuenta que su corriente de salida con un 50% de eficiencia en suelos de resistencia media de 3000 es de 1100 amp-h/kg. Ver tabla de corriente de salida real de ánodos Pág.66 Cap. II.

$$0 \text{ sea: } 1100 \text{ amp-h/kg} \times 22.7 \text{ kg} = 24.970 \text{ amp-h}$$

...../..

Un ánodo de 22.7 kg tiene 24,970 amp-h de capacidad

$$\frac{\text{Ahora } 24.970 \text{ amp-h}}{8.760 \text{ h/año} \times 0,066 \text{ amp}} = 43 \text{ años}$$

Luego como hemos dicho, que la estructura deberá tener una vida útil de por lo menos 40 años, si empleamos estos ánodos con una corriente de salida de 66 mts cada uno, e instalados en sectores que tienen una Resistencia media de 3000 con una duración calculada de 43 años, estamos cumpliendo con los requerimientos iniciados del sistema. Este criterio indudablemente pasará en el análisis y costo del sistema y servirá de base de comparación con la otra alternativa. Se incluye el cuadro de Oil 8 Gas Journal para verificación gráfica de la duración de los ánodos de magnesio basados en la corriente de salida y resistividad.

L.21

INSTALACION DEL SISTEMA :

Procedimiento equipo y materiales .

Instalación de los ánodos : Como se mencionó antes en la Pág.

se colocarán los ánodos a 5 mts de la tubería y manteniendo paralelismo con ello, espaciados entre ellos 62.5 mts. Se introducirán de modo que queden lo más vertical posible respecto al suelo y enterrados a una profundidad tal, de mo

...../..

do que permanezcan en un suelo más o menos homogéneo. Como es usual en otros oleoductos, las cabezas de los ánodos estarán a un nivel similar al de la cara inferior de la tubería y se colocarán marcas de cualquier índole pero lo suficientemente claras y visibles para determinar la ubicación de los ánodos.

Conexiones eléctricas .- Por lo general, los ánodos para protección de oleoductos enterrados en el suelo vienen provistos de fábrica con cables para conexión a la estructura a proteger.

Los materiales o conectores deben ser de bronce y soldados a la estructura con soldadura de plata si es posible o similar. Para asegurar un buen contacto eléctrico, las piezas y cable deben estar completamente limpias. Si la punta va a ser enterrada, debe ir adecuadamente aislada con materiales bituminosos, o bandas de PUC. Finalmente se la instalará a una profundidad que evite su destrucción o deformación, sea por cultivos o cualquier otro factor que presente el tipo de terreno en el cual reposa.

Cajas de prueba y registro : Para facilitar la operación de estos sistemas de protección, todos o una buena parte de los ánodos deben ir provistos de cajas de prueba y

registro. Estas cajas contienen un panel de dimensiones adecuadas y de material aislante sobre el cual se conectan los terminales de los cables que vienen tanto de la tuberfa como del ánodo. Estos terminales están unidos con una barra de conexión desmontable para cuando se necesite hacer mediciones con el miliampermetro. La posición de la caja variará de acuerdo a las condiciones de trabajo, pero deberá ir montada sobre un poste pequeño o dentro de una cámara a prueba de intemperie ubicada al nivel del suelo. Las condiciones aquí mencionadas se pueden apreciar gráficamente en la Fig. 13.

...../...

CABLES :

El cable requerido para conexión de ánodos de aleación de magnesio a la tubería enterrada viene conectado de fábrica con el ánodo. El ánodo cilíndrico de 22.7 Kg. trae cable Nº 4 am-G de cobre con aislamiento de PVC doble.

RELLENO "BACKFILL" .-

Para asegurar un consumo uniforme del ánodo y también una entrega alta de corriente de éstos a la estructura se los debe rellenar con una pasta o composición gypsum/bentonita que viene -- también desde fábrica y se lo colocará al momento de ser enterrados los ánodos.

UBICACION DE LOS ANODOS :

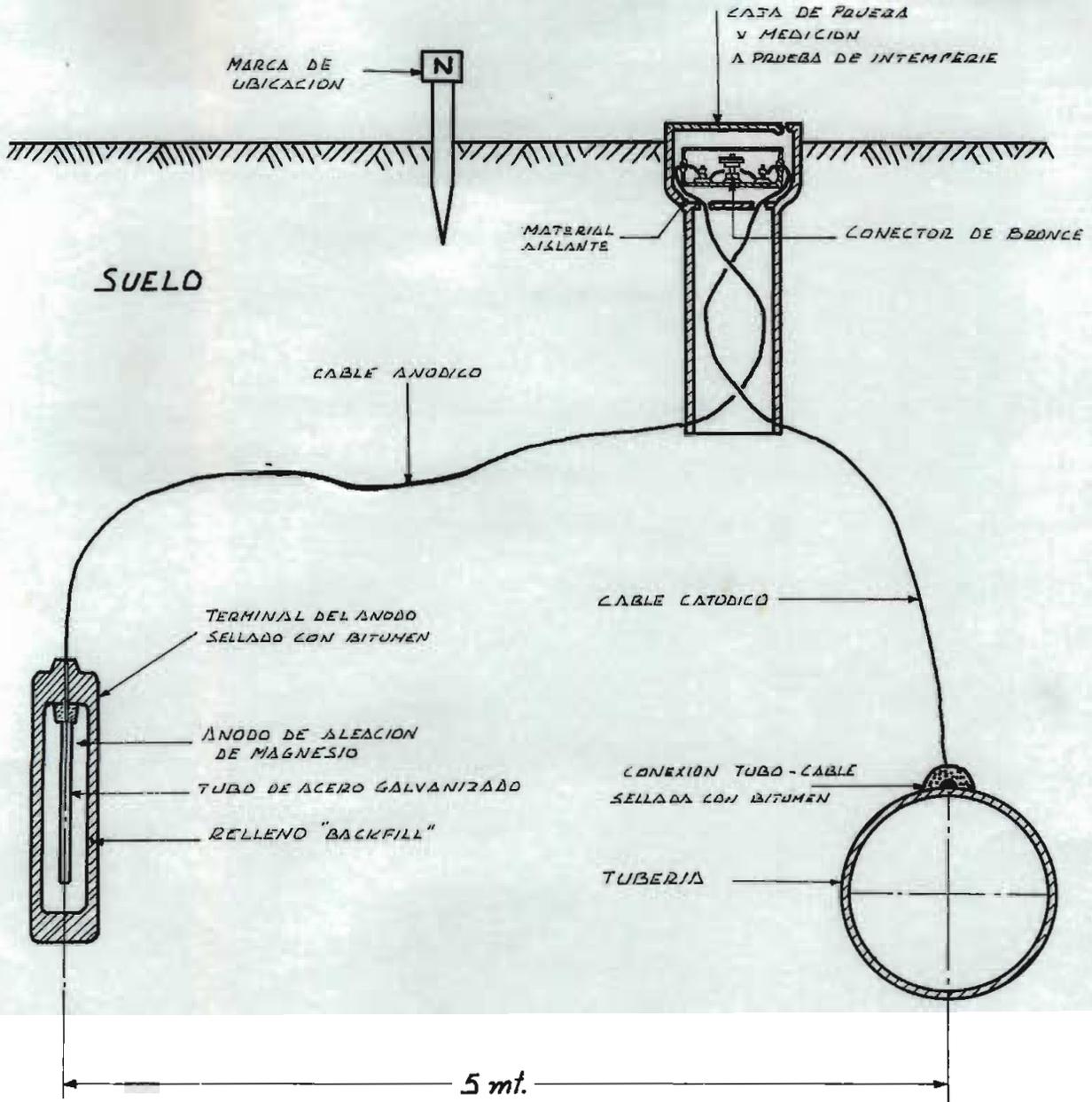
Deberán instalarse como ya se dijo a r mts. en sentido perpendicular con la tubería y manteniendo una trayectoria paralela con la misma.

Todo esto lo notamos en la Fig. 13 y en las figuras- 14, 15 se indican formas características de los ánodos de zinc y - magnesio comercialmente disponibles para protección catódica.

Para aclarar mejor, el por qué se escogió un ánodo de

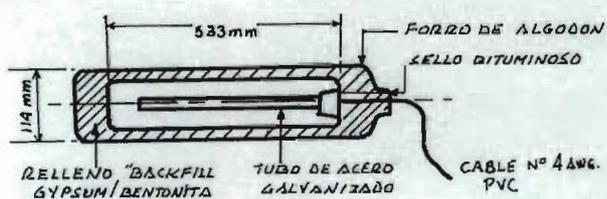
...../..

Fig. 13



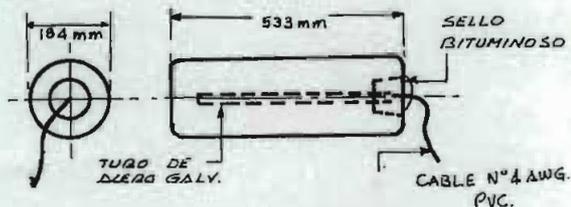
DETALLE DE INSTALACION DE ANODO DE SACRIFICIO Y CAJA DE PRUEBA Y MEDICION

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
TESIS DE GRADO
PROTECCION CATODICA



PESO (10 KG)

**ANODO EMPACADO PARA
TUBERIAS ENTERRADAS**

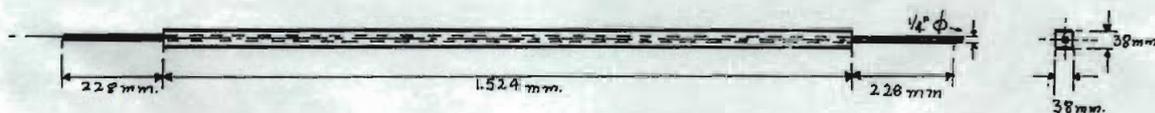


PESO (22.3 KG.)

**ANODO PARA TUBERIAS
ENTERRADAS EN SUELOS SALINOS**

ANODOS DE MAGNESIO

FIG. 14



**ANODO DE ZINC PARA TUBERIAS
ENTERRADAS**

FIG. 15

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
TESIS DE GRADO

PROTECCION CATODICA

magnesio para la protección y para verificar su duración respecto a la resistividad del suelo y corriente de salida de estos ánodos, anexamos el gráfico utilizado por The Corrosion Engineer Review, - Pág. 12 1966.

...../...

ALTERNATIVA 2

PROTECCION MEDIANTE LA CORRIENTE IMPRESA .-

Mencionamos de modo ligero en el Capitulo I., en que consistia el método de protección catódica mediante el empleo de Corriente Impresa, de manera que a modo de ampliación del concepto podemos expresar que si una corriente continua proveniente de una fuente externa de energía es introducida a través del suelo o agua a una estructura metálica, el efecto electroquímico natural (corrosión) es eliminado. Todo el metal se vuelve catódico y en consecuencia queda protegido completamente de la corrosión,.

Este principio puede ser aplicado indiferentemente en estructuras revestidas o desnudas. Aunque puede aplicarse independientemente de los revestimientos protectores, es indudable que si se utiliza combinadamente, se hará una gran economía de la cantidad de corriente necesaria para la protección. Aparte de esto, y si tomamos en cuenta que solo es necesario un equipo, tanto para proveer de energía como para ejercer el control de la protección de un tramo o de un oleoducto completo (lo que no sucede con los ánodos galvánicos o de sacrificio) su aplicación es recomendable por la economía en materiales y equipos que representa.

Cuando se utiliza este sistema de protección, la ener

...../...

gía proviene de una fuente externa y no de los ánodos, como sucedía en la Alternativa I, y en consecuencia los ánodos empleados esta vez no se consumen tan rápidamente, por lo cual no será necesaria una capacidad mayor, por ánodo, ni serán tan numerosos como en el caso anterior, puesto que la potencia del equipo de control y suministro de energía abastece por si solo los requerimientos de la instalación.

Además, la provisión de energía puede proceder de diferentes fuentes: generadores de c.c. instalados en el sitio, corriente alterna rectificada o empleando motores universales. Es lógico que al escoger una u otra fuente, el factor primordial será la estimación del costo de la energía en el lugar requerido.

La operación de estos sistemas requiere de menos labor, puesto que si es necesario efectuar chequeos, mediciones o ajustes para el control de la protección solo es necesaria la observación o manipuleo de la estación de control y alimentación. Habrá veces que los requerimientos de una instalación obliguen al uso combinado de los dos sistemas de protección, pero en nuestro caso vamos a analizarlos aisladamente para luego decidir qué es lo más adecuado técnica y económicamente.

...../...

Para iniciar el diseño del sistema de protección por esta alternativa, es fundamental en este caso, guiarnos por los criterios empleados por Compañías que han utilizado este sistema en diversas oportunidades y condiciones y han obtenido óptimos resultados, sobre todo en lo que respecta a duración, dimensionamiento y costo de los ánodos auxiliares. Se ha concluido de esta manera, que la protección mediante corriente impresa resulta en su aplicación práctica mucho más ventajosa desde todo punto de vista que el de los ánodos de sacrificio, por lo que su empleo se recomienda en la mayoría de los casos posibles.

Como en el caso anterior, es necesario conocer de antemano las características de los elementos que intervienen en el diseño del sistema de protección por corriente impresa, para estar en condiciones de escojer los más adecuados a los requerimientos del problema.

Como ya habíamos mencionado, en el Cap. I., Fig. 6 para la protección mediante este método, se necesita una fuente de abastecimiento de energía, cables para conexión entre elementos, ánodos auxiliares y accesorios. Vamos a detallar los materiales utilizados normalmente como ánodos auxiliares:

...../...

MATERIALES PARA ANODOS AUXILIARES (CORRIENTE IMPRESA) .-

Cualquier material conductor de corriente podría ser empleado como ánodo, pero la razón fundamental es la economía, que determina que el material a usarse será aquel que represente menor costo frente a resultados satisfactorios de operación. Como los ánodos son los que se consumen al proteger una estructura metálica, lo ideal será que el material seleccionado pueda combinar un consumo relativamente bajo y un costo reducido. El hierro puro por -- ejemplo (que es menos noble que acero) tiene un rango de pérdida - de peso de aproximadamente 9 Kg/amp transmitido a través del ánodo; esto hace que el hierro no sea un material adecuado por su costo - excesivo, si lo comparamos con el acero de deshecho tuberfa de hie rro de deshecho, bloques de grafito y aleaciones especiales, que - resultan mucho más económicos.

La Shell, utiliza una Tabla comparativa de consumo - de ciertos materiales comunmente empleados como ánodos y que nos → servirá para escoger el adecuado a nuestras circunstancias.

MATERIAL	RANGO DE CONSUMO (pérdida de peso)
Tuberfa de acero de desecho,	
rieles, etc	6.6 a 9 Kg/amp-año
Hierro fundido, tuberfas viejas etc.	0,9 a 9 " " "
/..

MATERIAL	RANGO DE CONSUMO (pérdida de peso)
Bloques de grafito	hasta 0,9 Kg/amp-año

Acero de deshecho :

Tiene la ventaja de que obtenible en cantidades y a un costo bajo. Para densidades superficiales de corriente normalmente empleadas para protección, este material cuando viene en forma de rieles viejos, tubería vieja o secciones estructurales, adquiere una relación uniforme que es proporcional a la corriente. Sin embargo, ya que este tipo de material se consigue usualmente en secciones largas y comparativamente delgadas y cuando estas tienen que ser enterradas en el suelo pueden interceptar o atravesar diversos estratos de suelo que tienen distinta resistividad se consumen rápidamente, llegándose a interrumpir la continuidad del ánodo y dejando en consecuencia desconectado el ánodo del sistema.

Hierro fundido de deshecho, tuberías viejas etc. - Por lo general -

las piezas de hierro fundido tienen la ventaja de tener una sección transversal relativamente delgada, de modo que una sola pieza podría estar ubicada en suelos de una resistividad más o menos uniforme. Además si a estas piezas se las reviste de grafito, éste último se consume antes que el hierro, provocando en consecuencia una duración -

...../...

más larga de estos ánodos y reduciendo su rango de consumo.

Grafito .- Este material ha ido incrementando su empleo debido a que tienen un rango bajo de consumo, y aunque resulta un poco más caro que el hierro fundido, se lo emplea más comunmente - pues su renovación o recambio es menos frecuente que el hierro.

Vienen generalmente de forma cilíndrica e impregnados de ceras o resinas que reducen las posibilidades de fractura o desintegración conforme el ánodo se va consumiendo, traen además incorporados terminales y cables para conexión, pues su instalación es delicada debido a su fragilidad. Las dimensiones más comunes de fabricación y disponibles en el mercado varían entre 65mm de diámetro por 760mm de longitud hasta 150mm de diámetro por 1830mm de longitud.

Para la instalación en suelo, los ánodos de grafito son regularmente impregnados de cera o resina con relleno de materiales carbonosos como el cisco de coke. Con estas características se pueden conseguir densidades superficiales de corriente de hasta 11 Amp/m². lo que hace que con estas corrientes de salida el rango de consumo sea extremadamente bajo. Si se elevan demasiado los rangos de salida se deteriora la superficie debido a la formación de gas y esto incide en el aumento del rango de consumo. Sin

...../..

embargo se puede elevar el rango de salida de corriente en forma temporal, para polarizar la estructura a proteger y sin provocar un deterioro mayor del ánodo.

Debido a su fragilidad, se debe tener mucho cuidado en su manipuleo, sea en el transporte, almacenamiento o instalación y cuando es necesario que los ánodos de este material sean grandes en tamaño, se deberá instalarlos con un recubrimiento de protección mecánica para evitar que con la consolidación del terreno luego de enterrados, se fracturen.

Para el cálculo, de la resistencia en el suelo de un ánodo de grafito standard de 76mm de diámetro por 1520mm de long. con relleno de cisco de coke, el Corrosion Handbook, ha establecido que si se entierran éstos en huecos de 8" de diámetro por 3m de profundidad, es necesario multiplicar la resistividad promedio del suelo en que se asientan por el factor 0.002.

De igual modo, y de la misma fuente, para calcular la resistencia efectiva de un grupo de ánodos espaciados entre sí 6m., se divide la resistencia de un ánodo por la raíz cuadrada del número de ánodos de grafito, será igual a la $\frac{1}{2}$ de la resistencia de uno solo.

...../..

Este procedimiento de cálculo es aceptado por la mayoría de investigadores y Empresas que emplean este sistema, de modo que lo adoptaremos en nuestro caso.

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION POR CORRIENTE IMPRESA .- Una vez-

que hemos determinado las características de los diversos materiales utilizados en la industria petrolera para ánodos auxiliares del sistema de protección catódica mediante la corriente impresa, y definidas las particularidades y criterios a adoptar para el diseño, podemos proceder al cálculo y diseño del sistema para proteger el tramo comprendido entre el Km. 205 y 210 del Oleoducto.

Puesto que conocemos ya, la cantidad de corriente necesaria para la protección de este tramo y que la hemos determinado en 5.2 amp. podemos establecer un circuito simplificado de c.c. en el sitio-problema.

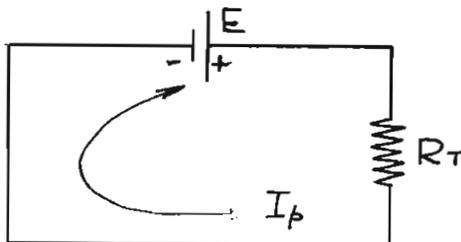


Fig. 16

...../....

en el cual:

E = tensión de alimentación en C.C., necesaria para imprimir una corriente $I_p = 5.2$ A.

I_p = Corriente protectora

R_t = Resistencia total del circuito, que comprende: resistencia del ánodo o ánodos requeridos, resistencia de los conductores de alimentación y subalimentación, resistencial longitudinal de la tubería. Cada una de estas resistencias por supuesto involucrarán a otras correspondientes y para su cálculo se tiene siempre en cuenta la resistividad promedio del tramo.

Los valores o variables a determinar son:

E = Voltaje nominal requerido para la protección

V = Voltaje real de salida del equipo alimentador.

I_m = Corriente de protección para 1 mt. lineal de tubería.

N = Número de ánodos

R_1 = Resistencia de un ánodo de grafito de 76mm. de diámetro por 1520,mm de longitud.

R_{eq} = Resistencia equivalente de un banco de ánodos.

R_g = Resistencia de la estructura en el tramo a proteger.

R_t = Resistencia total del circuito.

Los valores conocidos o deducibles de tablas son:

I_a = Corriente que circula por un ánodo de grafito de 76 mm de diámetro

...../..

metro por 1520mm de longitud, o capacidad de corriente = 0.8 amp (Pet. Transp. Handbook)

L = Longitud total del tramo = 5000 mts.

l = Longitud del cable de alimentación entre fuente de energía y nodo = 100 mts.

l₁ = Longitud del cable subalimentador entre terminal negativo e equipo de alimentación tubería = 30 mts.

= Resistividad promedio en el tramo = $(3140 + 2100 + 4070)/3 = 3.103 \Omega \text{cm}$

R_a = Resistencia del acero = 0.01609 Ω/km .

R_c = Resistencia del cable de alimentación, normalmente el empleado para una corriente I_p = 5.2 amp y para protección catódica es el N^o 4 AWG, aislamiento PVC de cobre, cuya resistencia es $0.815 \Omega/\text{km} = r_c$

R_s = Resistencia del cable subalimentador, asimismo es de norma el emplear cable N^o 14 AWG de cobre aislado con PVC, con resistencia r_s = 8,285 Ω/km .

I_p = 5.2 Amp.

CALCULO DE LAS VARIABLES DEL CIRCUITO DE C.C.

Corriente de protección por metro lineal de oleoducto:

$$I_m = I_p/L = 5.2 \text{ Amp}/5000 \text{ mts} = 10.4 \times 10^{-4} \text{ Amp/m.}$$

Puesto que se requiere 5.2 amp. para protección de to

...../..

do el tramo y como por un ánodo de grafito circula una corriente i igual a $I_a = 0.8$ amp necesitaremos:

$$N = I_p / I_a = 5.2 / 0.8 \text{ Amp/amp} = 6.5 \text{ \u00c1nodos}$$

tomaremos:

$$N = 7 \text{ \u00c1nodos de } 76\text{mm de } \phi \times 1.520\text{mm long.}$$

Para el c\u00e1lculo de R_1 nos valemos de la expresi\u00f3n:

$$R_1 = \rho / 2\pi L \ln(4L/ae)$$

en la cual:

R = Resistencia de un solo \u00c1nodo

ρ = Resistividad promedio = 3.103 Ω cm.

L = Longitud del \u00c1nodo en cm. = 152 cm.

a = Radio del \u00c1nodo en cm. = 3.8 cm.

e = Base de los logaritmos naturales = 2.71828..

Esta expresi\u00f3n la emplea el Petroleum Transportation Handbook, -- 1963 P\u00e1g. 9-37

Luego: $R = 3.103 / 6.28 \times 152 \ln(4 \times 152 / 3.8 \times 2.7182)$

$$R_1 = 13.44$$

Para el c\u00e1lculo de la resistencia equivalente del grupo de \u00c1nodos a usar, y de acuerdo al criterio empleado por el Corrosion Handbook, mencionado antes:

$$R_{eq} = R_1 / \sqrt{N}$$

$$R_{eq} = 13.44 / \sqrt{7}$$

$$R_{eq} = 5.08$$

...../..

Para el cálculo de la resistencia del conductor de alimentación, -
que se ha decidido tendrá una longitud $l = 100$ mts. y puesto que -
se ha determinado en tablas el valor de la resistencia por Km. del
cable Nº 4 AWG = $0.815 \Omega/\text{Km}$

$$R_C = r_C \times l$$
$$R_C = 0.815 \Omega/\text{km} \times 0.1 \text{ Km} = 0.0815$$

Con este valor podemos calcular la caída de tensión a lo largo del-
conductor de alimentación y que será igual a :

$$V_C = R_C \times I_P = 0.0815 \times 5.2 = 0.423 \text{ V}$$

más tarde veremos si esta caída de tensión dentro del 3% máximo --
permisible estipulado por las normas pertinentes.

De igual manera calculamos la resistencia del cable subalimentador
y que es:

$$R_S = r_S \times l$$
$$R_S = 8,285 \times 0.010 = 0.0828$$

que nos procará una caída de tensión casi igual a la que provoca R_C
La resistencia total entre alimentador y grupo de ájodos será :

$$R_{C-a} = R_C + R_1 / N$$
$$R_{C-a} = 0.0815 + 1344/7 = 2,002$$

La resistencia de la estructura, en el tramo de 5Km, es igual a :

$$R_g = r_g \times L$$

en la que

$$r_g = \text{Resistividad del oleoducto} = R_g / S ; S = \text{sección trans.tubo.}$$
$$S = \pi/4 (D_e^2 - D_i^2) = 0.785 (84.41) = 66.26 \text{ cm}^2.$$

...../...

luego :

$$r_g = \frac{0.150 \text{ } \Omega/\text{m}/\text{mm}^2}{66.26 \times 10^2 \text{ mm}^2} = 0.0000226 \text{ } \Omega/\text{m}$$

puesto que:

$$R_g = r_g \times L$$

$$R_g = 0.0000226 \times 5.000 \text{ } \Omega/\text{m} \times \text{m}$$

$$R_g = 0.113 \text{ ohmios}$$

Resumiendo a un diagrama eléctrico, los parámetros que disponemos-
ahora:

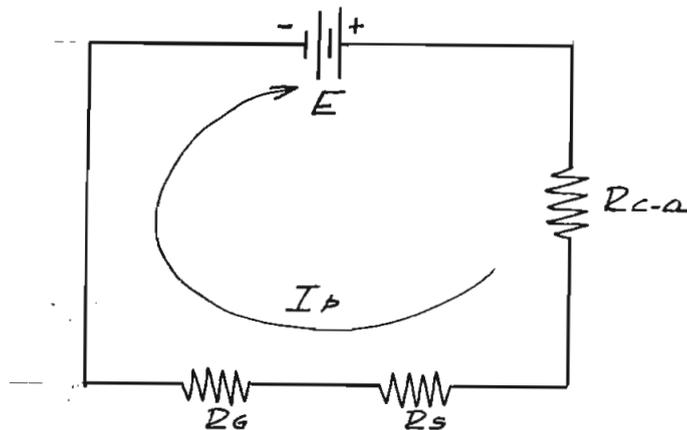


Fig. 17.

$$R_t = R_{c-a} + R_g + R_s$$

$$R_t = 2,002 + 0.113 + 0.0828$$

$$R_t = 2,1986 \text{ ohmios.}$$

...../....

En el circuito de la Fig. 17

$$E = I_p \times R_t$$

$$E = 5.2 \times 2.1986 = 11.43 \text{ V. dc.}$$

Este sería el voltaje nominal necesario para imprimir una corriente de 5.2 amperios en un circuito constituido por resistencias de la tubería, conductores, suelo, ánodos; pero puesto que el equipo que suministrará este voltaje tendrá una eficiencia determinada de operación, referida a las potencias de entrada en CA, y salida en C.C. para determinar el voltaje real, tomaremos en cuenta la eficiencia del equipo seleccionado. Para el efecto, emplearemos los datos sobre equipos transformadores-rectificadores manufacturados por la Standard Telephone and Cables que es una de las fábricas más conocidas como proveedoras de equipos de protección catódica, y de la cual anexamos una Tabla sobre equipos rectificadores, para de ella escoger el más adecuado a nuestro requerimientos. Ver Fig. 18

DATOS BASICOS Y RANGOS DE OPERACION DE EQUIPOS RECTIFICADORES PARA-

PROTECCION CATODICA

Alimentación: 220/110 V. AC - monofásicos, 50/60c, Tipos C.P.6 a C.P. 16

...../...

TIPO N°	Control Voltaje salida	Rango de		Corriente desalida Amps.	Dimensiones			Peso (Kg)	
		salida	Volts		A	P	H		
C.P.6	63 pasos	7.0/48		25	63	86	111	272	409
C.P.8	63 "	1.8/12		50	63	86	111	272	409
C.P.10	63 "	1.8/12		50	63	86	99	227	340
C.P.12	63 "	3.5/24		10	39	42	61	91	136
C.P.14	15 "	1.8/12		10	34	46	43	68	91
C.P.16	15 "	0.9/6		10	34	46	43	68	91
C.P.15	15 "	1.8/12		5	34	46	43	68	91

Todos estos valores y rangos son aplicables a equipos que van a operar a una temperatura ambiente promedio de 30°C. Cuando la temperatura es más alta, hay que especificar en las requisiciones de material.

...../....

GRAFICA PARA LA DETERMINACION DE LA EFICIENCIA PROMEDIO DE LOS EQUI

POS C.P.6 a C.P. 16

Standar Telephone and Cables Ltd.

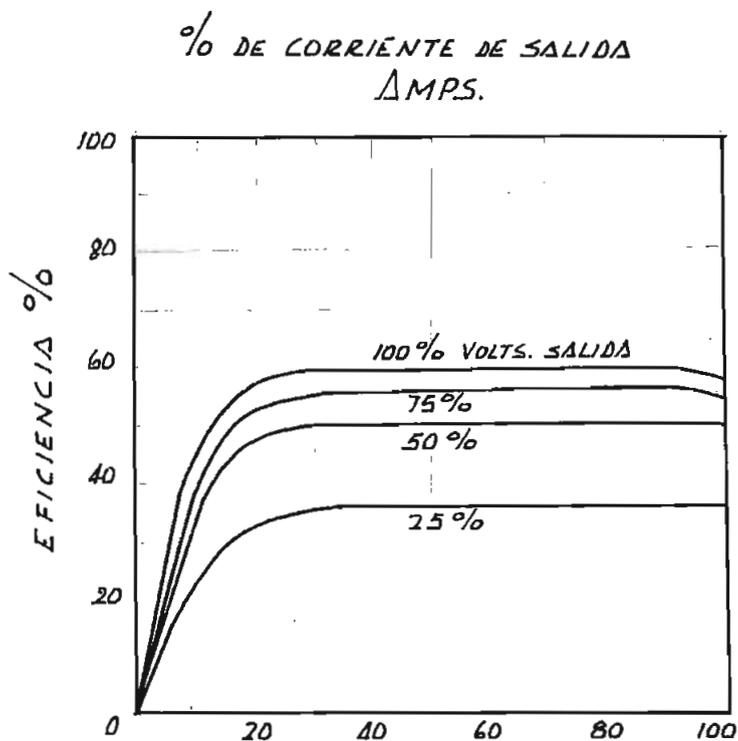


Fig. 18

Para la utilización del gráfico de eficiencias, tenemos primero que escojer el equipo que consideremos el más adecuado a los requerimientos del sistema elegido.

/...../...

La corriente de salida que precisamos es de 5.2 Amp. y la tensión 11.43 V, el equipo según la Tabla que más conviene al sistema es el C.P.12, cuyas características son:

Entrada: 220/110 V. - 50/60 C. - monofásico

Salida : 3.5/24 V dc. - 10 amp de salida, 63 pasos de regulación - de voltaje, temperatura de operación 30° C.

Estableciendo la relación de porcentaje de voltaje de salida, que en nuestro caso es:

$$\% = 11.43/24 \times 100 = .48\%$$

y de corrientes

$$\% = 5.2/10 \times 100 = 52\%$$

determinamos la eficiencia que tendrá el equipo en el sistema, y que será igual a:

$$e = 48\%$$

Con este valor de eficiencia podemos determinar el voltaje real de salida que precisamos obtener del equipo rectificador, para la operación del sistema, y que será:

$$V = E/e = 11.43/0.48 = 22.6 \text{ V.}$$

Todos estos cálculos desarrollados, como se mencionó ya, son para proteger el tramo de 5Km, comprendido entre los Km. 205 a 210 y que nos servirá para establecer comparación con el sistema de ánodos de sacrificio en el mismo tramo. Para los tramos entre los Km.

...../...

196-198 y Km. 226-227, se calculará la tensión de alimentación y la corriente de protección. Ver anexo I.

Para el cálculo del equipo rectificador para el tramo completo (35 Km) solo será necesario establecer ciertas modificaciones en los cálculos, sirviéndonos una gran mayoría de los datos computados anteriormente.

Calculemos los valores indispensables para el diseño:

PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA DEL TRAMO COMPLETO -35Km.

La corriente de protección para 35.000 mts era: $I_p = 36.8$ Amp.

Luego el número de ánodos esta vez será: $N = I_p / I_a$

$$N = 36.8 / 0.8 = 46 \text{ ánodos}$$

R_1 es igual que en el caso anterior: $R_1 = 13.44$ ohmios.

...../...

ANEXO I

Cálculo de la corriente para los tramos 1 y 3 que están comprendidos entre los Km. 196-198 y 226-227.

L = 2.000 mts.

$$I_p \text{ (para 2000 mts)} = \frac{36.8 \times 2.000}{35.000} = 2.08 \text{ Amp.}$$

puesto que $R_t = R_g + R_s + R_{c-a}$

y $R_s = 0,0828$

$$r_g = 0,0000226$$

$$R_c = 0.0815$$

$$R_g = R_1/N ; R_1 = 13.44$$

$$N = 3$$

$$R_{c-a} = \frac{13.44}{3} = 4.48 = R_c + R_1/N$$

$$R_g = r_g \times 2.000 = 0,0000226 \times 2.000 = 0,0452$$

luego:

$$R_t = 0,0452 + 0,0828 + 4,48 = 4,6080$$

$$E = I_p \times R_t$$

$$E = 2,08 \times 4,60 = 9,56 \text{ V}$$

Si aceptamos la misma eficiencia que para el caso del tramo de 5 Km. tendremos:

$$V = 9.56/0,48 = 19.8 \text{ V}$$

Luego podemos adoptar el equipo C.P.12 similar al anterior.

...../..

La resistencia equivalente será:

$$R_{eq} = R_1 / \sqrt{N}$$

$$R_{eq} = 13.44 / \sqrt{46} = 1.95 \text{ ohmios}$$

igual valor que anterior. $R_c = 0.0815$ ohmios

$$R_{c-a} = 0.0815 + 13.44/46$$

$$R_{c-a} = 0.3745 \text{ ohmios}$$

R_s igual que antes: $R_s = 0.0828$ ohmios

ahora tenemos que : $R_g = r_g \times 35.000 \text{ mts.}$

$$R_g = 0.0000226 \times 35.000 = 0.791 \text{ ohmios}$$

y la resistencia total del circuito será ahora :

$$R_T = 0.0828 + 0.3755 + 0.791$$

$$R_T = 1.2493 \text{ ohmios}$$

en forma similar que el caso anterior, tenemos ahora que:

$$E = I_p \times R_T$$

$$E = 36.1 \times 1.2493 = 46,0 \text{ V.}$$

Si hacemos las mismas consideraciones respecto a la elección del equipo, y seleccionamos el Tipo C.P.3, cuyas características son:

Alimentación - entrada AC: 220/110 V. 50/60 c, monofásicos

salida en DC: rango de salida: 7.0/48V, 50 amp. de capacidad

Y para determinar su eficiencia procedemos de manera similar que el caso anterior, salvo que ahora empleamos otro tipo de gráfico para el cálculo de la eficiencia y proporcionado por el mismo fabricante, para este equipo tendremos:

...../...

porcentaje de tensiones: $\% = 46,0/48 \times 100 = 96\%$

porcentaje de corrientes : $\% = 36.8/50 \times 100 = 73.8\%$

Según el gráfico correspondiente, obtenemos una eficiencia de operación de :

$$e = 76\%$$

Ahora, el voltaje real de operación, con esta eficiencia calculada será;

$$V = E/e$$

$$V = 46.0/0.76 = 60.5 \text{ V.}$$

Lo cual significa que el equipo seleccionado no cubriría el requerimiento de voltaje necesario mínimo de operación, por lo cual será indispensable especificar al fabricante los datos de diseño, en este caso, lo mínimo que se podría especificar sería una salida regulable desde 7.0 volts. Dc hasta 72 Vdc. con igual número de pasos de regulación que el equipo anterior. Con este equipo nos variará desde luego la eficiencia que ahora sería:

$$\% \text{ voltajes} = 46.0/72 \times 100 = 64\%$$

con este valor, y por tanteo de la curva de eficiencias conseguimos una eficiencia aproximada del orden:

$$e = 73\%$$

con lo que ahora el voltaje real de operación sería :

$$V = E/e = 46.0/0.73 = 63 \text{ V.}$$

Con todos estos datos, podemos ahora especificar los equipos y ma-

...../....

teriales necesarios para la protección catódica mediante corriente impresa, sistema de operación del equipo, instalación y precauciones, y finalmente establecer el costo tanto en la protección del tramo de 5 Km, como del tramo total y establecer comparaciones técnico-económicas con el sistema de protección mediante ánodos de sacrificio, para concluir cual de ellos es el más aconsejable emplear en el Oleoducto Ecuatoriano.

REQUERIMIENTOS Y CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES A EMPLEAR EN LA
INSTALACION DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA MEDIANTE CORRIENTE-

IMPRESA

Equipo de Alimentación :

Los más comunmente empleados para proveer de energía a un sistema de protección catódica, son los transformadores-rectificadores, diseñados para diferentes rangos de potencias y alimentados desde una fuente de corriente alterna,. Comercialmente vienen diseñados para rangos desde 3 a 200 Amp de salida o más, con tensiones asimismo de salida tan bajas de C.C. como 1.4 como tan altas de 112 V. DC. La construcción de estos equipos es para operación tanto trifásica como monofásica, con tensiones standard de alimentación, desde 115 a 440 V. CA.

...../...

En casos especiales, que dependen del diseño del sistema, se puede solicitar al fabricante su construcción, ajustada a las especificaciones del proyecto; aunque esto es muy esporádico, se puede operar un sistema a frecuencias no standard.

Estas unidades, tienen un sistema de enfriamiento, sea por aceite o por aire y vienen equipadas de sistema de protección, constituido por disyuntores o seccionadores (fusibles en pequeñas unidades) tanto para el lado de alimentación como para la salida; un sistema de control que consta de un amperímetro, voltímetro, tapa para regulación del voltaje y un switch general.

Ocasionalmente y si el diseño lo requiere, puede venir acompañado de pararrayos para operación interior o a la intemperie, dispositivos automáticos para regulación de la carga (reducción) en caso de sobrecalentamiento de la unidad, termómetros, indicadores de nivel de aceite, etc.

Las eficiencias de trabajo, se conservan en un rango del 60% para unidades monofásicas y del 80% para unidades trifásicas, sin notarse una declinación de estos valores hasta con un 50% de sobrecarga.

Anodos: El material más común empleado como ánodo en el método de

corriente impresa es el grafito, el cual viene generalmente impregnado de cera o resina para prevenir la entrada de mezclas o soluciones a la conexión metálica, pues podrían provocar una descarga rápida de corriente lo que redundaría en un consumo violento del ánodo.

Estos ánodos, se los fabrica normalmente de forma cilíndrica de dimensiones variables entre los 5 cm a 15 cm de diámetro por 150 cm. de largo; los de 2.5 cm de ϕ son utilizados con frecuencia en agua dulce, de 7.5 cm., para agua salada y de 5 cm. a 15 cm. son utilizados en suelos.

Para evitar un consumo rápido y prevenir una corriente alta de salida, se los instala por lo general en una columna rellena con hulla o carbón molidos; la altura de la columna y ϕ de la columna está en el rango de 20 cm. de ϕ por 2M de profundidad. El objetivo principal a más del mencionado, es disminuir el ataque del ánodo por la autocorrosión y formar un medio poroso por el cual puedan disiparse los gases formados.

Se pueden emplear también ánodos inertes de metales como el platino y el titanio o aleaciones de éstos, pero sólo tienen aplicación cuando se va a proteger una estructura sumergida en

...../...

agua o en electrolitos especiales, mas no en el suelo. Lo mismo - se puede decir del plomo el cual actúa como ánodo inerte bajo ciertas condiciones, aunque generalmente es atacado mucho por la corrosión.

Cables y conexiones : El cable de cobre es el empleado en la mayoría de las estaciones rectificadoras, aun-- que se puede emplear indiferentemente el aluminio. El aislamiento, especialmente para las secciones que van enterradas debe ser el - más adecuado; el polietileno es el más común, aunque este a veces es empleado con una cubierta exterior de cloruro de polivinilo. - Las conexiones deben ser hechas con conectores mecánicos o empleando algún proceso térmico. Para el aluminio se debe emplear únicamente conectores mecánicos, incluyendo conexiones mecánicas o hi--dráulicas a presión.

En el lado del ánodo contiguo al rectificador, todas las conexiones deben ser aisladas contra el contacto con el suelo, puesto que cualquier descarga de corriente a través de una conexión defectuosa incidirá en la destrucción rápida del cable y de la conexión.

En el lado del cátodo todas estas precauciones se tor

...../...

nan innecesarias; se puede emplear cable desnudo sin peligro, salvo la pérdida de energía que se involucra en esta protección.

Dispositivos auxiliares : Para un correcto y completo funcionamiento y supervisión de un sistema de protección catódica, son indispensables y útiles ciertos dispositivos auxiliares, entre los cuales se puede mencionar :

Puntos de prueba : que se deben instalar en cada cruce de vías y en número suficiente a fin de que se puedan tomar lecturas de potenciales a lo largo de la estructura protegida y pueda conseguirse periódicamente un perfil de las mismas. Esto contribuye especialmente a tener a la mano los datos esenciales en caso de producirse problemas de interferencia.

Juntas aisladas : Son esenciales para aislar el sistema protegido de otros sistemas, tuberías, oleoductos, estaciones de compresión y descompresión, sistemas de distribución de energía, etc. Son útiles también aunque no necesarios para seccionar el sistema. Cualquier aislamiento instalado con esta finalidad debe ser cortocircuitado mediante una (bond) junta accesible que permita el funcionamiento de la protección. En caso de fallas o problemas, las mediciones tomadas abriendo estas juntas, pueden ser muy útiles para localizar contactos indebidos o cortocir-

...../...

cuitos en las líneas.

Soportes de camisa y sellos aislantes: Son necesarios para aislar eléctricamente la línea de las camisas empleadas para los cruces de vías ferroviarias o carreteras. Como estas camisas son por lo general de acero desnudo y aunque la corriente protectora sea la suficiente, siempre habrá conexión metálica entre la línea y la camisa, por lo cual se deben emplear sellos aislantes. En caso de haberlos previsto en el diseño, se llena el espacio entre camisa y línea de un electrolito común, que es lo que se hace generalmente en la práctica.

Conectores : Pueden ir conectados entre las conexiones mecánicas tales como acoplamientos tipo manga, a fin de integrar la línea dentro de una estructura continua eléctricamente. Estos pueden ser de acero o cobre y son por lo general de gran sección transversal de modo que introduzcan muy poca resistencia en la línea. Los conectores entre líneas, sean estas paralelas o perpendiculares entre sí son generalmente de cobre de pequeño tamaño y pueden ocasionalmente tener una resistencia inserta en el circuito a fin de controlar el flujo de corriente entre dos líneas en un determinado valor.

Estaciones monitoras : Consisten de instrumentos de medición de

instalación permanente; Voltímetros encerrados en estructuras a -- prueba de intemperie o para interiores si es posible. Mediante es tos instrumentos, se puede tomar lecturas de potencial directas de la línea, para lo cual deberá ir conectado entre la línea un punto de referencia, que por lo general puede ser este último un pequeño ánodo de zinc de unas 5 lbs, enterrado a la misma profundidad o - más bajo que la línea y en una funda especial de relleno de betonita. Es de suponer que estas lecturas de potencial tomadas de esta manera no serán iguales a las que se obtendrían con un electrodo - de referencia standard (cobre/sulfato de cobre), pero tendrá una - constante de corrección, que puede ir marcada en el instrumento y que se deberá tomar en cuenta al efectuar las mediciones de poten- cial.

Antes de proseguir con el cálculo del costo del siste- ma de protección detallado en la Alternativa II, es muy necesari- o aclarar ciertos conceptos de diseño y de instalación de siste- mas de protección. Estos se refieren a las Bridas Aislantes de - fundamental aplicación en todo el sistema de protección catódica - que no tiene necesariamente que proteger toda la longitud de una - estructura. De igual manera las juntas resistentes.

BRIDAS AISLANTES .-

...../..

La protección catódica por lo general es aplicada a aquellas secciones de un oleoducto que están sometidas a una acción corrosiva severa debido a las características y resistividades bajas del suelo en que reposan y no en las que presentan características benignas,. Si se aplicara protección catódica indiferentemente a todo un oleoducto sin tomar en cuenta lo mencionado arriba, esto incidiría en la cantidad de corriente necesaria para proteger toda la estructura, lo cual pues es económicamente impracticable, ya que se sobredimensionarían los equipos proveedores de energía - en caso de la corriente impresa y en caso de los ánodos de sacrificio se requerirían en número excesivo y por demás costoso.

En tales circunstancias, aquellas partes que se asientan en suelos no corrosivos y en consecuencia no necesitan de protección catódica deberían ser aisladas eléctricamente de las secciones que si la necesitan, mediante el empleo de bridas aislantes. De esta forma el drenaje de corriente hacia aquellas partes de la línea que no requieren de protección sería eliminado, permitiendo en consecuencia una reducción en la dimensión de la corriente, que se traduce en reducción de los equipos alimentadores, o ánodos de sacrificio y al final en disminución de los costos generales.

Para líneas en las que la presión de trabajo es elevada (caso del oleoducto ecuatoriano) y en otras circunstancias en

...../...

las que su uso es impracticable, se debe utilizar las juntas aislantes que se detallan en la Fig. 20.L

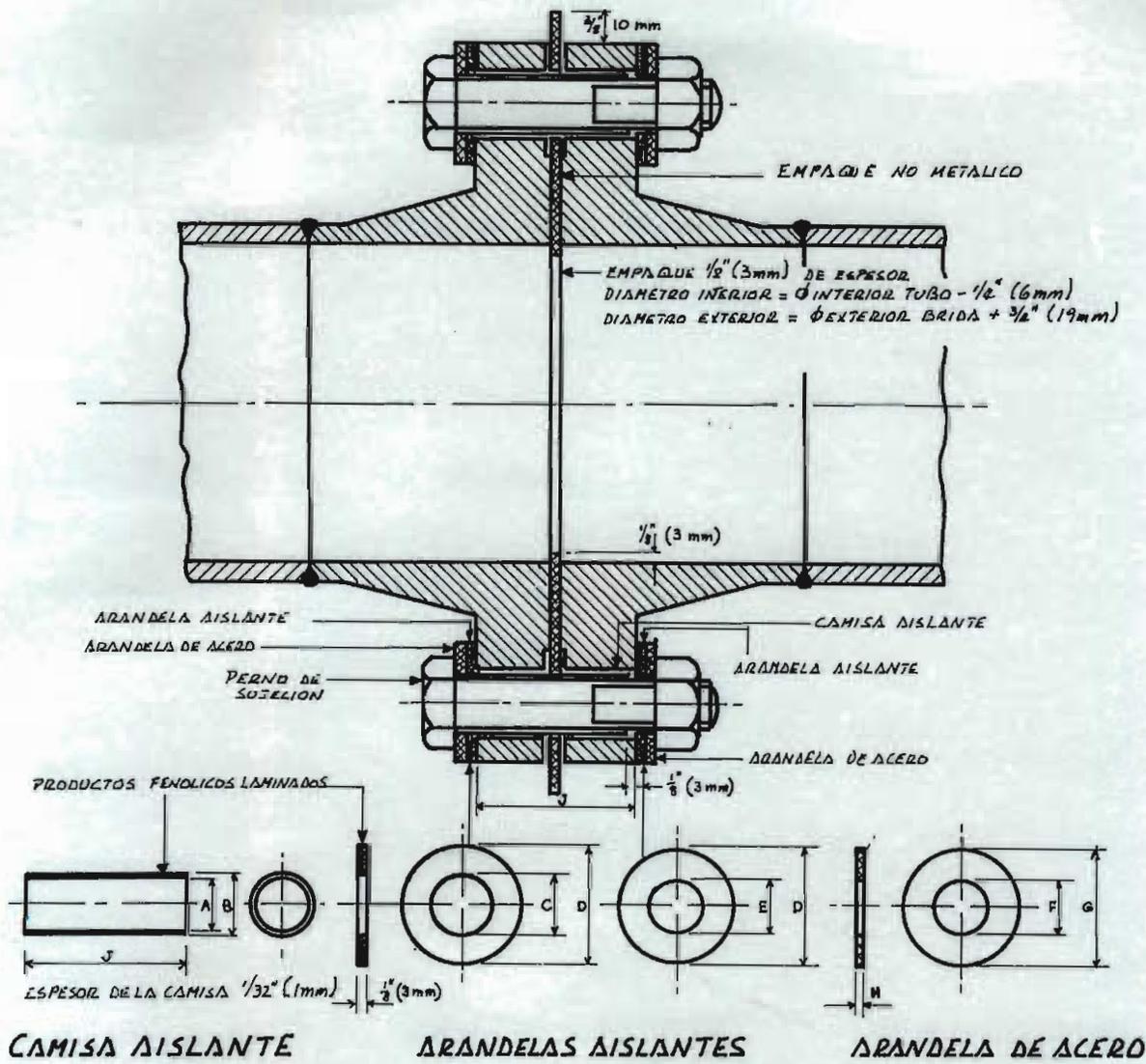
En determinadas áreas en donde quedan expuestas las bridas aislantes y se tiene que trabajar en zonas cercanas o próximas a ellas, se debe protegerlas mediante cubiertas adecuadas a fin de evitar el riesgo de provocar chispas por rozamiento o accidentalmente cortocircuitar la resistencia por ejemplo al depositar herramientas sobre las bridas.

Para una comprensión mejor de lo antedicho se incluye la Fig. 19, que describe gráficamente la brida aislante típica.
L.29

JUNTAS RESISTENTES :

El uso de las bridas aislantes generalmente eliminará el flujo de corriente hacia la parte no protegida de la línea, pero en determinadas circunstancias corrientes parásitas del sistema de protección pueden penetrar en la sección aislada por un determinado punto y salir por otro, induciendo en consecuencia una severa corrosión en éste último punto. Para prevenir esto, una junta-resistente es conectado a través de la brida aislante, permi----

...../...



DIAMETRO DE PERNOS	DIMENSIONES EN PULGADAS								DIMENSIONES EN MILIMETROS												
	DIAMETRO	CAMISAS		ARANDELAS AISLANTES			ARAND. ACERO			DIAMETRO MINIMO	DIAMETRO	CAMISAS		ARANDELA AISLANTES			ARAND. ACERO			DIAMETRO DE MINIMO	
		A	B	C	D	E	F	G	H			A	B	C	D	E	F	G	H		
1/2	3/4	9/16	5/8	3/16	1 1/8	7/16	9/16	1/2	1 1/8	0-104	1 3/16	19	14	16	17	29	16	14	29	25	30
5/8	7/8	1 1/16	3/4	3/16	1 3/8	1 1/8	1 1/8	1/2	1 3/8	0-128	1 7/16	22	17	19	20	35	17	17	35	3	37
3/4	1	1 3/16	7/8	3/16	1 5/8	1 1/8	1 1/8	1/2	1 5/8	0-128	1 11/16	25	21	22	23	41	21	21	41	3	43
7/8	1 1/8	1 5/16	1	1/16	1 7/8	1 1/8	1 1/8	1/2	1 7/8	0-160	1 15/16	29	24	25	26	48	24	24	48	4	49
1	1 1/4	1 1/2	1 1/8	1/16	2 1/8	1 1/8	1 1/8	1/2	2 1/8	0-176	2 3/16	32	27	29	29	54	27	27	54	5	56
1 1/8	1 3/8	1 7/16	1 1/8	1/16	2 3/8	1 3/8	1 3/8	1/2	2 3/8	0-192	2 7/16	35	30	32	33	60	30	30	60	5	62
1 1/4	1 1/2	1 5/8	1 3/8	1/16	2 5/8	1 3/8	1 3/8	1/2	2 5/8	0-192	2 11/16	38	33	35	36	67	33	33	67	5	68
1 1/2	1 3/4	1 3/4	1 1/2	1/16	3 1/8	1 3/8	1 3/8	1/2	3 1/8	0-192	3 7/16	44	40	41	42	79	40	40	79	5	81

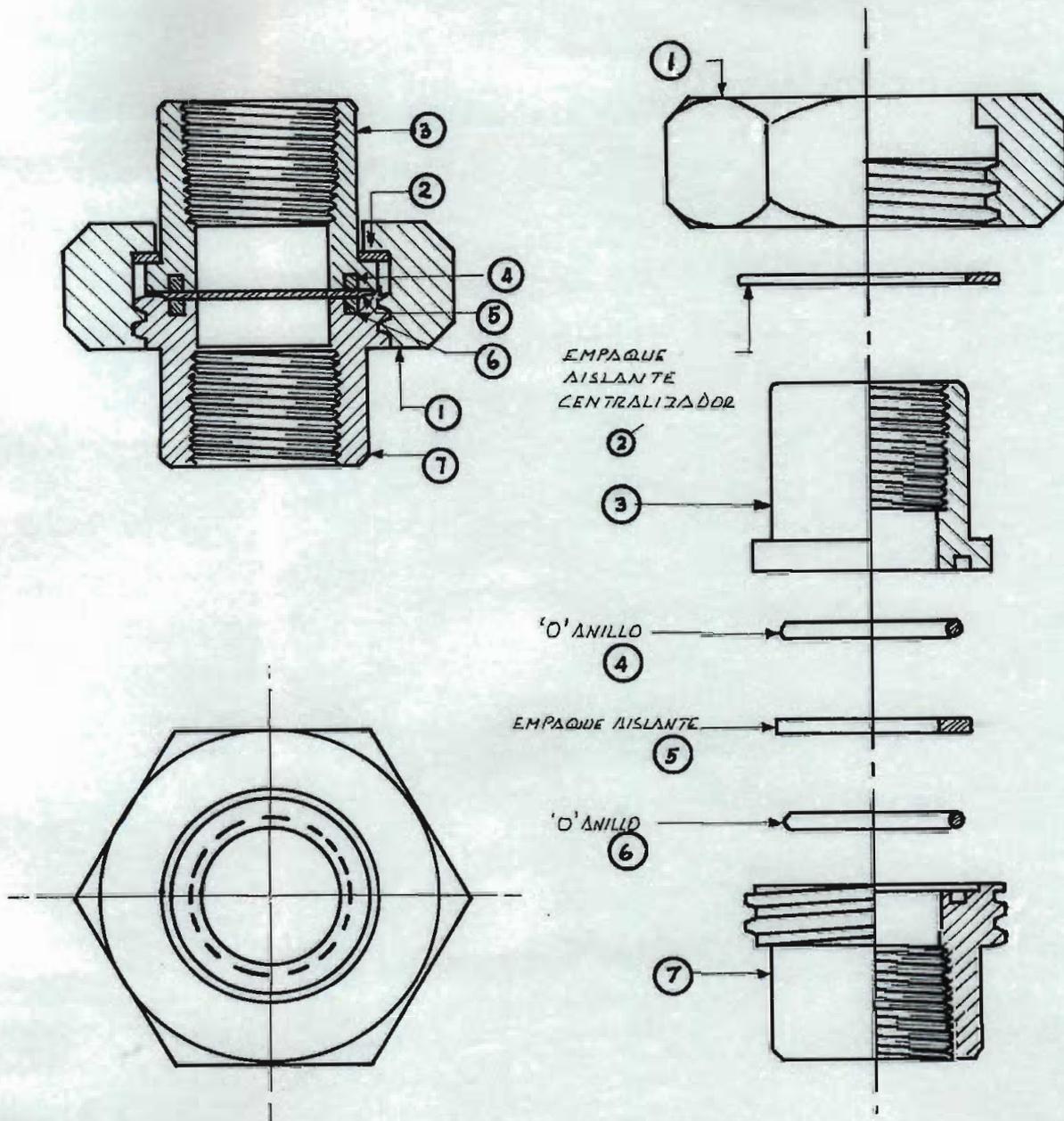
DISEÑO RECOMENDABLE PARA RANGOS 150-300-600 A.S.A.

Fig. 19

DIAGRAMA TIPO DE BRIDAS AISLANTES

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
 TESIS DE GRADO
 PROTECCION CATODICA

FUENTE: SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM - CATHODIC PROTECTION MATERIALS BULL.



UNION AISLANTE TIPO

Fig. 20

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL TESIS DE GRADO
PROTECCION CATODICA

tiendo de esta manera que una corriente suficiente de protección - fluya hacia la sección aislada de la línea y regrese a través de - la junta resistente a la sección protegida, evitando de esta mane- ra los efectos de las posibles corrientes parásitas.

Empleo de las bridas aislantes y juntas resistentes . -

1.-Para aislar secciones de un oleoducto .- La distribución nor- mal del flujo de co- rriente proveniente desde un banco de ánodos auxiliares o desde án- dos de sacrificio hacia un oleoducto revestido, digamos de una lon- gitud AB se ve en la Fig. 21 a y b.

Suponiendo ahora que sólo fuera necesario proteger - el tramo BC en el mismo gráfico y caso real en el oleoducto en es- tudio, se nota el efecto provocado con esto en el flujo de corrien- te al insertar una brida aislada en el punto C. La sección AC no- queda protegida, y toda la concentración de corriente es ahora en el tramo BC. Puede ser que ahora la densidad de corriente aplica- da al tramo BC sea más grande que la necesaria, por lo cual sería posible reducir la salida de corriente de la fuente de alimenta- ción (sea rectificadora o de ánodos de sacrificio) con el consi- guiente ahorro en el costo.

...../...

Tomando el mismo diagrama como referencia, pero suponiendo ahora que hubiera una corriente parásita protectora que entre por el punto D de la tubería y por el punto E deje la misma para introducirse en la parte protegida F. Debido a que el punto E se tornaría anódico, se vería sujeto a una corrosión severa, lo cual pues hay que evitar. Para esto se instala una junta resistente a través de la brida aislante a fin de que la corriente que deja el punto E, se vea forzada a circular a través de la junta resistente y retorne a la parte protegida sin afectar el punto E. Esto se muestra gráficamente en las Figs. 22 y 23.

Todo lo explicado arriba indica que para nuestro estudio debemos tomar muy en consideración la instalación de las bridas aislantes y juntas resistentes si fueren necesarios, puesto que incidirá en el dimensionamiento y protección efectiva del tramo.

Resultados y conclusiones :

Analizando nuevamente el perfil de resistividades, - que trae el Cap. I, y basándonos en el criterio de juzgar como altamente corrosivos a los suelos cuya resistividad específica está por debajo de los 5.000 ohmios-cm, podemos concluir que las seccio

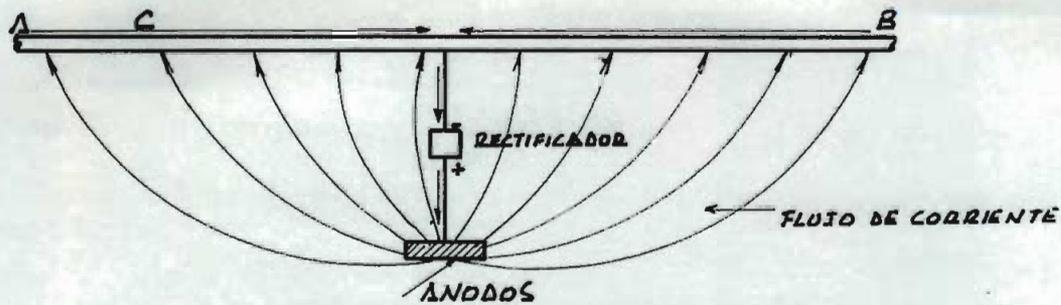
...../...

nes del tramo en estudio, que realmente necesitan de protección ca
tódica adicional al revestimiento protector actualmente dado a la-
tubería, son aquellas que se encuentran localizadas en los Km 196-
198 TRAMO 1 ; Km 205-210 TRAMO2; y Km 226-227 TRAMO 3.

Es indudable que pesará mucho en la elección del sis
tema a aplicarse en estos tramos, el examen de diversos criterios-
técnico-económicos tales como: instalación del sistema, operación,
mantenimiento y control del mismo, vida útil de la estructura y lo
que resulte fundamental en este caso, el costo de la obra.

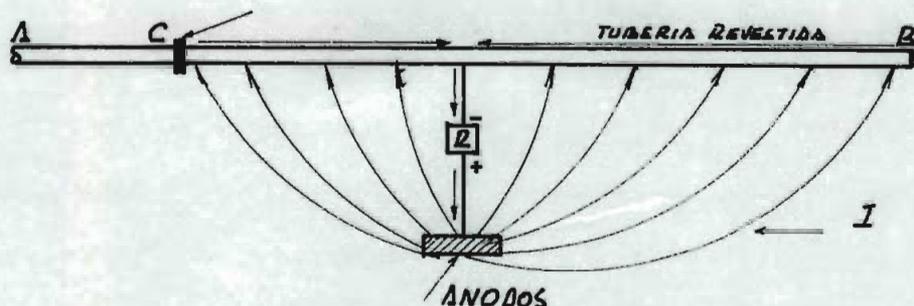
A fin de contar con los elementos indispensables pa-
ra hacer una selección adecuada y aplicable, se anexa un cuadro com
parativo con los resultados obtenidos de mediciones de campo, cál-
culos y características de los diversos elementos que intervienen-
en cada una de las Alternativas. En cada uno de los casos, los da
tos del cuadro se han tomado considerando una densidad mínima de -
corriente para protección de 0.5 mA/m^2 y que el potencial tubo-sue-
lo a lo largo del tramo protegido se mantendrá en un valor no menor
de -0.85 V . respecto al electrodo de referencia.

...../...



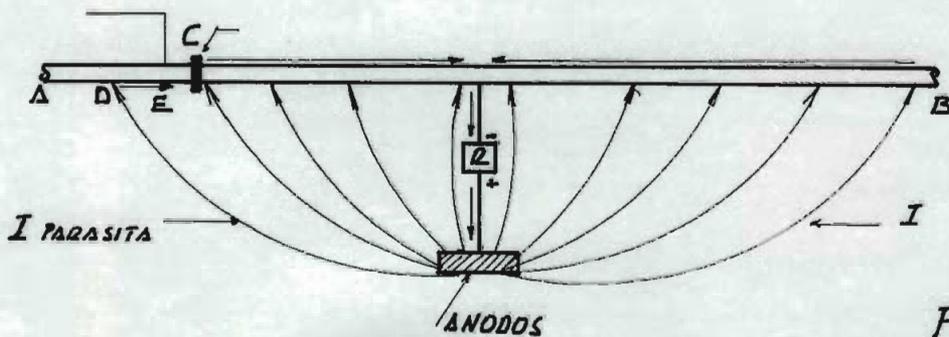
DISTRIBUCION NORMAL DE CORRIENTE

FIG. 21



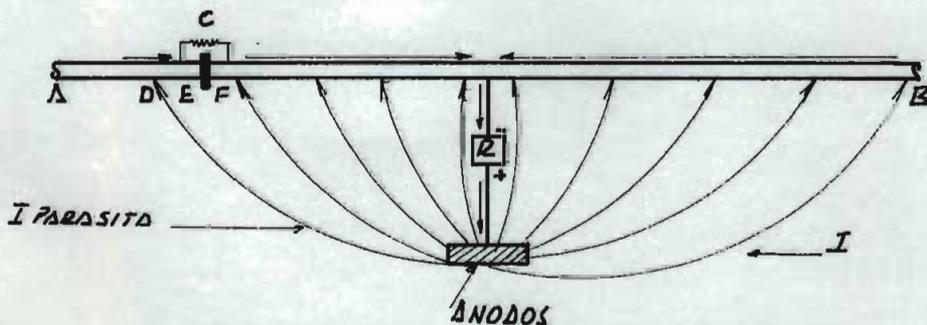
EFFECTO DE INSERTAR UNA BRIDA AISLANTE

FIG. 21



EFFECTO DE LA I PARASITA SOBRE UNA SECCION AISLADA

FIG. 22



EFFECTO DE INSERTAR UNA BRIDA AISLANTE Y JUNTA RESISTENTE

FIG. 23

ESCUELA POLITECNICA
TESIS DE GRADO

PROTECCION CATODICA

DISTRIBUCION DE CORRIENTE

PROYECTO: 25 DIBUJO: 17

CUADRO COMPARATIVO DE DATOS OBTENIDOS DEL DISEÑO POR ANODOS DE SACRIFICIO Y CORRIENTE

IMPRESA

Resistividad específica media del suelo: 3.103 ohmios-cm.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3	TRAMO TOTAL
--	---------	---------	---------	-------------

Corriente protección (Amp)	2	5.2	2	36.3
----------------------------	---	-----	---	------

# Ánodos	32	80	32	144
----------	----	----	----	-----

ALTERNATIVA 2	3	7	3	46
---------------	---	---	---	----

I de salida ALTERNATIVA 1	66	66	66	66
---------------------------	----	----	----	----

/ánodo (mA) ALTERNATIVA 2	800	800	800	800
---------------------------	-----	-----	-----	-----

Cajas de prueba o ALTERNATIVA 1	32	80	32	144
---------------------------------	----	----	----	-----

equipos ALTERNATIVA 2	1	1	1	3
-----------------------	---	---	---	---

Instrumentos. ALTERNATIVA 1	2	2	2	2
medición ALTERNATIVA 2	-	-	-	-

Estaciones ALTERNATIVA 1	32	80	32	144
de control ALTERNATIVA 2	1	1	1	3

...../....

Un examen detenido del cuadro anterior demuestra que en cualquier caso resulta desfavorable la aplicación de la alternativa I, ya -- que si tomamos como ejemplo la instalación de los ánodos en uno y otro caso, resulta en la práctica que la ubicación en el lugar de 144 elementos requiere de mayor mano de obra, transporte de ellos a lo largo de la ruta de la tubería, materiales para conexiones, accesorios, etc, lo cual no sucede en caso de instalar 46 ánodos que tienen incluso menor peso que los necesarios para la Alternativa 1. Esto si suponemos que la protección se va a aplicar el tramo completo de 35 km, pero como esto no va a suceder si nos regimos a lo que en la realidad se presenta, es decir proteger tan solo los tramos considerados como sujetos a corrosión fuerte, lo mencionado anteriormente adquiere mayor peso y reforza el criterio de escoger como utilizable la Alternativa II.

De igual manera y puesto que cada punto en donde se haya instalado un ánodo de sacrificio en caso de la Alternativa I, requiere de operación y mantenimiento individual y en el mejor de los casos será necesario el mantenimiento y control de 144 puntos frente a 13 puntos o mejor dicho tan sólo en las estaciones rectificadoras de la alternativa II, para controlar igual o proteger un tramo igual de tubería y bajo las mismas condiciones, el empleo de la corriente Impresa indudablemente presenta mejores condiciones en

...../...

cuanto al aspecto técnico se refiere. Asimismo cuando sea necesario efectuar reparaciones y chequeos periódicos previstos para un funcionamiento aceptable del sistema de protección, la facilidad para realizarlos será también un factor preponderante en la elección de una u otra Alternativa. En nuestro caso nos decidimos por el empleo de la Corriente Impresa.

Estos criterios de adopción del método a seguir, serán justificados debidamente cuando se analicen las cuestiones económicas que presentan cada una de las Alternativas estudiadas y que demostrarán la bondad del sistema elegido, tanto en el aspecto técnico como en el económico.

...../....

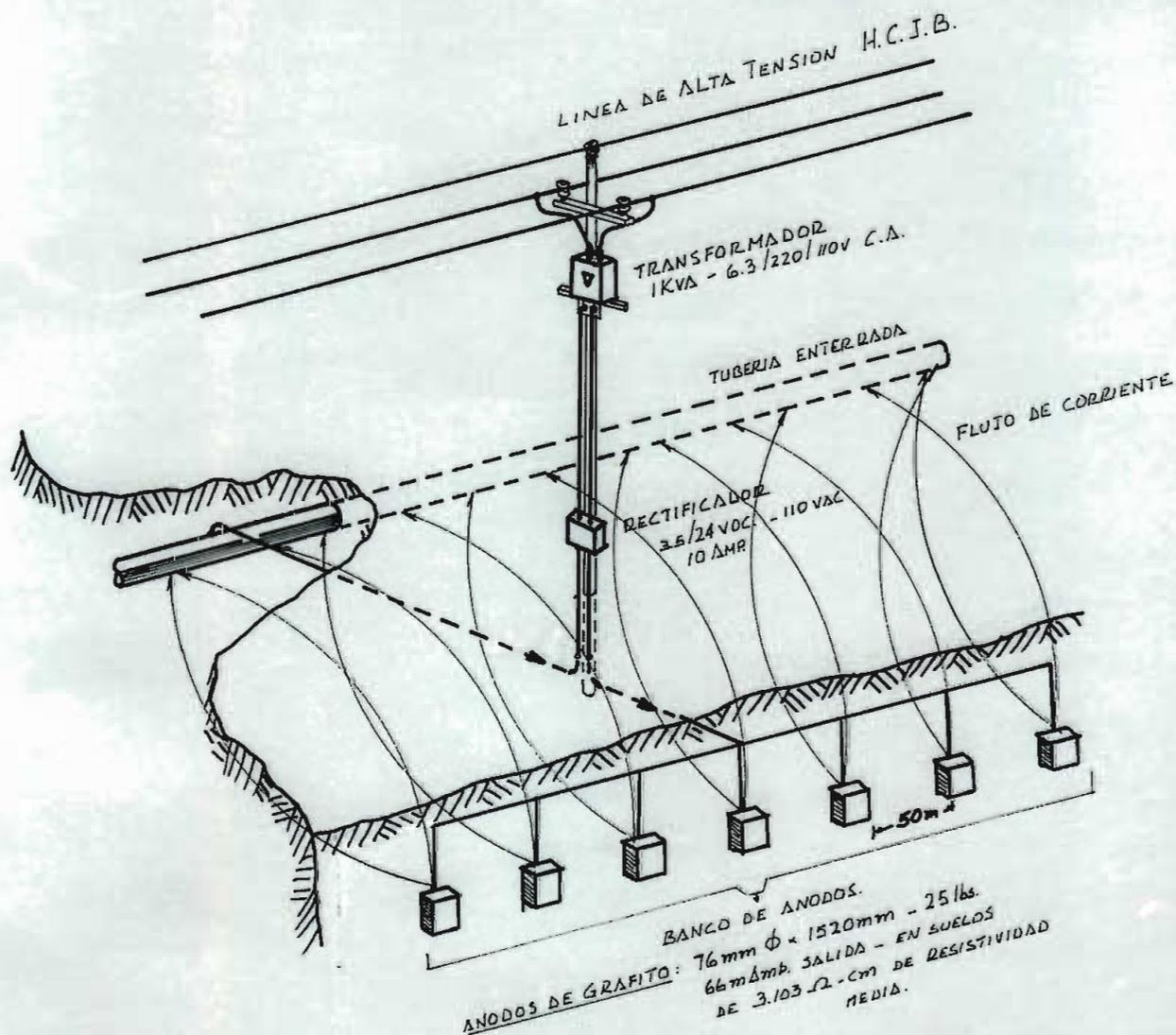


FIG. 24

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL	
TESIS DE GRADO	
PROTECCION CATODICA	
KM. 205 - KM. 210	
TRAMO PAPALLACTA - LA MERCED	
PROYECTO: J.B.G.	DIBUJO: J.B.G.
ESCALAS: NINGUNA	OBSERV.

II. b.-

ANALISIS TECNICO-ECONOMICO Y ADOPCION DEL DISEÑO DEFINITIVO.-

Basándonos en datos estadísticos compilados y publicados por The Pipeline Engineer, Pipeline Handbook issue de 1968,- sobre costos de material, instalación y mano de obra, para sistemas de protección catódica mediante ánodos galvánicos o de sacrificio, obtenemos los siguientes datos :

Costo promedio de un ánodo de Magnesio por
unidad de peso \$/ 55,00/kg

Puesto que la Alternativa I, contempla el
empleo de ánodos de aleación de magnesio -
de 22,7 kg. tendríamos:

Costo de un ánodo de 22,7 kg (aleación de-
magnesio) " 1.248,50

Tomemos para comparación el tramo de 5 km,
entre los km, 205 y 210. Se necesitan 80
ánodos de 22.7 kg, luego C_1 :

Costo de 80 ánodos de magnesio de 22.7 kg. " 99.880,00

$$C_1 = \$ 99.880,00$$

Como cada ánodo requiere de una caja de --
prueba según diagrama de instalación que -

...../
...../...

se aprecia en la Fig. 13 del Cap. II, y cada una de éstas cuesta US.\$ 8.00 c/u. -----

(\$ 200.000 c/u.) tendremos:

Costo de 80 cajas de prueba para ánodos. = C_2 \$ 16.000,00

La misma fuente de información, menciona - que el costo de instalación, tomando en cuenta mano de obra, transporte y cables de conexión, se estima en \$16/ánodo lo cual en -- nuestro medio equivale a \$ 400.00/ánodo, -- con lo cual tendremos el costo C_3 igual a:

Costo de instalación de 80 ánodos = C_3 \$ 32.000,00

Hay que incluir además el costo del equipo de prueba, constituido por lo siguiente:...

1 miliamperímetro de baja resistencia, para medir corriente que fluya desde el suelo hacia la estructura (desde cada ánodo hacia el tubo), para determinar si el flujo de corriente corresponde a la calculada para la protección,. Este costo se le ha fijado en \$ 2.500,00, que importe en el mercado nacional estos instrumentos.

1 Voltímetro de alta resistencia similar al empleado por medición de potenciales tubo - suelo, para determinar si el potencial tubo suelo se mantiene en el nivel requerido pa-

...../
...../...

ra la protección (-0.85 V.) De acuerdo a -
los costos del mercado local se lo calcula -
en S/ 2.700.00

Costo total de instrumentos de medida = C_4 S/ 5.200,00

Costo de ingeniería, que incluye el diseño -
del sistema supervisión de instalación, pues
ta en marcha y chequeo periódico...25%del to
tal = C_5 " 38.000,00

Costo total del sistema de protección por á-
nodos de sacrificio = C_t

$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 =$ " 191.080,00

Hay que anotar, que todos los materiales indispensa-
bles para la aplicación de este método no tienen el recargo de im-
posiciones aduaneras etc., puesto que cuentan con liberación de im-
puestos por la Ley vigente de Hidrocarburos. Solamente habrá que
hacer constar recargos adicionales por transporte, manipuleo, segu-
ros, almacenamiento, etc., que para efectos del presente estudio -
no se los toma en cuenta puesto que no resulta la Alternativa ele-
gida, y para comparación sólo bastan los costos del diseño e insta-
lación.

Para hacer ahora una estimación del costo del siste-
ma de protección catódica mediante el empleo de la corriente impre-
...../....

sa, nos basamos en los costos utilizados por un país similar al nuestro, México a través de su Institución Estatal PEMEX y modificados de acuerdo a nuestro medio. De acuerdo a este criterio, se tiene que el costo promedio para protección de estructuras enterradas (oleoductos) empleando equipos rectificadores de corriente, es de \$/ 180.00/amp/año, costo que incluye la adquisición, operación, mantenimiento, suministro de energía a un promedio de \$/ 0.45/kwh y cargos fijos de un 12.5% sobre el capital invertido. A este costo habrá que añadir el valor del transformador a instalarse entre la línea de alta tensión de la HCJB que pasa por el lugar y el rectificador, y que lo calculamos en \$/ 1.000.00/KVA requerido y \$/ 1.800.00 por concepto de instalación y transporte del mismo.

Con estos criterios y adoptando una vida útil promedio de los equipos a utilizar de 20 años y para la estructura de 40 años, tendremos:

$$\text{Costo del equipo} = C_1 = \$/ 180.00/\text{amp/año} \times 5.2 \text{ amp} \times 40 \text{ años}$$

$$C_1 = \$/ 37.440.00$$

Esto en el supuesto caso que hubiera disponible en el mercado, equipos rectificadores para una corriente de salida de 5.2 amp., puesto que según el catálogo de la STC el equipo más cercano a los requerimientos de corriente de salida es aquel que tiene 10 amp. de salida, el costo real del equipo será :

...../....

Costo real $C_1 = 180 \times 10 \times 40 =$	\$	72.000.00
Costo del transformador y su instalación: C_2 adoptando uno de 5 KVA. para tener reserva - de energía.		
$C_2 =$	"	5.800.00
Costo de ingeniería = 25% igual que el ante- rior. $C_3 =$	"	20.000.00
Costo total de la instalación del sistema de protección por corriente impresa = C_t		
$C_t = C_1 + C_2 + C_3 =$	"	97.800.00

Si establecemos un costo por kilómetro protegido, -
por una y otra Alternativa se puede tener un elemento de juicio ca-
tegórico para la selección del más económico. Ateniéndonos a esto,
tendríamos:

Costo por km protegido, Alternativa I = \$/ 191.080/5km = \$/38.216.00/km

Costo por km protegido Alternativa II = \$/ 97.800/5km = \$/19.500.00/km

Costos de los cuales podemos facilmente deducir cual
sería el más económico, y si tenemos en cuenta lo anotado en el a-
nálisis técnico de los dos sistemas, podemos señalar objetivamente
que la Alternativa II, es la más viable y de aplicación práctica y
económica recomendable.

...../..

II. b.- ADOPCION DEL DISEÑO DEFINITIVO

PROTECCION CATODICA DE LOS TRAMOS 1, 2 y 3 DEL OLEODUCTO ECUATORIA
NO - UBICADOS EN EL SECTOR ENTRE PAPALLACTA Y LA MERCERD.-

PROTECCION POR CORRIENTE IMPRESA .-

Habíamos señalado que el factor preponderante para la elección del método de protección era el económico, pero además cuentan también los comentarios que se mencionaron al iniciar el diseño de la Alternativa II, entre los cuales, otro factor fundamental que hace recomendable la aplicación de éste método de protección, es la operación y mantenimiento del sistema, que requiere de menos labor, estaciones de control, fuentes de energía, ánodos, materiales, etc.

En resumen y empleando el Diagrama esquemático de la Fir. 24, que representa al equipo de protección, fuente de alimentación, estructura protegida y medio de reposo, podemos ya especificar sus elementos, es decir el equipo necesario, materiales, etc. y cuantificar su costo real, incluyendo esta vez y en detalle todos los rubros que comprenden el costo total.

De modo esquemático nuestro sistema de protección se

...../...

puede representar como en la fig. 25.

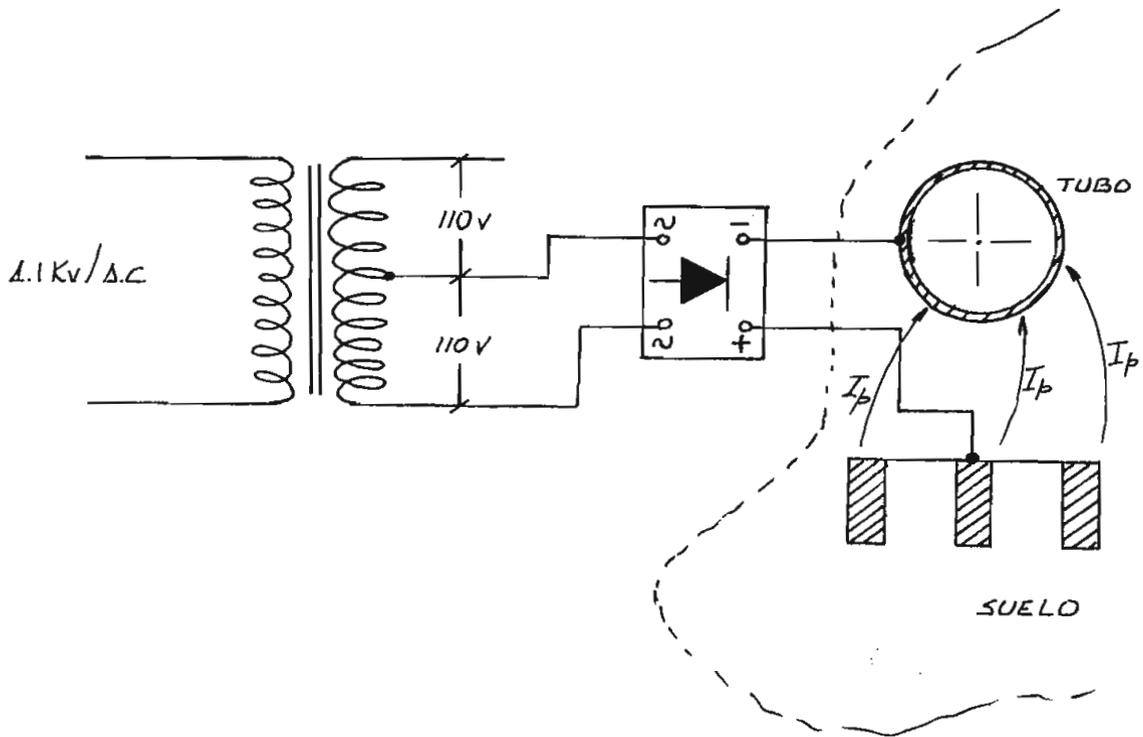


Diagrama simplificado

Fig. 25

Para proceder al trazo del diagrama eléctrico completo del sistema es necesario aclarar de modo ligero las características de los rectificadores empleados generalmente para la protección catódica por corriente impresa.

RECTIFICADORES PARA PROTECCION CATODICA .-

.....
...../.....

Una de las fuentes más comunes de energía necesaria para la protección catódica es la comercialmente disponible (corriente alterna) convertida a corriente continua mediante el empleo de rectificadores. Estos, como generalmente se los conoce en el mercado, constituyen en realidad dos dispositivos en uno solo: un transformador para convertir la energía comparada (alterna) de 110 220 u ocasionalmente a 440 V, monofásica o trifásica, a voltajes bajos requeridos que pueden estar entre el rango de 3 a 30 V AC; y un grupo de rectificadores para convertir este bajo voltaje alterno a continuo.

Los rectificadores para protección catódica pueden ser clasificados de tres maneras: de acuerdo a la clase de rectificación empleada; de acuerdo a la disposición del circuito y según el cual se han de conectar los diversos elementos; y de acuerdo al emplazamiento y enfriamiento de la unidad entera.

Escencialmente un rectificador es un dispositivo que tiene la particularidad de presentar una menor resistencia al paso de la corriente en una dirección, más no en la otra. Comercialmente y para el fin propuesto se encuentran dos tipos de relativa importancia: en el primero, se forma a propósito una delgada película de óxido sobre un disco o placa de cobre, al aplicar una co--

...../...

riente, ésta fluirá más rápidamente desde el óxido hacia el cobre que desde el cobre hacia el óxido; en el segundo caso, se deposita una pequeña capa de selenio sobre una lámina de acero o aluminio y se la recubre luego con una capa delgada de metal conductor; la corriente fluirá más rápidamente desde el selenio hacia la capa de metal conductor que desde ésta última hacia el selenio.

Cuando los requerimientos de una instalación reclaman servicio intermitente, es preferible usar los rectificadores de óxido de cobre, ya que los de selenio tienen la tendencia a tornarse inestables mientras permanecen fuera de servicio; pero debido a la corta duración del cobre empleado de esta manera, ha hecho que los rectificadores de selenio sean los de uso generalizado.

Ninguno de los otros métodos conocidos de rectificación - por tubos de vacío, conmutadores sincrónicos, o de tipo electrolítico - han llegado a tener una aplicación muy amplia en el campo de la protección catódica debido a que requieren de una inspección continua, por cuanto por lo general las instalaciones a proteger se encuentran casi siempre en áreas remotas.

Circuito rectificadores . - En el circuito más simple de rectificación, basta conectar una sola unidad -

...../...

en serie con la carga y la alimentación. Durante el intervalo de tiempo que el voltaje se mantiene en una dirección (semiciclo positivo o negativo) la corriente fluye, mientras que en el otro intervalo la corriente es bloqueada. Esto se puede apreciar en la Fig. 26, en la cual se muestra un circuito rectificador conocido como de media onda.

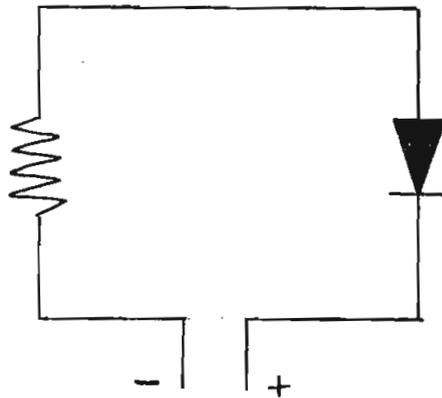


Fig. 26

En el mismo circuito, si el voltaje resulta demasiado alto para un solo elemento, pueden conectarse dos o más en serie; asimismo si la carga es demasiado grande, se pueden conectar dos o más o grupos en paralelo.

...../...

Cuando se requieren dos elementos a fin de permitir el paso de suficiente corriente, se puede hacer una conexión al -- centro de la bobina secundaria del transformador para dividir el - voltaje aplicado en dos direcciones. Esto se señala en la Fig. 27, y este circuito es conocido como un rectificador de onda completa.

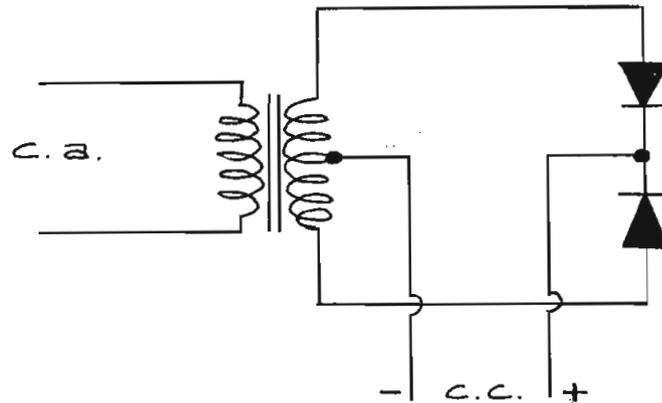


Fig. 27

La corriente fluye a través de la carga durante ambas mitades del ciclo en las dos direcciones pasando alternativamente a través de los dos elementos, con lo cual se puede conseguir un - flujo continuo de corriente.

La desventaja del circuito rectificador de media on-

...../....

da es su bajo factor de utilización, resultante de su operación -
intermitente; en el de onda completa en cambio se requiere un --
transformador con conexión al centro de su bobina secundaria, y -
si se necesita regular la corriente de salida requerirá en conse-
cuencia de otro punto de ajuste en el voltaje, a fin de proveer -
de voltajes iguales durante cada mitad de ciclo. Estas dificultag
des que presenta el circuito rectificador de onda completa, pue--
den ser superadas empleando cuatro elementos (o cuatro grupos) -
tal como se señala en la Fig. 28, y que representa el circuito u-
niverslamente empleado en rectificadores monofásicos para protec-
ción catódica.

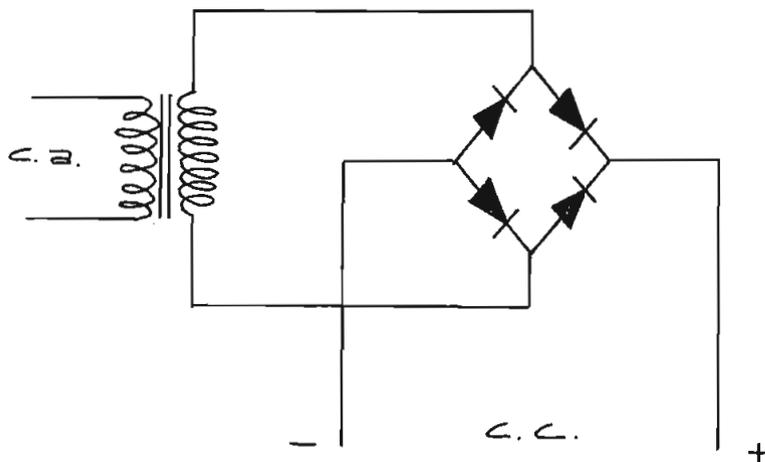
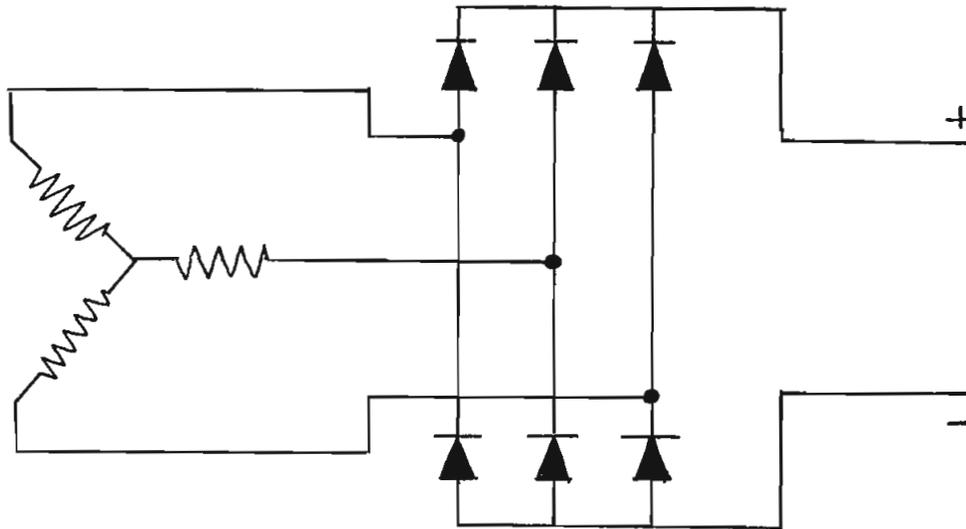


Fig. 28

...../...

Se puede conseguir una eficiencia alta de estos equipos, si se utiliza alimentación trifásica, y asimismo se puede diseñar una gran variedad de circuitos, uno de los cuales anexamos como ilustración y que representa un rectificador de onda completa trifásico. Fig. 29



RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE ONDA COMPLETA

Fig. 29

Estas unidades trifásicas resultan en la práctica más caras que las unidades monofásicas para capacidades pequeñas, aun--

...../...

que esta diferencia va disminuyendo conforme se incrementa la capacidad. A veces es necesario tomar en cuenta la disponibilidad de tensiones trifásicas y su costo, aunque muchas veces los costos de operación no llegan a justificar el costo inicial de estos equipos. El resultado final es que las unidades rectificadoras monofásicas han llegado a ser las de uso común en protección catódica, excepto para grandes capacidades y en casos particulares.

En nuestro caso y por las razones expuestas, hemos seleccionado adecuadamente el equipo rectificador monofásico de onda completa, servicio continuo, corriente de salida relativamente baja, voltaje rectificado de operación normal, refrigeración por aceite, que aunque cara inicialmente se justifica por la operación durante largos periodos y en las más adversas condiciones sin necesidad de atención alguna.

Una vez que se ha señalado las características fundamentales del equipo rectificador a emplear en nuestro sistema y seleccionado de entre los equipos manufacturados por la Standard Telephone & Cable Ltd, podemos establecer el diagrama definitivo de la instalación. Fig. 30

...../..

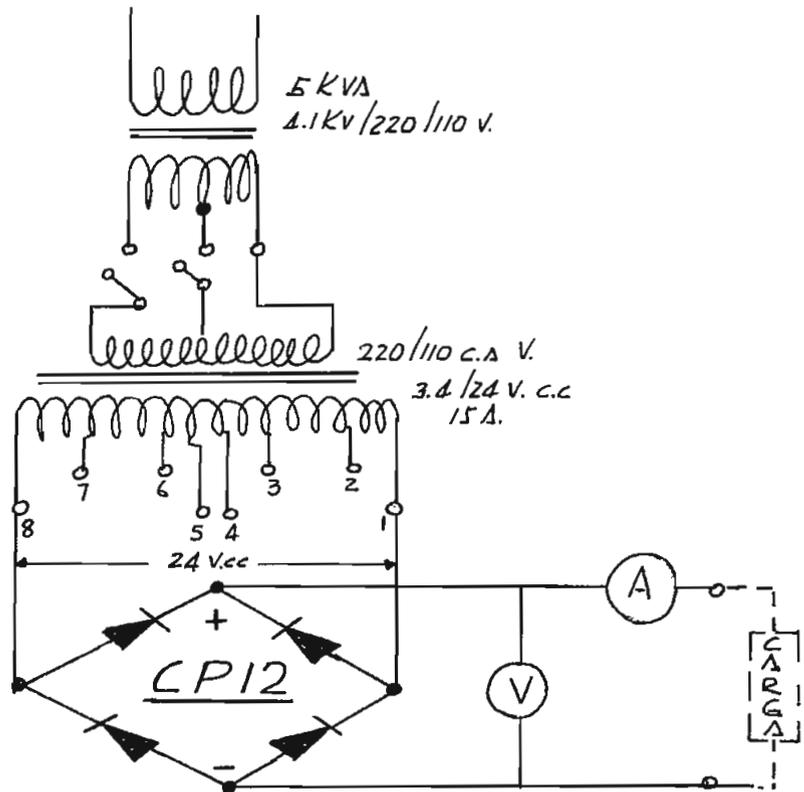


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL SISTEMA DE PROTECCION

Fig. 30

OPERACION DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA CON ESTACIONES RECTIFI

CADORAS

Todos los componentes de un sistema rectificador adecuadamente diseñado vienen por lo general contruidos para soportar

...../...

o resistir la intemperie y operar por períodos relativamente largos sin atención alguna, salvo la inicial. Sin embargo pueden presentarse ciertos obstáculos, que priven parcial o totalmente a la estructura de la protección necesaria, y como frecuentemente sucede - por desgracia, estos sucesos no llegan a ser descubiertos sino al cabo de semanas, meses y aún años, evitando de este modo el conocer cuando se ha detenido el proceso de protección; cuando se tiene conocimiento de estos fenómenos puede haber ocurrido ya un gran daño o avería en la estructura.

La parte o elemento más indispensable de un sistema de protección es la tubería misma y es en consecuencia la que necesita de una inspección continua. Esta inspección se hará mediante el empleo de las estaciones monitoras, mencionadas antes o mediante una instrumentación adecuada que permita conocer los potenciales tubo-suelo a lo largo de la tubería y a determinados espacios por lo menos una vez al mes. La localización de estos puntos de lectura deberá ser tan adecuada que asegure que la protección completa de la línea llevando a cabo racional y efectivamente. Por lo general las grandes compañías que operan oleoductos en diversos lugares, han llegado a definir que la situación de estos puntos resulta adecuada cuando están ubicados por lo menos en el punto medio de un vano entre rectificadores.

...../...

Se puede llevar una estadística adecuada, tomando lecturas de potencial cada año durante los primeros cinco, luego es recomendable hacerlo cada dos años. Las inspecciones mensuales que -citamos antes, deben comprender lecturas en las estaciones rectifi-cadoras de voltaje, corriente y potencia disipada y mantenerlos en-records apropiados para comprender o seguir el proceso de protección a través del tiempo de diseño del sistema, pues es muy útil y sirve para aclarar cualquier problema que se presente durante este perf-odo registrado. Así, cuando se producen cambios estacionales estos registros indicarán variación de la corriente y del potencial tubo-suelo, ya que variará la acidez del suelo, al igual que el ataque a los ánodos se notará también por la variación de esas lecturas.

El deterioro de los recubrimientos también se notará-o manifestará en una declinación del potencial y muy probablemente-en un incremento de la corriente de protección, De igual modo, las fallas en los equipos rectificadores o de protección se manifesta-rán de modo abrupto o muchas otras condiciones que pueden ser fácil y rápidamente detectadas con el equipo o instrumentos de control.

En relación al mantenimiento o inspección del sistema de protección se puede seguir el siguiente procedimiento:

1.- En las estaciones de control antes de abrir las cajas de protec-

...../...

ción de los equipos, examinar por si se detectan señales de corrosión externa o agrietamiento. Chequear si el disco del Watt metro (si lo hay) está girando. Al tocar la caja se notará un leve calentamiento y se oirá un leve zumbido propio del trabajo del transformados-rectificador.

- 2.- Se debe abrir cuidadosamente la caja para prevenirse de la presencia de serpientes, o insectos irritantes y venenosos. Tomar lecturas de los instrumentos en los taps de regulación de volta je. Se debe examinar por si se halla algún daño mecánico.
- 3.- Desconectar la alimentación del rectificador mediante el empleo del switch general, de modo que la unidad quede inactiva. Rápidamente antes que el equipo tenga tiempo de enfriarse tocar las columnas del rectificador. Estos deben estar calientes, de pendiendo de la carga, pero lo que es más importante es que todos ellos estén a la misma temperatura. Si no es así, es proba ble que uno de ellos no esté trabajando por algún defecto.
- 4.- Trabajando rápidamente para evitar que la unidad se enfríe, tocar todas las conexiones para sentir si están frías. Un calentamiento aunque no sea fuerte indicará flojedad de las mismas, por lo cual se deberá proceder a ajustarlas. Si están demasiado flojas se deberá desarmarlas, limpiarlas y reconectarlas.
- 5.- Si no se tiene mucha prisa, se debe hacer un cuidadoso chequeo-visual de la unidad completa, para detectar si se han producido

...../...

arcos o existen quemazones debido a descargas atmosféricas. -
Chequear asimismo los fusible y dispositivos de protección, al
igual que su provisión de repuestos.

- 6.- Si encuentra depositados polvo, residuos orgánicos, etc, proceder
der a limpiarlos.
- 7.- Con la unidad aún detenida chequear si el watímetro gira, caso-
de ser así significa que otras cargas están conectadas al sis-
tema.
- 8.- Reenergizar la unidad y chequear la lectura de los instrumentos
del equipo y compararlos con los instrumentos portátiles de -
prueba. El voltímetro debe ser chequeo, midiendo en los termini
nales de salida de la unidad. El chequeo del amperímetro re--
quiere la desconexión de un terminal.
- 9.- Examinar la unidad, para determinar el estado de la pintura -
protectora, estructura potante, ducto del cable enterrado, etc,
para ver si hay daños de construcción.

...../...

II.- c.- ANEXOS: ESPECIFICACIONES FINALES Y PLANOS DEFINITIVOS .-

Para las especificaciones definitivas y lista de materiales del sistema de protección escogido, hay que hacer notar que se han tomado en cuenta los tres tramos que precisan de protección, y que tienen similitud en cuanto a los materiales que requieren unos u otros. Solo existe la variación entre los Tramos 1 y 3 que son iguales respecto al Tramo 3 en la potencia del transformador de alimentación C.A. que no será de 5 KVA sino de solamente 1 KVA, puesto que la corriente de salida necesaria de estos dos tramos es de 2 AMP.

ESPECIFICACIONES Y LISTA DE MATERIALES PARA SISTEMA DE PROTECCION -
CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA.-

<u>ITEM</u>	<u>CANTIDAD</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>Precio unit.</u>	<u>PrecioTotal</u>
1	3	Transformador-rectificador metálico de selenio de las siguientes características: voltaje de alimentación 220/110-VAC con tapa de regulación; - frecuencia de operación: 50/60 c/s; refrigeración por aceite; temperatura de operación: 300	/...

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	Precio Unit. Precio total
		<p>C; provisto de dispositivos de protección contra sobrecargas del lado C.C. 10 Amp;- con conectores a prueba de intemperie a la entrada y salida; con instrumentos de medición de voltaje y corriente para 0 -- 24 Vdc y 0 - 15 amperios respectivamente; lado de baja tensión 3.4/24 Vdc con 8 pases de regulación de 3.5 V c/u; todo el equipo irá protegido contra intemperie y explosión y vendrá provisto de facilidades para medir la temperatura del aceite.</p>	
2	1	<p>Modelos similar a Type CP12 manufacturado por la Standard Telephone & Cables Ltd... Transformador monofásico de 5 KVA 6.3/220 /110 V + 15% de regulación 50/60 c/s, refrigerado por aceite; para instalación a -</p>	<p>\$/ 20.628,00 \$/ 61.884,00</p>

...../....

ITEM	CANTIDAD	D E S C R I P C I O N	Precio Unit.	Precio total
		la intemperie, con dispositivos mecánicos para su montaje sobre poste de hormigón, - similar a:	₡ 5.000,00	₡ 5.000,00
3	2	Transformados, de características similares al anterior de Item 2; pero de 1KVA - de potencia.	₡ 1.200,00	" 2.400,00
4	6	Pararrayos con rango 6.3 KV - 50 A tipo - NGK.	" 960,00	" 5.760,00
5	6	Seccionadores de cuchilla para 6.3 KV -15 A similar a	" 800,00	" 4.800,00
6	3	Suiches fusibles bipolares para 400 V-15A	" 300,00	" 900,00
7	3	Postes de hormigón armado tipo A-3 9,5 - mts. de largo y 16 cm de ϕ /en la punta...	" 1.200,00	" 3.600,00
8	6	Crucetas de hierro perfil en L de 2" y -- 1/4" x 120cm	" 150,00	" 900,00
9	6	Abrazaderas de varilla de hierro galvanizado de 1/2" x 20"	" 30,00	" 180,00

...../...

ITEM	CANTIDAD	D E S C R I P C I O N	Precio Unit.	Precio total
10	24	Conectores de presión tipo Burndy No...	25,00	600,00
11	13	Anodos de grafito de 76 mm. de ϕ por -- 150 mm. de largo tipo regular similar a manufacturado por "Great Lakes Carbon - Co" USA.	514,00	6.682,00
12	500	Kg. de cisco de coque metalúrgico para - relleno "backfill" de ánodos, similar a Tipo GAB-1, manufacturado por "Great La- kes Carbon Co" USA.	4,50	2.250,00
13	350	Tramos de 3 mts. c/u de tubo galvaniza- do de 3/4" de ϕ para relleno de cisco - de coque de 1/4 ánodos	35,00	1.225,00
14	30	Cajas de conexión galvanizada con tapas 3/4".	24,00	960,00
15	6	Aisladores tipo pib para 6.3 KV doble - campana	72,00	432,00

...../....

ITEM	CANTIDAD	D E S C R I P C I O N	Precio Unit.	Precio total
16	150	Tramos de tubo conduit galvanizado de 1/2"	\$ 24,00	\$ 3.600,00
17	500	Metros de cable de cobre Nº 4 AWG aislamiento PVC.	" 9,00	" 4.500,00
18	300	metros de cable de cobre N°14 AWG aislamiento PVC.	" 1,50	" 450,00
Total Materiales				\$108.453,00
19	135	Metros cúbicos de excavación para instalación de bancos de ánodos, de 250, 100 y 100m cada tramo, 50 cm de ancho por 60 cm de profundidad.	\$ 40,00	\$ 5.400,00
20	13	Instalación y colocación de ánodos en sus respectivos ductos, incluyendo la excavación de agujeros y relleno.	" 160,00	" 2.080,00
21	135	Metros cúbicos de relleno de los ductos mencionados en el Item 19.	" 30,00	" 4.050,00

...../.....

ITEM	CANTIDAD	d e s c r i p c i ó n	Precio Unit.	Precio total
22	6	Construcción de registros de manposte-- rfa para indicación de extremos de tube rfa protegida de 20 cm por 20 cm por - 100 cm.	150,00	900,00
23		Instalación de cables alimentadores y - subalimentadores que comprende ubicación y recubrimiento de cascajo o arena en - capas de 25 de espesor.	" 110,00	" 1.320,00
24	20	Días de transporte de personal y mate-- rial durante la instalación del sistema (sin subsistencias).	" 400,00	" 8.000,00
25	3	Instalación de postes y transformadores respectivos para cada estación protecto ra	" 1.500,00	" 4.500,00
26	3	Instalación de tres rectificadores en - su poste respectivo, incluyendo su trans porte	" 1.500,00	" 4.500,00

...../....

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION	Precio Unit.	Precio total
27	6	Instalación de juntas aislantes en puntos extremos de cada tramo protegido..	\$ 400,00	\$ 2.400,00
28	6	Compra de juntas aislantes según detalle que consta en la Alternativa II, - para tubería de 26" X-60. "	395,00	" 2.370,00
		TOTAL MANO DE OBRA		\$ 33.150,00
		TOTAL MATERIALES		\$108.453,00
		SUBTOTAL		\$ 141.603,00
		10% concepto de imprevistos.		\$ 14.160,00
		30% concepto de costos de Ingeniería, - que incluye el diseño, supervisión de instalación y puesta en marcha.....		\$ 42.400,00
		COSTO TOTAL		\$ 198.163,00

=====

COSTO TOTAL: CIENTO NOVENTA Y OCHO MIL CIENTO SESENTA Y TRES SUQUES,00/100

=====

...../....

Costo por Km protegido: = Costo total/longitud de tramo a proteger

$$\text{Costo/Km} = 198.163/9 = \$/ 22.018/\text{Km}.$$

Que si lo comparamos con los valores unitarios por Km establecido en el análisis económico de las dos Alternativas, se ajusta racionalmente con el costo estimado de protección mediante la Corriente Impresa.

INDICE DE CUADROS Y TABLAS

	<u>PAGINA</u>
Combinación de revestimientos.- Protectores y Protección Catódica.	39
Características de los suelos en los cuales va enterrado el oleoducto.	47
Potenciales tubo-suelo del tramo comprendido entre los Km. 195 a 230.	53
Potenciales y Corriente de Salida de varios materiales utilizados como cátodos.	64
Corriente de salida de ánodos de magnesio.	66
Rangos de consumo de materiales anódicos.	79
Especificaciones de equipos rectificadores para protección catódica.	90
Cuadro comparativo de datos obtenidos del diseño por las dos Alternativas.	110

INDICE DE GRAFICOS Y PLANOS

	<u>PAGINA</u>
Perfil de Resistividades y factor pH.	48
Gráfico de corriente de salida y vida de á- nodos en relación a la Resistividad.	75
Gráfico para la determinación de la eficien <u>u</u> cia de equipos rectificadores.	91
Detalles instructivos para instalación de <u>á</u> nodos de grafito.	140
Perfil transversal de la trayectoria del o- leoducto Lago Agrio-Esmeraldas.	
Perfil transversal y planimetría del tramo- en estudio.	

B I B L I O G R A F I A

- L.1 Royal Dutch Shell Cathodic Protection Bulletin. 1968
- L.2 Corrosion Welding Engineering Society. Technical Paper No.1608
1963
- L.3 The Oil and Gas Journal, Abril 1967
- L.4 Korrosion und Korrosionsschutz, F. TODT 1959
- L.5 Cathodic Protection of buried metal structures. W.KATZ-BOWER.
1967
- L.6 Corrosion. G.R.KEHN - E.J. WILHELM. 1956
- L.7 Electrochemical Bulletin.- W.J. SCHWERDTFEGER 1952
- L.8 Electroquímica - MANTELL - 1954
- L.9 C.W.E. Bulletin - BROWN & MEARS - 1964
- L.10 Corrosion - KEHN & WILHELM - 1956
- L.11 Corrosion - MAY & HUMBLE - 1954
- L.12 Petroleum Transportation Handbook - 1963
- L.13 Medidor de Resistividad NORMA - Escuela Politécnica Nacional
- L.14 The Pipe Line Engineer - BAUER & VOGEL - 1961
- L.15 Petroleum Transportation Handbook - 1963
- L.16 Petroleum Transportation Handbook - 1963
- L.17 Royal Dutch Shell Cathodic Protection Bulletin. 1968
- L.18 The Pipeline Engineer - Year Handbook - 1965
- L.19 Royal Dutch Shell Cathodic Protection Bulletin. 1968
- L.20 Royal Dutch Shell Cathodic Protection Bulletin. 1968
- L.21 The Oil & Gas Journal - 1967