

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica



**"LOCALIZACION DE SITIOS DE CORTO CIRCUITO ELECTRICO PARA
TUBERIAS ENTERRADAS EN CRUCES ESPECIALES"**

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

Carlos E. Quezada Banchon



Guayaquil

Año

Ecuador

1995

DECLARACION EXPRESA

“ LA RESPONSABILIDAD DE LOS HECHOS , IDEAS Y DOCTRINAS
EXPUESTOS EN ESTA TESIS , ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE ;
Y EL PATRIMONIO DE LA MISMA , A LA ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL ”.

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULO PROFESIONALES DE LA
ESPOL)

A handwritten signature in cursive script, reading "Carlos Enrique Quezada B.", is written over a horizontal line. The signature is fluid and somewhat stylized, with a large loop at the end.

CARLOS ENRIQUE QUEZADA BANCHON

DEDICATORIA

A mi madre MATILDE BANCHON M.,
por su constante apoyo en mi vida estudiantil.

A mis hermanos.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. JULIAN PEÑA E.

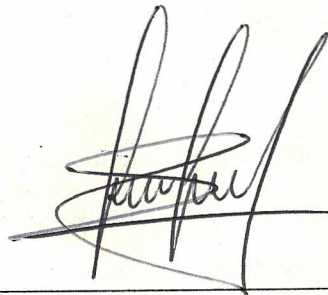
Sr. MARCOS ROJANO

por su valiosa colaboración y

dirección brindada en la reali-

zación de este trabajo.

TRIBUNAL DE GRADO



**ING. JULIAN PEÑA E.
DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. ALFREDO BARRIGA
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA
MECANICA**



**ING. VLADIMIR BERMUDEZ
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



**ING. ALFREDO TORRES
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

RESUMEN

A menudo en instalaciones donde se requiere proteger una línea de tuberías que presentan problemas de aireación diferencial, y más aun en instalaciones que se encuentran en operación, se hace indispensable contar con métodos y técnicas para que dicha protección sea la adecuada y para un posterior mantenimiento de la misma, de tal forma que sea realizada en el menor tiempo posible y económica.

Es por esto que el objetivo de este trabajo de investigación, es el de proveer información específica para la comprobación de un buen aislamiento eléctrico en sitios denominados "cruces especiales" de tuberías, los mismos que se deben realizar tanto en fase de instalación como en fase de operación. De singular importancia será la localización y ubicación de posibles corto circuitos eléctricos que se ocasionan en la colocación de tuberías concéntricas que actúan como verdaderos blindajes eléctricos.

El capítulo 1 trata sobre lo que son los cruces especiales y de los tipos de protección que existen para evitar la corrosión de la tubería conductora. Se proporcionará información necesaria para el montaje y mantenimiento del sistema aislador por cubierta corta en tales casos.

En el capítulo 2, se compendia un procedimiento formal para la construcción del modelo experimental para protección de tubería por cubierta corta, así como las simulaciones realizadas tanto en su fase pre-instalatoria como en terrenos con diversas condiciones de agresividad.

En el capítulo 3 se analizan los resultados experimentales obtenidos con respecto a los valores teóricos de las fórmulas eléctrica utilizables en estos casos para determinar la ubicación del corto circuito eléctrico entre la tubería y la cubierta.

Por último se darán conclusiones y recomendaciones que sirvan como guía a los técnicos que se dedican a éste tipo de actividades , en el que encontrarán una propuesta sencilla de optimizar los ensayos para la detección de algún contacto eléctrico entre las tuberías.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XII
NOMENCLATURA.....	XIII
INTRODUCCION.....	14

CAPITULO I

1. CRUCES ESPECIALES EN INSTALACIONES DE TUBERIAS

ENTERRADAS

1.1 Cruces especiales comunes.....	16
1.2 Los circuitos eléctricos y su analogía en blindajes de tuberías.....	18
1.3 Formas de aislamiento eléctrico.....	22
1.3.1 Por cubierta corta.....	23
1.3.2 Por barrera aislante.....	27
1.3.3 Por revestimiento pesado con alambre reforzado.....	29
1.4 Aislamiento eléctrico por cubierta corta.....	31
1.4.1 Características de los componentes del sistema aislador.....	31
1.4.2 Instalación de cubierta aisladora.....	37
1.4.3 Mantenimiento del sistema aislador por cubierta corta.....	43

CAPITULO II

2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y SIMULACION DE CORTO CIRCUITO ELECTRICO

2.1 Metodología de la experimentación.....	46
2.2 Descripción del equipo experimental.....	47
2.2.1 Materiales.....	47
2.2.2 Equipos e instrumentos de medición.....	47
2.2.3 Construcción del sistema de aislamiento por cubierta corta.....	49
2.3 Simulación pre-instalatoria.....	56
2.3.1 Técnica operativa.....	56
2.3.2 Resultados obtenidos.....	56
2.4 Simulación en terrenos con diversas condiciones de agresividad.....	63
2.4.1 Técnica operativa.....	63
2.4.2 Resultados obtenidos.....	63

CAPITULO III

3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	84
APENDICE.....	85

INDICE DE FIGURAS

N°	Descripción	Pág.
1.	Corrosión por aireación diferencial.....	17
2.	Analogía eléctrica del sistema aislador en corto circuito.....	20
3.	Circuito en serie.....	22
4.	Aislamiento eléctrico por cubierta corta.....	24
5.	Aislamiento eléctrico por barrera aislante.....	28
6.	Aislamiento eléctrico por revestimiento pesado con alambre reforzado.....	30
7.	Puntos de pruebas en cruces especiales.....	36
8.	Componentes del sistema aislador.....	38
9.	Localización del corto circuito.....	41
10.	Medidor de resistividad de terreno "Vibroground".....	48
11.	Multímetros para mediciones eléctricas.....	50
12.	Amplificador de voltaje.....	51
13.	Diagrama del amplificador de voltaje.....	52
14.	Juego de resistores.....	53
15.	Diagrama de resistores.....	54
16.	Sistema aislador experimental.....	55
17.	Sistema eléctrico experimental para ubicación del corto circuito.....	57
18.	Circuito eléctrico para ubicación del corto circuito.....	58
19.	Ubicación del corto circuito en simulaciones pre-instalatorias.....	60
20.	Consecuencia de la unión de tuberías con diferente espesor.....	62
21.	Medición de resistividad del terreno.....	64

22.	Mediciones de campo para determinar la ubicación del corto circuito.....	65
23	Ubicación del corto circuito eléctrico (terreno corrosivo).....	70
24.	Ubicación del corto circuito eléctrico (terreno poco corrosivo).....	71
25.	Influencia de la resistividad del terreno en la ubicación del corto circuito.....	72
26.	Influencia de la resistividad del terreno sobre la corriente.....	73
27.	Comportamiento de la corriente en la cubierta por cambio de ubicación del corto circuito (terreno moderadamente corrosivo).....	74
28.	Comportamiento del voltaje en la cubierta por cambio de ubicación del corto circuito (terreno moderadamente corrosivo).....	75

II
III
IV
V
VI
VII
VIII

INDICE DE TABLAS

N°	Descripción	Pág.
I.	Descripción de aisladores.....	32
II.	Descripción de tapones de cubierta.....	34
III.	Ubicación del corto circuito eléctrico en simulaciones pre-instalatorias.....	59
IV.	Resistencia de cubierta.....	61
V.	Resistividad del terreno.....	66
VI.	Ubicación del corto circuito eléctrico en terreno corrosivo.....	67
VII.	Ubicación del corto circuito eléctrico en terreno moderadamente corrosivo.....	68
VIII.	Ubicación del corto circuito eléctrico en terreno poco corrosivo.....	69

NOMENCLATURA

ρ	Resistividad del terreno en Ohm.cm
V	Voltaje de la fuente.
v1	Caída de voltaje con multímetro.
v2	Caída de voltaje con amplificador y multímetro.
volt.	Voltios.
mv.	Milivoltios.
I	Corriente.
amp.	Amperios.
R	Resistencia.
R/L	Resistencia por unidad de longitud en Ohm/m.
Ohm	Ohmios.
P	Potencia
L	Distancia del corto circuito eléctrico.
m.	Metros.
cm.	Centímetros.
LCT	Distancia teórica del corto circuito eléctrico.
LCE 1	Distancia experimental del corto circuito eléctrico con multímetro .
LCE 2	Distancia experimental del corto circuito eléctrico con amplificador y multímetro.
MV	Milivoltímetro.
A	Amperímetro
B	Batería.

INTRODUCCION

El creciente costo que conlleva el reemplazo de tuberías metálicas y la necesidad de encontrar mejores formas de protección contra la corrosión constituyen un continuo desafío para los Ingenieros y Corrosionistas, puesto que frecuentemente aparecen signos de deterioro en mucho de los sistemas de tuberías enterrada durante su operación, es por esto que se necesita plantear formas diversas de protección para disminuir estos riesgos.

Cuando una línea de tubería con alma de acero es instalada en terrenos donde existen áreas que tienen libre suministro de oxígeno(bien aireados) , y áreas que están faltos de oxígeno (pobrementemente aireado) , como en el caso de tuberías que atraviesan una calle asfaltada, o existe presencia cercana de otra estructura , se produce la corrosión inminente en ciertas áreas de la tubería , debido a que la sección de tubería en el suelo aireado se convierte en cátodo y la sección en suelo pobrementemente aireado en ánodo y por lo tanto corroída.

Como una solución adecuada para evitar la corrosión en estos casos (que en la práctica se presenta con mucha frecuencia) , se hace indispensable la instalación de una tubería concéntrica en la sección de tubería pobrementemente aireada , la cual actúa como un blindaje eléctrico de la tubería interior a proteger. Pero para que dicha protección sea efectiva, es necesario aislar todo contacto eléctrico entre las dos tuberías (mediante sellos en los extremos y separadores aislantes).

El trabajo propuesto en esta tesis está encaminado a realizar mediante simulación de tuberías enterradas , pruebas de aislamiento y conductividad eléctrica en estos sitios

denominados "cruces especiales", a objeto de ver una alternativa de solución a quienes en obra de infraestructuras similares se encuentran con estos problemas.

CAPITULO I

1. CRUCES ESPECIALES EN INSTALACIONES DE TUBERIAS ENTERRADAS.

1.1 Cruces especiales comunes

Una de las causas de actividad en la pila corrosiva es la condición referente a la "aireación diferencial". Algunos investigadores consideran esta causa como una de las mas importantes y comunes razones para los daños de corrosión . Asumiendo por el momento de que una línea de tuberías es enterrada en un suelo completamente uniforme pero que algunas áreas de la línea tiene un libre suministro de oxigeno (bien aireada), mientras que otras áreas están carentes de oxigeno (pobrementemente aireada). Bajo estas condiciones, la tubería en suelo bien aireado se transformara en cátodo y la tubería en suelo pobrementemente aireada será el ánodo y por lo tanto será corroída .

Un caso práctico de cruce especial es el de una tubería pasando por debajo de una calle pavimentada (figura N°1) en donde está en contacto con suelo que tiene un restringido suministro de oxigeno comparado con la tubería en el otro lado de la calle en suelo no cubierto por superficie pavimentada . La corrosión por debajo del pavimento puede ser severa. Esto ha sido observado frecuentemente en sistemas de tuberías.

Otro caso de similar naturaleza es el de una tubería que atraviesa un río o un arroyo a una determinada profundidad, pero en contacto con suelo bien aireado en el otro lado. La corrosión entonces estará concentrada en el área por debajo del río o arroyo .

Suelo en los lados de la
vía permite la libre
migración de oxígeno hacia
la superficie de la tubería.

Vía pavimentada evita
el libre acceso del
oxígeno hacia la tubería.

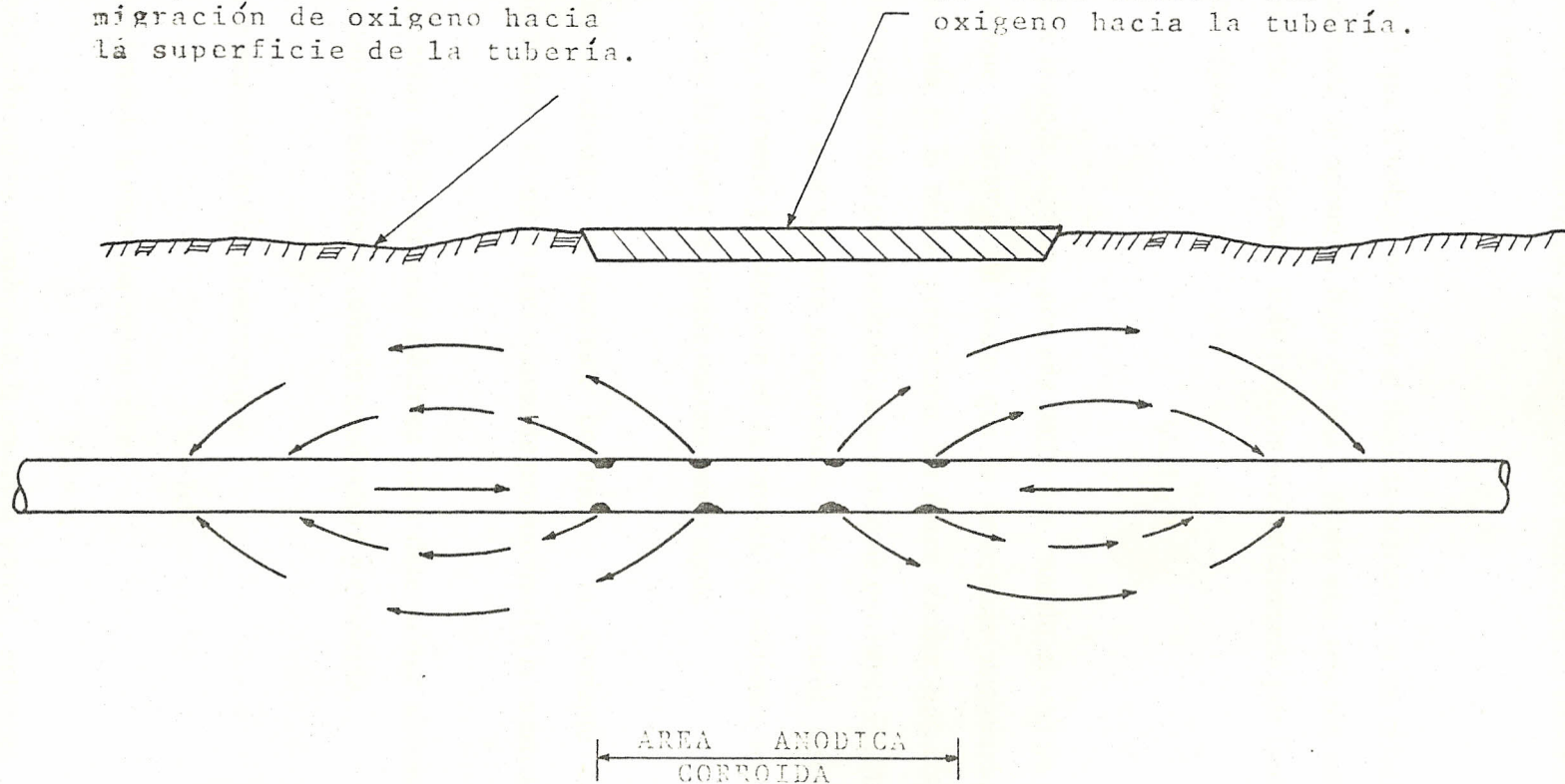


Fig.Nº1.- Corrosión por aireación diferencial

1.2 Los circuitos eléctricos y su analogía en blindajes de tuberías

Ley de Ohm

Puesto que el voltaje produce el flujo de corriente en un circuito cerrado y la resistencia se opone al flujo de ella, existe una relación entre el voltaje, corriente, y resistencia. Esta relación fue determinada por Georg Simon Ohm como sigue:

$$V = I \times R$$

Dicha fórmula expresa por una parte que cuando el voltaje de la fuente se mantiene constante, en tanto que la resistencia aumentaba, la corriente disminuía en la misma proporción. En forma similar, una disminución de la resistencia tendría por resultado un aumento de corriente. En otras palabras, la corriente es inversamente proporcional a la resistencia. Esta relación entre voltaje, corriente y resistencia en un circuito de corriente continua se conoce como ley de Ohm y se puede resumir como sigue:

“En un circuito de corriente continua, la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia”.

Deducción de la fórmula eléctrica para determinar ubicación del corto circuito eléctrico entre tubería conductora y cubierta.

De la ecuación de Ohm tenemos que:

$$V = I \times R$$

Reordenando la ecuación encontramos

$$V/I = R$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación para L , entonces

$$V/(I \times L) = R/L$$

Despejando L de la ecuación obtenemos

$$L = \frac{V}{I \times (R/L)}$$

Donde L es la distancia del corto circuito entre las dos tuberías desde un punto de referencia dado.

Circuitos en serie

En la presentación del anterior material, el circuito descrito ha tenido una cosa en común. Es decir, había una y solo una trayectoria que podía seguir la corriente del terminal positivo de la fuente de potencia, a través del circuito, regresando al terminal negativo de la fuente. Nunca se observó ningún punto en el circuito donde la corriente pudiera dividirse para seguir más de una trayectoria. A éste tipo de circuito de una sola trayectoria se le llama circuito en serie.

Carga en serie

Hasta ahora, se ha descrito un circuito con una sola carga, por ejemplo un resistor. La resistencia de ésta carga única ha sido la resistencia total del circuito y la potencia consumida en el circuito era la potencia que esa carga consumía. Sin embargo, en la práctica se encuentra frecuentemente que un circuito tiene más de una carga. En nuestro caso encontramos varias cargas en serie cuando en el sistema protector se produce un corto circuito. Estas cargas son los resistores, cables, cubierta protectora, resistencia del puente eléctrico, tubería conductora, entre las de mayor consideración como se muestra en la figura N° 2.

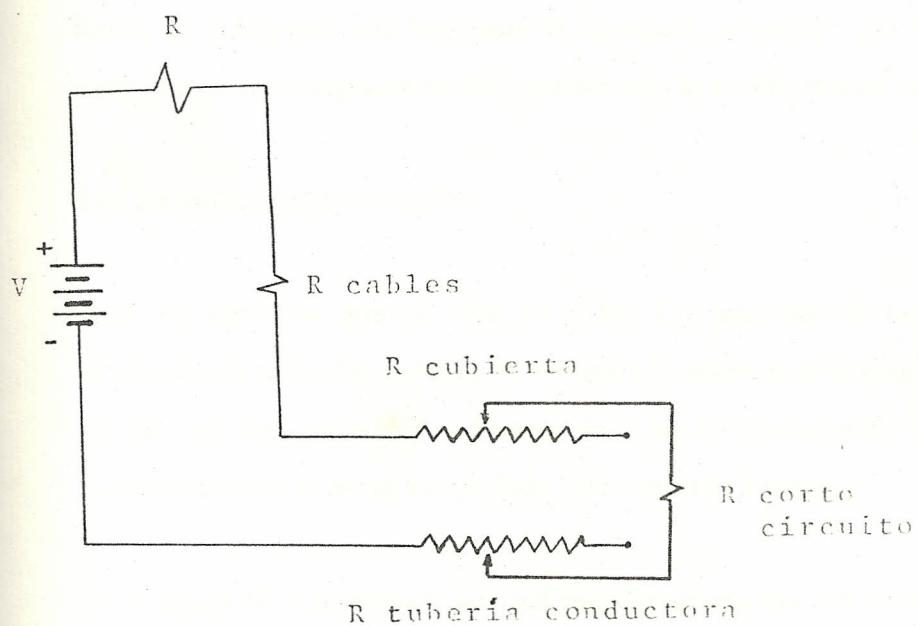
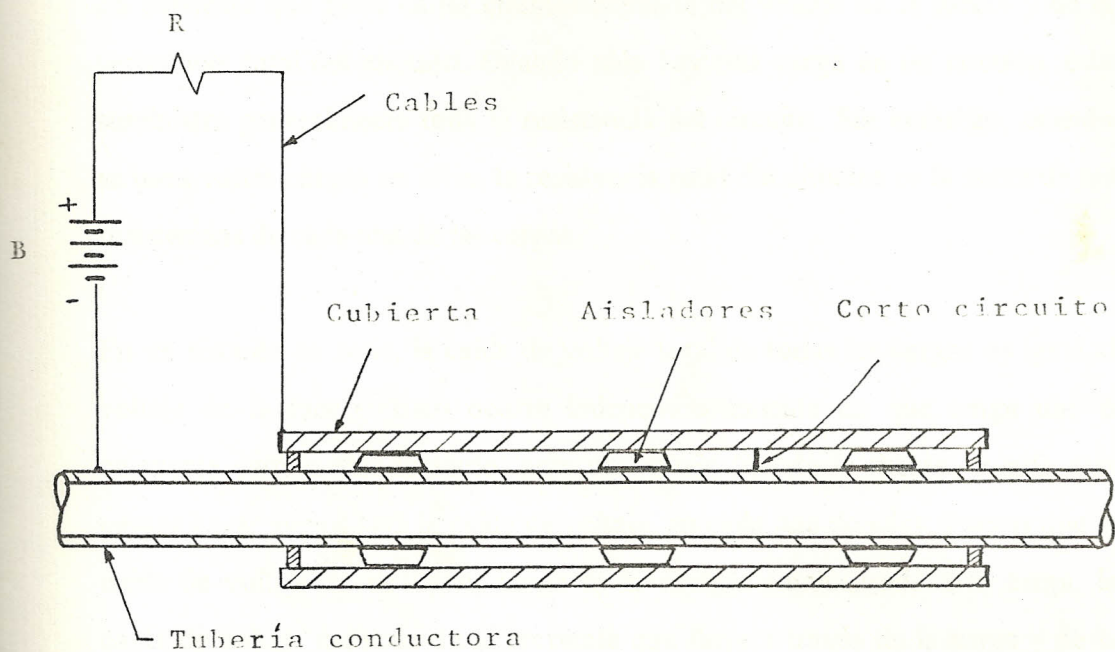


Fig. N°2.- Analogía eléctrica del sistema aislador en corto circuito.

La corriente que fluye en un circuito depende del voltaje de la fuente y de la resistencia total del circuito. Cuando sólo hay una carga en un circuito, ésta suministra generalmente toda la resistencia del circuito. Sin embargo, cuando se usan varias cargas en serie, la resistencia total del circuito es la suma de las resistencias de cada una de las cargas.

En un circuito en serie, la caída de voltaje total de todas las cargas es igual al voltaje de la fuente. Esto ocurre independientemente de que tenga uno o cincuenta cargas. Por lo tanto, para un voltaje fijo de la fuente, cuanta más cargas haya, menor será la caída de voltaje en cada una de ellas. Puesto que la caída de voltaje en cualquier carga es la energía suministrada a la carga, la caída de voltaje depende de la corriente que fluye a través de la carga y de la resistencia, es decir, mientras menor sea la corriente o más baja la resistencia, menor será la caída de voltaje. Lo anterior se representa por la ecuación $E = I \times R$. Se recordará que ésta es una de las ecuaciones de la ley de Ohm y que indica las relaciones que hay entre la corriente, el voltaje y la resistencia de cada uno de los componentes del circuito, así como del circuito completo .

Ley de voltaje de Kirchhoff

Esta ley establece que es cero en todos los instantes de tiempo la suma algebraica de todos los voltajes de la rama a lo largo de cualquier malla cerrada de una red. Esta es una consecuencia de la ley de conservación de energía, ya que el voltaje es la energía (o trabajo) por unidad de carga.

En la figura N° 3 se muestra una red resistiva simple con sentidos de referencia asignados para los elementos y un sentido de referencia para el recorrido en las mallas en el sentido de las manecillas del reloj, seleccionada para aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff. Principiando en el nodo A, se asigna un signo

positivo al voltaje cuando las marcas de polaridad ocurren en el orden -a + y un signo negativo cuando ocurre lo contrario. Por lo tanto, se escribe :

$$+ V_g - V_1 - V_2 - V_3 = 0$$

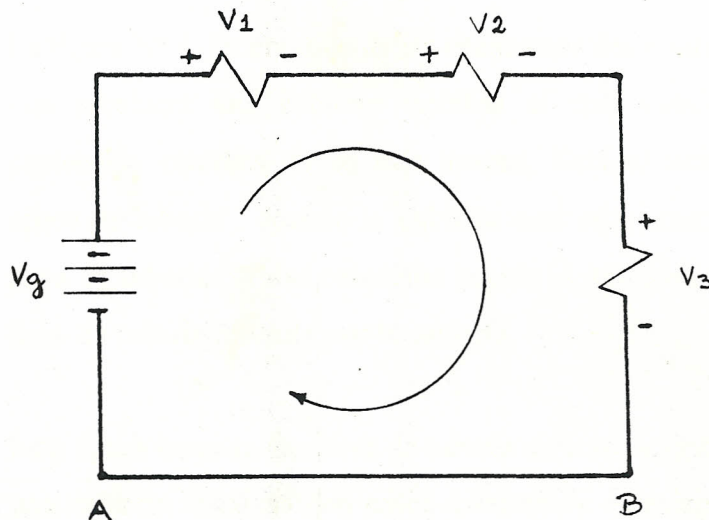


Fig..N°3.- Circuito en serie

Esta ecuación se puede transformar ya sea multiplicando por -1 o pasando los términos de un lado de la ecuación a la otra.

$$V_g = V_1 + V_2 + V_3$$

la ecuación interpreta como que la suma de las caídas de voltaje es igual a la suma de las elevaciones de voltaje.

1.3 Formas de aislamiento eléctrico

Cuando existen líneas de tuberías con problemas de aireación diferencial se recurre al aislamiento eléctrico de la tubería conductora.

Dicho aislamiento puede realizarse tanto con barreras aislantes no metálicas como con corazas metálicas alrededor de la tubería a ser protegida. Cada tipo será discutido a continuación :

1.3.1 Por cubierta corta

La figura N° 4 ilustra una de las situaciones desfavorables más comunes que involucra una cubierta metálica el cual desvía la corriente de protección catódica de su ruta normal. Esta situación se produce en cruce de tubería , cuando la cubierta está en contacto metálico con la línea de tuberías. Tales contactos impide la protección catódica de una línea de tubería rodeada por la cubierta.

Esta figura muestra una línea de tubería en corte longitudinal, tanto como una cubierta instalada con sellos extremos y espaciadores aislantes para conservar la cubierta completamente libre de contacto metálico con la línea de tubería . Pero este aislamiento no es siempre logrado .Los contactos pueden originarse de condiciones tales como:

1. Sellos extremos instalados incorrectamente.
2. Número insuficiente de espaciadores.
3. Línea de tubería torcida por forzamiento.
4. Soldadura en el interior de la cubierta , el cual puede crear contacto eléctrico entre la línea de tubería y la cubierta cuando el espacio libre es pequeña como resultado de la condición 2 y 3 arriba indicada.
5. Alambre para puntos de pruebas en contacto con el extremo de la cubierta .
6. Objetos metálicos o fragmentos accidentalmente dejados dentro de la cubierta durante su construcción.

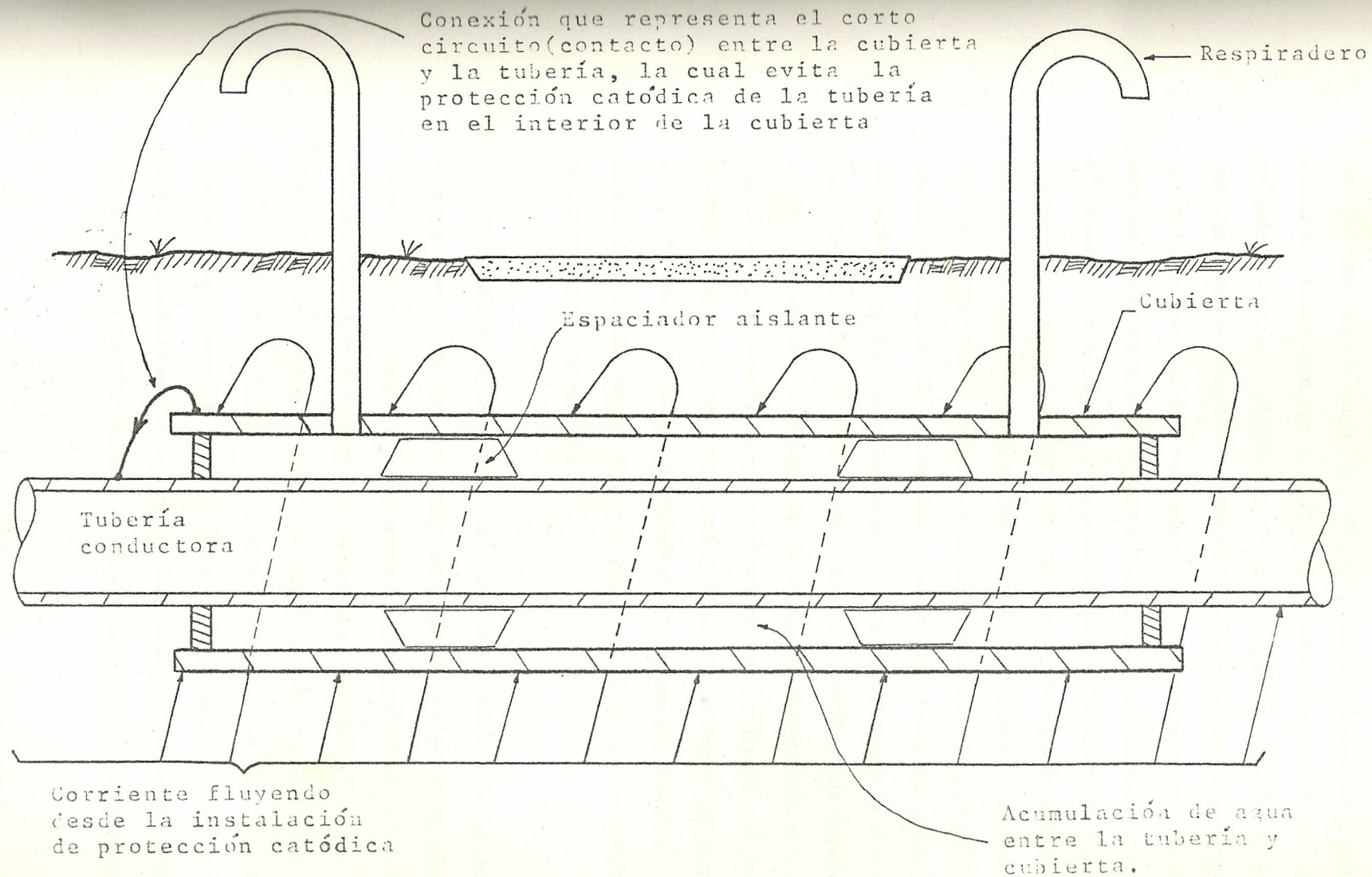


Fig. N°4.- Aislamiento eléctrico por cubierta corta

Sea cual que fuere la causa , la condición puede ser representada por una conexión como muestra la figura. Si la tubería en el interior de la cubierta es revestida completamente o si el espacio entre la tubería y cubierta esta sin humedad, no podría haber otro problema de corrosión que la atmosférica del acero expuesto. Los revestimientos de la línea de tuberías están particularmente expuestos a daños mientras están siendo empujados hacia el interior de la cubierta. El agua algunas veces ingresa a la cubierta a través de defectos en sellos extremos o puede condensarse del aire que ingresa a través de los respiraderos. La figura muestra agua entre la tubería y cubierta como es encontrado en un gran porcentaje de cruces especiales. Estos medios posibles de corrosión indican la necesidad de protección catódica en esa zona de la tubería dentro de la cubierta tanto como en el resto de la tubería .Debido a que cuando las averías han ocurrido, la reparación es mucho mas complicada y costosa que en lugares donde las tuberías son enterradas directamente en suelo a lo largo de la via. La naturaleza critica de los cruces especiales desde el punto de vista de riesgos y dificultad de reparación, justifica el ser detallista para estar seguro de que la tubería en el interior de la cubierta esté apropiadamente protegida.

Es interesante observar porque la protección catódica de la tubería rodeada por la cubierta no puede ser lograda con un corto circuito eléctrico entre tubería y cubierta como muestra la figura. Con el corto circuito en el sitio, la corriente de protección catódica se acumula en el exterior de la cubierta y fluye a lo largo de esta hasta el punto de contacto entre la tubería y la cubierta . En el punto de contacto, la corriente de protección catódica fluye hacia la tubería conductora a través del contacto metálico y desde allí a lo largo de la parte posterior de la tubería conductora hasta la instalación de la protección catódica. En

estas condiciones, esencialmente ninguna corriente de protección catódica fluirá a través de la pared de la cubierta y agua hasta la superficie humedecida, dejando la tubería en el interior de la cubierta expuesta a la corrosión aun aunque el resto de la tubería está totalmente protegida.

En algunos sistemas de tuberías, tubos de cubierta pobremente revestida o sin ella, son usadas sobre línea de tuberías bien revestidas. Si tales cubiertas se conectan accidentalmente con la línea, existirá otro problema además de la pérdida de protección sobre la tubería interior de la cubierta. Esto es porque una cubierta en contacto con la tubería revestida puede absorber tanta corriente de protección catódica equivalente a varias millas de línea de tuberías. Tales cubiertas corto circuitadas imponen por lo tanto una innecesaria carga en las instalaciones de protección catódica.

Si el tubo que actúa como cubierta está libre de contacto metálico con la tubería conductora (es decir, apropiadamente aislada), el material metálico del tubo coraza sirve simplemente como parte del ambiente conductivo. La corriente de protección catódica entonces es capaz de fluir de manera directa a través de la pared de la cubierta hacia esas porciones de la línea de tuberías en contacto con cualquier electrolito en el interior de la cubierta. Con esta conexión, la corriente descargada desde la superficie de la cubierta corroerá el interior de la cubierta. Por esta razón es importante tratar de conservar los defectos de revestimiento al mínimo sobre la tubería que se encuentra dentro de la cubierta. Esto reduce el flujo de corriente total y reduce las pérdidas metálicas de la superficie interior de la pared de cubierta.

1.3.2 Por barrera aislante

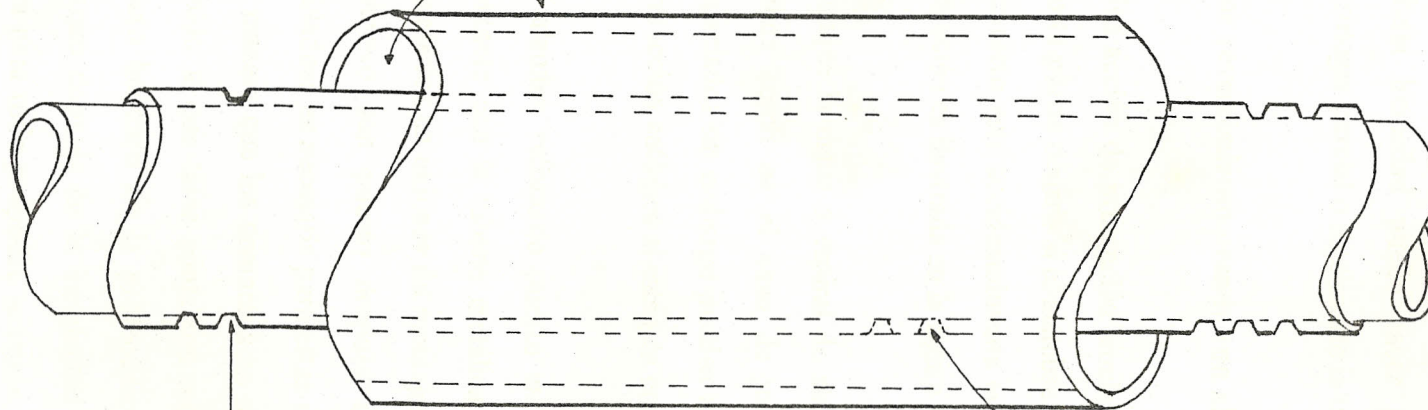
En la figura N° 5 muestra una situación en la cual parte de la línea de tuberías revestidas es rodeada por una pared aislante holgada. El espacio entre esta barrera y la tubería puede llenarse con tierra o agua. Si hay defectos en el revestimiento de tubería, el metal expuesto estará sujeto a corrosión. Además de eso, si la tubería esta bajo protección catódica, la corriente protectora no puede alcanzar el metal expuesto en los defectos de revestimiento en el interior de la barrera.

Un análisis de la implicaciones de la figura puede sostener el argumento de que la corriente de protección catódica podría fluir hacia los defectos del revestimiento protector a través del suelo o agua entre la barrera aisladora y la línea de tuberías. Esto puede ser, pero frecuentemente no en las cantidades suficientes para la protección. Para una distancia dada entre el extremo de la coraza y un defecto de revestimiento dentro de dicha coraza, la cantidad de corriente que llega al metal descubierto en los defectos del revestimiento será una función de la resistencia longitudinal de la capa de tierra o agua entre la coraza y la tubería a través de la cual la corriente debe fluir. Esto significa que la capacidad de la corriente eléctrica para penetrar tales espacios no es grande. Como algo práctico, no se debería esperar fuerza de corriente hacia adentro del espacio a una distancia mayor a tres veces el espesor de la capa entre la coraza y la tubería. Esta figura no es rigurosa pero sirve como una guía de la relación expuesta.

La discusión anterior se aplica también a una barrera completamente aislada. Esta barrera no necesita rodear completamente la tubería, pero puede proteger parcialmente un área, como sucede con una gran roca. Si

Barrera aislante
alrededor de
la tubería.

Tierra, agua, o mezcla
de los dos, entre el
revestimiento de tubería
y barrera aislante.



Defectos fuera de la
barrera aislante recibe
la corriente de protección
catódica libremente.

Defectos de revestimiento
en el interior de la
barrera aislante reciben
poca o ninguna corriente
de protección catódica.

Fig. N° 5.- Aislamiento eléctrico por barrera aislante.

la barrera es un material aislante, pero suficientemente poroso para absorber suficiente humedad del suelo para convertirse en conductivo, dicha humedad puede hacer pasar suficiente corriente como para proteger parcial o totalmente la tubería en los defectos de revestimiento.

1.3.3 Por revestimiento pesado con alambre reforzado

Una acción de protección similar a la que encontramos en una cubierta corta puede ocurrir si el alambre reforzado en el revestimiento pesado de concreto está accidentalmente en contacto eléctrico con la tubería. Esta situación es ilustrada en la figura N° 6.

Aunque la malla o espiral de alambre reforzado no forma una cubierta sólida como en el caso de una cubierta corta, los alambres poco espaciados sin embargo pueden interceptar la mayoría de la corriente de protección catódica si están en contacto eléctrico con la tubería.

El alambre reforzado puesto en un revestimiento no debería estar en contacto con la tubería metálica. Además deben tomarse los cuidados necesarios en uniones de montajes si el alambre reforzado y material de concreto son puesto después de soldar y cubrir. Una inspección cuidadosa es necesaria para estar seguro de que el alambre sea puesto de tal manera que los contactos no se produzcan. Esto es muy importante debido a que tales contactos reducirán o anularán completamente el efecto benéfico de la protección catódica en su vecindad y también porque después de la instalación, la tubería con revestimiento pesado será para todo propósito práctico, inaccesible para la eliminación de los contactos. Para estar seguro de que los contactos no existen, es buena

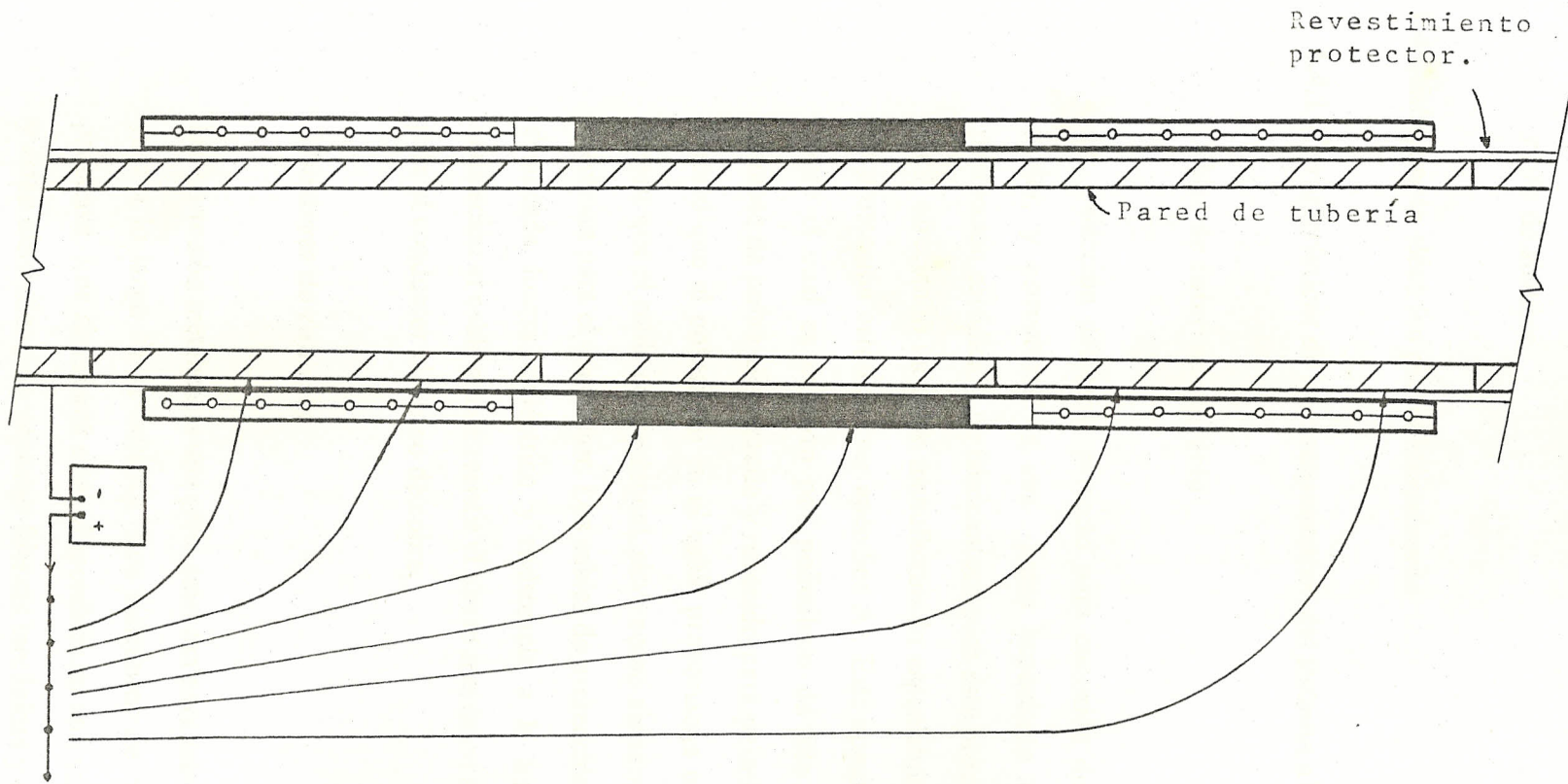


Fig.Nº6.- Aislamiento eléctrico por revestimiento pesado con alambre reforzado

práctica hacer mediciones de resistencia entre la tubería metálica y la malla de alambre.

1.4 Aislamiento eléctrico por cubierta corta

1.4.1 Características de los componentes del sistema aislador

Cables de enterrado directo

La selección del cable correcto para conexión de ánodos, fuentes de poder, y estructuras es una parte importante de algún diseño de protección catódica. Los fabricantes hacen este proceso de selección más fácil, ofreciendo un cable manufacturado especialmente para la industria de protección catódica (ver apéndice A). Está compuesto de alambre de cobre el cual es cubierto por polietileno de alto peso molecular. El alambre de cobre es trenzado y revenido para permitir extra flexibilidad. Puesto que el polietileno en el cable proporciona un espesor dos veces mayor que el cable convencional, sirve como aislador eléctrico y cubierta mecánica para el conductor. Los cables de protección catódica tienen una destacada fuerza dieléctrica y resistencia a la humedad. Durante la instalación el cable puede resistir el abuso mecánico sin riesgo de dañarse para el conductor eléctrico de cobre.

Aisladores de cubierta

La corrosión metálica es una seria amenaza para una línea de tubería que pasa a lo largo de la cubierta. Los aisladores de cubierta eliminan este problema. Los aisladores están disponibles en una variedad de materiales y están diseñados para soportar fuerzas mecánicas y aislar eléctricamente

una tubería conductora de su cubierta. Para obtener economía en la instalación, se fabrican aisladores de polietileno moldeado por inyección. Estos tienen una alta resistencia a la abrasión y bajo coeficiente de fricción, y están disponibles para diámetros de tubería conductora desde $\frac{3}{4}$ hasta 48 pulgadas. Cuando la resistencia a fuerzas extremas y durabilidad son prioridades, aisladores laminados en frío pueden ser usados con una variedad de ruedas aisladoras. Para proteger el revestimiento de la tubería conductora y para proveer un nivel secundario de aislamiento, la cubierta de acero son revestidos con un recubrimiento con cloruro de polivinil. Estos recubrimientos presentan una excepcional resistencia dieléctrica (1380 vol/milla), es resistente a ácidos y álcalis, y tiene una temperatura máxima de operación igual a 150 F. Los tipos de aisladores se muestra en la tabla I.

TABLA I
DESCRIPCION DE AISLADORES

MODELO DE AISLADOR	COMPOSICION	TIPO DE RUEDAS
A8	Correa con 8" de acero	1", 2"plástico y acero moldeado
A12	Correa con 12" de acero	1", 2"plástico y acero moldeado
C12G-2	Correa con 8" revestido	1", 2"plástico y acero moldeado
C12G-2	Correa con 12"revestido	1", 2"plástico y acero moldeado
PE	plástico	plástico

Sellos extremos de cubierta

El ataque de corrosión puede ocurrir en el interior del espacio anular de la tubería conductora y su cubierta. La instalación de los sellos extremos de su carcasa es una de las más efectivas formas para combatir éste problema. Los sellos son hechos de eslabones moldeados de caucho sintético sólido, los cuales son unidos por pernos y tuercas resistentes, Después de que los eslabones son colocados en la cubierta ya instalada, los pernos son girados para crear un sello hermético de agua y aire. Estos sellos evitan que la humedad de otros fluidos se introduzcan, minimizando el riesgo de la actividad corrosiva. Además, aíslan eléctricamente y sostienen la tubería conductora. Su construcción de caucho flexible absorbe los golpes y vibraciones creadas por disturbios de tierra. Algunos de los sellos extremos se muestran en el apéndice B.

Los sellos extremos están diseñados para instalación de campo rápida. Estas son despachadas pre-ensabladas en 10 unidades de eslabones a lo largo con instrucciones completas. El diámetro necesario de sellado puede ser alcanzado en minutos, simplemente por aumento o removiendo eslabones individuales. Puesto que los elementos selladores de caucho se expanden cuando los pernos son apretados, los sellos compensaran para una considerable cantidad de desalinamiento angular y excentricidad mientras amortigua formando un sello eficiente.

Tapones extremos de cubierta

Los tapones extremos completa el sellado contra la introducción de electrólitos en el espacio anular entre la tubería conductora y la cubierta metálica. Debido a que detiene efectivamente la intrusión de fluidos

térreos y de esta manera evita la corrosión. Los tapones son fabricados de un caucho sintético compuesto.

Puesto que el caucho es resistente a muchos ácidos , álcalis y otros químicos encontrados frecuentemente en suelos , estos pueden ser usados en numerosos ambientes para proveer una larga vida de protección contra la corrosión. Además, los tapones están disponibles en una variedad de diámetros y algunas diferentes configuraciones, como se muestra en la tabla II.

Los tapones de cubierta están diseñados para instalación libre de averías. Ellos forman un enlace mecánico fuerte a los extremos de la cubierta y la tubería a través de abrazaderas de acero inoxidable ajustables, los cuales pueden ser apretados con algun destornillador. Los rebordes sobre los tapones identifican las áreas para colocar las abrazaderas para asegurar una conexión firme.

TABLA II

DESCRIPCION DE TAPONES DE CUBIERTA

MODELO	APLICACIONES TIPICAS
C	Tubería conductora con movimiento lateral
FW	A prueba de fuego
S	Uso general
W	Envolvente

Puntos de pruebas para sistema aislador por cubierta corta

La facilidad con el cual el sistema de protección con cubierta corta puede ser probado depende del tipo de punto de prueba instalado.

Algunas sugerencias sobre puntos de pruebas en cubierta son incluidos en la figura N° 7.

Los puntos de pruebas de cuatro cables (tubo respiradero sirve como un cable en los casos 1 y 2) permiten exactitud en mediciones de resistencia. El alambre adicional, tubo respiradero, o varilla de prueba en contacto con el extremo opuesto de la cubierta hace posible localizar la posición de un corto circuito.

Conexiones de los cables de pruebas en tuberías

Los cables de pruebas para medición de potencial son clasificados por su resistencia mecánica más que por sus requerimientos eléctricos. Como guía, el cable conductor trenzado N°12 AWG con aislamiento plástico (tipo TW) es adecuado para este servicio en los casos usuales. Tales cables pueden ser conseguidos de acuerdo a su clasificación por colores. Los cables de calibre grueso N°6 o N°4 AWG son satisfactorios a menos que los puntos de pruebas estén bajo el tránsito severo o en áreas de sistemas de corrientes extraviadas, donde los cables pueden ser dañados. Si fuese necesario conectar cables de pruebas durante la instalación, empalmes enroscados o atornillados deberían ser evitados, porque pueden desarrollar alta resistencia con el tiempo. Un empate soldado es preferible, usando estaño. El empate debería ser aislado con caucho y cinta plástica para hacerlo hermético al agua.

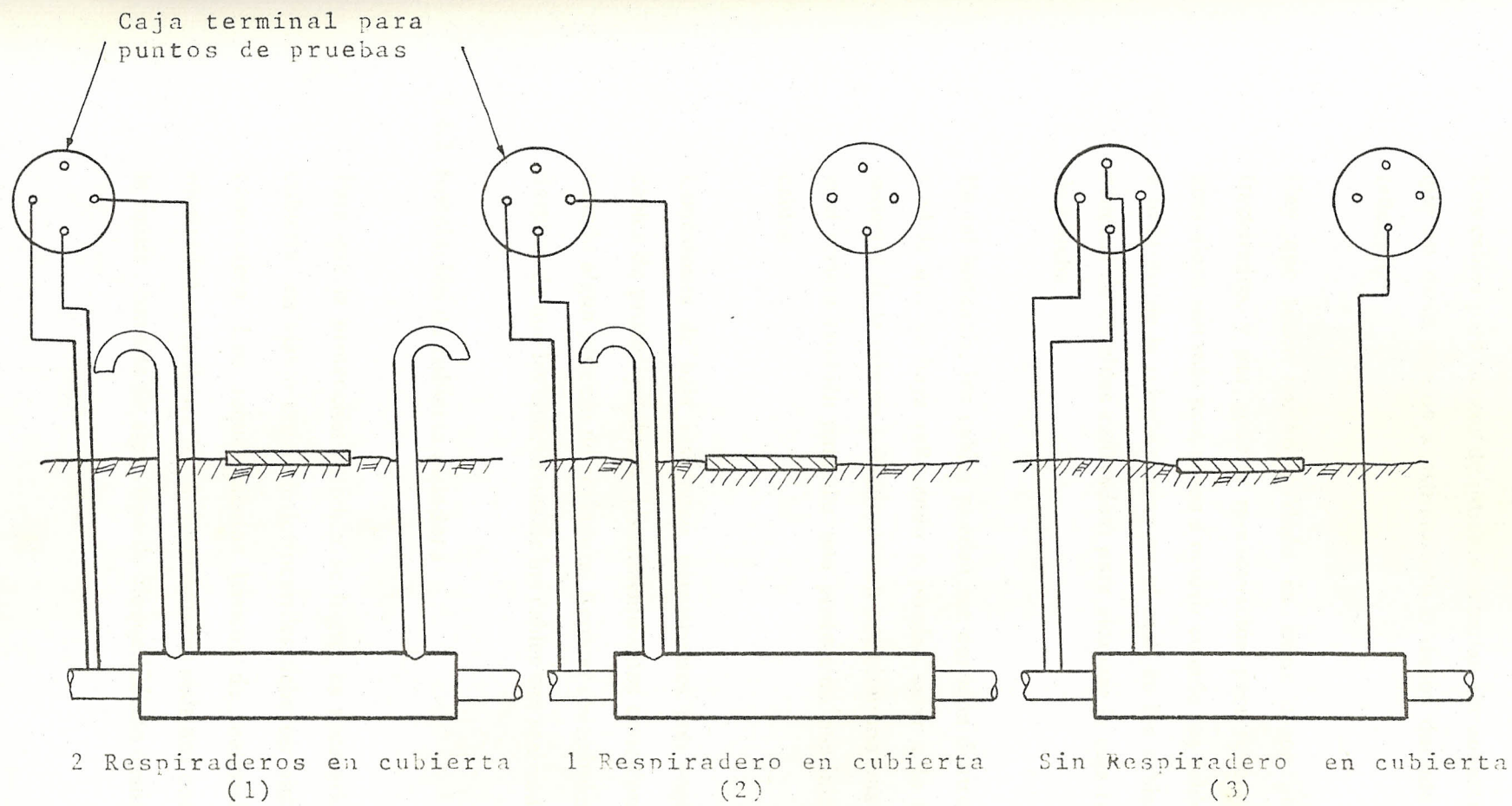


Fig.Nº7.- puntos de pruebas en cruces especiales

Los cables para puntos de pruebas deberían ser conectados de tal forma que no estén sujetos a estiramiento o daños durante la operación de rellenado.

Hay que tener mucho cuidado en estos casos para evitar cables fracturados, y por ende la re-excavación para reparar. Daños de esta naturaleza son más propensos a ocurrir cuando los cables son extendidos a lo largo de la tubería (como en el caso de los cables para puntos de pruebas de 4 cables calibrados) para alcanzar la caja terminal del punto de prueba.

En tal instancia, los cables pueden ser corridos dentro de la tubería a medida que se baya rellenando o puedan estar a lo largo de la parte superior de la tubería y mantenida en posición con una cinta adhesiva el cual servirá también para dar una protección mecánica adicional a los cables.

Conexiones de baja resistencia permanentes son requeridas entre los cables de prueba y tubería. Usualmente estas conexiones son realizadas usando algún proceso de soldadura. Reparar revestimiento es importante después de que las conexiones de los cables son realizadas.

1.4.2 Instalación de cubierta aisladora

Para que la protección catódica se logre, es necesario que el tubo de cubierta en vías o cruce de ferrocarriles debe ser aislada de la tubería conductora. Los requerimientos básicos de materiales aislantes son mostrados en la figura N° 8. Espaciadores aislantes como se muestra en la figura , consiste de algún tipo de bloque aislante deslizante , los cuales

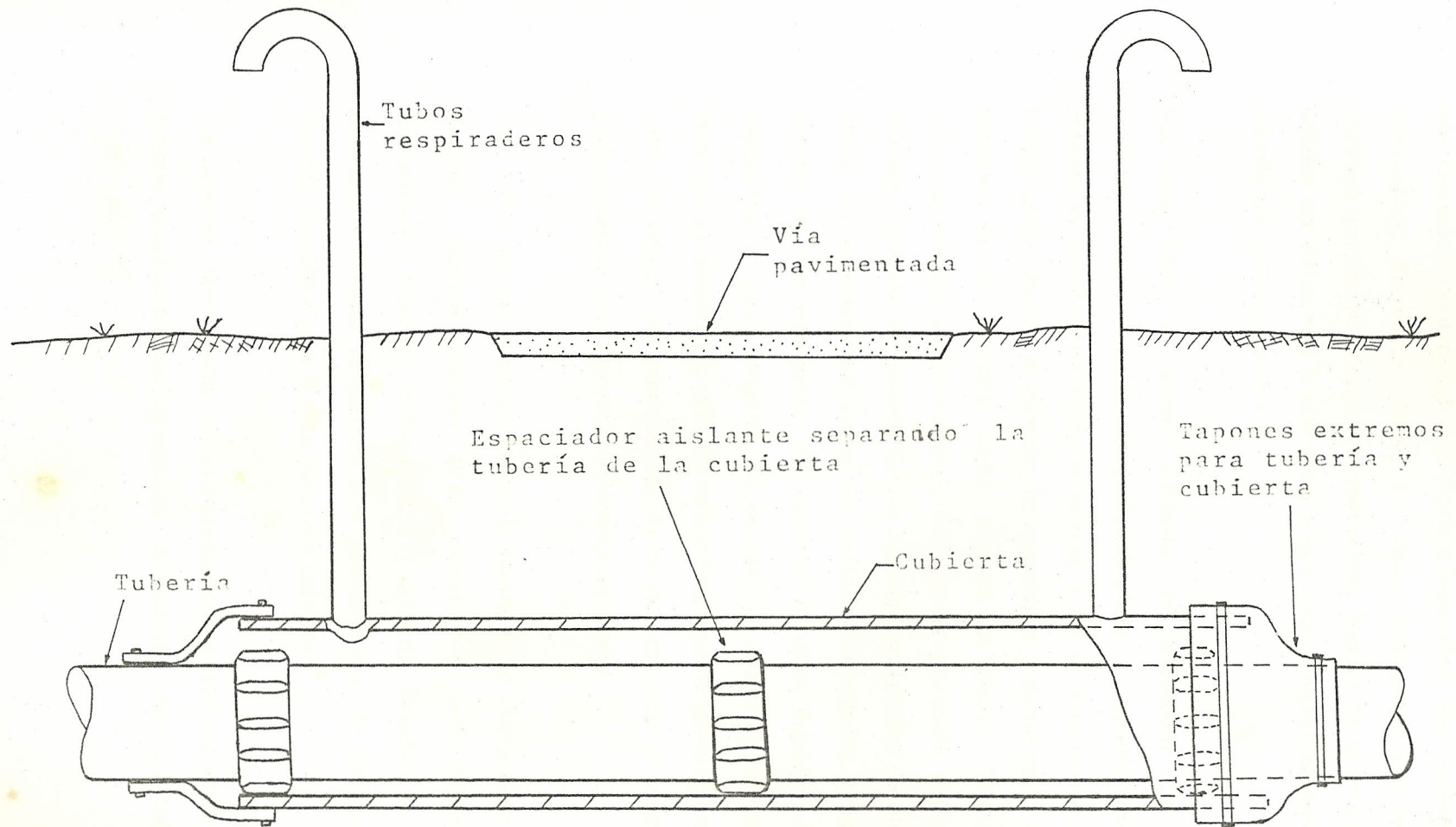


Fig. N°8.- Componentes del sistema aislador

son asentados alrededor de la tubería a intervalos. Hay varios diseños disponibles, fluctuando desde los tipos totalmente plásticos hasta modelos que tienen bloques aisladores con bandas de acero (los cuales pueden ser de caucho o plásticos) o que tiene bloques asegurados a la tubería con cables de acero.

Sea cual fuere el diseño utilizado, lo importante es colocarlo uniformemente espaciados, asegurándolos bien a la tubería conductora y planear su localización sobre la misma, a fin de que cuando éste sea halado en la cubierta, el extremo del espaciador aislante quede cerca del extremo de la cubierta como muestra la figura. Siguiendo las recomendaciones del fabricante para el número y medida del espaciador aislante. Durante el montaje de las tuberías, materiales de alta calidad deben ser utilizados así como los cuidados necesarios, especialmente cuando se está trabajando con tuberías de gran diámetro en cruces especiales de gran longitud. Si durante la operación de empuje de cubierta, un aislador de cubierta es accidentalmente golpeado o dañado, entonces deberá ser reemplazado antes de continuar el empuje para poder mantener una separación eléctrica adecuada.

Los sellos extremos mostrados en la figura están disponibles en varios diseños. Muchos diseños están clasificados para proveer sellos herméticos y flexibles, entre tubería y cubierta. Muchos de ellos son herméticos al agua. El método ilustrado es típico de mangas de cuero sintético medidos para fijar la tubería y cubierta.

La cubierta misma debe ser preparada apropiadamente antes de que la tubería conductora sea introducida al interior de éste. Las soldaduras

deberán ser aisladas en el interior para evitar daños a los espaciadores aislantes. La cubierta necesita estar recta y alrededor de la tubería, con espaciadores pegados. Todo residuo debe ser removido. Si los tubos respiraderos son colocados después de que el tubo conductor es puesto, haciendo un agujero con oxicorte sobre la cubierta puede dañar el revestimiento de la tubería y si el pedazo de metal resultante debido al corte del agujero es dejado al caer dentro de la cubierta, un corto circuito desde la tubería conductora a cubierta podría resultar. Por consiguiente, todo agujero cortado debería ser realizado antes de introducir la tubería conductora.

Localización de corto circuito eléctrico en sistemas de protección

Si un sistema de aislamiento por cubierta corta se corto circuita en servicio, la capacidad de descubrir por pruebas dónde el corto está localizado, ahorrará mucho tiempo y dinero durante intentos de limpieza fallidos. Esto puede ser realizado con adecuados puntos de prueba, como ilustrado en la figura N°9. Como se muestra en la figura, la corriente de batería medida con un amperímetro es conducida entre la tubería conductora y la cubierta. Esta corriente fluirá a lo largo de la cubierta hasta el punto del corto circuito donde se transferirá hacia la tubería y regresará a la batería. Un multímetro conectado entre los dos extremos de la cubierta indicará un valor dado por la medición del flujo de corriente a través de la resistencia de la cubierta dentro de la longitud de la cubierta por la cual la corriente fluye. La medida y espesor, o peso por pie debe ser conocida a fin de que su resistencia pueda ser determinada utilizando el apéndice C.

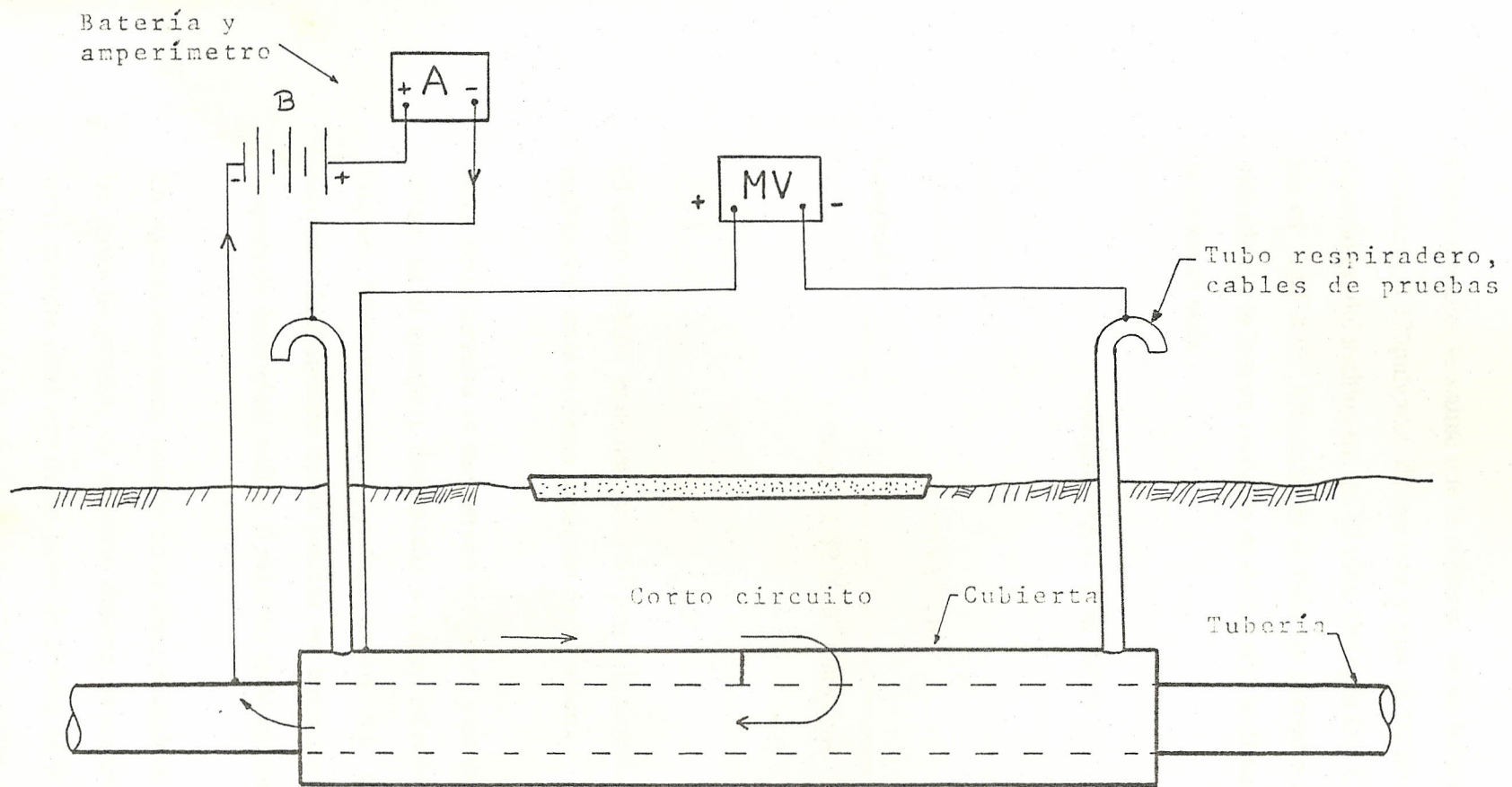


Fig. N°9.- Localización del corto circuito

Como ejemplo, se asume que la cubierta es un tubo de 26 pulgadas de diámetro, 0.375 pulgadas de espesor y que el tramo punteado para las conexiones del multímetro es 80 pies. Del apéndice C, la resistencia por pie es 2.82×10^{-6} Ohm/pie. Si el flujo de corriente de la batería es 10 amperios y la lectura recogida es de 1.6mV, la distancia atravesada por la corriente sería :

$$\text{Longitud} = \Delta V / (I \times (R/L))$$

$$\text{Longitud} = \frac{1.6\text{mV} \times 10^{-3}}{10\text{amp} \times 2.82 \times 10^{-6} \text{ Ohm / pie}} = 57 \text{ pies}$$

El corto circuito, entonces, sería 57 pies a la derecha de la conexión del multímetro en el extremo izquierdo de la cubierta.

Si un corto circuito es encontrado a algunos pies del extremo izquierdo (como en el ejemplo), éste puede ser muy dificultoso e impráctico de limpiar. Afortunadamente, muchos cortos son encontrados en los extremos de la cubierta donde pueden ser limpiados sin mucha dificultad después de determinar cuál es el extremo corto circuito .

En algunas ocasiones, cuando no se tiene el cuidado respectivo al poner las guías de prueba, un aparente defecto de cubierta es realmente un corto circuito entre una de las guías de prueba de la tubería y cubierta o el respiradero de la tubería. Esto puede resultar, por ejemplo, si los

alambres de prueba son envueltos alrededor de los respiraderos y posteriormente son halados de tal manera que el aislamiento se fracture y produzca un corto circuito.

1.4.3 Mantenimiento del sistema aislador por cubierta corta

Mantener el aislamiento entre la tubería conductora y la cubierta es el objetivo más importante en un cruce especial. Si es imposible conservarlos aislados, algunos pasos deberían ser tomados para eliminar (por otro método que la protección catódica) condiciones propicias para la corrosión sobre la tubería conductora.

El estado de aislamiento en los sistemas de protección por cubierta corta debería ser medida en cada inspección anual. Algo que indique corto circuito después de la última inspección, debería ser notificado para una pronta reparación. Antes de que un equipo de línea sea enviado al sitio, se deberá determinar la localización del corto circuito por mediciones eléctricas.

La primera cosa a chequear es el punto de prueba en el sistema de protección. Es usual encontrar que el corto circuito no está en la cubierta propiamente dicha, pero es el resultado de contacto entre los cables de prueba y el respiradero de la cubierta o entre los cables y el punto de prueba del conductor montado sobre el respiradero de la cubierta.

Con un contacto en uno de los dos extremos, entonces ese extremo puede ser destapado, el sello extremo removido y el corto circuito despejado. Esto puede requerir gata de tubería y cubierta por separado y

la inserción de aisladores adicionales entre ellos. Usualmente , cuando el contacto está en un extremo , su localización y causa son obvios una vez que el extremo es destapado y el sello final es removido. El sello extremo de la cubierta debería ser reemplazado después de que el corto circuito sea despejado y antes de rellenado el agujero.

Donde las pruebas indican que el punto de contacto está bien atrás del extremo de la cubierta, existe el riesgo de que éste no pueda ser despejado trabajando desde el extremo de la cubierta. Para proteger la tubería conductora en el interior de la cubierta no despejable , el procedimiento favorable es llenar el espacio anular completo entre el tubo y la cubierta con un material que sofocará alguna tendencia de corrosión. Compuestos para cubierta (grasas que contienen químicos inhibidores) o petróleo no refinado (con bajo contenido de sulfuro) pueden ser usados.

El procedimiento general para el uso de compuestos o petróleo para el llenado de cubierta es cómo sigue:

1. *Destapar el extremo de la cubierta , remover el sello extremo y dejar que toda el agua sea drenada . Reemplace el sello extremo.*
2. Donde la cubierta tiene un respiradero en cada extremo, bombear compuesto colado o petróleo en el fondo del respiradero hasta que emerja a la parte superior del respiradero.
3. Si la cubierta no tiene un respiradero en cada extremo, instalar tubos montantes para el propósito y luego seguir el paso dos. Esto asegura el llenado completo del espacio anular en el interior de la cubierta.

Para una operación exitosa , los compuestos colados o petróleo deberán ser bombeados dentro de la cubierta durante un corto período para que la

colada corra a lo largo de la cubierta antes de que se espese. Calderos coladores y bombas (o equivalentes) deben estar disponibles.

CAPITULO II

2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y SIMULACION DE CORTO CIRCUITO ELECTRICO.

Se proveerá información específica para la comprobación de un buen aislamiento eléctrico en sitios denominados "cruces especiales", los mismos que deben realizarse tanto en fase de instalación como en fase de operación. De singular importancia será la localización y posterior ubicación de puentes eléctricos en sistemas aisladores, la influencia de la resistividad del terreno en la localización de dichos puentes y la ventaja de contar con un amplificador de voltaje para lograr una mayor exactitud en las mediciones de campo.

2.1 Metodología de la experimentación

A fin de representar situaciones prácticas en una línea de tubería con el sistema de aislamiento por cubierta corta, se realizarán en el presente trabajo de investigación 32 simulaciones de campo, de las cuales 8 serán realizadas colocando el sistema de tuberías en un sitio donde no exista contacto con el medio corrosivo (ensayos pre-instalatorios), y las restantes 24 se realizarán cuando la misma sea enterrada en lugares con las condiciones de agresividad siguiente:

- 8 ensayos de campo en terreno corrosivo.
- 8 ensayos de campo en terreno moderadamente corrosivo.
- 8 ensayos de campo en terreno poco corrosivo.

Cada conjunto de ensayos (8 simulaciones) tanto en la fase pre-instalatoria como en la fase de operación involucrará situaciones adecuadas y

desfavorables para el sistema de protección por cubierta corta (las situaciones desfavorables serán cuando exista el corto circuito entre la tubería a proteger y su cubierta) para su posterior detección y ubicación por el método eléctrico

2.2 Descripción del equipo experimental

2.2.1 Materiales

Los materiales utilizados para la realización del modelo experimental son los siguientes :

Tubería de acero de 2" de diámetro y 7.20m de longitud .

Tubería de acero de 4" de diámetro y 6.70m de longitud .

Cable con aislamiento plástico flexible N° 10 AWG.

Aisladores de cubierta plástica modelo PE para tubería interior y exterior de 2" y 4" respectivamente.

Sellos extremos , serie 300 modelo LS 300C para tubería de acero.

Tapones extremos de cubierta modelo S para tubería de acero según norma ANSI.

Lagartitos metálicos para simulación de corto circuito eléctrico.

2.2.2 Equipos e instrumentos de medición

Soldadora eléctrica.

Soldadora autógena

Cargador de batería "CHRISTIE", modelo C-690.

Batería de 12 voltios "PERFECTA" ,con potencia máxima de 600W.

Medidor para resistividad de terreno "VIBROGROUND", modelo 293 (figura N° 10).

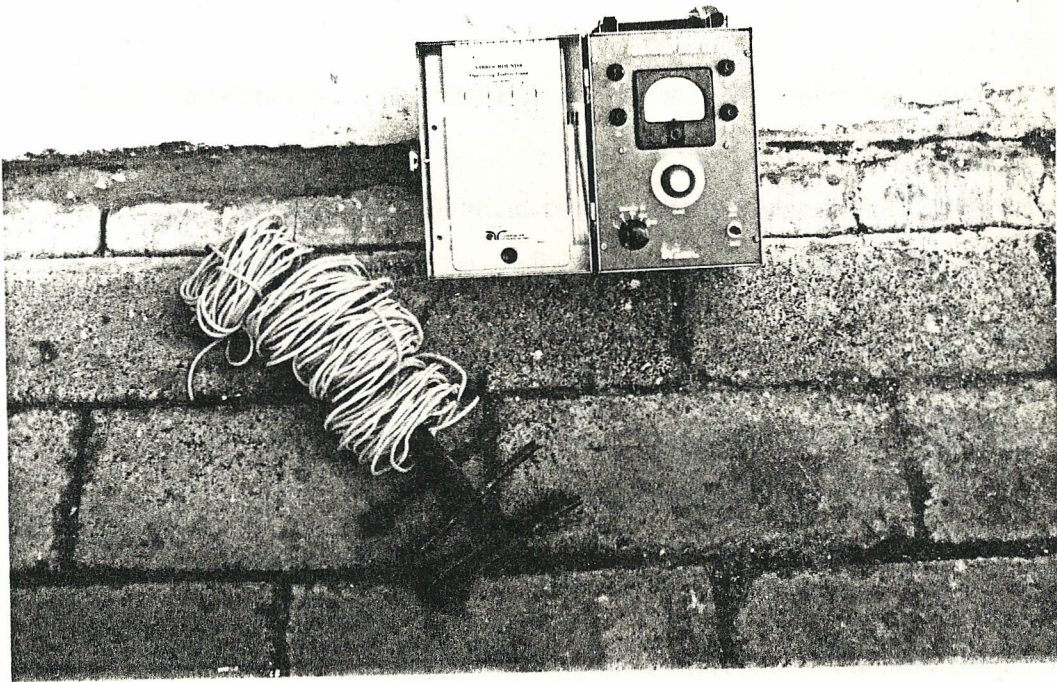


Fig. Nº 10.- Medidor de resistividad "Vibroground".

Multímetro digital YF-1100A con rango desde 0.1mV hasta 1000V DC.(figura N° 11).

Amperímetro digital 66B301A con rango desde 0.1micro A hasta 10A DC.(figura N°11).

Amplificador de voltaje (figuras N° 12 y 13).

Resistores de 1 Ohm,10 Vatios (figuras N°14 y 15).

2.2.3 Construcción del sistema de aislamiento por cubierta corta

La construcción del modelo experimental para las posteriores pruebas de aislamiento eléctrico se realizó tomando en consideración el siguiente procedimiento:

1. Unión con soldadura eléctrica, tanto en tuberías conductoras como las tuberías utilizadas para coraza a una longitud determinada.
2. Conexión de cables en los puntos de prueba para la determinación del puente eléctrico.
3. Colocación de los aisladores de cubierta sobre la tubería conductora.
4. Montaje de la tubería conductora en el interior de la cubierta .
5. Colocación de los sellos extremos de cubierta.
6. Montaje de tapones extremos de cubierta.

Dicho sistema aislador se muestra en la figura N°16.



Fig. N° 11.-Multímetros para mediciones eléctricas.

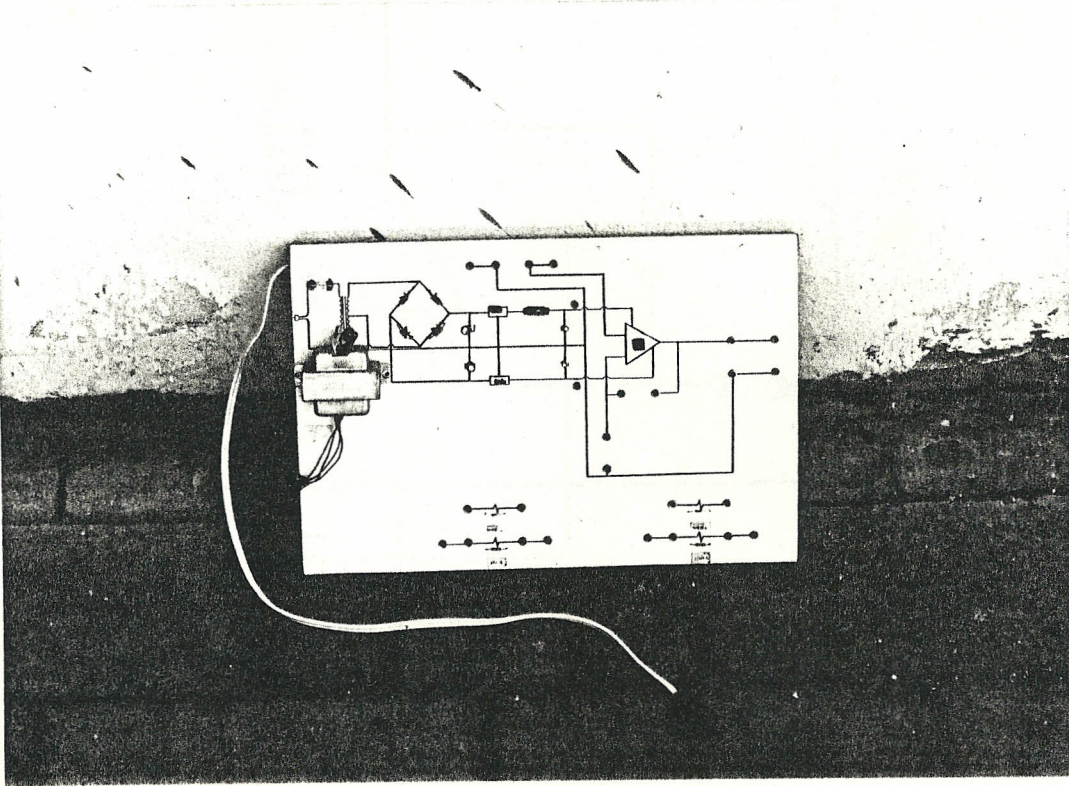


Fig. N° 12.- Amplificador de voltaje.

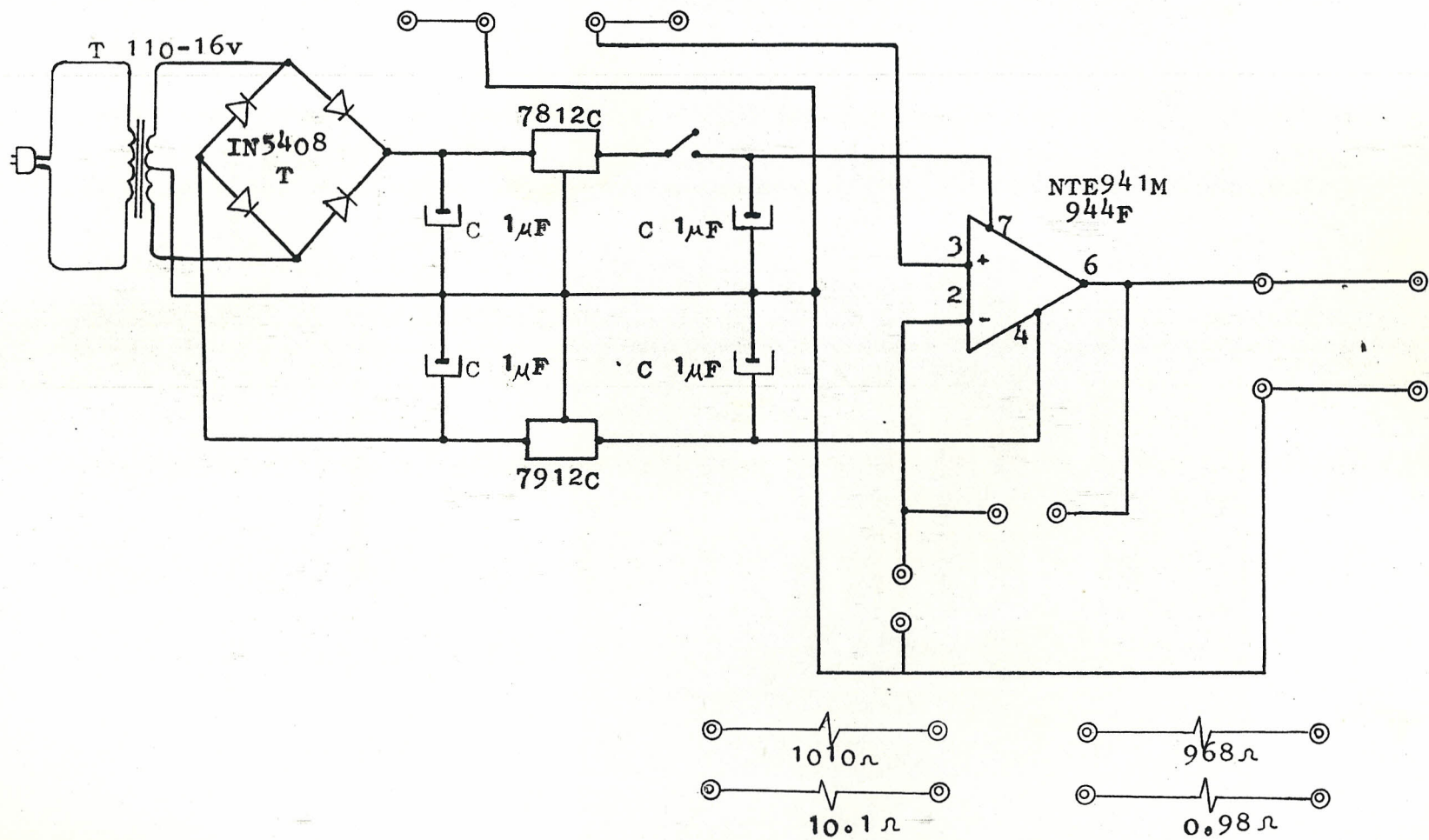


Fig. Nº13.- Diagrama de amplificador de voltaje.

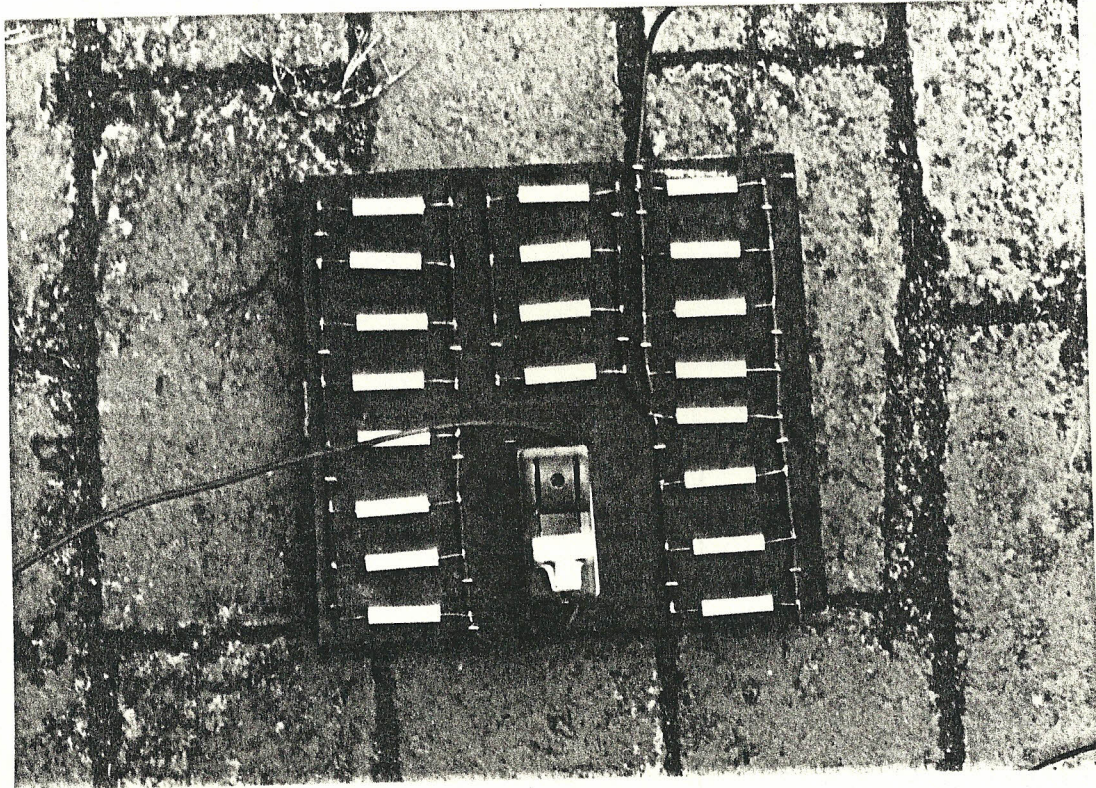
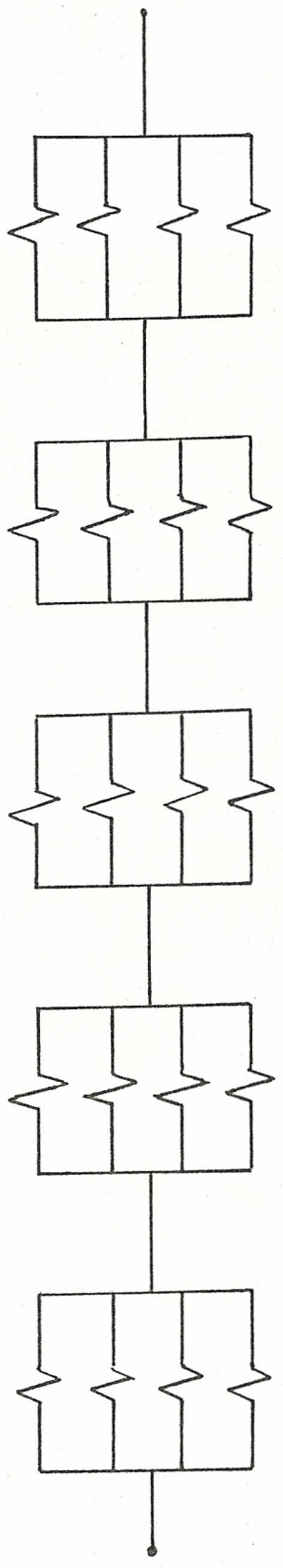


Fig. N° 14.- Juego de resistores.

20 Resistores
1 Ohm , 40 Vatios



$R_{eq.} = 1.25 \text{ Ohm.}$



Fig. Nº15.- Diagrama de resistores

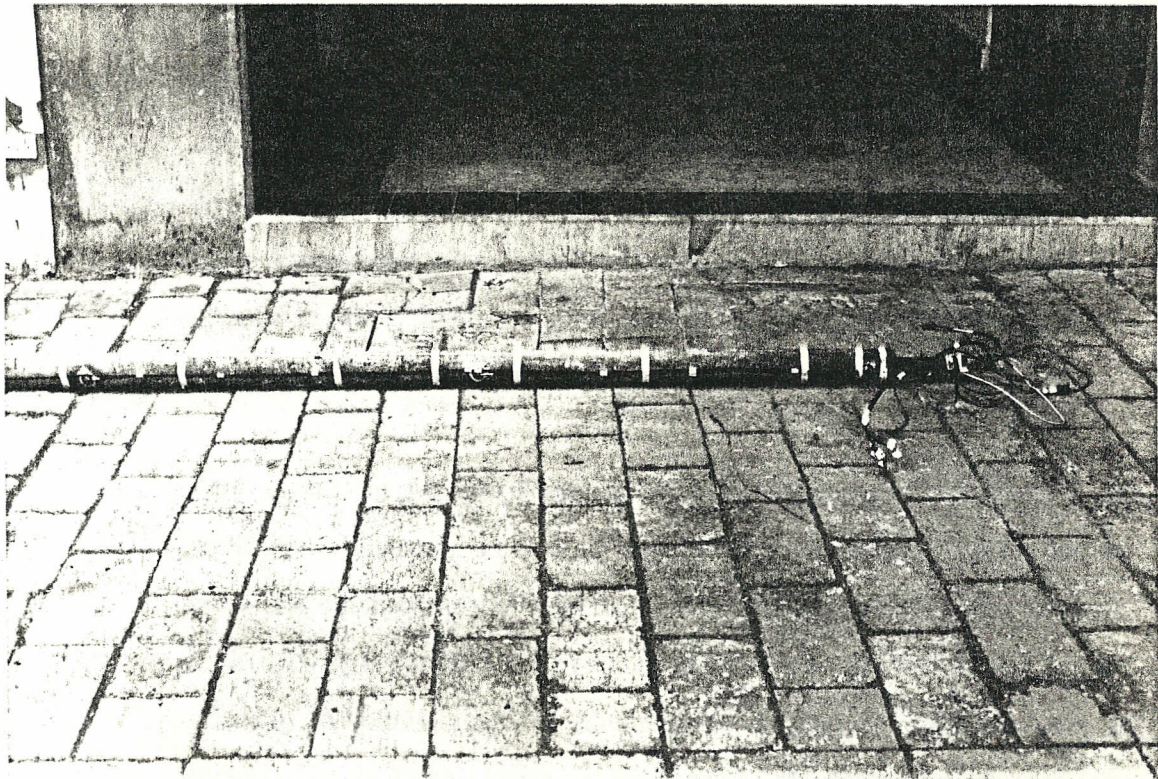


Fig. N° 16.- Sistema aislador experimental.

2.3 Simulación Pre-Instalatoria

2.3.1 Técnica operativa

Una vez que el sistema aislador ha sido instalado, es necesario estar seguro de que el aislamiento eléctrico entre la tubería conductora y la cubierta sea perfecta antes de que la tubería sea enterrada. Con éste fin se ha diseñado un sistema eléctrico , el cual servirá para determinar un corto circuito eléctrico o puente eléctrico entre las tuberías concéntricas , producido por un inadecuado montaje de dicho sistema de protección.

Este circuito eléctrico eléctrico se muestra en la figura N° 17.

Para lograr un puente eléctrico entre las tuberías concéntricas y su posterior localización ,se han conectado cables en diversas posiciones de la tubería conductora y la cubierta (a 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m y 6.6m), los cuales serán unido para producir el corto circuito eléctrico entre las tuberías. Adicionalmenté se ha instalado el sistema eléctrico para la localización de dicho puente , el cual consiste de una batería en serie con las resistencias , amperímetro y tubería conectado a los puntos de prueba, además de un voltímetro conectado en paralelo a la cubierta , el cual determinara la caída de voltaje a través de la misma, en el momento de producirse el corto circuito eléctrico (ver figura N° 18).

2.3.2 Resultados obtenidos

Las tablas III , IV y las figuras N° 19 y 20 reúnen los resultados cuantitativos de las simulaciones de campo realizadas.

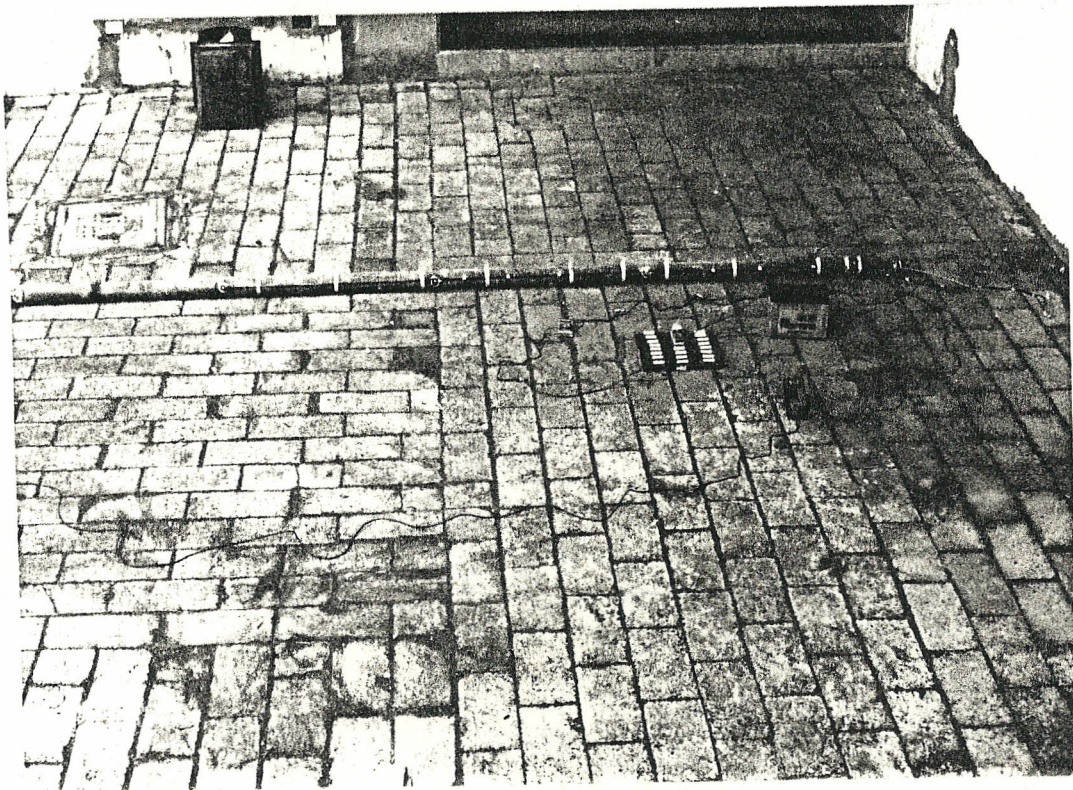


Fig. N° 17.- Sistema eléctrico experimental para ubicación de corto circuito.

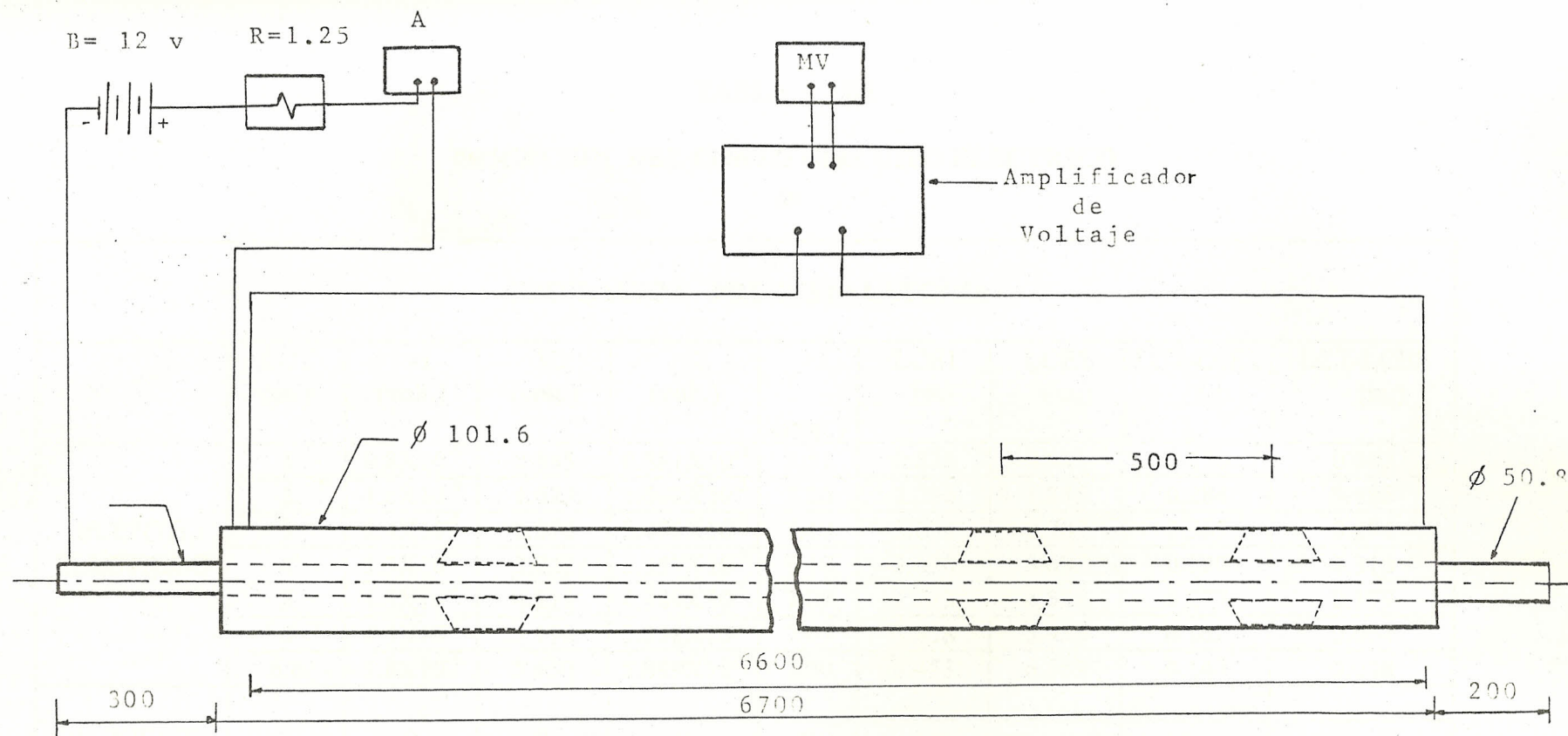


Fig. N°18.- Circuito eléctrico para ubicación del corto circuito

TABLA III

UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO

SIMULACION PRE-INSTALATORIA									
	LCT (m.)	v1 (volt.)	V2 (volt.)	v2 (volt.)	I (amp.)	LCE1 (m)	LCE2 (m.)	LCT-LCE1 (m.)	LCT-LCE2 (m.)
PUENTE ELECTRICO	1	0.8×10^{-3}	0.845	0.881×10^{-3}	7.51	0.830	0.913	0.170	0.087
	2	1.6×10^{-3}	1.623	1.692×10^{-3}	7.26	1.716	1.815	0.284	0.185
	3	2.4×10^{-3}	2.370	2.470×10^{-3}	7.10	2.633	2.709	0.367	0.291
	4	3.3×10^{-3}	3.221	3.357×10^{-3}	7.10	3.620	3.682	0.380	0.318
	5	4.3×10^{-3}	4.211	4.389×10^{-3}	7.09	4.723	4.821	0.277	0.179
	6	5.3×10^{-3}	5.170	5.388×10^{-3}	7.07	5.838	5.936	0.162	0.064
	6.6	5.8×10^{-3}	5.650	5.889×10^{-3}	7.00	6.453	6.552	0.147	0.048
SIN PUENTE ELECTRICO	----- -	0	0	0	0	-----	-----	-----	-----

(R/L)cubierta = 1.284×10^{-4} Ohm/ m.

FIG. N°19.- UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO
SIMULACION PRE-INSTALATORIA

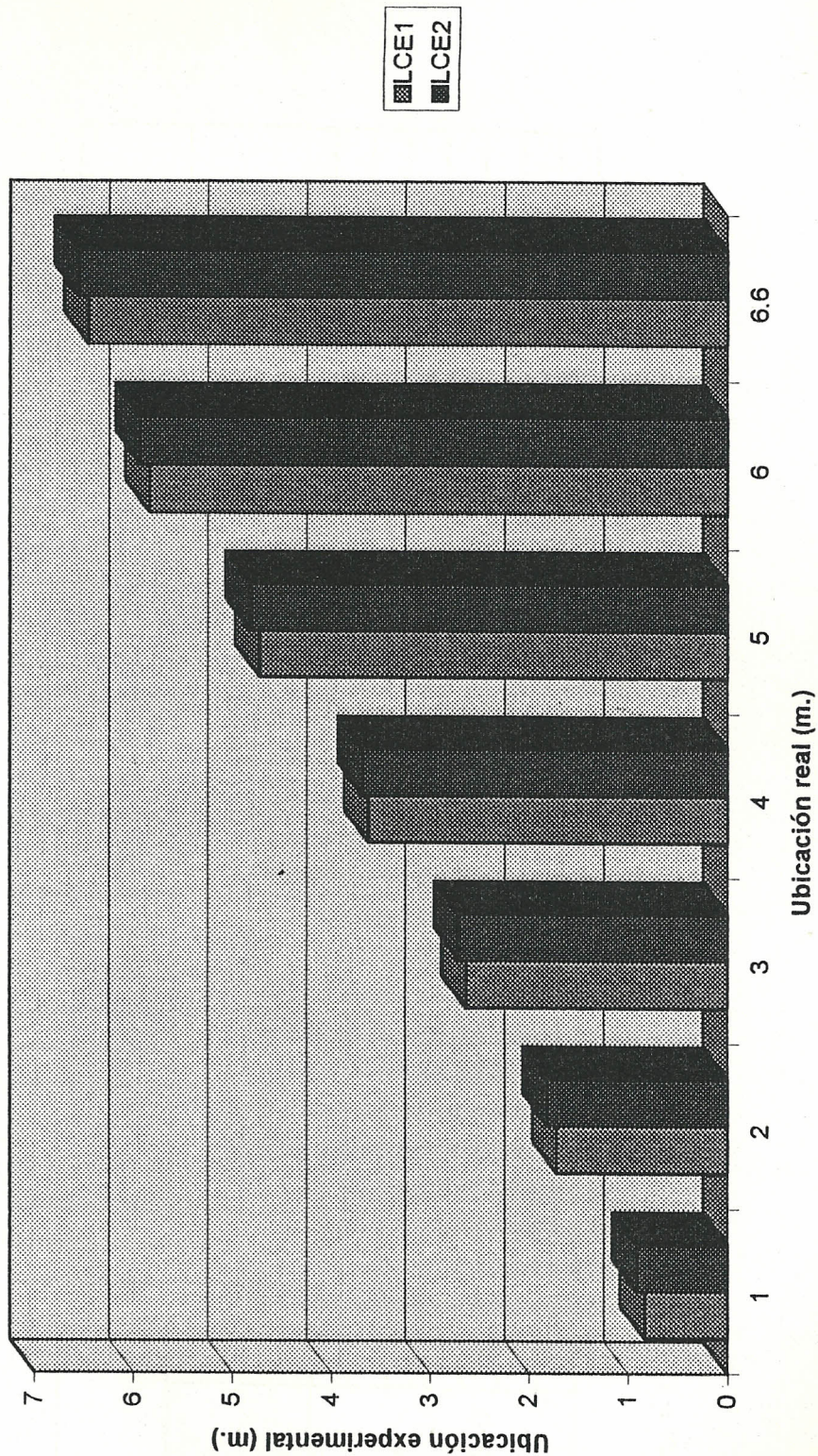
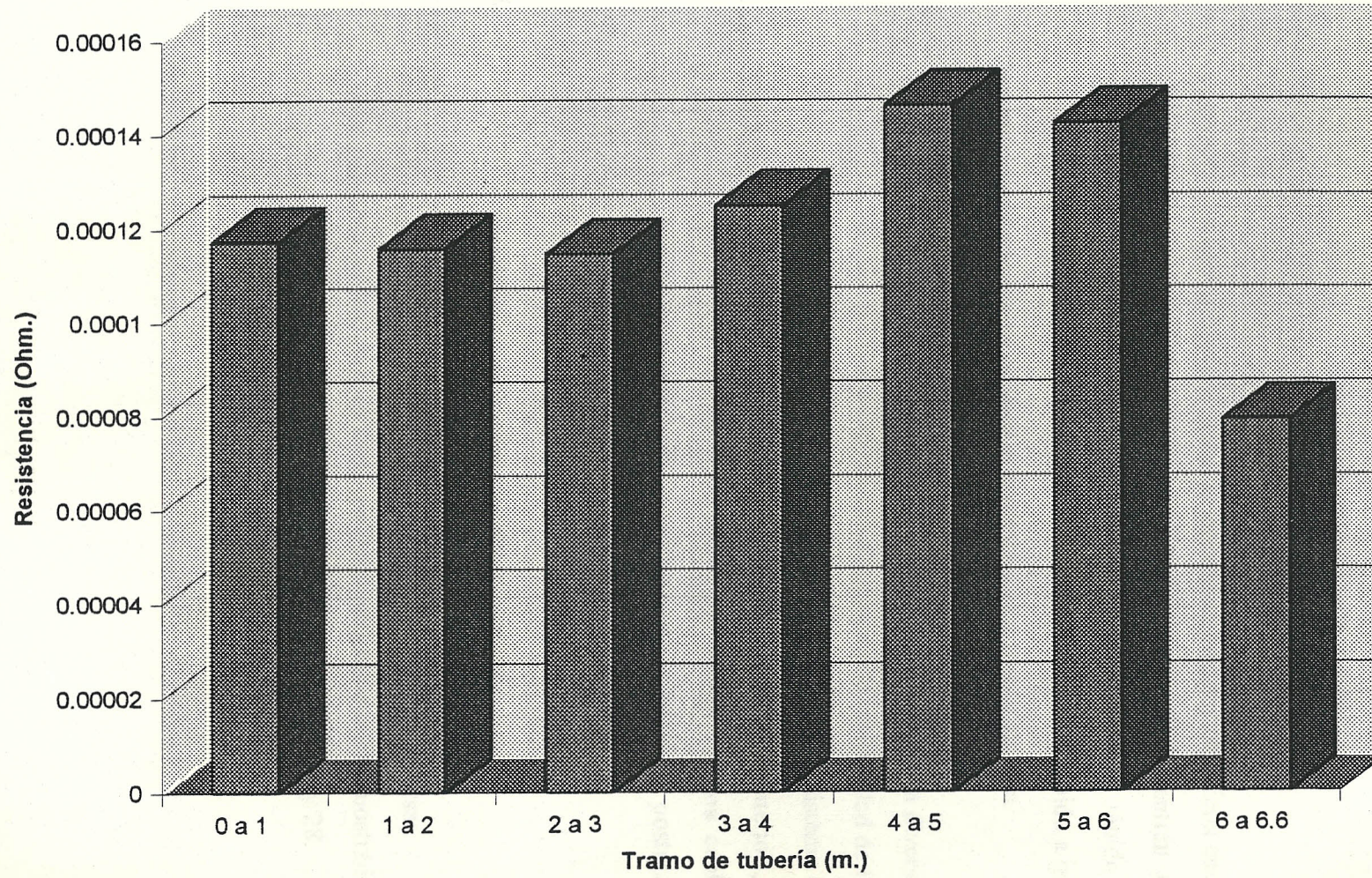


TABLA IV
RESISTENCIA DE CUBIERTA

SIMULACION PRE-INSTALATORIA					
	LCT (m)	V2 (volt.)	v2 (volt.)	I (amp.)	R (Ohm.)
PUENTE ELECTRICO	1	0.845	0.881×10^{-3}	7.51	1.173×10^{-4}
	2	1.623	1.692×10^{-3}	7.26	2.331×10^{-4}
	3	2.370	2.470×10^{-3}	7.10	3.478×10^{-4}
	4	3.221	3.357×10^{-3}	7.10	4.728×10^{-4}
	5	4.211	4.389×10^{-3}	7.09	6.190×10^{-4}
	6	5.170	5.388×10^{-3}	7.07	7.622×10^{-4}
	6.6	5.650	5.889×10^{-3}	7.00	8.413×10^{-4}

$(R/L)_{\text{cubierta}} = 1.284 \times 10^{-4} \text{ Ohm/m.}$

FIG.Nº20.-CONSECUENCIA DE LA UNION DE TUBERIAS CON DIFERENTE ESPESOR
SIMULACION PRE-INSTALATORIA



2.4 Simulación en terrenos con diversas condiciones de agresividad

2.4.1 Técnica operativa

Debido a que en muchas ocasiones se presentan puentes eléctricos entre la tubería conductora y la cubierta cuando éstas se encuentran en funcionamiento, se hace indispensable contar con un método rápido y sencillo para la localización y ubicación de dichos puentes, debido a que en muchas ocasiones es imposible tener acceso a toda la tubería.

Para simular esta situación, se procedió a seleccionar suelos con diversas condiciones de agresividad mediante la medición de la resistividad de los terrenos como muestra la figura N°21, para luego enterrar el sistema de protección en estos terrenos, y utilizando el sistema eléctrico anterior, se procederá a realizar puentes eléctricos por medio de los cables conectados a lo largo de las tuberías concéntricas, para su posterior localización y ubicación por el método eléctrico (figura N°22).

2.4.2 Resultados obtenidos

Luego de realizadas los ensayos de campo en terrenos con diversas condiciones de agresividad, se obtienen los resultados que son mostrados en las tablas V, VI, VII, VIII y las figuras N° 23, 24, 25, 26, 27 y 28.

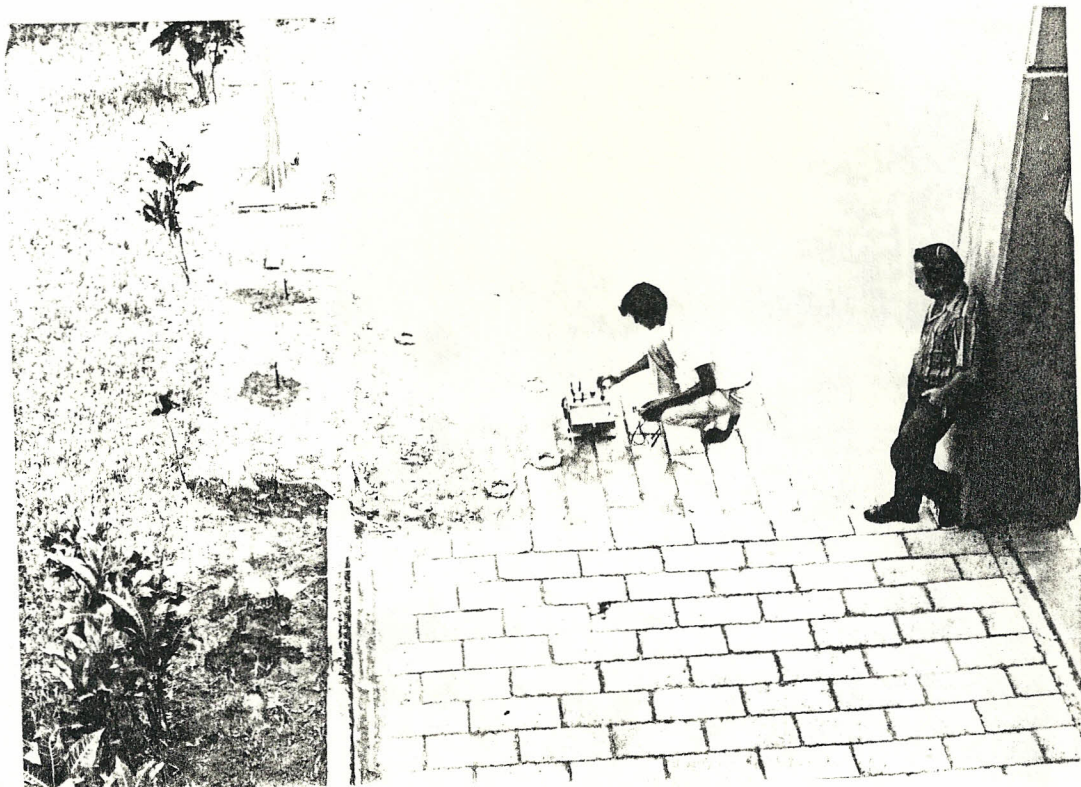


Fig. N° 21.- Medición de resistividad.



Fig. N° 22.- Mediciones de campo para determinar la ubicación del corto circuito.

TABLA V
RESISTIVIDAD DEL TERRENO

	RESISTIVIDAD (Ohm.cm)	RESISTIVIDAD PROMEDIO (Ohm.cm)	CARACTERISTICA DEL TERRENO
TERRENO I	703.531	998.794	Corrosivo
	929.666		
	1130.675		
	1231.305		
TERRENO II	1507.566	1994.384	Moderadamente corrosivo
	1947.273		
	2135.719		
	2386.980		
TERRENO III	9422.292	7302.276	Poco corrosivo
	6595.604		
	5339.298		
	7851.910		

(R/L)cubierta = 1.284×10^{-4} Ohm/m.

TABLA VI
UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO
SIMULACION EN TERRENO

TERRENO CORROSIVO									
$\bar{\rho} = 998.00 \text{ Ohm.cm}$									
	LCT (m.)	v1 (volt.)	V2 (volt.)	v2 (volt.)	I (amp.)	LCE1 (m)	LCE2 (m.)	LCT-LCE1 (m.)	LCT-LCE2 (m.)
PUENTE ELECTRICO	1	0.9×10^{-3}	0.897	0.935×10^{-3}	7.57	0.926	0.962	0.074	0.038
	2	1.7×10^{-3}	1.680	1.751×10^{-3}	7.50	1.765	1.818	0.235	0.182
	3	2.5×10^{-3}	2.481	2.586×10^{-3}	7.47	2.606	2.696	0.394	0.304
	4	3.5×10^{-3}	3.401	3.545×10^{-3}	7.45	3.658	3.706	0.342	0.294
	5	4.5×10^{-3}	4.390	4.576×10^{-3}	7.39	4.742	4.823	0.258	0.177
	6	5.5×10^{-3}	5.351	5.577×10^{-3}	7.36	5.820	5.901	0.180	0.099
	6.6	6.2×10^{-3}	5.965	6.217×10^{-3}	7.35	6.570	6.587	0.03	0.013
SIN PUENTE ELECTRICO	-----	1.4×10^{-4}	0.139	1.448×10^{-4}	0.47	-----	-----	-----	-----

(R/L)cubierta = 1.284×10^{-4} Ohm/ m.

TABLA VII
UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO
SIMULACION EN TERRENO

TERRENO MODERADAMENTE CORROSIVO		$\bar{\rho} = 1994.384 \text{ Ohm.cm}$							
	LCT (m.)	v1 (volt.)	V2 (volt.)	v2 (volt.)	I (amp.)	LCE1 (m)	LCE2 (m.)	LCT-LCE1 (m.)	LCT-LCE2 (m.)
PUENTE ELECTRICO	1	0.8×10^{-3}	0.835	0.870×10^{-3}	7.42	0.839	0.913	0.161	0.087
	2	1.6×10^{-3}	1.629	1.698×10^{-3}	7.36	1.693	1.796	0.307	0.204
	3	2.5×10^{-3}	2.444	2.547×10^{-3}	7.30	2.667	2.717	0.333	0.283
	4	3.4×10^{-3}	3.286	3.425×10^{-3}	7.24	3.657	3.684	0.343	0.316
	5	4.3×10^{-3}	4.214	4.392×10^{-3}	7.18	4.664	4.764	0.336	0.236
	6	5.3×10^{-3}	5.169	5.388×10^{-3}	7.17	5.757	5.852	0.243	0.148
	6.6	6.0×10^{-3}	5.812	6.058×10^{-3}	7.16	6.526	6.589	0.074	0.011
SIN PUENTE ELECTRICO	-----	0	9.95×10^{-3}	1.037×10^{-5}	0.13	-----	-----	-----	-----

(R/L)cubierta = $1.284 \times 10^{-4} \text{ Ohm/ m}$.

TABLA VIII
UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO
SIMULACION EN TERRENO

TERRENO POCO CORROSIVO		$\bar{\rho} = 7302.274 \text{ Ohm.cm}$							
	LCT (m.)	v1 (volt.)	V2 (volt.)	v2 (volt.)	I (amp.)	LCE1 (m)	LCE2 (m)	LCT-LCE1 (m.)	LCT-LCE2 (m.)
PUENTE ELECTRICO	1	0.8×10^{-3}	0.810	0.844×10^{-3}	7.24	0.861	0.908	0.131	0.092
	2	1.6×10^{-3}	1.599	1.666×10^{-3}	7.14	1.745	1.817	0.255	0.183
	3	2.4×10^{-3}	2.347	2.446×10^{-3}	7.07	2.644	2.694	0.356	0.306
	4	3.3×10^{-3}	3.177	3.311×10^{-3}	7.03	3.656	3.668	0.344	0.332
	5	4.3×10^{-3}	4.127	4.302×10^{-3}	7.03	4.763	4.766	0.237	0.234
	6	5.3×10^{-3}	5.117	5.333×10^{-3}	7.02	5.880	5.916	0.120	0.084
	6.6	5.9×10^{-3}	5.676	5.916×10^{-3}	7.00	6.564	6.582	0.036	0.018
SIN PUENTE ELECTRICO	-----	0	5.00×10^{-3}	5.212×10^{-6}	1.706×10^{-3}	-----	-----	-----	-----

(R/L)cubierta = 1.284×10^{-4} Ohm/ m.

FIG.Nº23.- UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO
TERRENO CORROSIVO

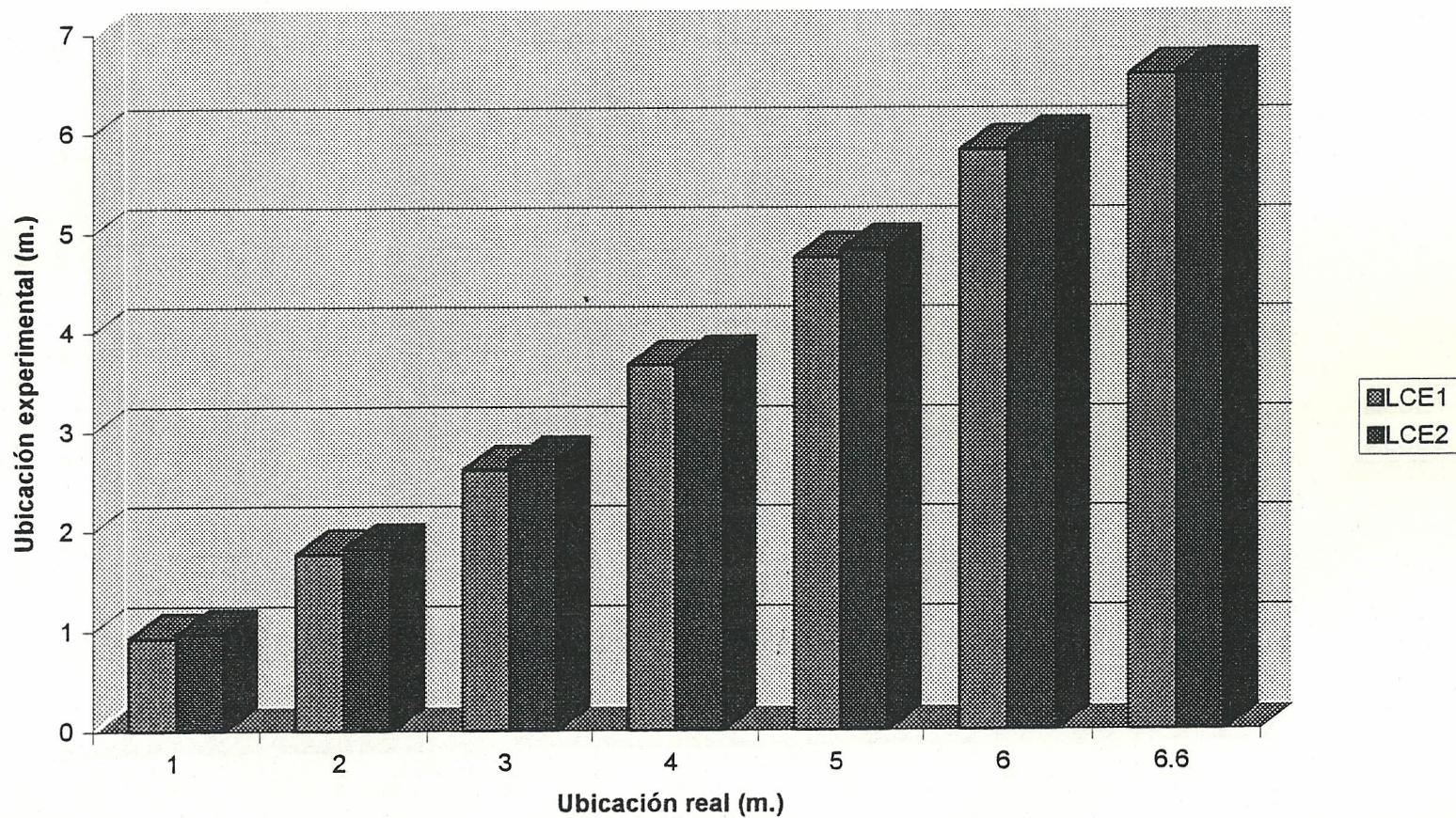


FIG. N°24.- UBICACION DEL CORTO CIRCUITO ELECTRICO
TERRENO POCO CORROSIVO

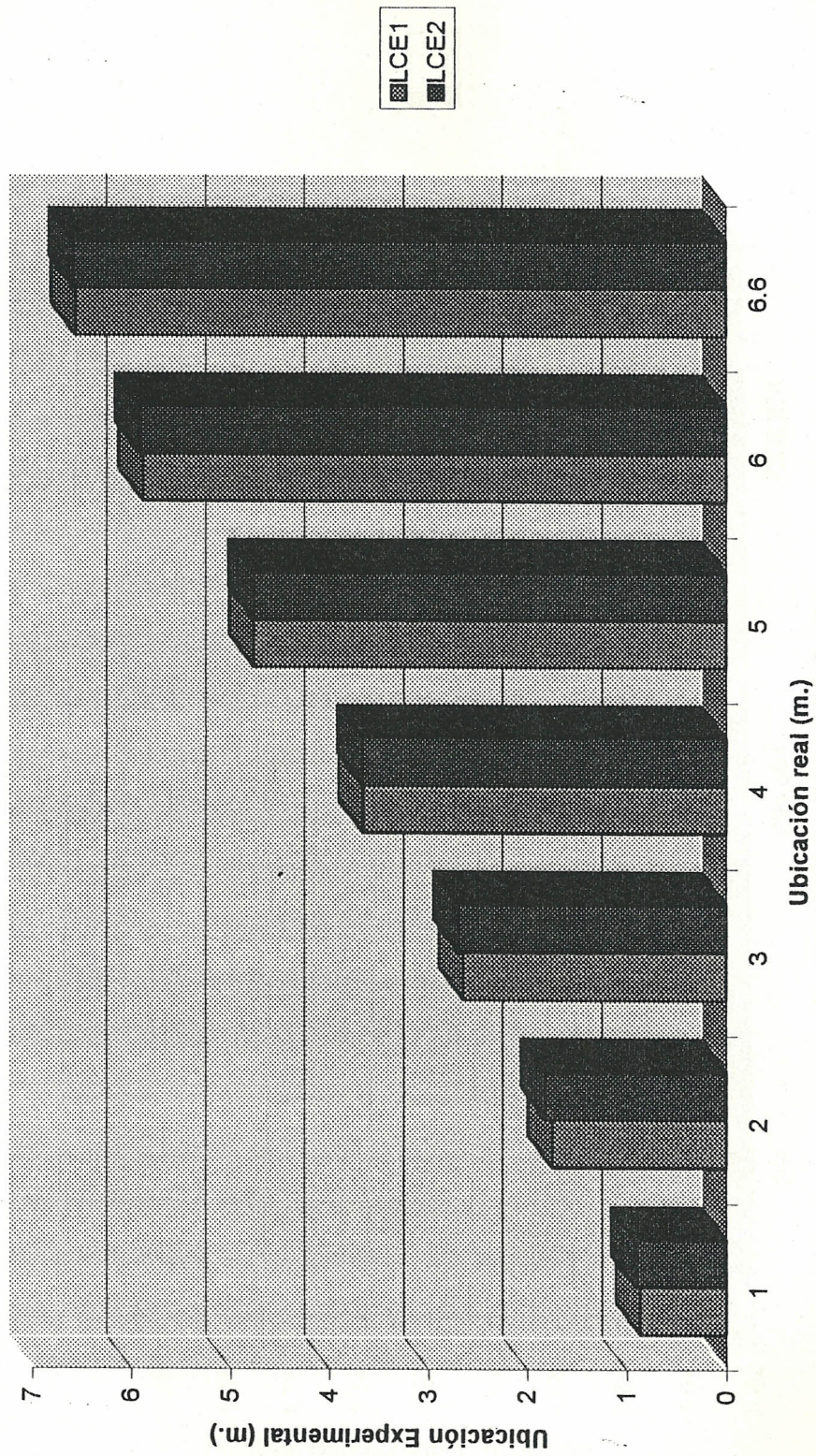


FIG.Nº25.- INFLUENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO EN LA UBICACION DEL CORTO CIRCUITO

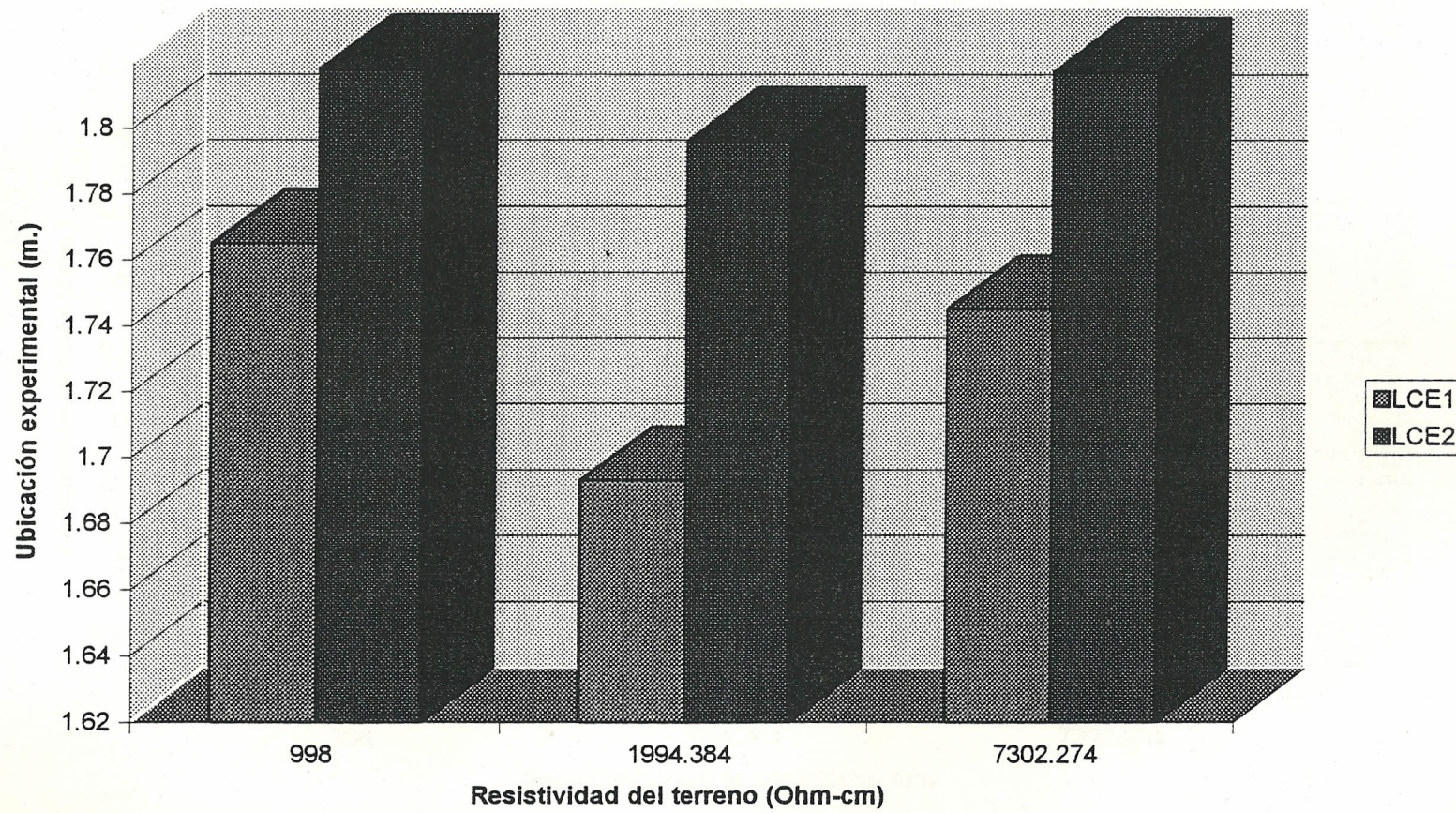


FIG.Nº26.-INFLUENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO SOBRE LA CORRIENTE

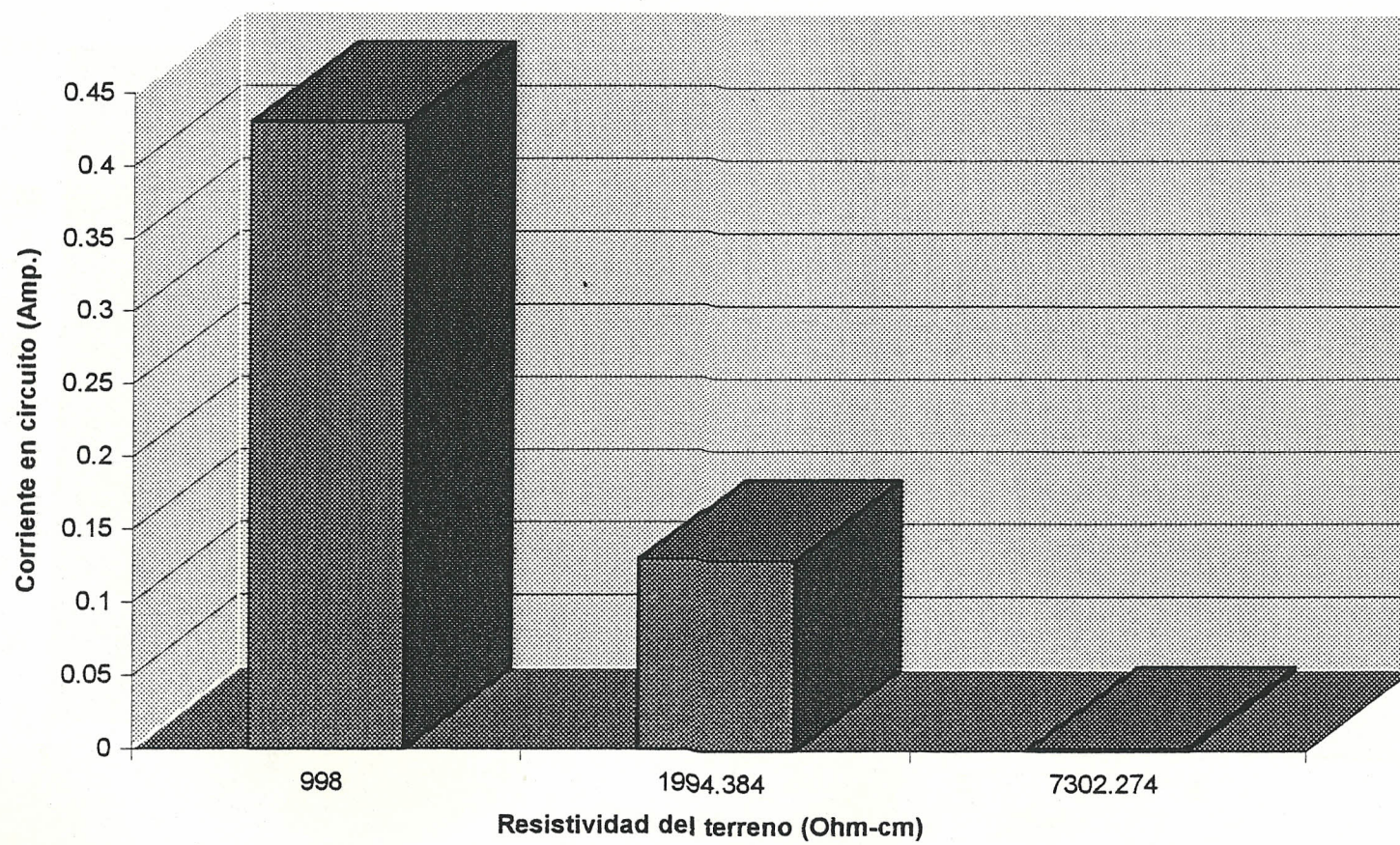


FIG.N° 27.- COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE EN LA CUBIERTA POR CAMBIO DE UBICACION DEL CORTO CIRCUITO (TERRENO MODERADAMENTE CORROSIVO)

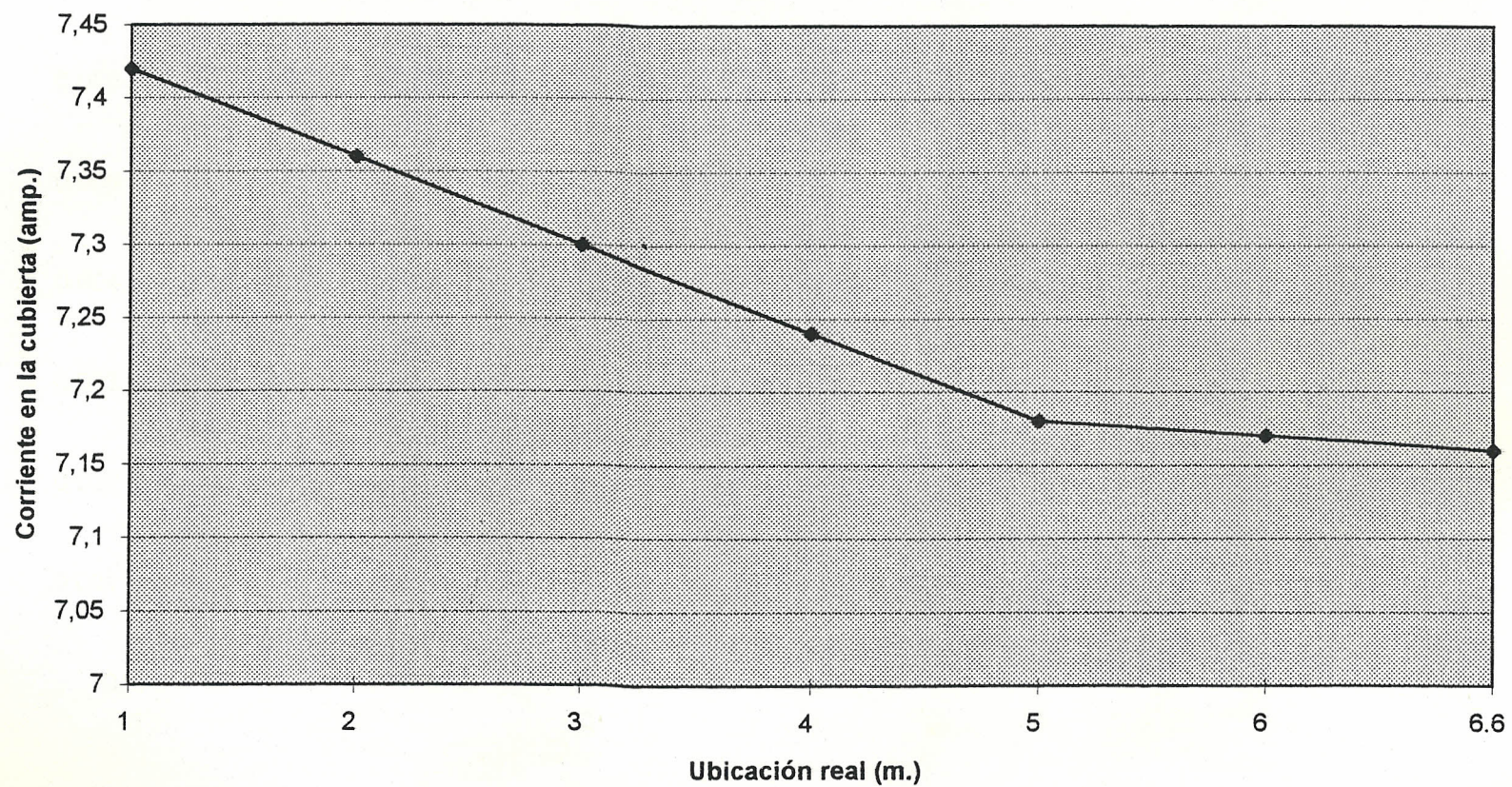
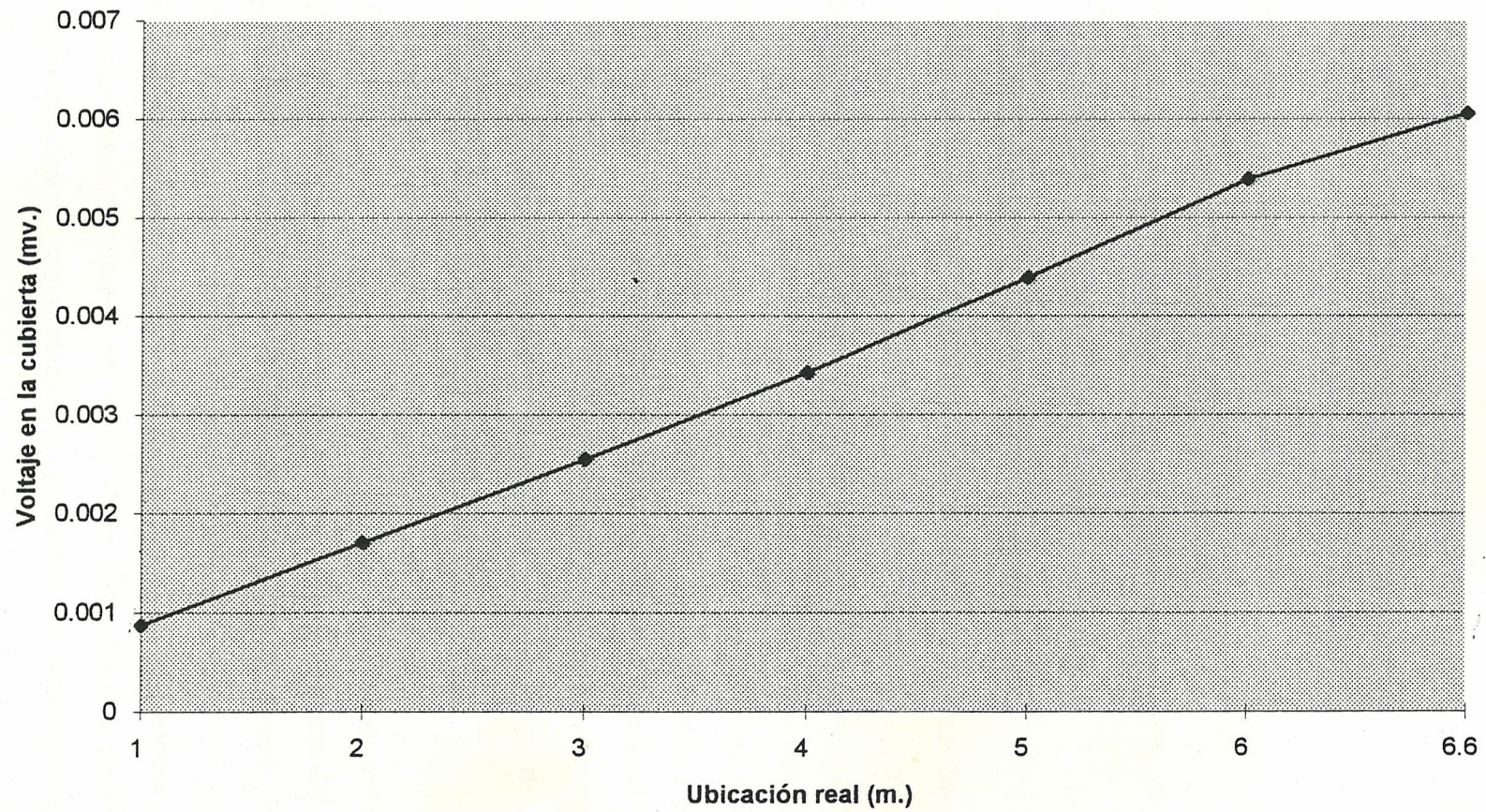


FIG. Nº28.-COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN LA CUBIERTA POR CAMBIO DE UBICACION DEL CORTO CIRCUITO (TERRENO MODERADAMENTE CORROSIVO)



CAPITULO III

3. ANALISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, podemos analizar lo siguiente :

Ensayos pre-instalatorios

Como se muestra en la tabla III de la prueba en donde no hay corto circuito eléctrico, tanto el voltaje como la corriente son cero, debido al perfecto aislamiento eléctrico que existe entre la cubierta protectora y la tubería conductora (ambas metálicas), caso contrario a lo que sucede cuando existe algún corto circuito eléctrico o puente eléctrico entre las dos tuberías en las cuales existe tanto voltaje como corriente y por lo tanto es posible determinar la posición de este por el método eléctrico con una diferencia máxima entre la posición real y la experimental de 38.0 cm (cuando el corto circuito eléctrico es simulado a 4m del punto de lectura).

Al analizar el comportamiento de las variables eléctricas se evidencia que a medida que el puente eléctrico se haya a mayor distancia del punto de medición (o sea cuando el puente eléctrico pasa por ejemplo de 1 a 2m), la corriente que circula por la cubierta tiende a disminuir, pero no en la cantidad con que aumenta su resistencia, produciéndose como consecuencia un incremento del voltaje sobre dicha cubierta, puesto que esta es directamente proporcional a la resistencia ($\Delta V_{\text{cubierta}} = I_{\text{cubierta}} \times R_{\text{cubierta}}$).

En los ensayos experimentales realizados se puede observar que la caída de voltaje sobre la cubierta era muy pequeña (en el orden de los milivoltios), debido a la baja resistencia que esta posee ($R=8.47 \times 10^{-4}$ Ohm), por lo que en nuestro caso se hizo necesario contar con un circuito electrónico que permita obtener una mayor exactitud en las mediciones puesto que un multímetro digital sensa en la escala de milivoltios solo un decimal luego del entero, lo cual produce inexactitud en el cálculo final de la posición del corto circuito. La diferencia que existe entre la medición con el multímetro y con la ayuda adicional del amplificador de voltaje es mostrada en la anterior tabla y en la figura N°19, en la cual podemos observar mayor exactitud cuando se utiliza el amplificador, debido a que éste instrumento electrónico permite obtener hasta tres decimales después del valor entero (en la escala de milivoltios), con lo que se logra valores experimentales más aproximados al valor real de la posición del puente eléctrico desde el punto de medición.

Ensayos en terrenos con diversas condiciones de agresividad.

En estas pruebas de campo (tablas VI, VII y VIII) observamos que la determinación y posición del puente eléctrico entre la tubería conductora y la cubierta es posible (cuando se ha simulado dicho puente), aunque ahora la corriente circula por dos rutas en paralelo, una a través de la batería-resistencias-cubierta- puente eléctrico-tubería conductora-batería y la otra que circula a través de la batería-resistencias-cubierta-tierra-batería. Pero a causa de que la segunda ruta presenta mayor resistencia total al paso de la corriente por la alta resistencia del terreno (Resistividad = 998 Ohm-cm en terreno corrosivo), entonces casi toda la corriente circula por la primera ruta que tiene una baja resistencia de la cubierta ($R=8.474 \times 10^{-4}$ Ohm) y tubería conductora, produciendo resultados de la posición del puente eléctrico similares a los que se presentaron en las pruebas pre-instalatorias (figuras N°23, 24 y 25).

En estas pruebas de campo se observó un comportamiento similar de las variables eléctricas que en la primera prueba, debido a que al aumentar la distancia del corto, la corriente tiende a disminuir, y el voltaje sobre la cubierta a aumentar (figuras N°27 y 28).

Aquí también podemos notar la importancia que tiene la utilización del amplificador de voltaje como circuito de ayuda para el multímetro en la medición de la caída de voltaje sobre la cubierta debido a que por ejemplo en la tabla VII para un puente eléctrico ubicado a 2m del punto de medición, el multímetro sensa una caída de voltaje sobre la cubierta de 1.6×10^{-3} voltios, mientras que con la ayuda del amplificador este valor es de 1.698×10^{-3} voltios (dos decimales más que el primero), el cual produce que la diferencia con respecto a la posición teórica del corto sea de 20.4 cm y no de 30.7 cm como podemos apreciar en dicha tabla.

Es de interés destacar que a pesar de que en las pruebas pre-instalatorias, las lecturas de caída de voltaje y corriente entre las tuberías eran iguales a cero (indicando un buen aislamiento eléctrico), pudo encontrarse luego, de que las lecturas cambiaron cuando el mismo sistema de tuberías fue enterrado. Esto no significa que algo haya ocurrido en el sistema de aislamiento eléctrico, el cual es tan bueno como en la primera prueba. Lo que sucede es que en estas condiciones la corriente producida por la batería circula por la ruta batería-resistencias-cubierta-tierra-batería, pero como la resistencia de la tierra es alta, entonces la resistencia total del circuito tiende a aumentar, produciendo como resultado de esto que la antes mencionada corriente sea de muy bajo amperaje ($I = V_{\text{batería}} / R_{\text{Total}}$), como podemos evidenciar en las tablas VI, VII y VIII.

En estos ensayos la resistividad del terreno (ver tabla V) juega un papel importante, puesto que cuando una tubería (bien aislada) se encuentra enterrada en suelo corrosivo (resistividad baja), la corriente sensada es mayor que en terreno poco corrosivo a causa de la resistividad que posee cada uno de los terrenos. Esto es comprobado en la tabla VI en donde la resistividad del suelo es de 998 Ohm-cm y la corriente del circuito es de 0.47 A ,en cambio en la tabla VIII, en terreno con resistividad igual a 7302.274 Ohm-cm (terreno poco corrosivo), la corriente del circuito disminuye a 1.706×10^{-3} A , como se ilustra en la figura N°26.

Ahora bien ,en las lecturas experimentales de la posición del corto circuito eléctrico existe una diferencia considerable con respecto a la real, aun utilizando el amplificador de voltaje, tanto en las pruebas pre-instalatorias como en terrenos con diferente grado de agresividad . Esta diferencia se produce debido a dos causas, la primera, es porque las tuberías que actuaron como cubierta tenían espesores diferentes (aproximadamente 1.5mm de diferencia), y segundo, por el cordón de soldadura que sirvió de unión entre las dos tuberías (la cual tiene una resistencia diferente que la de tubería), razón por la cual se produjo una variación al calcular la resistencia por unidad de longitud de dicha cubierta ,ya que este cálculo supone que la resistencia a lo largo de la tubería es constante , lo cual no es así porque como podemos observar en la tabla IV y la figura N°20, en los tres primeros metros en la cual se sitió la tubería de mayor espesor, encontramos valores entre 1.147×10^{-4} y 1.173×10^{-4} Ohm/m (resistencia por unidad de longitud uniforme) y entre el cuarto y quinto metro, se observa valores de hasta 1.462×10^{-4} Ohm/m, debido a que se trata de la tubería de menor espesor.

Los cálculos podrían ser mejorados si toda la tubería fuese del mismo espesor. Supongamos que solo calculamos la resistencia por unidad de

longitud en los tres primeros metros de la cubierta (tubería de mayor espesor y uniforme) , entonces encontraríamos un valor de 1.159×10^{-4} Ohm/m (obsérvese que este valor es menor al calculado utilizando las dos tuberías donde $R/L = 1.284 \times 10^{-4}$ Ohm/m), y de producirse un corto circuito entre la cubierta y la tubería conductora a dos metros del punto de medición, la lectura de la posición de dicho puente eléctrico utilizando este nuevo valor que considera la tubería homogénea en la fórmula sería igual a:

$$L = \frac{1.692 \times 10^{-3} \text{ V}}{7.26 \text{ A} \times 1.159 \times 10^{-4} \text{ Ohm/m}} = 2.0108 \text{ m}$$

Como podemos observar este valor experimental difiere de la verdadera posición del corto circuito en 1.08 cm, lo que nos hace meditar sobre la importancia de utilizar tuberías del mismo diámetro y espesor como cubierta protectora para poder obtener resultados confiables .

Finalmente, se puede evidenciar en las tablas de resultados una disminución apreciable de la corriente a medida que la distancia del puente eléctrico aumenta con respecto al punto de medición (resistencia de la cubierta aumenta). Esta exagerada variación no es aceptable en condiciones normales debido a que la resistencia de la tubería es pequeña ($R_{\text{cubierta}} = 8.47 \times 10^{-4}$ Ohm) comparada con la resistencia que posee el juego de resistores colocados en serie a la batería y cubierta para regular el voltaje ($R = 1.2$ Ohm), y debido a esto, cualquier aumento de la resistencia de la cubierta (colocar el corto circuito, por ejemplo de 2m a 5m) no produciría una disminución apreciable de la corriente. Dicho comportamiento se da por la disminución del voltaje de la batería a causa de la disipación de calor a través de los resistores ($P = 96\text{W}$) .

durante el tiempo que se realizaron las pruebas. Esta disminución apreciable de corriente produce además que la caída de voltaje a través de la cubierta ($\Delta V = I_{\text{cub.}} \times R_{\text{cub.}}$) no aumente lo esperado cuando la resistencia de la cubierta aumenta (cuando el puente eléctrico se encuentra a mayor distancia), aunque esto no influye en el cálculo de la posición del corto circuito eléctrico desde el punto de medición.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizado los ensayos de campo, se concluye lo siguiente:

1. El método eléctrico utilizado en esta tesis para determinar la posición del puente eléctrico en un sistema aislador ofrece excelentes resultados cuando existe sólo uno de ellos.
2. En caso de que existan dos o más puentes de continuidad eléctrica entre las dos tuberías concéntricas, este método no predice dicha ubicación.
3. La utilización del amplificador de voltaje como un circuito auxiliar al multímetro digital, permite aumentar la exactitud de las mediciones.
4. La no uniformidad de espesor de las tuberías que actúan como cubierta protectora, produce inexactitud en la determinación de la posición del corto circuito eléctrico; pues la resistencia por unidad de longitud de la tubería estaría sujeta a variaciones.
5. La resistividad del terreno ejerce poca influencia en la exactitud de la ubicación del corto circuito, siempre y cuando los extremos de las tuberías concéntricas estén perfectamente aisladas.

Una vez mencionadas las conclusiones, se recomienda lo siguiente:

1. Manipular con mucho cuidado tanto la tubería conductora como la que se utiliza como cubierta, de tal manera que no se produzcan

deflexiones, las cuales traerían como consecuencia la presencia de contactos metálicos entre sí.

2. No utilizar tuberías parcialmente corroídas para usarlas como cubierta, debido a que se producirían errores al intentar determinar la posición de algun contacto eléctrico.
3. Utilizar este sistema de cuatro cables para pruebas, como el más adecuado en la determinación y ubicación de posibles puentes eléctricos.
4. Implementar un programa de mantenimiento anual del sistema aislador con el fin de evitar contingencias.

BIBLIOGRAFIA

1. PEABODY., Control of Pipeline Corrosion , National Association of Corrosion Engineers , Houston 1967.
2. SCHASCHL AND MARSH., News Views On Soil Corrosion , Vol. 2, N 11 (1963).
3. COMPTON, Instruments For Measurements In Underground Corrosion Work, Vol.15, N 11, (1959).
4. BROWN , New Data On Electrical Resistivity Of Line Pipe Steel, Vol. 3 , N°12 (1964).
5. VAN VALKENBURG , Análisis de Redes .
Standard Practices on Procedures for Steel , ASTM, Ohio , 1985.
6. HARCO., The complete source for Corrosion.
7. DENNY A. JONES., Principles and Prevention of Corrosion.
8. J.A.MAURIN., Manual de anticorrosión , Urmo,S.A. Bilbao (1968).
9. U.R. EVANS., The Control and Corrosion Control, Wiley and Son, New York (1971).

APENDICE A

ESPECIFICACIONES DE CABLES

MEDIDAS		NUMERO DE TRENZAS	ESPEJOR DE AISLAMIENTO		DIAMETRO EXTERNO	
AWG	(mm ²)		IN	(mm)	IN	(mm.)
14	(2.5)	7	0.11	(2.794)	0.299	(7.59)
12	(4)	7	0.11	(2.794)	0.31	(7.87)
10	(6)	7	0.11	(2.794)	0.34	(8.64)
8	(10)	7	0.11	(2.794)	0.36	(9.14)
6	(16)	7	0.11	(2.794)	0.41	(10.41)
4	(25)	7	0.11	(2.794)	0.46	(11.68)
2	(35)	7	0.11	(2.794)	0.52	(13.21)
1	(45)	19	0.125	(3.175)	0.59	(14.99)
1/0	(50)	19	0.125	(3.175)	0.63	(16.00)
2/0	(70)	19	0.125	(3.175)	0.67	(17.02)
4/0	(120)	19	0.125	3.175)	0.78	(19.81)

APENDICE B
ESPECIFICACION DE SELLOS EXTREMOS

SERIE 300		Recubrimiento máximo = 0.6", la pared de la tubería de cubierta debería ser de cédula 40 o menor excepto para diámetros de 8" y 10", los cuales deberían tener un espesor de pared de cédula 30 o menor.	
TUBO Conductor X Cubierta (Medidas de tuberías) API & IPS	Total de eslabones	Eslabones simples	Modelo básico de sellado
½ X 2 1/2"	3	3	LS 300C
¾ X 3"	4	4	LS 300C
1" X 3"	4	4	LS 300C
1 ¼ " X 3 ½ "	5	5	LS 300C
1 ½ " X 3 ½ "	5	5	LS 300C
1 ½ " X 4"	3	3	LS 325C
2" X 4"	6	6	LS 300C
2 ½ " X 5"	4	4	LS 325C
3" X 5"	8	8	LS 300C
3 1/2" X 6"	5	5	LS 325C
4" X 6"	10	10	LS 300C
6" X 8"	15	15	LS 300C
8" X 10"	19	19	LS 300C
10" X 12"	22	22	LS 300C

APENDICE C

RESISTENCIA PARA TUBERIAS DE ACERO

DIAMETRO DE TUBERIA (pulg.)	DIAMETRO EXTERNO (pulg.)	ESPESOR DE PARED (pulg.)	PESO POR PIE (Lb.)	RESISTENCIA POR PIE $\text{Ohm} \times 10^{-6}$
2	2.375	0.154	3.65	79.2
4	4.5	0.237	10.8	26.8
6	6.625	0.280	19.0	15.2
8	8.625	0.322	28.6	10.1
10	10.750	0.365	40.5	7.13
12	12.75	0.375	49.6	5.82
14	14.00	0.375	54.6	5.29
16	16.00	0.375	62.6	4.61
18	18.00	0.375	70.6	4.09
20	20.00	0.375	78.6	3.68
22	22.00	0.375	86.6	3.34
24	24.00	0.375	94.6	3.06
26	26.00	0.375	102.6	2.82
28	28.00	0.375	110.6	2.62
30	30.00	0.375	118.7	2.44
32	32.00	0.375	126.6	2.28
34	34.00	0.375	134.6	2.15
36	36.00	0.375	142.6	2.03