

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA PROTECCIÓN
CATÓDICA DE OLEODUCTOS Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA EN EL
OLEODUCTO REFINERÍA TEXACO - CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA
DEL INDE

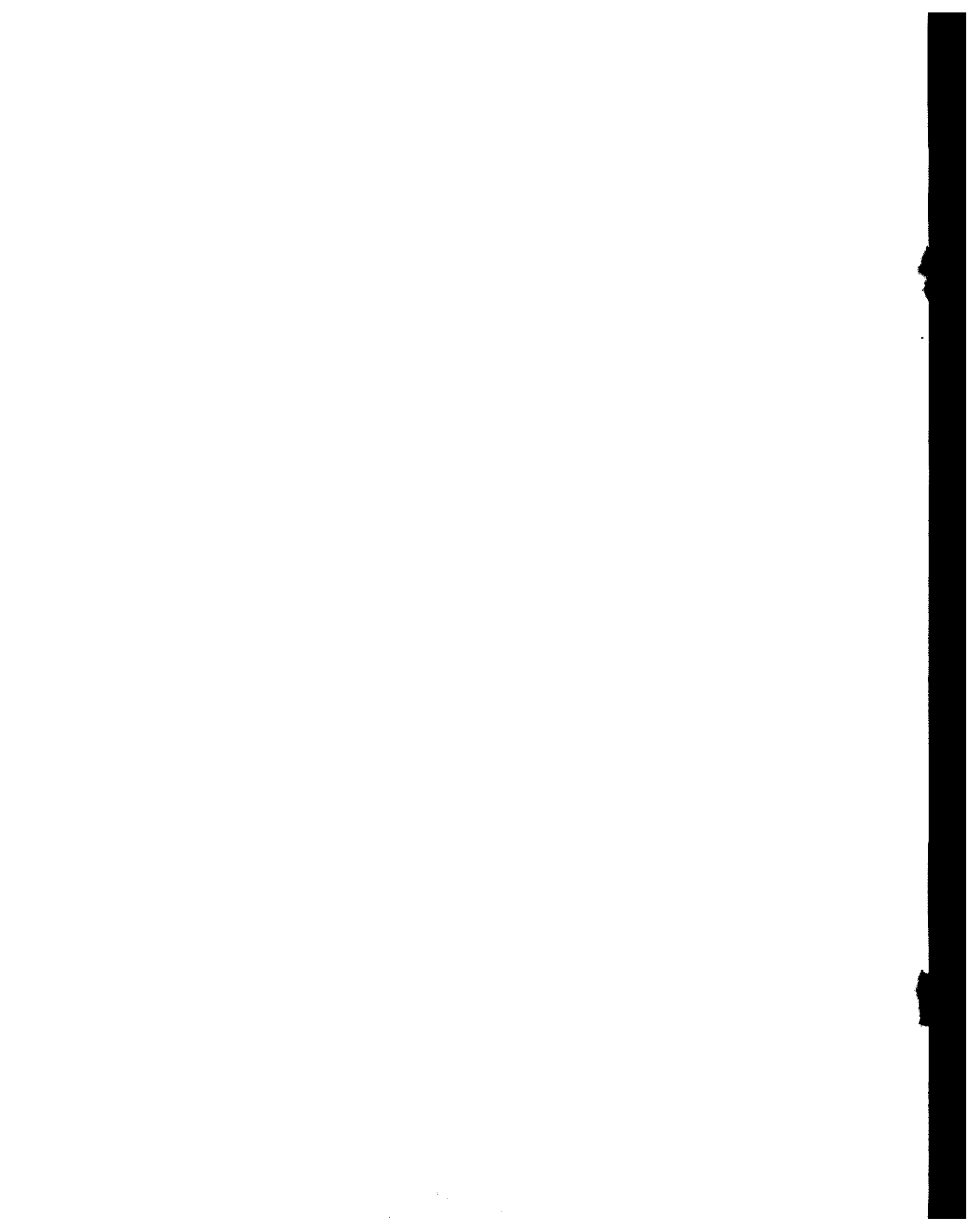
TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARIO VINCENT PEREIRA PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1.995



08
T(3660)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

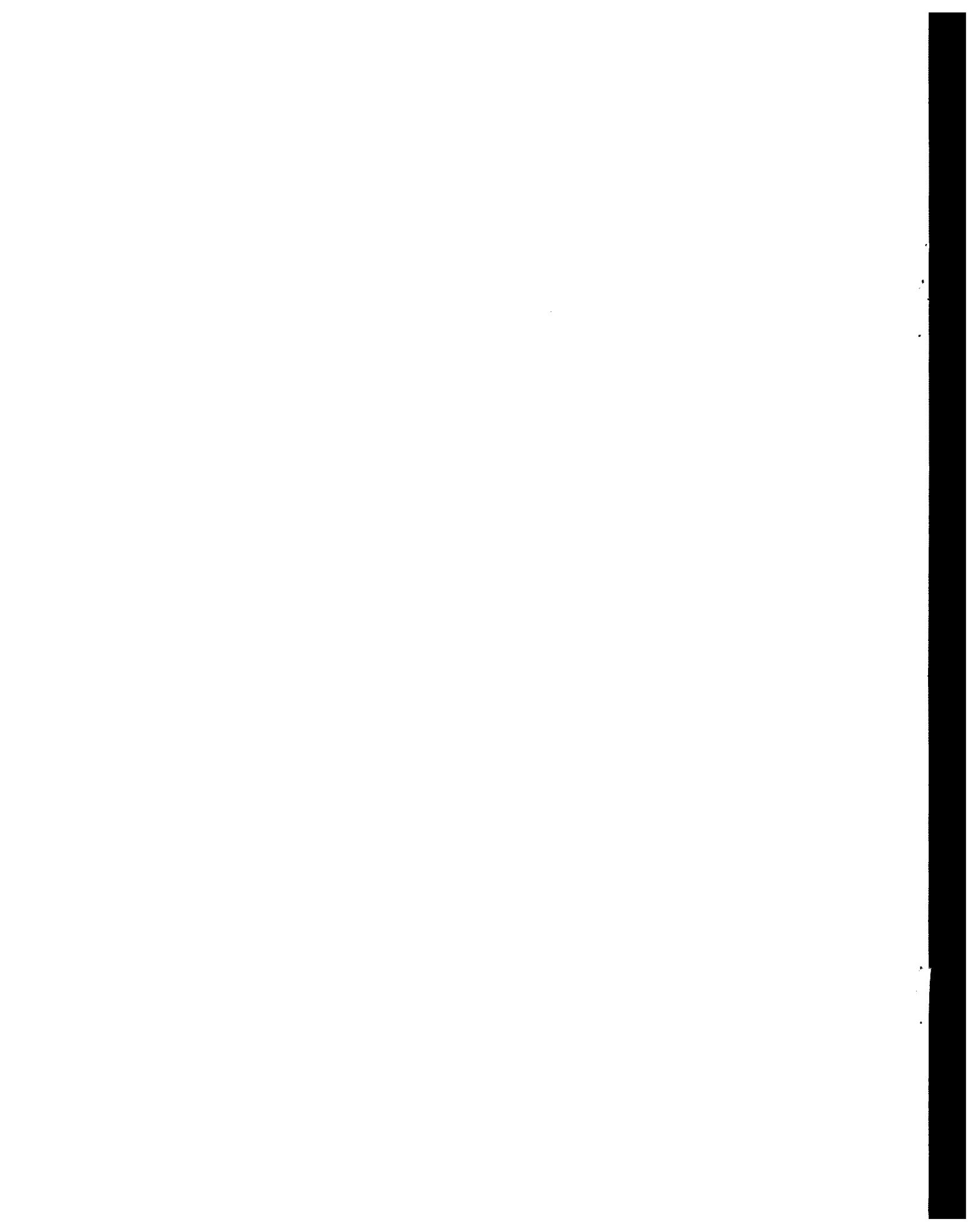
Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA PROTECCIÓN
CATÓDICA DE OLEODUCTOS Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA EN
EL OLEODUCTO REFINERÍA TEXACO - CENTRAL TÉRMICA
ESCUINTLA DEL INDE,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica con fecha 8 de agosto de 1,994.



Mario Vincent Pereira Padilla



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



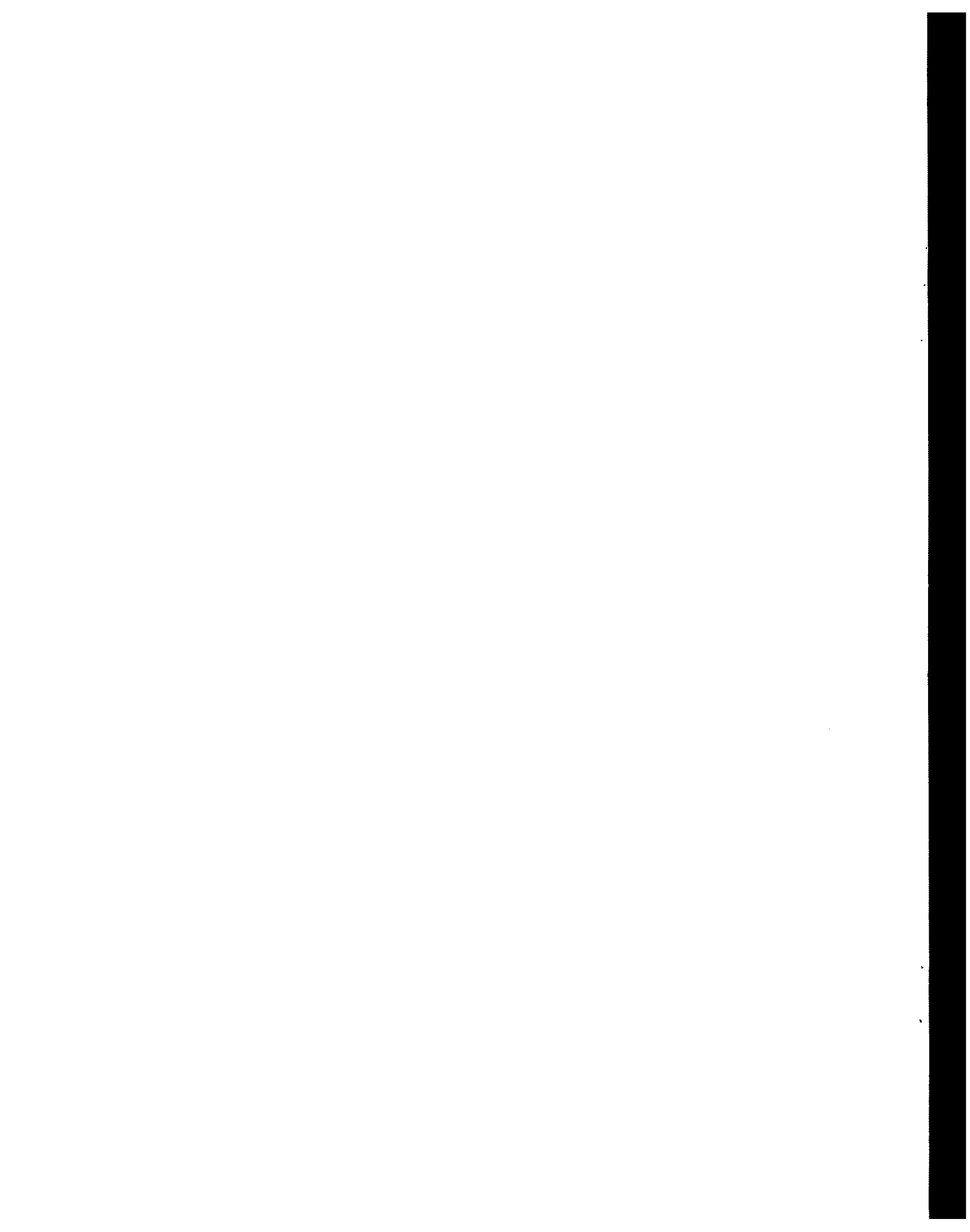
FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK
VOCAL 1º	ING. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ GUERRA
VOCAL 2º	ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLÓRZANO
VOCAL 3º	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRÍA MÉNDEZ
VOCAL 4º	BR. FREDDY ESTUARDO RODRÍGUEZ QUEZADA
VOCAL 5º	BR. MARIO NEFTALÍ MORALES SOLÍS
SECRETARIO	ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK
EXAMINADOR	ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA
EXAMINADOR	ING. MARVIN AGRIPINO ARGUETA NATARENO
EXAMINADOR	ING. ROBERTO ENRIQUE MOLINA THOMAE
SECRETARIO	ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ



AGRADECIMIENTO

Al personal de TEXAS PETROLEUM COMPANY y TEXACO GUATEMALA, en especial:

- Ing. Gustavo Matzdorf Silva;
- Ing. William Logan Orellana;
- Ing. Rodrigo Sutter Alegría;
- Sr. Carlos Rizzo;

por su asesoría, apoyo y entusiasmo en la realización de esta investigación.

Al personal de la CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA DEL INDE, en especial:

- Ing. Alejandro Fabián;

por su valiosa colaboración.

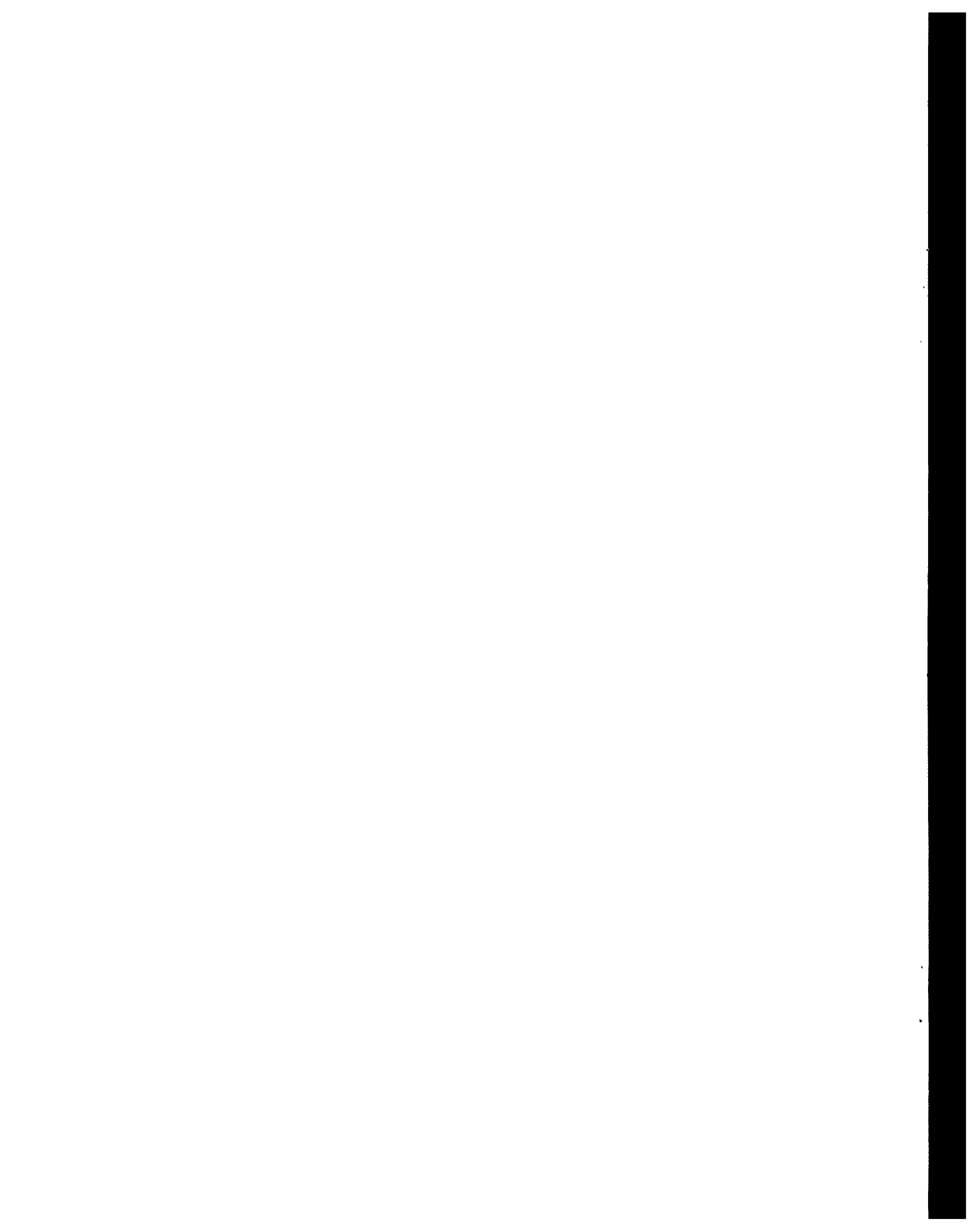
Al personal de la Planta del Puerto de San José de la compañía ESSO CENTRAL AMERICA, en especial:

- Ing. Ricardo Bendaña;
- Ing. César Camey;

por facilitarme los equipos necesarios para llevar a cabo la última etapa de este trabajo.

A Amilcar Monroy, por los dibujos que ilustran este trabajo de tesis y

A toda mi familia y amigos por su amor, motivación y apoyo.



Escuintla, 15 de marzo de 1995

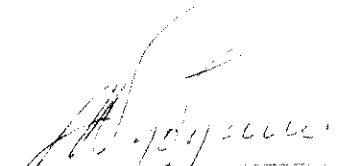
Ingeniero
Jorge Chilo Siguere R.
Coordinador la Carrera de Ingeniería Mecánica.
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala.
Ciudad Universitaria, Zona 12

Ing. Siguere:

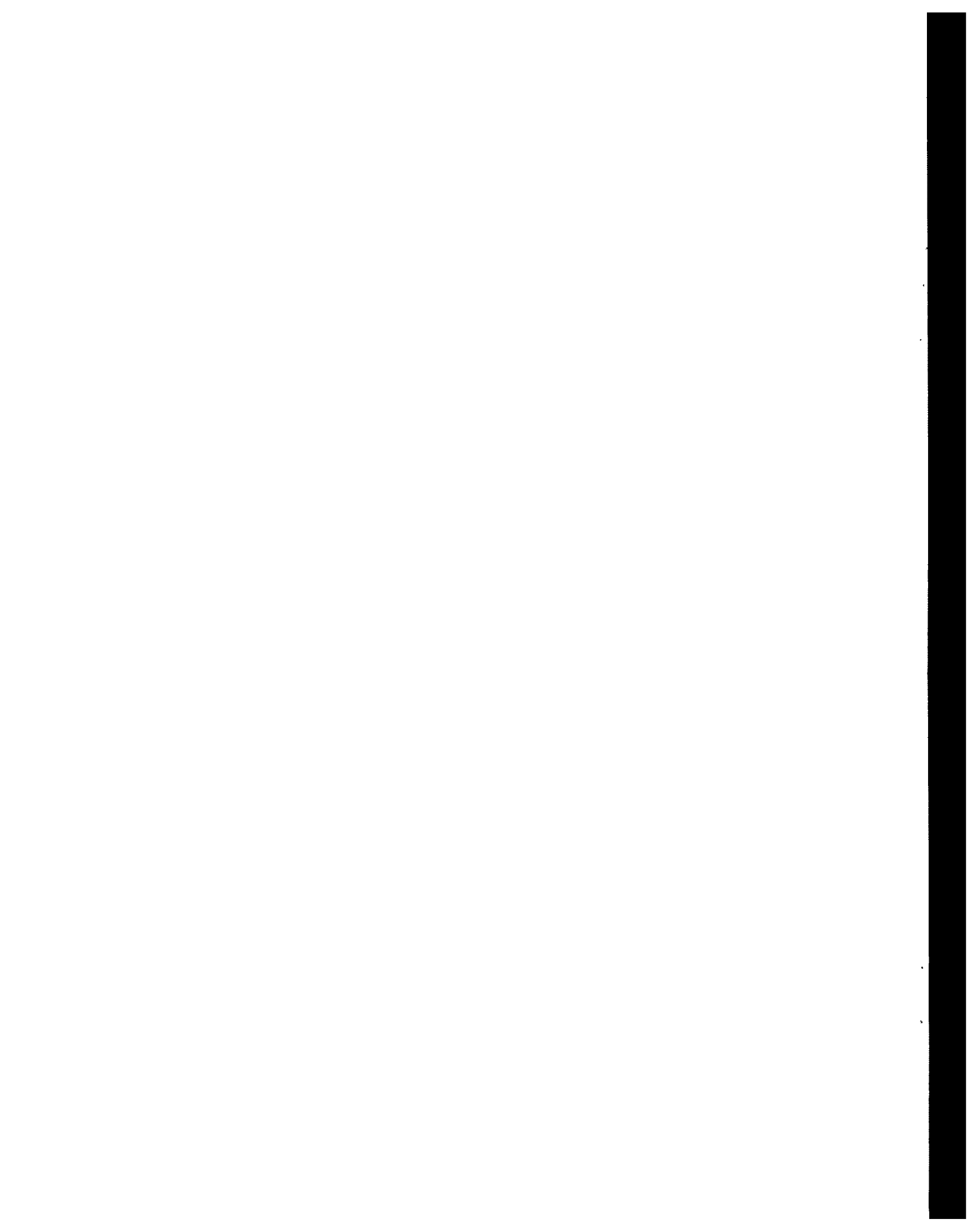
Por medio de la presente le informo que he asesorado al Ingeniero Infiere Mario Vincent Pereira Padilla, Carnet No. 87 - 15705, en la elaboración de su trabajo de tesis titulado **"CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA DE OLEODUCTOS Y SU APLICACIÓN PRÁCTICA EN EL OLEODUCTO REFINERÍA TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA DEL INDE"**

Para desarrollar éste trabajo nos hemos concentrado en presentar diferentes aspectos que es necesario considerar al diseñar un sistema de protección catódica, y en ejemplificar su aplicación. Esta tesis será de mucha utilidad a aquellos ingenieros y técnicos que estén interesados en familiarizarse con los conceptos fundamentales la corrosión electroquímica de oleoductos y de la protección catódica con la cual se les puede proteger.

Atentamente:



William George Logan O.
Ingeniero Electricista
Colegiado 2717



Guatemala, 24 de marzo de 1995

Ing. Jorge Chilo Siguere R.
Coordinador de la Carrera de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Siguere:

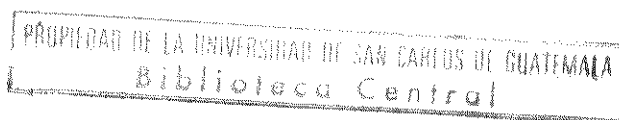
Por medio de la presente me permito saludarlo a la vez que hago de su conocimiento que asesoré al Ing. Inieri Mario Vincent Pereira Padilla, en la elaboración de su trabajo de tesis titulado "*Consideraciones para el diseño de la protección catódica de oleoductos, y su aplicación práctica en el oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE.*". El trabajo en mención fue revisado en su totalidad por mi persona, y del cual puedo comentarle entre lo más importante lo siguiente:

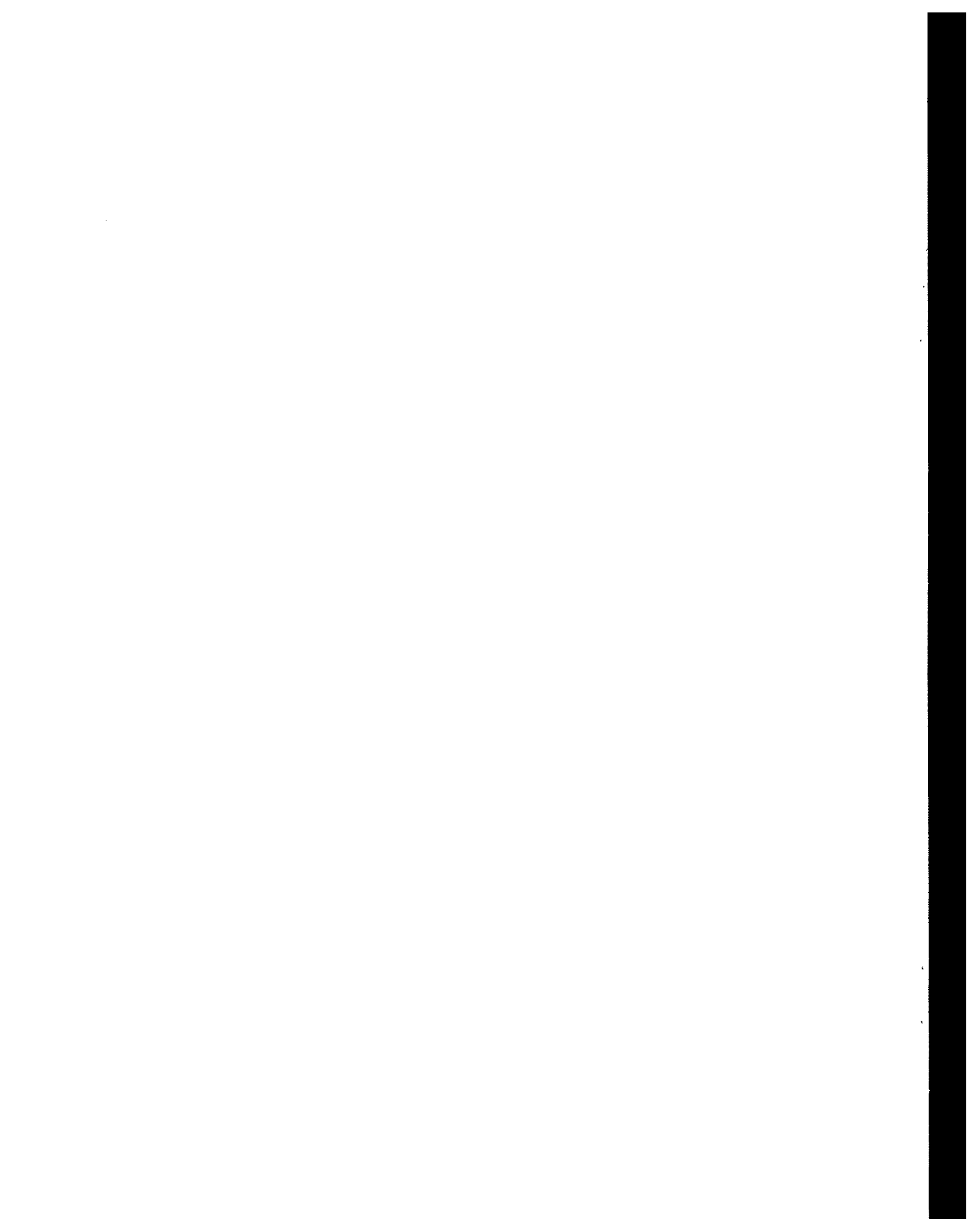
- Es un estudio importante sobre protección catódica para el medio guatemalteco, el cual constituye una base sobre la cual se puede avanzar en dicho tema.
- Será de mucha importancia para el sector energético del país ya que trata sobre la conservación de tuberías que transportan combustibles líquidos.
- Mantiene en todo momento un rigor de investigación y aplicación en la materia que considera.

Por lo anterior me permito recomendarla como estudio de tesis previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente,


Gustavo Adolfo Matzdorf Silva
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado 3571







FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Coordinador del área Materiales Y Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del asesor, y, habiendo revisado en su totalidad el trabajo titulado Consideraciones para el Diseño de la Protección Catódica de Oleoductos y su Aplicación Práctica en el Oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE, del estudiante Mario Vincent Pereira Padilla, recomienda la autorización.

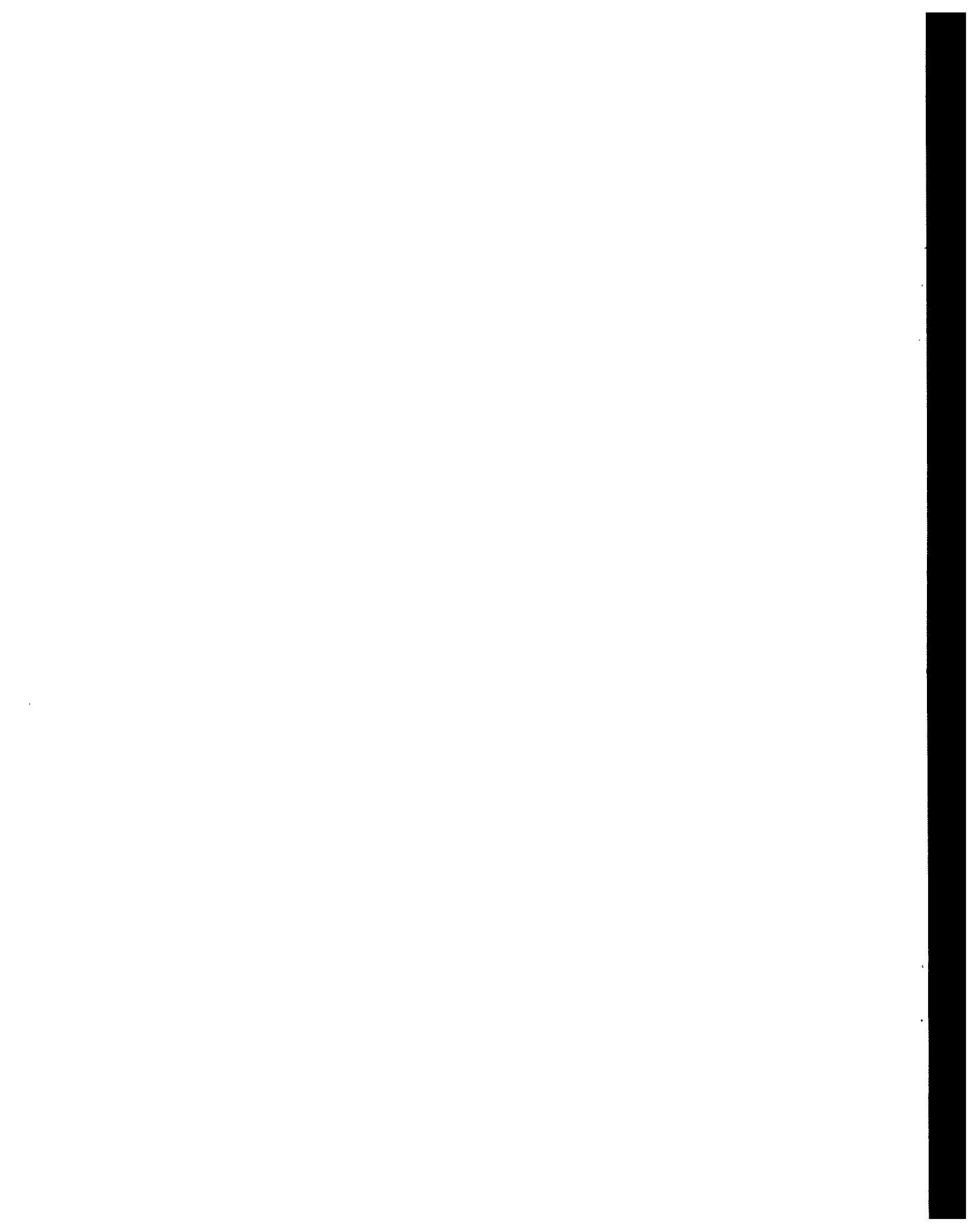
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Arturo Estrada Martínez

Coordinador de Area

Guatemala, septiembre de 1,995.

/bedei.





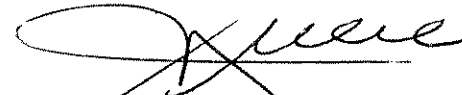
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con el visto bueno del Coordinador del Area de Materiales y Complementaria al trabajo de tesis titulado CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA DE OLEODUCTOS Y SU APLICACION PRACTICA EN EL OLEODUCTO REFINERIA TEXACO - CENTRAL TERMICA ESCUINTLA DEL INDE, del estudiante MARIO VINCENT PEREIRA PADILLA, procede a la autorización del mismo.

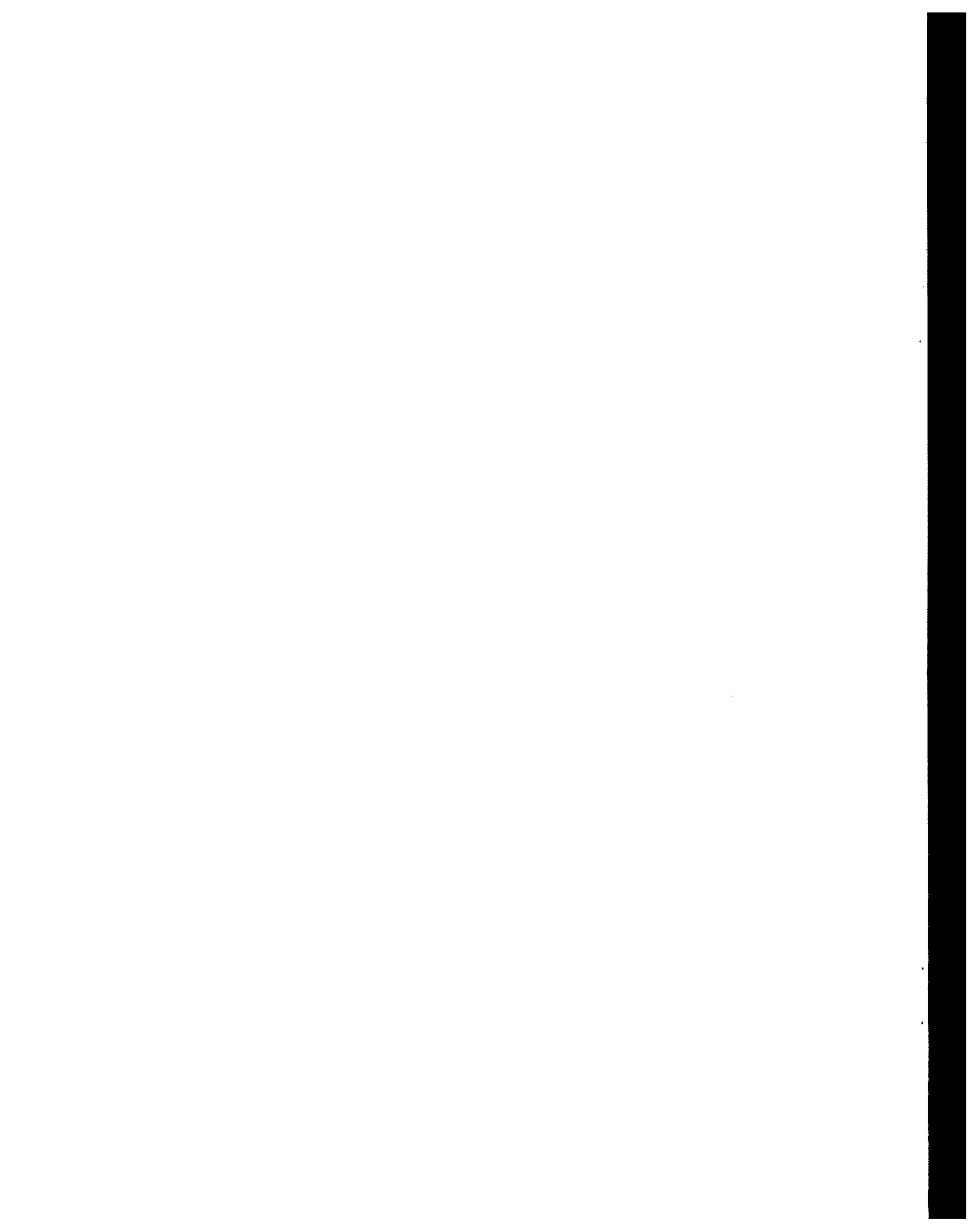
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Jorge C. Siguere Rockstroh
DIRECTOR DE ESCUELA

Guatemala, septiembre de 1,995.

/bedei.







FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Ingeniero Jorge C. Siguere Rockstroh, al trabajo de tesis titulado Consideraciones para el Diseño de la Protección Catódica de Oleoductos y su Aplicación Práctica en el Oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE, presentado por el estudiante universitario Mario Vincent Pereira Padilla, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE

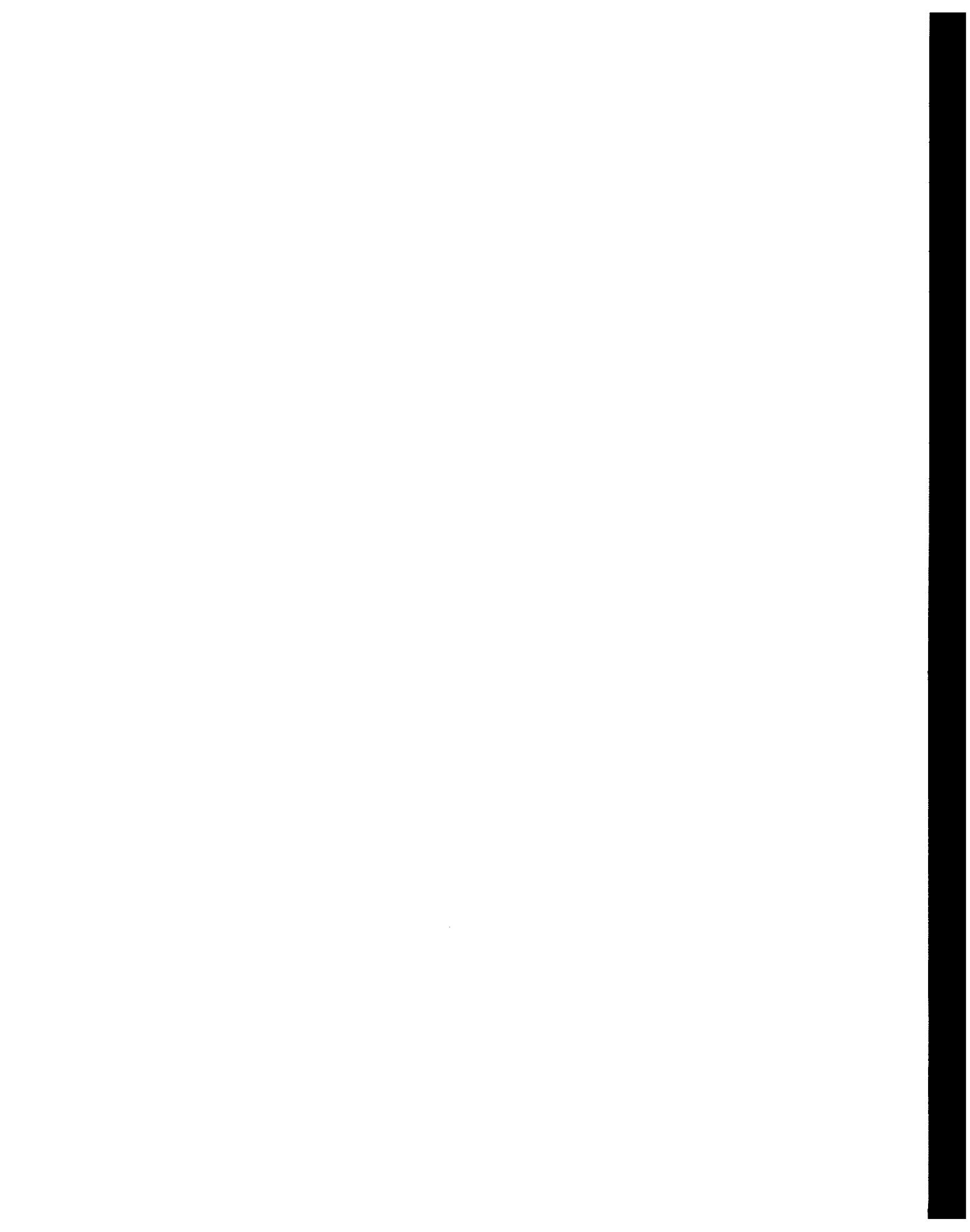
ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK

DECANO



Guatemala, septiembre de 1,995.

/bedei.



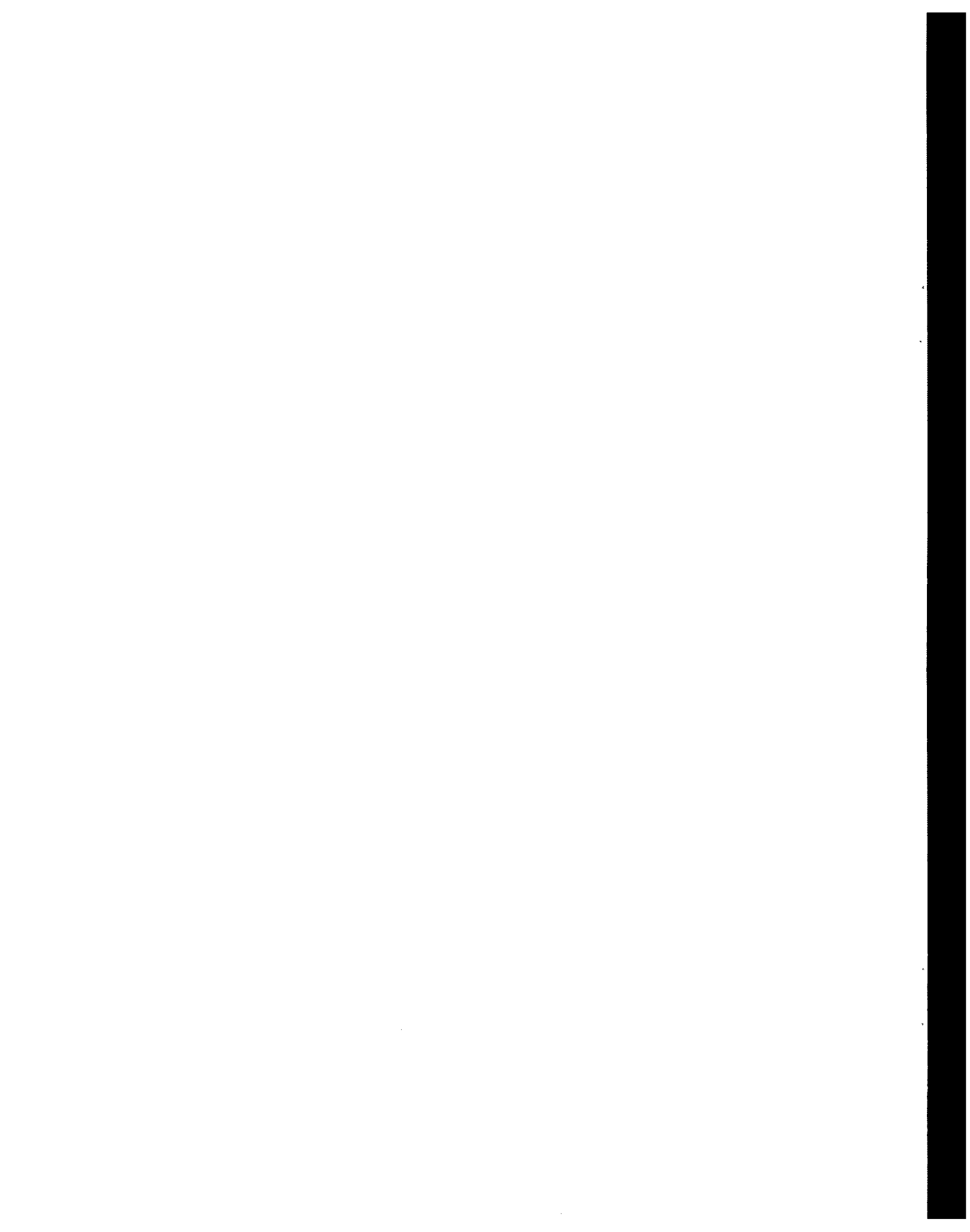
ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. No.	Título	Página
1	Componentes de una celda electroquímica.	3
2	Semicelda utilizada para medir el potencial electrodico del zinc.	5
3	Corrosión de en una tubería de acero debido a su conexión con una válvula de latón.	10
4	Corrosión de tuberías debido a materiales diferentes.	11
5	Corrosión de una tubería nueva debido a su conexión con una vieja.	12
6	Corrosión debido a incrustaciones en la superficie del metal.	14
7	Corrosión debido a rayaduras en la superficie de metal.	15
8	Corrosión debido a diferencias en la composición del suelo.	16
9	Corrosión debido a variaciones en el suelo debido a excavaciones, nivelación de tierras, o debido al uso de una mezcla de suelos de diferente tipo como material de relleno.	17
10	Corrosión debido a variaciones en la humedad del suelo.	19
11	Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.	20
12	Ánodos instalados verticalmente en agujeros.	23
13	Ánodos instalados horizontalmente.	24
14	Protección catódica mediante voltaje impuesto.	25

15	Ánodos colocados en pozos profundos.	29
16	Ánodos colocados en forma distribuida.	31
17	Ánodos colocados en forma concentrada.	32
18	Potenciales obtenidos en una línea de una tubería sin recubrimiento. Semicelda de referencia colocada sobre la línea.	36
19	Potenciales obtenidos en una línea de una tubería sin recubrimiento. Semicelda de referencia colocada alejada de la línea.	37
20	Medición de la resistividad eléctrica del suelo mediante el método de 4 electrodos.	39
21	Resistividades de suelo obtenidas a lo largo de una tubería.	44
22	Corrientes galvánicas en una tubería.	46
23	Curva de atenuación para un oleoducto	51
24	Oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE	60
25	Oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE. Tramo I.	61
26	Oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE. Tramo II.	62
27	Oleoducto Refinería Texaco - Central Térmica Escuintla del INDE. Tramo III.	63
28	Prueba de demanda de corriente	67
29	Potencial oleoducto - suelo.	73
30	Resistividad eléctrica del suelo	73
31	pH del suelo	74
32	Distribución de los ánodos de sacrificio	77
33	Conexiones entre cables	79
34	Soldadura de cable a tuberías	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.	Título	Página
1	Serie de fuerzas electromotrices para algunos elementos.	6
2	Clasificación de la resistividad y corrosividad de suelos.	43
3	Densidad de corriente requerida por estructuras con recubrimientos en diferentes condiciones.	49
4	Factor f.	53
5	Factor de corrección.	54
6	Factor de corrección para la determinación de la resistencia a tierra de un conjunto de ánodos.	56
7	Combustible despachado a Central Térmica Escuintla por el oleoducto durante 1994.	58
8	Potencial oleoducto suelo.	68
9	Resistividad eléctrica del suelo promedio a 1 metro de profundidad.	68
10	pH del suelo a lo largo del oleoducto.	68



ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

a	la separación entre electrodos al aplicar el <i>Método Wenner de cuatro electrodos</i>
A	radio del ánodo (incluyendo el material de relleno auxiliar)
AC	corriente alterna; relacionado con corriente alterna
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)
b	distancia entre los electrodos exteriores al aplicar el <i>Método Wenner de cuatro electrodos</i>
DC	corriente directa; relacionado con corriente directa
e⁻	(1) electrón (2) corriente electrónica
f	Factor de la Tabla No. 4.
F	Factor de corrección de la Tabla No. 6
FEGUA	<i>Ferrocarriles de Guatemala</i>
i	corriente (amperios)
INDE	<i>Instituto Nacional de Electrificación</i>
L	longitud de un ánodo (cm.)
<i>l_m</i>	vida de un ánodo de magnesio (años)
<i>l_z</i>	vida de un ánodo de zinc (años)
M	metal
n	número de ánodos en un grupo

NACE	<i>National Association of Corrosion Engineers</i> (Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión)
R	(1) resistencia eléctrica (Ω) (2) resistencia a tierra de un ánodo (Ω)
R_f	resistencia de un grupo de ánodos colocados en línea recta. (Ω)
R_T	resistividad eléctrica del suelo a una temperatura de T °C. ($\Omega\cdot\text{cm.}$)
T	temperatura del suelo (°C)
W	peso de un ánodo (libras)
ρ	resistividad eléctrica del suelo ($\Omega\cdot\text{cm.}$)

Para los elementos químicos, unidades y constantes se usan los símbolos de costumbre.

GLOSARIO¹ DE TÉRMINOS TÉCNICOS

activo - la dirección negativa del potencial electroódico.

ánodo - electrodo de una celda electrolítica en el cual la oxidación es la reacción principal. (Los electrones fluyen lejos del ánodo en el circuito externo. Es usualmente en el ánodo donde ocurre la oxidación y donde iones metálicos entran a la solución.)

ánodo de sacrificio - material más anódico conectado, eléctricamente, al material o estructura a proteger, el cual se corroe protegiendo, así, a la estructura dada.

ataque selectivo - corrosión acelerada de una parte del ánodo de sacrificio.

banco de ánodos² - En la protección catódica mediante voltaje impuesto, es el conjunto de ánodos conectados a un mismo rectificador.

cátodo - electrodo de una celda electroquímica en el cual la reducción es la reacción principal. (Los electrones fluyen hacia el cátodo en el circuito externo.)

celda de corrosión - celda electroquímica formada entre distintas porciones de metal en una estructura, que resulta en la transformación de una de las porciones de metal del estado metálico al iónico.

celda de referencia - sistema compuesto por un elemento metálico en un electrolito, respecto del cual se mide el potencial electroódico de un elemento metálico en otro electrolito. Usualmente, consiste en una barra de cobre dentro de una solución de sulfato de cobre.

celda electrolítica - ver **celda electroquímica**.

celda electroquímica - sistema electroquímico que consiste en un ánodo y un cátodo en contacto metálico (conectados eléctricamente) e inmersos en un electrolito. (El ánodo y el cátodo pueden ser diferentes metales o áreas disímiles en el mismo material.)

celda patrón - ver **celda de referencia**

celda por composición - celda de corrosión electroquímica producida entre dos materiales de diferente composición.

celda por concentración - celda electrolítica cuya fuerza electromotriz es causada por una diferencia en la concentración de algunos componentes en el electrolito.

cople galvánico - ver **par galvánico**.

corriente galvánica - la corriente eléctrica entre metales o no metales conductores en un par galvánico.

corriente impuesta - una corriente eléctrica suministrada por un dispositivo que emplea una fuente de poder que es externa al sistema electrodico. (Un ejemplo es la corriente directa para protección catódica.)

corrosión - reacción química o electroquímica entre un material, usualmente, un metal y su ambiente que produce el deterioro del material y sus propiedades.

corrosión electroquímica - corrosión producida por el desarrollo de una corriente eléctrica entre partes de una estructura metálica en contacto con un electrolito, lo cual produce la eliminación de iones del metal.

corrosión galvánica - corrosión acelerada de un metal debido al contacto eléctrico con un metal más noble o conductor no metálico en un electrolito corrosivo.

corrosión por grietas - corrosión localizada de la superficie de un metal en o inmediatamente adyacente a, un área que está aislada de la exposición plena al ambiente debido a la cercana proximidad entre el metal y la superficie de otro material.

corrosión química - remoción de átomos de un material por efecto de la solubilidad o reacción química entre el material y el líquido circundante.

corrosión termogalvánica - efecto corrosivo que resulta de la celda galvánica causada por un gradiente térmico a través de la superficie de un metal.

corrosión uniforme - corrosión que ocurre, aproximadamente, a la misma rapidez sobre la superficie de un metal.

densidad de corriente - corriente eléctrica de o hacia una unidad de área de la superficie de un electrodo.

despolarización - cambio en la corriente en una celda electroquímica debido a la modificación del electrolito en contacto con los electrodos. En la celda de corrosión generalmente, produce un aumento en la corriente y, consiguientemente, en mayor corrosión.

electrodo de referencia - ver **celda de referencia**

electrolito - medio conductor a través del cual los iones se mueven constituyendo una corriente en una celda electroquímica.

equipos a prueba de explosión - equipos (en inglés denominados "explosion proof") que pueden utilizarse en ambientes con vapores inflamables y que no presentan el riesgo de producir una fuente de ignición.

explosion proof - ver **equipos a prueba de explosión**

noble - la dirección positiva del potencial electródico.

oxidación - pérdida de electrones por el constituyente de una reacción química. (También se refiere a la corrosión de un metal expuesto a un gas oxidante a temperaturas elevadas.)

par galvánico - par de conductores disímiles, comúnmente metales, en contacto eléctrico.

polarización - el cambio en el potencial electródico de la celda electroquímica debido al paso de corriente. En las celdas de corrosión resulta en una disminución en la corriente y, consiguientemente, en una menor corrosión del metal.

potencial electródico - el potencial de un electrodo en un electrolito medido en contra de un electrodo de referencia.

potencial estructura-electrolito - potencial de una estructura en contacto con un electrolito respecto de un electrodo de referencia.

rapidez de corrosión - la cantidad de corrosión que ocurre por unidad de tiempo.

reacción anódica - reacción por oxidación mediante la cual se ionizan los átomos metálicos en el ánodo de una celda electroquímica.

reacción catódica - reacción de reducción en la que se forma un producto secundario en forma de gas, sólido o líquido en el cátodo de una celda electroquímica.

reacción de oxidación - reacción anódica por la cual los electrones son cedidos a la celda electroquímica.

reacción de reducción - reacción catódica por la cual son aceptados los electrones de la celda electroquímica.

reducción - la ganancia de electrones por el constituyente de una reacción química.

resistencia específica - ver **resistividad**.

resistividad - la resistencia eléctrica de una unidad de volumen de un material; el recíproco de la conductividad.

serie de fuerzas electromotrices - lista de elementos arreglada de acuerdo a su potencial electródico patrón o estándar, con los metales "nobles" como el oro siendo positivos y metales "activos" como el zinc, negativos.

serie electroquímica - ver **serie de fuerzas electromotrices**

serie galvánica - lista de metales y aleaciones arreglados de acuerdo a su potencial relativo de corrosión en un medio-ambiente determinado.

zonas anódicas - tramos o porciones de una estructura en donde la corrosión es más severa.

INTRODUCCIÓN

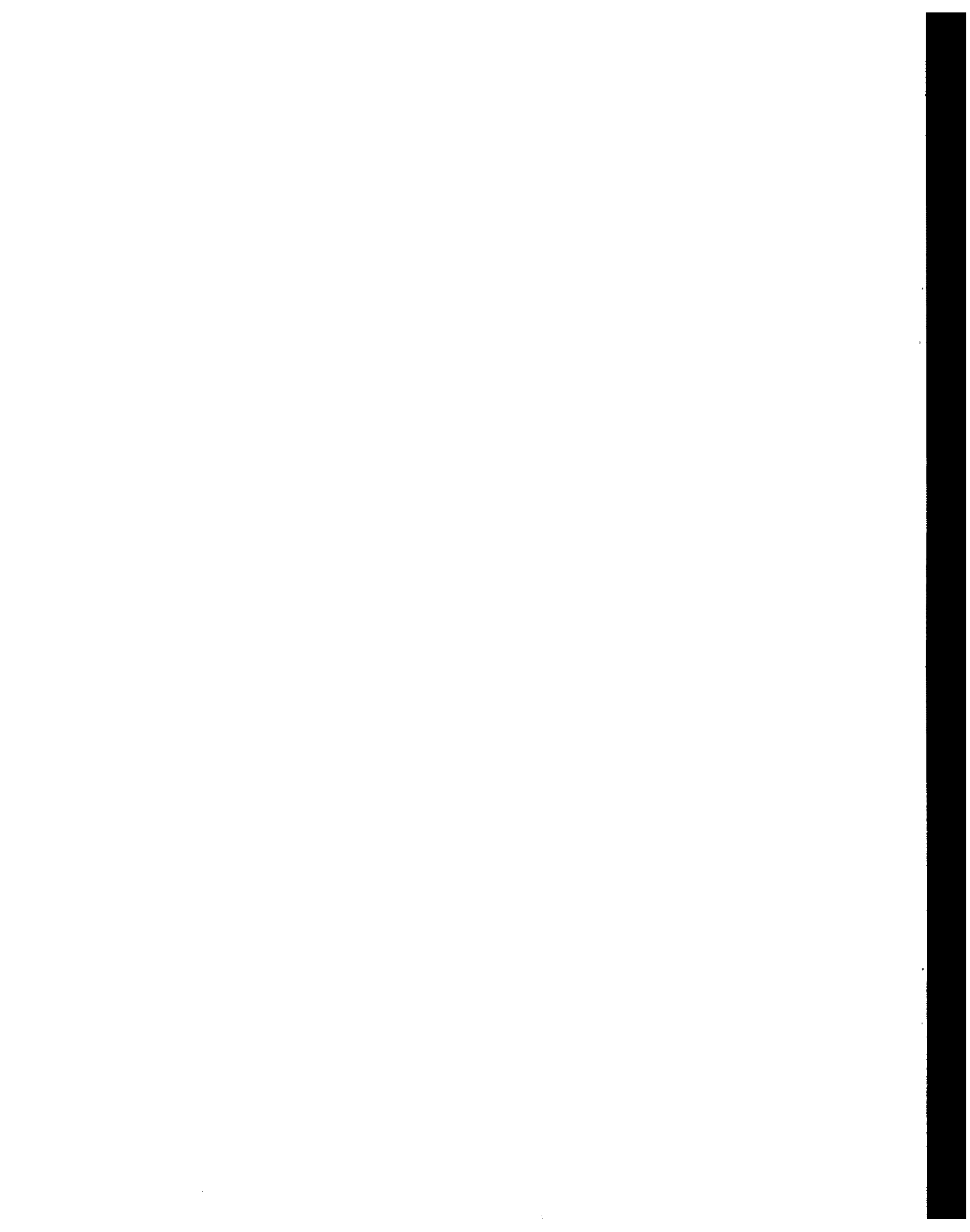
Uno de los problemas serios de la industria es la corrosión. En Guatemala no se ha determinado a cuánto ascienden las pérdidas anuales debido a este fenómeno, pero, estudios llevados a cabo en varios países estiman que los perjuicios causados por la corrosión equivalen del 1.5 al 3.5% del Producto Bruto Nacional.³

La corrosión de las estructuras o máquinas debe prevenirse desde el diseño de las mismas. Son muchas las medidas que se tienen disponibles para ello, como lo es la selección adecuada de los materiales, el uso de recubrimientos, la protección anódica o pasivación, tratamientos, etc.; la protección catódica es una de ellas.

La protección catódica es un método muy eficaz de control y prevención de la corrosión electroquímica. En la corrosión electroquímica, se presenta un flujo de electrones de una porción de metal de la estructura hacia otra. En las regiones donde se presenta este "déficit" de electrones, el material es más propenso a corroerse. La protección catódica consiste en suministrar una corriente de electrones a la estructura a fin de reducir o evitar estas regiones. Actualmente, en Guatemala, son pocas las empresas que lo aplican, a pesar de que a largo plazo la inversión es compensada por una durabilidad mucho mayor de las estructuras metálicas.

El fenómeno de la corrosión es complejo, son muchas e incontrolables las variables involucradas. Esto hace necesario el considerar el diseño de un sistema de protección catódica como un experimento. La experiencia y conocimiento de aquellos involucrados en tal diseño es muy importante. No se pretende que este trabajo resuelva todo lo relacionado con tal diseño, se persigue el presentar los aspectos más importantes de una forma condensada y realista.

En el presente trabajo se dará una descripción de lo que es la corrosión para dar al lector una comprensión básica del tema; se describirá en qué consiste la protección catódica y más, particularmente, cómo se aplica a tuberías enterradas. Se lleva a cabo la ejemplificación de la parte teórica, realizando el diseño del sistema de protección catódica del oleoducto entre la Refinería Texaco y la Central Térmica Escuintla del Instituto Nacional de Electrificación.



CAPÍTULO 1

ASPECTOS TEÓRICOS FUNDAMENTALES

1.1 El mecanismo de la corrosión

1.1.1 Definición de corrosión

La *American Society for Testing and Materials* define la corrosión como la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su ambiente, lo que produce el deterioro del material y de sus propiedades⁴. Esta definición da en sí dos grandes clasificaciones de los tipos de corrosión: la corrosión química y la corrosión electroquímica, los cuales se analizarán más detenidamente, siendo la corrosión electroquímica la que interesa.

1.1.2 Tipos de corrosión

1.1.2.1 Corrosión química

La corrosión química consiste en la remoción de átomos de un material por efecto de la solubilidad o reacción química entre el material y el líquido circundante⁵. Los dos tipos más importantes de corrosión química son: la oxidación y la disolución directa.

1.1.2.1.1 Oxidación (corrosión por gases)

La composición o propiedades de un material pueden verse seriamente alteradas por la reacción química de estos con el oxígeno u otros gases en el medio que los rodea. Se denomina oxidación a la reacción de un material con el oxígeno. Al producirse este fenómeno se produce en la superficie del metal una capa de óxido o costra, la cual puede ser protectora e impedir o reducir el subsecuente deterioro del material.

1.1.2.1.2 Disolución directa

La *disolución directa* consiste en la disolución del material en un medio corrosivo hasta que el material se consume o se satura el medio.

1.1.2.2 Corrosión electroquímica

1.1.2.2.1 La celda electroquímica

A fin de comprender más fácilmente el fenómeno de la corrosión electroquímica conviene introducir, inicialmente, el concepto de *celda electroquímica*.

Una celda electroquímica (ver Fig. No. 1) es un sistema formado por dos piezas de metal (una llamada ánodo y la otra cátodo) en contacto metálico e inmersas en un electrolito. Los 4 componentes de una celda electroquímica son entonces:

- ánodo. El *ánodo* es la pieza que cede electrones al circuito y se corroe;
- cátodo. El *cátodo* recibe electrones, los cuales participan en una reacción química con algunos o todos los constituyentes del electrolito que se encuentran cerca de él;
- contacto eléctrico. El ánodo y el cátodo deben estar conectados eléctricamente, a fin de que los electrones fluyan del ánodo al cátodo;
- electrolito. Líquido que debe estar en contacto, tanto con el ánodo como con el cátodo, y, que provee el medio a través del cual los iones metálicos abandonan la superficie del ánodo y provee los elementos o moléculas que participan, químicamente, en la reacción catódica.⁶

En el ánodo se experimenta una *reacción anódica*, la cual es una reacción por oxidación mediante la cual se ionizan los átomos metálicos:

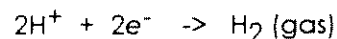


donde: e^{-} = electrón
M = metal

Los iones ingresan o se disuelven, generalmente, en la solución electrolítica, mientras que los electrones fluyen a través del contacto eléctrico hacia el ánodo donde participan en alguna reacción catódica.

En el cátodo se presenta una *reacción catódica*, siendo ésta una reacción de reducción en la que se forma un producto secundario en forma de gas, sólido o líquido.

En los líquidos libres de oxígeno, como el ácido clorhídrico (HCl) la reacción catódica más común es la de desprendimiento de hidrógeno:



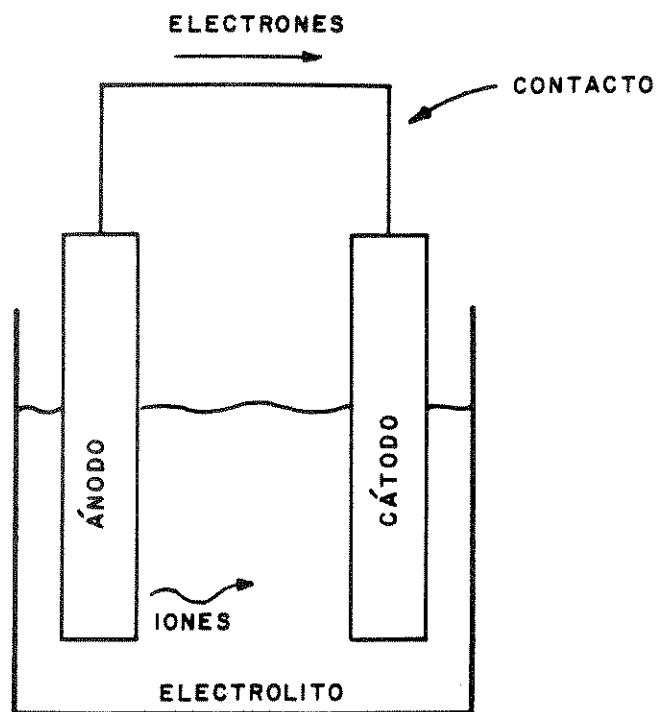
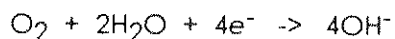


FIGURA No. 1
COMPONENTES DE UNA CELDA ELECTROQUIMICA

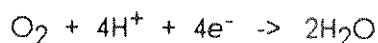
Esta reacción se produce por ejemplo cuando se coloca zinc en un ácido. Los electrones se combinan con iones de hidrógeno en la superficie y se forma hidrógeno atómico, gran parte de éste se combina para formar hidrógeno molecular, el cual se desprende en burbujas o se disuelve en el metal.

En el agua aireada, el oxígeno se encuentra disponible en el cátodo y se forman iones OH^- :



Los iones de hidroxilo (OH^-) reaccionan con los iones metálicos cargados positivamente, como los de Fe^{2+} , produciendo, finalmente, un producto sólido como el $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o herrumbre.⁷

En los oxiácidos, la reacción catódica produce agua como subproducto:



1.1.2.2 Potenciales de celda

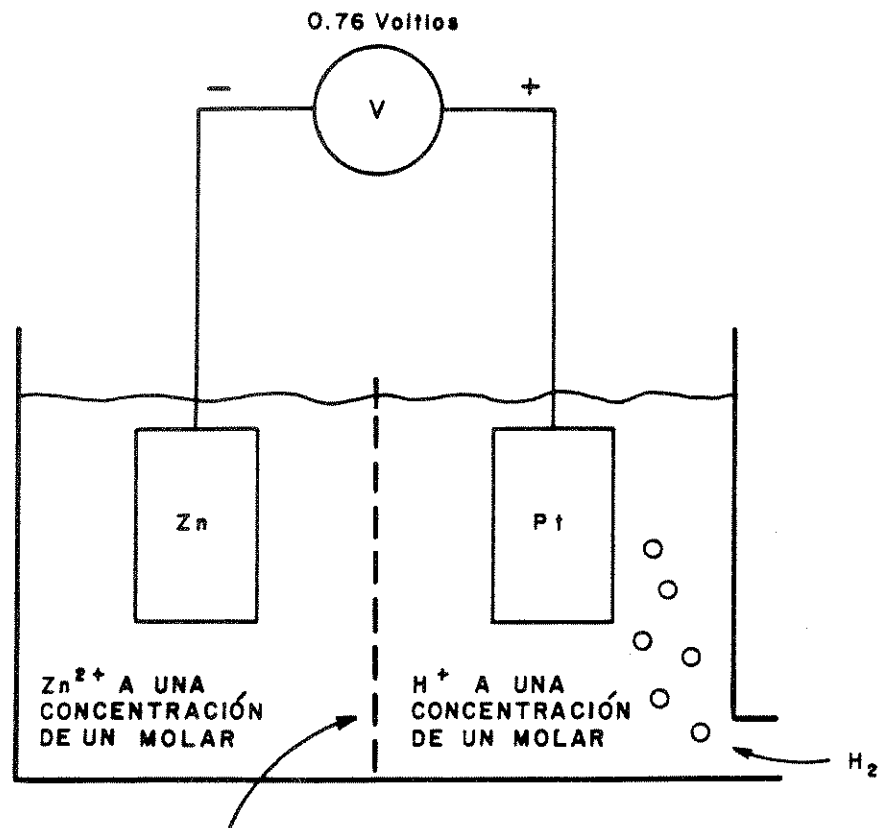
El potencial requerido para que se produzca la corriente en la celda electroquímica puede deberse a un voltaje deliberadamente impuesto o generarse de modo natural como es el caso en la corrosión.

Cada metal tiene una fuerza impulsora diferente, llamada *potencial electródico*, para solubilizarse, la cual puede medirse como voltaje. Para establecer el potencial electródico de un metal, es necesario establecer la *diferencia de potencial* entre el metal y un electrodo patrón. Para esto, se coloca un electrodo del metal a ensayar en una solución de concentración 1 molar de sus iones (ver Figura No. 2) en la otra mitad de la celda se coloca un electrodo de platino, el cual no participa en la reacción, en una solución de concentración de 1 molar de iones de hidrógeno (producidos por un ácido) una membrana semipermeable divide la celda.⁸ Midiendo el voltaje entre los dos electrodos se obtiene la diferencia de potencial.

Cuando el metal es más reactivo que el hidrógeno, es decir, tiende a ceder sus electrones y solubilizarse, se dice que el material es más activo o anódico y se le asigna signo negativo a su potencial. Si el metal tiende a recibir los electrones, se dice que es más noble que el electrodo patrón y a su diferencia de potencial se le asigna signo positivo. Si una lista de elementos se ordena de acuerdo a su diferencia de potencial electródico o estándar, con los metales "nobles" como el oro, siendo positivos y los metales "activos" como el zinc siendo negativos se obtiene una *serie de fuerzas electromotrices*, como la que se muestra en la Tabla No. 1.

1.1.2.3 Series galvánicas

Al determinar la serie de fuerzas electromotrices anterior, los metales y electrolitos debían cumplir varias condiciones específicas que, usualmente, sólo se pueden obtener en laboratorios. Por ejemplo, el electrolito debía contener concentraciones específicas de sales del mismo metal bajo análisis. Por esta razón se obtienen series parecidas con base en las necesidades que dicta la experiencia, mediante combinaciones de metales en variedad de ambientes, las cuales se



LA BARRERA PERMITE LA TRANSFERENCIA DE CARGA PERO NO LA MEZCLA DE ELECTROLITOS

FIGURA No. 2
 SEMICELDA UTILIZADA PARA MEDIR EL POTENCIAL ELECTRÓDICO DEL ZINC

denominan *series galvánicas*. Por ejemplo, puede obtenerse una serie galvánica para metales y aleaciones en agua de mar la cual se mueve a alta velocidad.

1.1.2.2.4 Polarización

Durante la operación de la celda electroquímica ocurren diversos cambios, los cuales pueden dar como resultado la variación de la corriente en la celda o, sea, se produce un cambio en la diferencia de potencial electrodo. A este cambio se le denomina *polarización*.

Reacción de corrosión (metal)	Potencial electrodo (V)
$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	+1.498
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^{+} + 4\text{e}^{-}$	+1.229
$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	+1.200
$\text{Pd} \rightarrow \text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	+0.987
$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^{+} + \text{e}^{-}$	+0.799
$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^{-}$	+0.788
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^{-}$	+0.771
$4(\text{OH})^{-} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^{-}$	+0.401
$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	+0.337
$\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^{-}$	+0.150
$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-}$	0.000
$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.126
$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.136
$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.250
$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.277
$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.403
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.440
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	-0.744
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.763
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	-1.662
$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-2.363
$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^{+} + \text{e}^{-}$	-2.714
$\text{K} \rightarrow \text{K}^{+} + \text{e}^{-}$	-2.925

Tabla No. 1. Serie de fuerzas electromotrices para algunos elementos.⁹

Después de que se inicia la corrosión, la concentración de iones en la superficie del ánodo o del cátodo puede cambiar. La disponibilidad de iones positivos cerca del cátodo puede disminuir y dar como resultado que menos electrones abandonen el cátodo. La alta concentración de iones cerca del ánodo, puede impedir que otros iones del metal corroyéndose, entren en la solución.

1.1.2.2.5 Tipos de corrosión electroquímica

En la corrosión electroquímica se produce un fenómeno análogo al que se produce en una celda electroquímica. Se tiene un flujo de electrones entre distintas áreas de la superficie de un metal. La porción de metal que cede sus electrones y que está transformándose del estado metálico al iónico o, sea, corroyéndose, se denomina ánodo. La porción de metal a donde fluyen los electrones se denomina cátodo. En la corrosión la conexión entre el ánodo y el cátodo se lleva a cabo, simplemente, por contacto. A fin de completar el circuito se tiene en contacto, tanto con el ánodo como con el cátodo, un electrolito. La diferencia de potencial necesaria para que fluya la electricidad puede deberse a varias causas, entre las cuales se pueden destacar diferencias en la composición del metal y diferencias en el electrolito. A estas celdas se denominan: *celdas de corrosión*.

Son muchos los casos de corrosión que se presentan y a los cuales se les da nombres especiales. Aquí se analizarán, únicamente, los que más interesan.

1.1.2.2.5.1 Corrosión de metal distinto o por celdas de composición

Cuando se forma una celda electroquímica utilizando dos electrodos de diferente material, se genera una diferencia de potencial que produce una corriente, debido a los diferentes potenciales electródicos. A las celdas de corrosión que se producen, debido al contacto en un electrolito de dos materiales de diferente potencial electródico, se denominarán: *celdas de composición*. A este tipo de corrosión, también se le denomina *corrosión galvánica*.

Los casos macroscópicos de este tipo de celdas, se producen debido a la utilización de materiales de diferente composición para diferentes partes de una estructura. Como ejemplos están: la conexión de una tubería de cobre a una de acero, o, el uso de remaches de acero en una lámina de cobre.

Los casos microscópicos se presentan cuando se tienen diferencias en la composición del material que no son apreciables a simple vista. Pequeñísimas celdas de corrosión se forman, por ejemplo, entre las diferentes fases de aleaciones.

1.1.2.2.5.2 Corrosión debido a diferencias en el electrolito o por celdas por concentración

Cuando se forma una celda electroquímica, colocando dos electrodos del mismo material en diferentes electrolitos, se genera una diferencia de potencial y, consiguientemente, una corriente. La dirección de la corriente depende de los electrolitos. A las celdas de corrosión que se producen debido a variaciones o diferencias en la composición del electrolito, se denominarán: *celdas por concentración*.

La corrosión debido a celdas por concentración es un tipo de corrosión que ataca sólo porciones de una superficie metálica. Este tipo de corrosión se desarrolla, particularmente, por diferencias en la concentración de iones. Las porciones de metal en contacto con el electrolito diluido (donde es más fácil la disolución de iones) constituyen el ánodo.

Por ejemplo, en estructuras subterráneas o sobre el suelo, este tipo de corrosión se produce debido a diferencias en la composición del suelo. Si parte de una tubería es instalada en suelo que presenta variaciones en la resistividad a lo largo de la longitud del tramo en el que es instalada, la porción de la tubería en contacto con el suelo de baja resistividad se vuelve anódica con respecto a la porción en contacto con el suelo de alta resistividad; la corrosión se presentará en la porción anódica.

1.1.2.2.5.3 Corrosión uniforme

Usualmente da la apariencia de un ataque directo del medio en el metal, en el sentido de que el deterioro está uniformemente distribuido sobre la superficie del metal. Las porciones anódicas están muy cercanas de las catódicas y ambas están en continua migración a través del metal. Este tipo de corrosión es resultado de variaciones en pequeñas longitudes en la composición del metal, electrolito o temperatura. En este tipo de corrosión, se dice, usualmente, que el ambiente es corrosivo con respecto al metal.

1.1.2.2.5.4 Corrosión anaeróbica o por bacterias

La *corrosión anaeróbica o por bacterias* resulta de la acción de bacterias que pueden existir en condiciones anaeróbicas (en ausencia de oxígeno) y en ambientes con un pH entre 5.5 y 8.5. Estas bacterias tienen la capacidad de reducir sulfatos presentes y de consumir hidrógeno en el proceso. El consumo de hidrógeno en los alrededores del metal lo despolariza y permite la corrosión del metal debido a celdas de corrosión presentes.

Las bacterias no atacan directamente al metal, sino que producen cambios químicos y físicos en el medio en el que éste se encuentra. Esto conduce a un deterioro del metal, por celdas que normalmente están reprimidas por una capa aislante de hidrógeno que produce polarización.¹⁰

1.1.2.2.5.5 Corrosión electrolítica o por "corrientes perdidas"¹¹

La corrosión por corrientes perdidas se presenta en estructuras metálicas con una parte de ellas o su totalidad en contacto con la tierra, como es el caso de tuberías enterradas, tanques de almacenamiento, subterráneos, o, sobre la tierra. Es el resultado de corrientes que son introducidas a la tierra de fuentes cercanas de corriente directa, tal como equipos de soldadura, maquinaria que emplea corriente directa o sistemas de protección catódica, cercanos.¹²

La corrosión se presenta en aquellas partes de la estructura donde el flujo de electrones entra a ella. Es decir en los puntos en donde la corriente electrónica ingresa a la estructura o en donde la corriente convencional la abandona.

1.1.3 Corrosión de tuberías enterradas

Se puede clasificar la corrosión de tuberías enterradas en corrosión interna y corrosión externa. La corrosión interna es la que se presenta en la superficie que está en contacto con el fluido que se transporta, y, la externa es aquella que se presenta en la superficie exterior.

Esta tesis se concentra en la prevención de la corrosión externa de tuberías. A fin de prevenir la corrosión interna son también muchas las herramientas que se tienen, entre las cuales se puede destacar la selección adecuada del material del cual está hecha la tubería y recubrimientos especiales.

Las celdas de corrosión presentes en las superficies externas de tuberías enterradas, son muchas veces parte integral de ésta y difíciles de reconocer. La descripción a continuación de varias celdas que pueden presentarse en tuberías, puede ser de gran utilidad a fin de detectarlas y prevenirlas.

1.1.3.1 Corrosión debido a celdas de composición (corrosión de metal distinto)

1.1.3.1.1 Corrosión debido a la conexión de piezas de diferente material

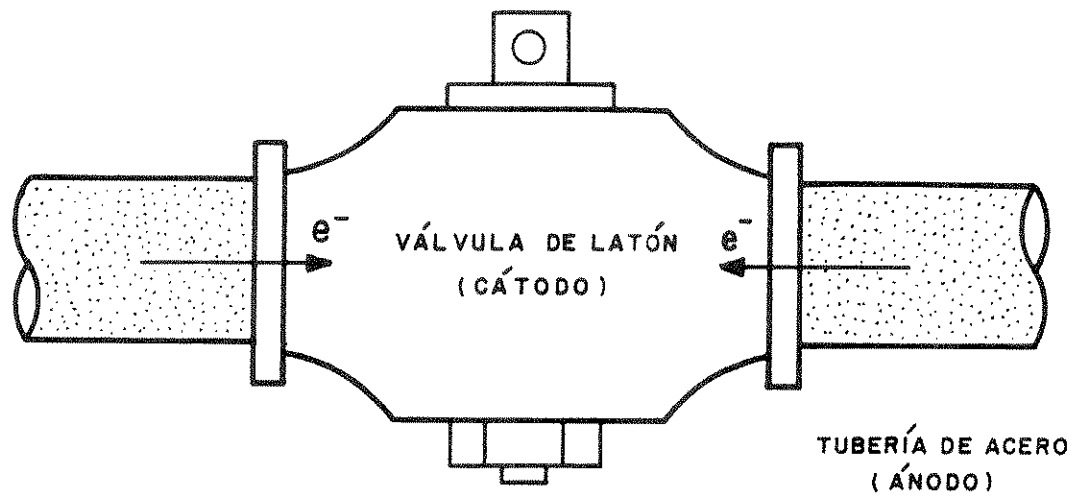
Cuando se conectan piezas hechas de diferente material en un electrolito se produce una diferencia de potencial y se origina corrosión. Por ejemplo, cuando se tiene una válvula de latón en una tubería de acero (ver Figura No. 3) la válvula es catódica y la tubería anódica, resultando en la corrosión de la tubería. Otro ejemplo de este tipo de celda de corrosión es cuando una tubería de cobre se conecta a una tubería de acero (ver Figura No. 4) el acero o hierro fundido es anódico respecto del cobre. En el punto donde la tubería de cobre es conectada a la de acero se produce un flujo de electrones del acero al cobre. Esto resulta en la corrosión del acero y en la relativa protección del cobre.

1.1.3.1.2 Corrosión debido a la conexión de piezas con diferente tiempo de uso

Una de las más comunes y menos considerada es la celda creada cuando una pieza "nueva" es instalada en una línea "vieja" es decir, se conectan piezas del "mismo" material pero con diferente tiempo de uso. El caso más frecuente es cuando una tubería nueva se conecta con una línea vieja (ver Fig. No. 5) la tubería nueva es siempre anódica y su corrosión dependerá del tipo de suelo y área relativa entre el cátodo y el ánodo. Si pequeños tramos de tubería nueva son instalados en una línea vieja, la corrosión se producirá a ritmos acelerados debido a que el pequeño ánodo tendrá que suplir la corriente requerida por la, comparativamente, mayor área del cátodo, conformada por la línea vieja.

1.1.3.1.3 Corrosión debido a incrustaciones en la superficie del metal

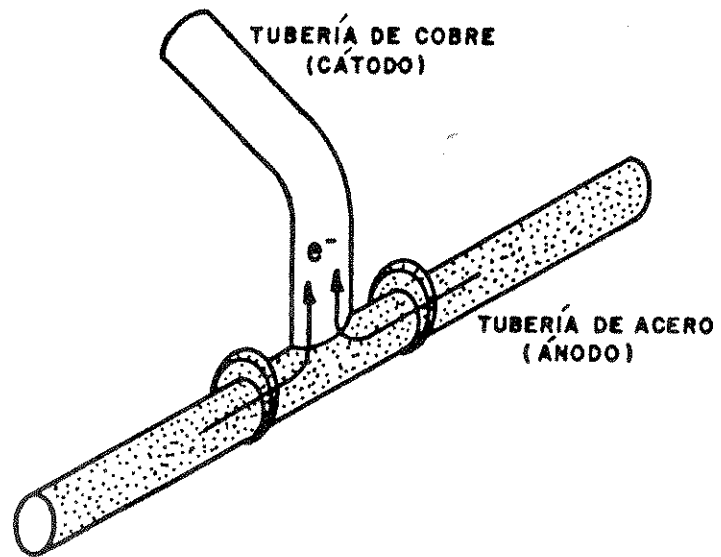
Durante la fabricación de la tubería pueden quedar impurezas incrustadas en la superficie del metal. Estas impurezas son, por lo general, catódicas, respecto del metal de la tubería. En el caso de que sean anódicas, respecto de la tubería y



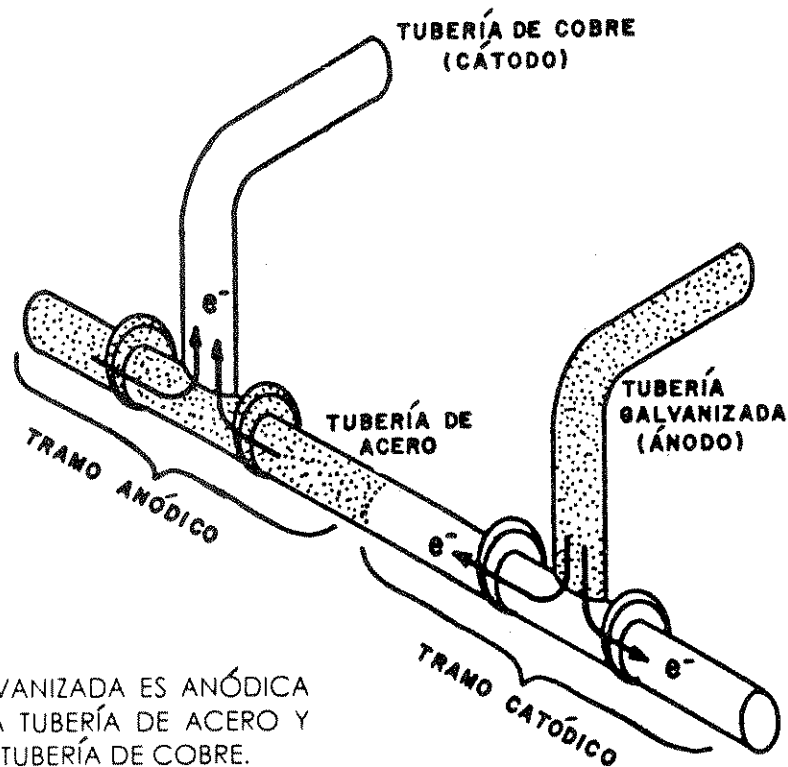
NOTA:
LOS MATERIALES SOMBREADOS
SON ANÓDICOS.

FIGURA No. 3
CORROSIÓN EN UNA TUBERÍA DE ACERO DEBIDO A SU
CONEXIÓN CON UNA VÁLVULA DE LATÓN

LOS TRAMOS DE TUBERÍA SOMBREADOS SON ANÓDICOS.



LA TUBERÍA DE ACERO ES ANÓDICA RESPECTO DE LA TUBERÍA DE COBRE. DONDE LA TUBERÍA DE COBRE ES UNIDA A LA DE ACERO, SE PRODUCE UNA CORRIENTE DE ELECTRONES DEL ÁNODO HACIA EL CÁTODO.



LA TUBERÍA GALVANIZADA ES ANÓDICA RESPECTO DE LA TUBERÍA DE ACERO Y RESPECTO DE LA TUBERÍA DE COBRE.

FIGURA No. 4
CORROSIÓN DE TUBERÍAS DEBIDO A MATERIALES DIFERENTES

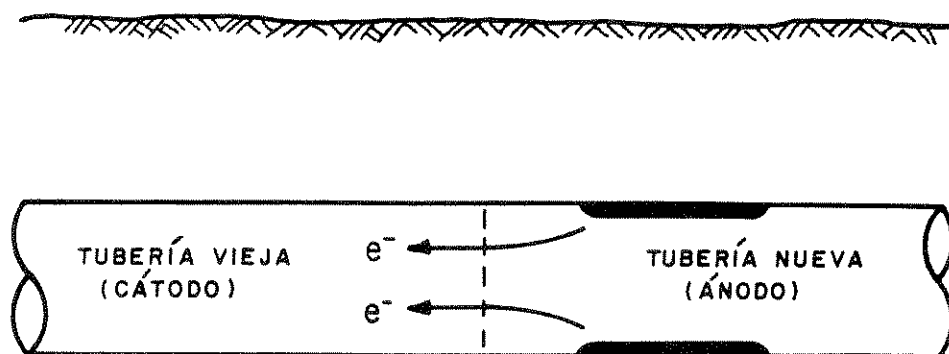


FIGURA No. 5
CORROSIÓN DE UNA TUBERÍA NUEVA DEBIDO A SU CONEXIÓN
CON UNA TUBERÍA VIEJA.

relativamente pequeñas, se presentará corrosión concentrada y picaduras si está enterrada en suelos corrosivos. (Ver Figura No. 6.)

1.1.3.1.4 Corrosión debido a rayaduras en la superficie del metal

Otro tipo común de celda galvánica es la que resulta debido a rayaduras en la superficie del metal (ver Figura No. 7). Los rayones debido a herramientas se convierten en áreas anódicas al ser enterrada la línea. Lo mismo ocurre con las superficies pulidas de las roscas que quedan al descubierto al ensamblarse con otros accesorios o tuberías. Bajo ciertas condiciones, estas celdas pueden ser muy destructivas debido a la proporción tan desfavorable entre las regiones anódicas y catódicas.¹³ Es importante notar que en el caso de tubería galvanizada, cuando esta sufre rayaduras, puede no corroerse debido a que el zinc es anódico respecto del material expuesto y lo protege.

Contrario a la creencia de muchas personas que no están bien familiarizadas con el fenómeno de la corrosión, una tubería recubierta no protegida catódicamente puede presentar fugas más rápido que una que no tiene ningún recubrimiento (tampoco protegida catódicamente)¹⁴ esto, debido a que en tuberías sin recubrimiento, la corrosión tiende a distribuirse sobre la totalidad de la superficie, retardando, por tanto, la penetración de la pared. Por otro lado, en tuberías recubiertas, la corrosión se concentra en áreas pequeñas (donde el metal está expuesto debido a rayaduras o defectos en el recubrimiento) acelerando la penetración de la pared. No obstante las fugas se presentan primero en una tubería con recubrimiento no protegida catódicamente, la pérdida total de metal es menor que en el caso de una tubería sin recubrimiento.

1.1.3.1.5 Corrosión debido a diferencias en el tratamiento térmico o zonas afectadas por el calor debido a soldaduras

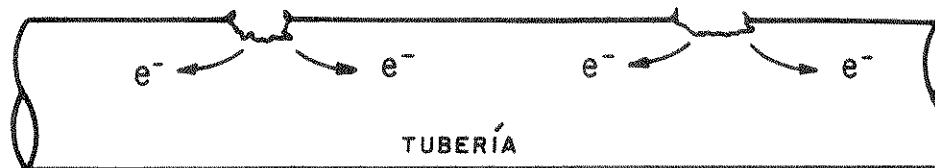
Diferencias en el tratamiento térmico o la existencia de zonas afectadas por el calor cerca de soldaduras puede dar origen a celdas de corrosión. Si dos piezas, originalmente, del mismo metal son conectadas, pero una es templada y la otra es sometida a recocido, la pieza templada se comportará como ánodo.

1.1.3.2 Corrosión por concentración (diferencias en el electrolito)

1.1.3.2.1 Corrosión debido a diferencias en la composición del suelo

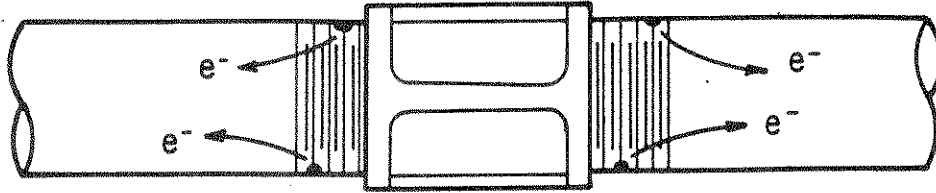
La corrosión de una tubería puede originarse debido a variaciones en la composición del suelo a lo largo de la longitud, como se muestra en la Figura No. 8. La tubería en contacto con el suelo de menor resistividad o, sea, el más corrosivo, se comportará, anódicamente.

En la Figura No. 9 se muestra otro tipo de celda por concentración. La tubería después de ser colocada y enterrada, puede entrar en contacto con porciones de tierra de diferente tipo de suelo. Estas celdas se originan debido a variaciones del tipo de suelo en función de la profundidad, su mezclado y uso de esta mezcla de suelos como relleno. Estas celdas se pueden prevenir, utilizando arena limpia como relleno.

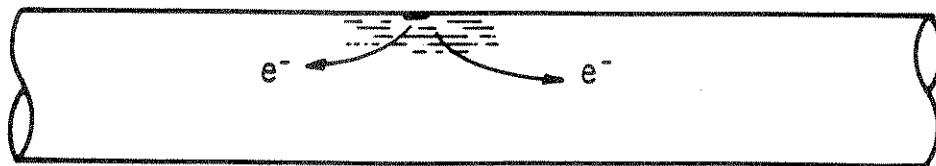


LA CORROSIÓN GALVÁNICA SE ORIGINA DEBIDO A IMPUREZAS EN LA SUPERFICIE DE LA TUBERÍA. SI ESTAS SON ANÓDICAS RESPECTO DEL MATERIAL DEL CUAL ESTÁ HECHA LA TUBERÍA, CORROSIÓN CONCENTRADA Y PICADURAS PUEDEN APARECER.

FIGURA No. 6
CORROSIÓN DEBIDO A INCRUSTACIONES EN LA SUPERFICIE DEL METAL

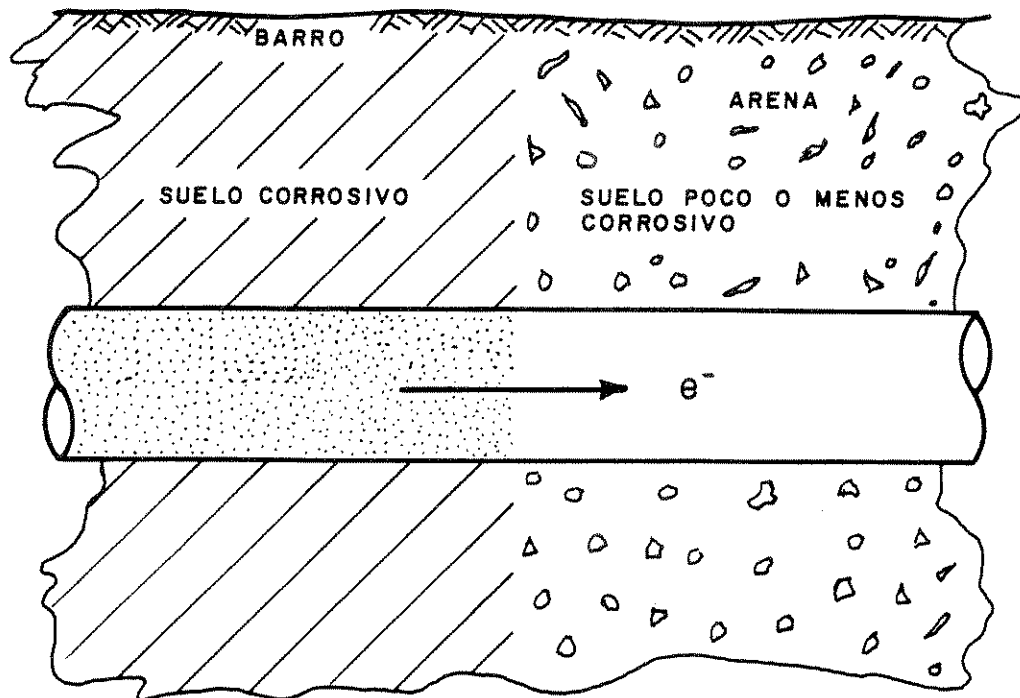


CORROSIÓN DEBIDO A ROSCADO QUE QUEDA AL DESCUBIERDO



CORROSIÓN DEBIDO A RAYADURAS

FIGURA No. 7
CORROSIÓN DEBIDO A RAYADURAS EN LA SUPERFICIE DEL METAL



LA CORROSIÓN DE LA TUBERÍA EN SUELOS CORROSIVOS SE VE INCREMENTADA DEBIDO A QUE LA TUBERÍA ESTÁ EN CONTACTO CON SUELO DE MENOR CORROSIVIDAD.

FIGURA No. 8
CORROSIÓN DEBIDO A DIFERENCIAS EN LA COMPOSICIÓN DEL SUELO.

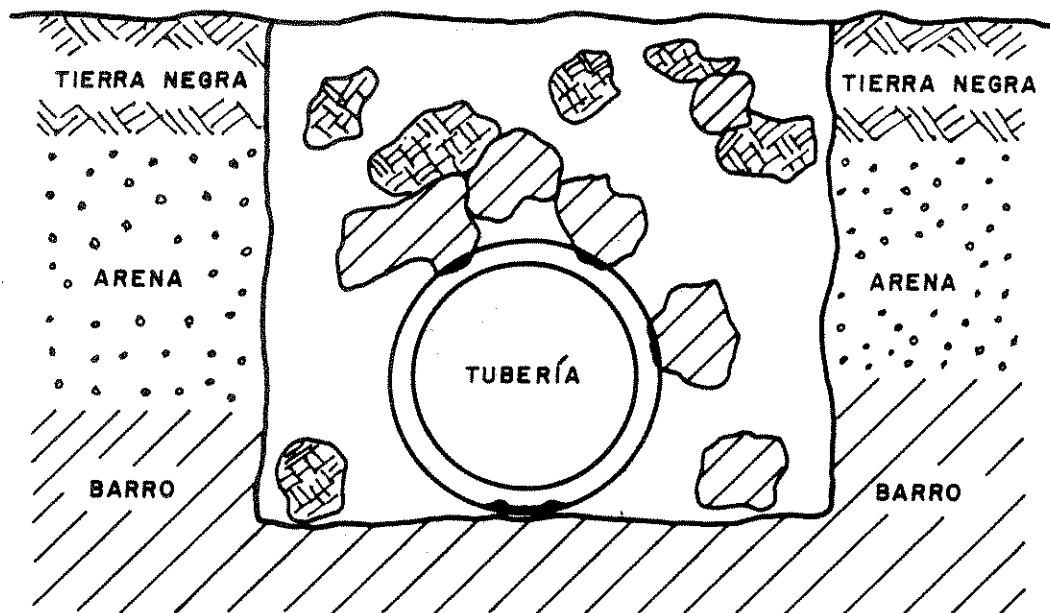
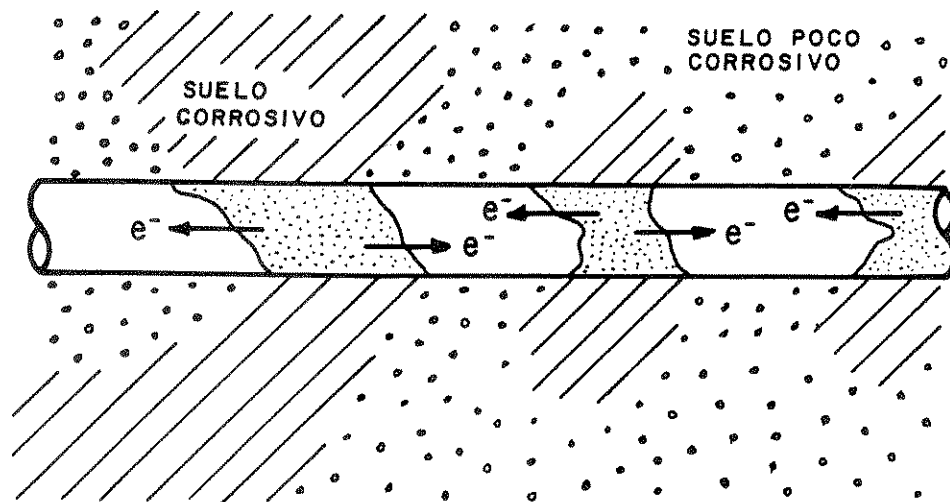


FIGURA No. 9

CORROSIÓN DEBIDO A VARIACIONES EN EL SUELO A CAUSA DE EXCAVACIONES, NIVELACIÓN DE TIERRAS, O POR LA MEZCLA DE SUELOS DE DIFERENTE TIPO COMO MATERIAL DE RELLENO.

1.1.3.2.2 Corrosión debido a variaciones en el contenido de humedad del suelo

La corrosión debido a celdas de concentración se puede originar debido a variaciones en el contenido de humedad del suelo. En la figura No. 10 se ilustra este caso, donde la tubería descansa sobre suelo húmedo y en su parte superior está en contacto con suelo de menor humedad.

1.1.3.2.3 Corrosión debido a variaciones en la temperatura del suelo

Celdas galvánicas pueden originarse, también, cuando existen diferenciales de temperatura en el electrolito. Si la temperatura de un área de la tubería varía respecto de otra, el área más caliente será anódica respecto del área más fría y se corroerá.

1.2 Tipos de sistemas de protección catódica de estructuras metálicas

A fin de reducir o evitar el problema de la corrosión se utilizan actualmente varias técnicas, siendo la protección catódica una de ellas. Esta técnica consiste en forzar a un metal (la estructura a proteger) a ser el cátodo de una celda electroquímica, mediante el suministro de una corriente de electrones. Estas corrientes externamente aplicadas, constituyen un potencial que se opone a la tendencia del metal a disolverse. Estas corrientes se regulan para satisfacer las necesidades de la estructura. El principio de protección catódica es simple, más su aplicación efectiva en la práctica a fin de preservar un metal en un ambiente cuyas variables son complejas e incontrolables, es complicada. Cada problema de corrosión debe ser considerado como un experimento.¹⁵

La protección catódica puede realizarse de dos formas: utilizando ánodos de sacrificio o mediante voltaje impuesto.

1.2.1 Protección catódica mediante ánodos de sacrificio

1.2.1.1 Descripción general del sistema de protección

La protección catódica mediante ánodos de sacrificio se lleva a cabo uniendo uno o varios *ánodos de sacrificio* a la estructura a proteger, formando así una celda electroquímica (ver Figura No. 11) los ánodos se colocan dentro del electrolito que también está en contacto con la estructura (en el caso de tuberías, la tierra) y están hechos de un material anódico respecto de la estructura. En esta celda el cátodo es la estructura. El ánodo de sacrificio, por lo común de zinc o de magnesio, reacciona con el electrolito y suministra una corriente de electrones que protege a la estructura. Con el tiempo los ánodos se consumen y deben reemplazarse.

Las ventajas del uso de ánodos de sacrificio en comparación con el uso de protección mediante voltaje impuesto son:

- no se requiere fuente de poder externa,
- raramente se encuentran problemas de interferencia con otras estructuras,
- la instalación y el mantenimiento es menos complicada,

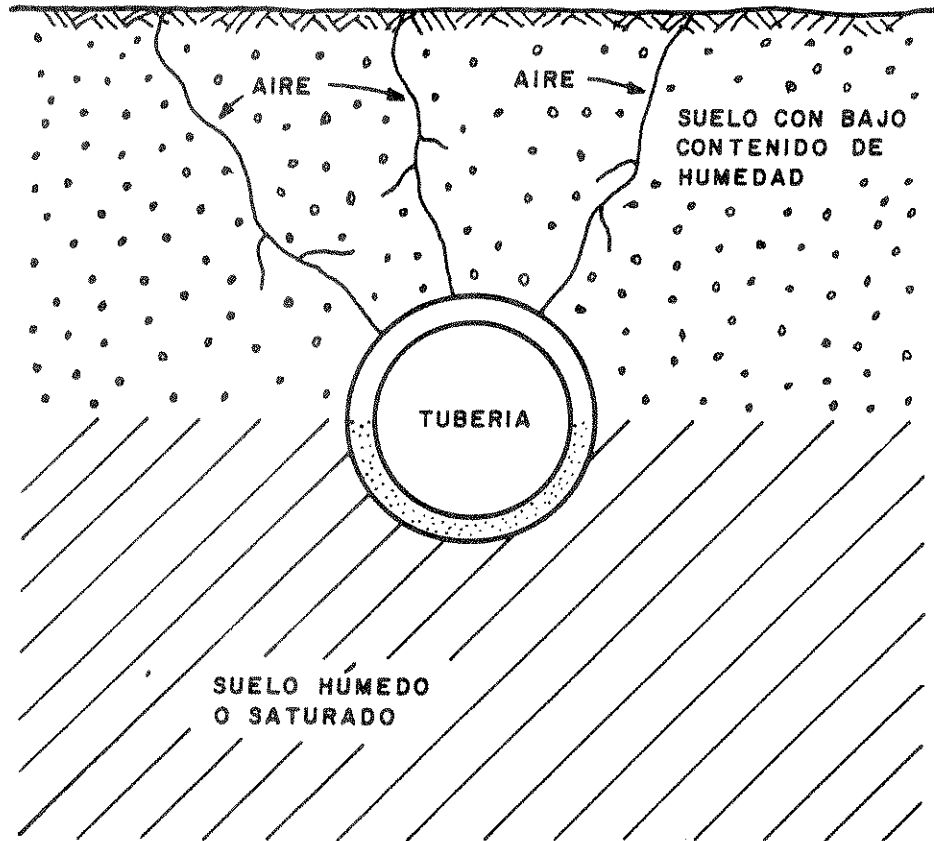


FIGURA No. 10
CORROSIÓN DEBIDO A VARIACIONES EN LA HUMEDAD DEL SUELO.

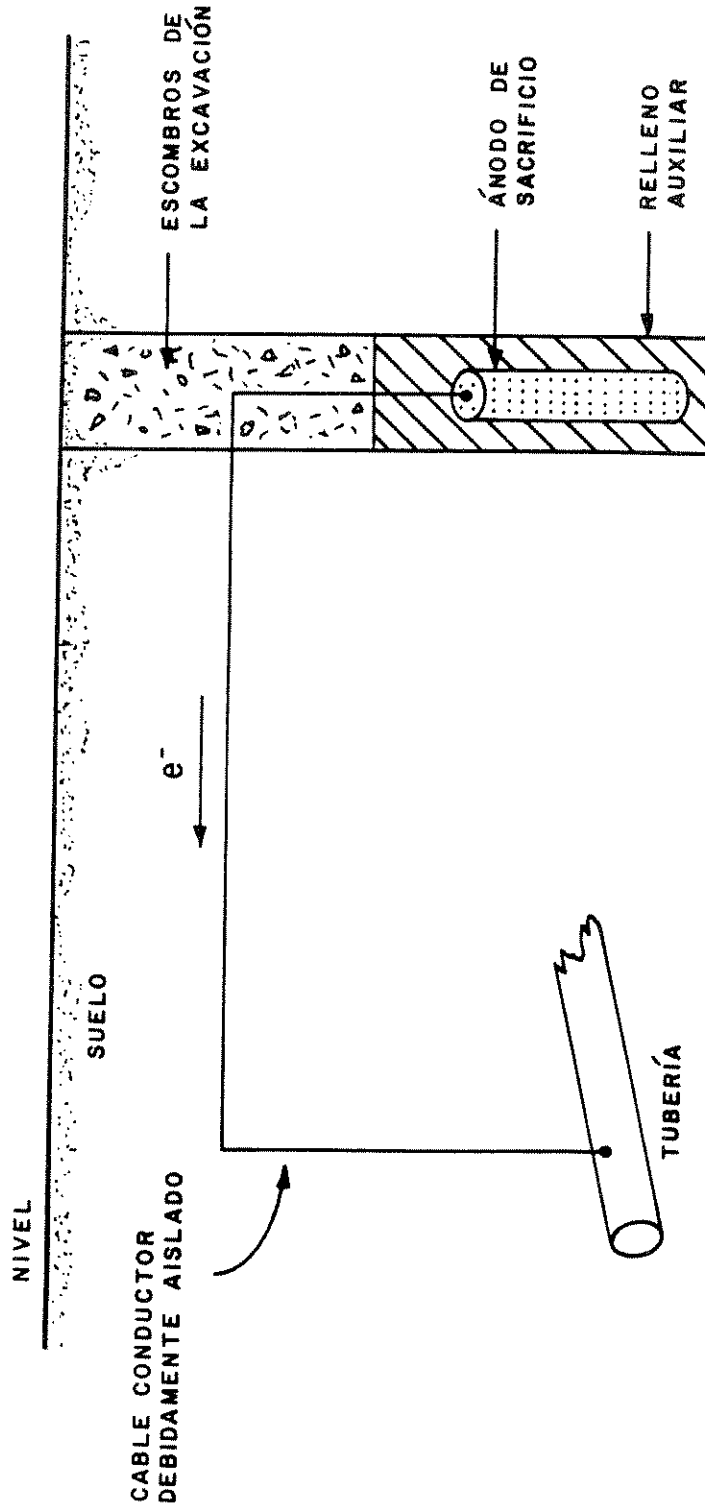


FIGURA No. II
PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE ÁNODOS DE SACRIFICIO.

Algunas desventajas son:

- la capacidad de suministro de corriente es limitada,
- se requieren, usualmente, suelos de baja resistividad,
- generalmente, no es aplicable a estructuras que tienen grandes áreas superficiales.

1.2.1.2 Consideraciones acerca de los ánodos

1.2.1.2.1 Capacidad de suministro de corriente

Una importante consideración en el diseño de un sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio, es que la diferencia de potencial entre los ánodos y la estructura sea tal, que tengan la capacidad de elevar el potencial de la estructura a un nivel de protección adecuado. Otra consideración de importancia es la vida probable del conjunto de ánodos o, sea, el tiempo durante el cual suministrará una corriente deseada.

Los principales factores que determinan la corriente suministrada por los ánodos de sacrificio son:

- la resistividad del suelo que rodea al ánodo,
- tamaño y forma de los ánodos,
- la composición metalúrgica de los ánodos,
- la cantidad y tipo de relleno auxiliar utilizado (ver sec. 1.2.1.2.2),
- la distancia a la cual el ánodo es colocado de la estructura,
- el número y espaciamiento cuando varios ánodos son utilizados,
- tamaño, condición y potencial estructura suelo de la estructura a proteger.

1.2.1.2.2 Ánodos instalados con relleno auxiliar

Usualmente, se utiliza un material especial como material de relleno después de que los ánodos se han introducido en la tierra. La composición recomendada del relleno auxiliar es la siguiente:

75% sulfato de calcio,
20% arcilla bentonítica,
5% sulfato de sodio.

Para mejores resultados el relleno debe compactarse de forma tal que se tenga contacto físico entre las partículas. A fin de simplificar la instalación y reducir costos, hay disponibles en el mercado ánodos que ya vienen empacados (usualmente en un contenedor cilíndrico de lata) con su respectivo material de relleno.

El relleno auxiliar mejora la operación del sistema debido a que:

- disminuye la resistencia ánodo - tierra.

- retiene humedad, la cual es necesaria para la debida operación del ánodo.
- permite un mayor y más estable potencial de operación.
- reduce los efectos debido a polarización.
- permite una operación uniforme del ánodo, reduciendo el ataque selectivo.

1.2.1.2.3 Ánodos instalados sin relleno auxiliar

En algunos electrolitos, como agua o suelos con extremadamente bajas resistividades (generalmente menor que 500 Ω -cm.) no requieren material de relleno. En el diseño para estos ambientes, la composición tamaño y forma del ánodo son los factores a considerar (generalmente, se prefiere zinc por su bajo costo).

En el caso de tuberías marinas por ejemplo, se pueden utilizar ánodos de zinc con la forma de brazaletes, colocados directamente alrededor de la tubería.¹⁶

1.2.1.2.4 Ubicación e instalación de los ánodos

La ubicación de los ánodos es más crítica en este tipo de sistema de protección que en los sistemas mediante voltaje impuesto. Los ánodos deben ser instalados en suelos de bajas resistividades y de tal forma que toda su longitud se encuentre, permanentemente, en contacto con suelo húmedo; esto se debe a que la corriente suministrada por los ánodos es, principalmente, función de la resistividad del suelo. Por ello es necesario un cuidadoso estudio de las propiedades del suelo que se encuentra en los alrededores de la estructura a proteger a fin de seleccionar las ubicaciones. En el caso de tuberías, un estudio de la resistividad eléctrica del suelo a lo largo de la línea permite ubicar estas posiciones.

Los ánodos y su respectivo relleno auxiliar pueden ser instalados verticalmente en agujeros (los cuales deben ser perforados tan profundo como sea, económicamente, factible en busca de humedad y baja resistividad) u horizontalmente en zanjas. Ver Figuras Nos. 12 y 13.

La práctica usual es la de colocar los ánodos a una distancia entre 1.5 y 3 metros de la estructura y a una profundidad mínima de 1.8 metros (por supuesto hay casos en los cuales es necesario alterar este criterio). Flexibilidad en la distribución de corriente es una de las ventajas de este tipo de sistema. En el caso de que se requieran altas densidades de corriente en un área dada, se pueden instalar múltiples ánodos en un solo agujero perforado a fin de suministrar la corriente deseada y asegurar la vida deseada de los ánodos.

1.2.2 Protección catódica mediante voltaje impuesto

1.2.2.1 Descripción general del sistema de protección

En la protección catódica mediante voltaje impuesto, se utiliza un rectificador, en donde un transformador reduce el voltaje de una corriente alterna a un valor deseado, y elementos rectificadores la convierten en corriente directa. El rectificador se conecta (ver Figura No. 14) entre un ánodo auxiliar o grupo de ánodos y la estructura a proteger. De esta forma se produce un flujo de electrones hacia la

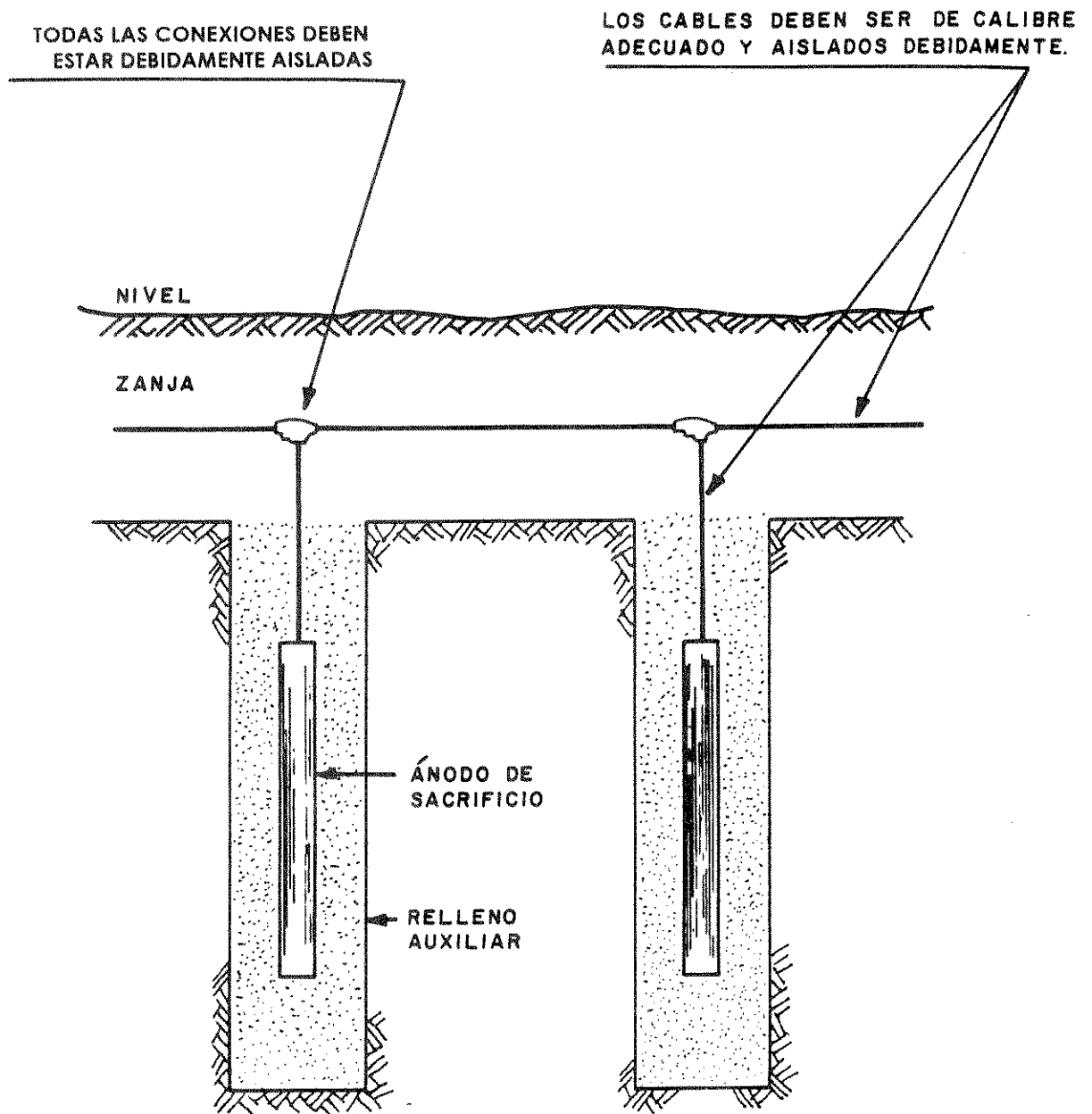


FIGURA No. 12

ÁNODOS INSTALADOS VERTICALMENTE EN AGUJEROS.

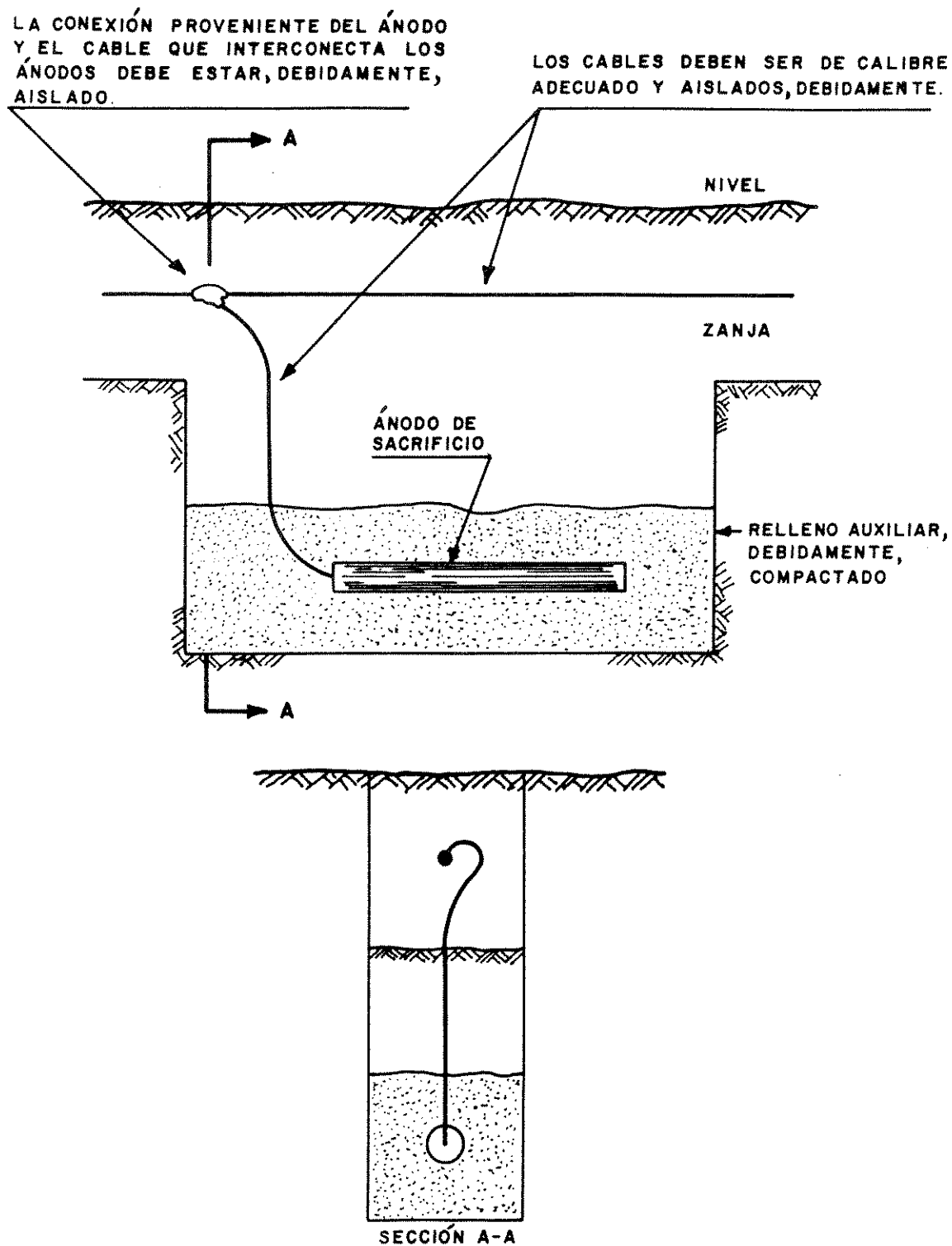


FIGURA No. 13
ÁNODOS INSTALADOS, HORIZONTALMENTE

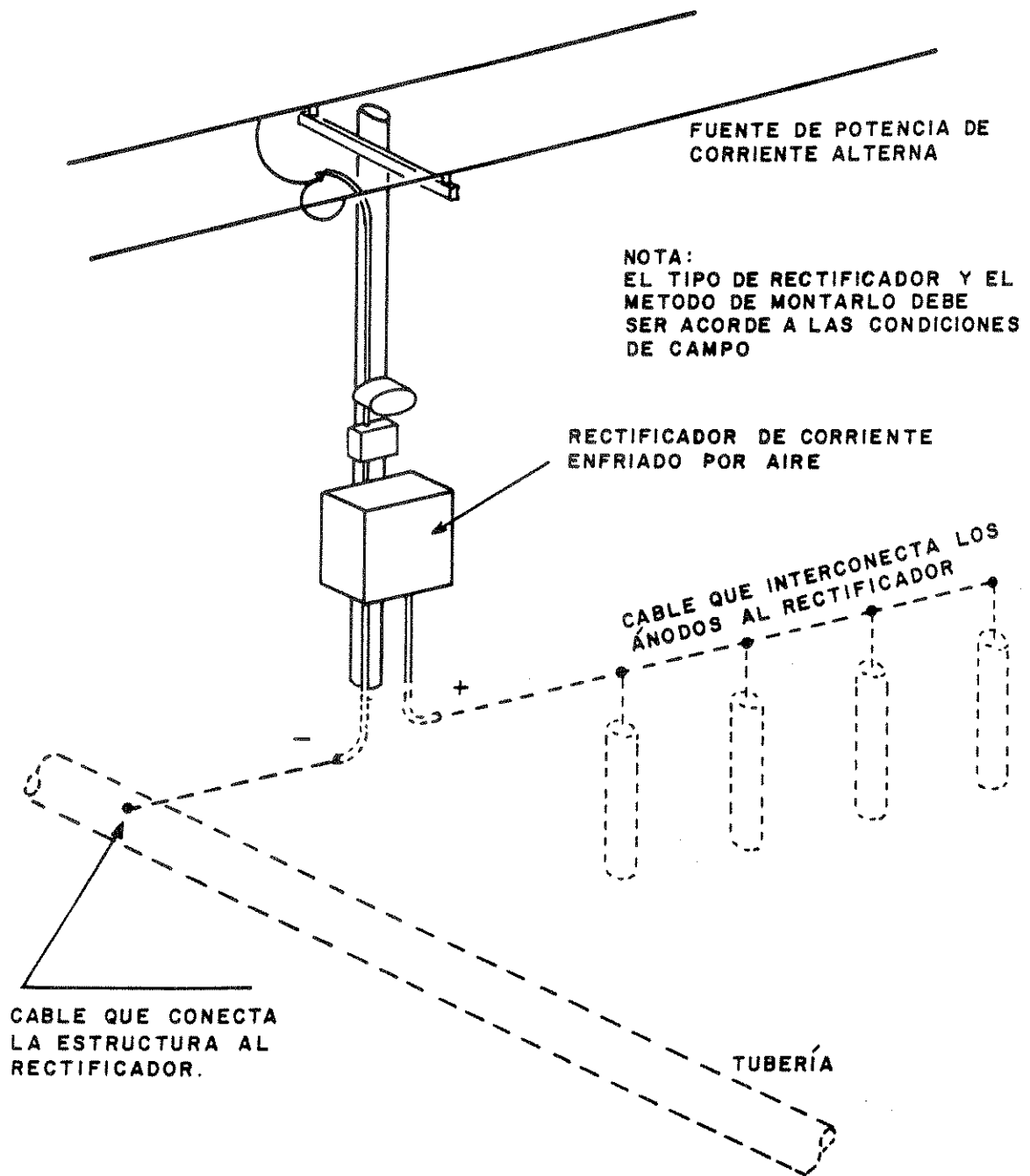


FIGURA No. 14
PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE VOLTAJE IMPUESTO.

1.2.2.3.5.2 Banco de ánodos colocado en forma distribuida

Este tipo de instalación es usado cuando se desea proteger sistemas de tuberías y estructuras complejas, tal como las que se encuentran en refineries y terminales de oleoductos. En estos casos los ánodos se colocan distribuidos en diferentes puntos; usualmente, en patrones que no siguen geometría alguna a fin de evitar la interferencia (ver Fig. No. 16) este tipo de instalación, normalmente, resulta en una menor corriente necesaria para alcanzar la protección.

1.2.2.3.5.3 Banco de ánodos colocado en forma concentrada

Este tipo de instalación consiste en colocar uno o varios grupos de ánodos, igualmente espaciados, siguiendo un patrón geométrico definido. (Ver Figura No. 17.) Las principales desventajas de este tipo de instalación son la interferencia y la sobreprotección de algunas partes adyacentes de la estructura y la poca protección de las estructuras más alejadas. Esto último, debido a que la corriente buscando la trayectoria de regreso al rectificador que presenta la menor resistencia, tiende a fluir únicamente a las estructuras cercanas con poca corriente llegando a las estructuras alejadas. Esto produce un desperdicio de corriente y la posible corrosión de las estructuras distantes.

En tuberías, este tipo de instalación se usa extensivamente cuando no se tienen problemas de interferencia y se desea que la corriente protectora abarque tramos grandes. Por lo general el banco de ánodos es colocado a algunos cientos de metros de la tubería, habiendo una distancia de, por lo menos, 5 metros entre ánodo.

1.2.2.3.5.4 Banco de ánodos colocado continua, horizontal y paralelamente a la estructura

Este tipo de instalación consiste en un conjunto de ánodos, colocados en forma paralela a la estructura en una zanja con su debido relleno auxiliar. Este método de proteger tuberías sin recubrimiento en ambientes altamente corrosivos o en donde la interferencia con estructuras cercanas es un inconveniente, es muy eficaz. El costo de la instalación es mucho mayor, pero debido a una menor resistencia del circuito, los costos para una corriente dada son, considerablemente, menores.¹⁹

1.3 Mediciones, ensayos y pruebas necesarias para determinar la naturaleza y magnitud de la corrosión

El primer paso en el diseño de un sistema de protección catódica es el llevar a cabo diversas mediciones y pruebas, cuyos resultados al ser interrelacionados e interpretados, adecuadamente, revelarán la naturaleza y magnitud de la corrosión. Es necesario el determinar si la corrosión es galvánica, debido a corrientes perdidas, bacteriológica, etc., y si es leve o severa.

A fin de planificar, adecuadamente, el estudio de campo que determinará tal patrón de corrosión, es necesario el conocer algunas cosas de la tubería, entre las cuales se puede destacar:

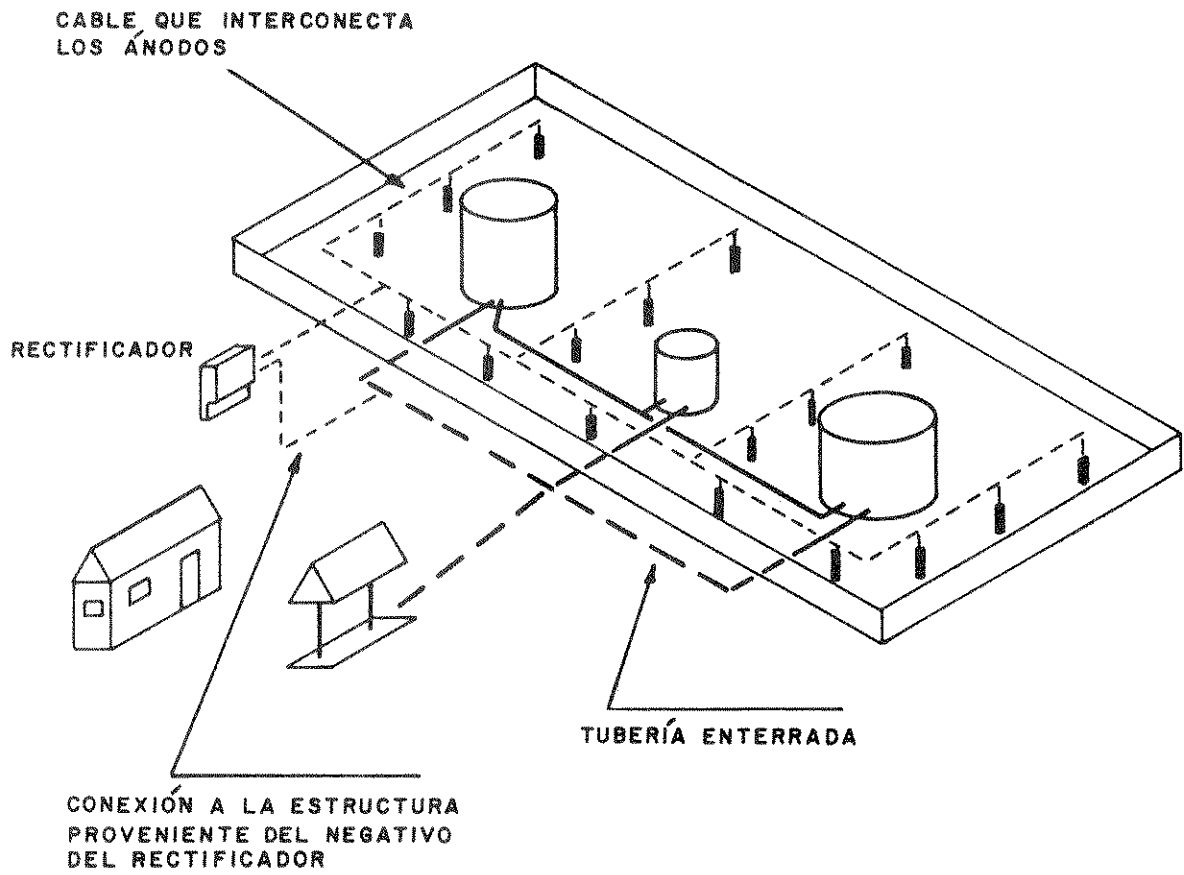


FIGURA No. 16
ÁNODOS COLOCADOS EN FORMA DISTRIBUIDA.

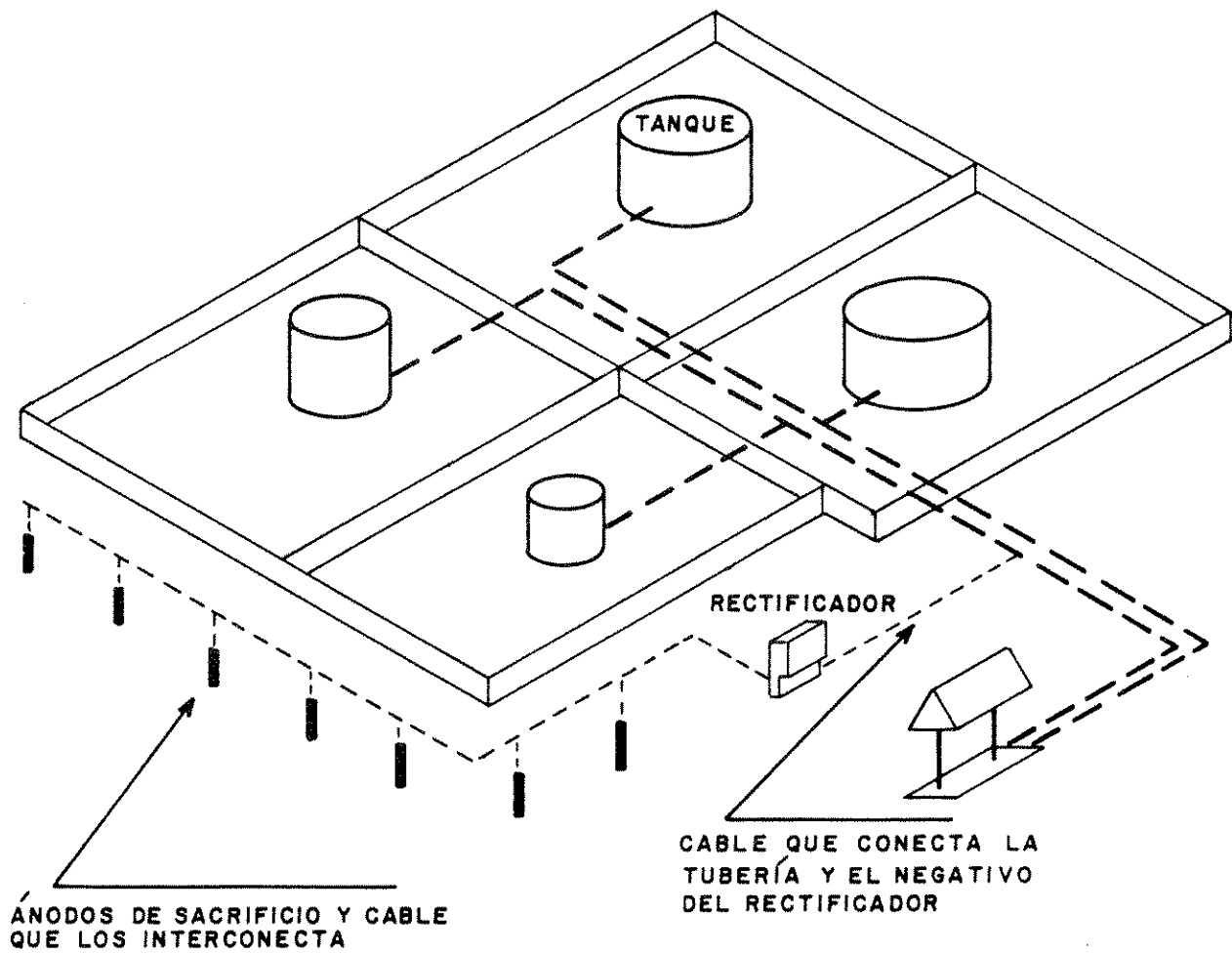


FIGURA No. 17
ÁNODOS COLOCADOS EN FORMA CONCENTRADA.

- material del cual está hecha la tubería.
- tipo de recubrimiento (si tiene) y las especificaciones y procedimiento seguidos durante la aplicación.
- fugas que han ocurrido. Información acerca de su ubicación y fecha, permitirán detectar las áreas donde las condiciones de corrosión son más severas.
- diámetro del tubo, espesor de la pared y peso por unidad de longitud. Información acerca de cualquier cambio a lo largo de la línea.
- tamaño o tamaños de las tuberías de revestimiento usadas, espesor de pared y peso por unidad de longitud. Tipo de metal del cual está hecha. Información acerca del aislante usado entre la tubería y la tubería de revestimiento. Especificaciones del recubrimiento usado, si tiene. Tipo de sellos aislantes usados en los extremos.
- ubicación y detalles de construcción de todas las estaciones de prueba que han sido instaladas para controlar la corrosión. Si estas estaciones no han sido instaladas, determinar puntos donde se puede hacer contacto con la tubería para propósitos de prueba.
- tipos de uniones usados entre los tramos de tubería.
- ubicación de bridas aislantes colocadas a propósito, con el objetivo de aislar, eléctricamente, la línea de otras porciones del sistema o de tuberías de propiedad ajena.
- planos o mapas de la línea, con la mayor información posible.
- ubicación de estructuras enterradas en las cercanías de la tubería a proteger. Si éstas están protegidas, catódicamente, ubicar la fuente de corriente de estos sistemas (particularmente rectificadores).
- fuentes posibles de corrientes parásitas o pérdidas cercanas.
- temperatura de los fluidos que se conducen.
- tramos en los cuales la tubería está paralela y cercana a líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje.²⁰

El conocimiento de los anteriores aspectos permitirá la adecuada aplicación e interpretación de algunas o todas las mediciones o pruebas que se describen en esta sección. Es la responsabilidad del ingeniero encargado del diseño del sistema de protección, el seleccionar las pruebas que mejor se adaptan a una situación en particular y que le permitirán obtener la información requerida al menor costo.

1.3.1 Potencial estructura - electrolito

La medición del *potencial estructura-electrolito* es una de las más valiosas herramientas en la determinación del patrón de corrosión electroquímica y de la posibilidad de corrosión en el futuro. En el caso de barcos o boyas, el electrolito es el agua, dándose, consiguientemente, a este potencial el distintivo *estructura-agua*. En el caso de estructuras sobre o bajo el suelo, como es el caso de tuberías subterráneas y tanques de almacenamiento atmosféricos, el electrolito es el suelo, por lo que al potencial se le denomina *potencial estructura-suelo*. Será, este último, el objeto de este análisis, puesto que es el que interesa.

1.3.1.1 Descripción del método

En la medición del potencial estructura-suelo, una celda de referencia, cuyo potencial es constante y puede ser duplicado, es colocada en el suelo en la vecindad de una sección de la estructura estudiada. Seguidamente, el potencial se obtiene contactando la sección de la estructura y la celda de referencia con un voltímetro de alta resistencia. Ese potencial está en función del promedio de los potenciales que existen en la sección dada de la estructura dentro del campo del electrodo de referencia.²¹

1.3.1.2 Equipo a utilizarse

- *Celda de referencia.* A fin de hacer contacto con la tierra (o agua) al medir el potencial estructura-electrolito, es necesario el usar una celda de referencia patrón. La celda de referencia que comúnmente se usa en estudios de corrosión es la *semicelda de cobre-sulfato de cobre (semicelda Cu/CuSO₄)*, esta consiste en una barra de cobre dentro de un tubo plástico, por lo general, transparente, que tiene un tapón poroso (de cerámica o madera) en un lado y una tapa de donde la barra mencionada sobresale. El tubo plástico se encuentra lleno de una solución saturada de sulfato de cobre (CuSO₄), el tapón poroso es colocado en contacto con la tierra y la barra de cobre es conectada al voltímetro. Los electrodos de sulfato de cobre deben conservarse llenos de la solución saturada. Unos pocos cristales deben añadirse para asegurarse de que la solución se encuentra siempre saturada. Sulfato de cobre químicamente puro y agua destilada, deben usarse al preparar la solución. Cuando el electrodo no está en uso, una tapa de hule debe colocarse sobre el lado poroso para evitar que se seque. Si, accidentalmente, se seca, perderá su porosidad y debe ser repuesto.
- *Voltímetro de alta resistencia.* Un voltímetro de corriente directa (de 100,000 Ω/V o de mayor sensibilidad) con rangos de escala de 0-0.1, 0-0.2, 0-1, 0-2 y 0-5 voltios; amperímetro con escalas de 0-6 y 0-30 amperios. Cuando la resistencia de la estructura o del electrodo a tierra sea demasiado alta para el uso del voltímetro de alta resistencia, un voltímetro tipo potenciómetro debe usarse.

1.3.1.3 Procedimiento de campo²²

- Con un instrumento afilado, aflojar un área a una profundidad de 1" a 2" en el suelo cerca de la estructura.
- Mojar el suelo o tierra aflojada donde se colocará la *semicelda*. La *semicelda* puede colocarse en las siguientes posiciones relativas respecto de la tubería:
 - directamente sobre la línea. Al potencial obtenido de esta forma se llamará "potencial sobre la línea",
 - lateralmente, a una corta distancia (por ej. 1 metro).
- Lateralmente, en un punto alejado (por ejemplo 60 metros).
- Introducir a presión la celda de referencia en la tierra aflojada. Cuidar de que vegetación tal como hojas o grama, no estén entre la celda de referencia y la tierra. Por ninguna circunstancia deben tomarse mediciones colocando la celda

en asfalto en vez de tierra mojada. Por lo general las celdas de referencia tienen una tapadera protectora de plástico en el extremo cerámico, es necesario removerla antes de introducir la celda en la tierra.

Medir y registrar el potencial entre la estructura y la celda de referencia. Para mayor facilidad en la toma de mediciones se establecen terminales de prueba. Cuando una terminal del voltímetro se coloca directamente sobre la estructura, es necesario el cuidar de que la superficie metálica de la estructura esté limpia de suciedad, grasa, pintura u otra clase de recubrimiento. Puede ser necesario el limpiar la superficie o remover pintura u otro recubrimiento cerca de donde se colocará una terminal del voltímetro.

1.3.1.4 Planeación

En el caso de líneas de tuberías, por lo general, se planifica el tomar las mediciones a intervalos regulares de longitud. A fin de determinar la ubicación de los puntos de mayor actividad de corrosión, se requieren intervalos de corta longitud, 30 metros por ejemplo.

1.3.1.5 Interpretación de las mediciones

Las medidas de potencial pueden indicar varias cosas, incluyendo una idea general de que, tanto la corrosión ha progresado y la ubicación de los tramos o porciones de la línea donde la corrosión es más severa: "zonas anódicas". De igual forma se pueden detectar tramos sujetos a corrosión por "corrientes perdidas".

Si se toman medidas de potencial a lo largo de un tramo (excepto donde hay corrientes perdidas) y se promedian, se observará que mientras más nueva y menos corroída esté la línea, más alto será este promedio. Tuberías nuevas de acero con recubrimiento, pueden tener potenciales alrededor de -0.7 voltios respecto de una semicelda Cu/CuSO_4 . Líneas viejas sin recubrimiento pueden tener un promedio entre -0.1 y -0.3 voltios.

La localización de las "zonas anódicas" en el caso de tuberías sin recubrimiento puede llevarse a cabo mediante mediciones de potencial sobre la línea, tomados a intervalos regulares. En la Figura No. 18, se muestran potenciales obtenidos en un estudio que, realmente, se llevó a cabo, graficados en función de la longitud. Debido a que la caída de potencial a lo largo de la tubería es despreciable en tramos cortos, las diferencias obtenidas en las lecturas, son efectivamente diferencias en el potencial del suelo respecto de la tubería. No obstante, no se obtienen curvas suaves, pues, extremos son evidentes. En donde los valores son de mayor magnitud es donde se presenta mayor corrosión y en donde los valores son pequeños la corrosión es menor o no hay. De esta forma pueden detectarse las zonas de mayor corrosión.²³

En una línea sin recubrimiento, si las mediciones se llevan a cabo respecto de una semicelda de referencia colocada alejada (60 metros por ejemplo) y los valores obtenidos se grafican en función de la longitud se obtienen curvas como la indicada en la Figura No. 19. En este caso la curva tiene una apariencia más suave o continua, pero aún son evidentes extremos relativos. Tales extremos son, básicamente, resultado de diferencias de potencial de la tubería respecto del suelo más alejado, y son provocadas por corrientes de corrosión que fluyen en la tubería de acero. Un

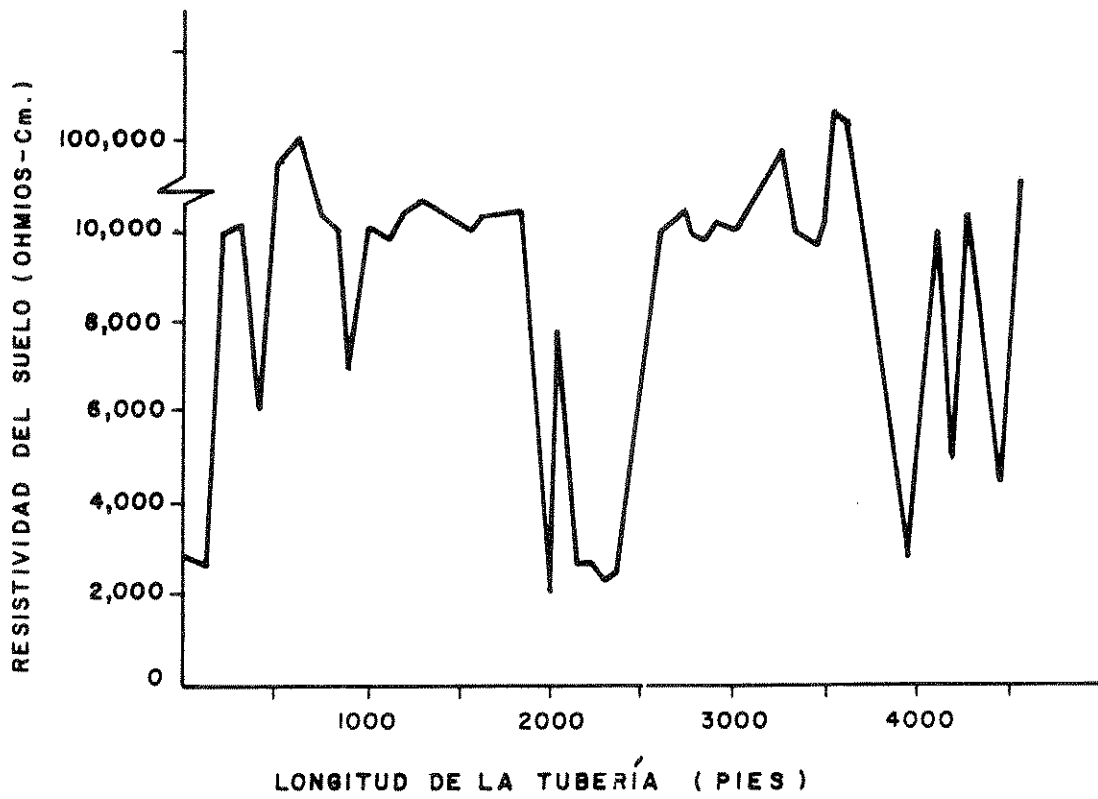


FIGURA No. 21
RESISTIVIDADES DE SUELO OBTENIDAS A LO LARGO DE UNA TUBERÍA.

En cada punto de medición se registra la caída de voltaje en el tramo seleccionado junto con la polaridad de las conexiones de los instrumentos a fin de determinar la dirección del flujo de corriente (generalmente, se toma de positivo a negativo, es decir, corriente convencional) la resistencia del circuito es medida y la caída de voltaje observada es corregida, si es necesario. Conociéndose la resistencia del tramo de tubería, el flujo de corriente puede obtenerse mediante la Ley de Ohm.

El valor de la corriente puede graficarse junto con la dirección del flujo en función de la longitud de la línea, tal como se muestra en la Figura No. 22. Note que en el tramo estudiado la corriente convencional viaja desde ambas direcciones hacia un punto. Este debe ser un punto donde la corriente positiva es descargada (desde un punto de vista de corriente electrónica, es desde donde los electrones fluyen en ambas direcciones) y si no se toman medidas correctivas donde pueden tenerse problemas con corrosión.

Estudios de este tipo son más significativos en tuberías sin recubrimiento. En una tubería con recubrimiento en buenas condiciones la corriente sólo puede entrar o salir a través de defectos en el recubrimiento como rayaduras o picaduras. A pesar de que la densidad de corriente es mayor en estos defectos, la magnitud de la corriente en la tubería puede esperarse que sea menor que en tuberías sin recubrimiento (aunque no siempre).³³

1.3.4 Acidez del suelo

En muchas áreas, los suelos que se encuentran en la ruta de la tubería tendrán un pH de, aproximadamente, 7, es decir, neutro en lo que a acidez respecta.

En el caso de tuberías de acero, suelos alcalinos no representan problema alguno. Por otro lado, tuberías de aluminio pueden corroerse, considerablemente suelos altamente alcalinos. Una condición alcalina en la superficie de la tubería es un efecto secundario de la protección catódica. La protección catódica excesiva puede, por tanto, ser perjudicial para el aluminio.³⁴

Condiciones ácidas tienen el efecto de hacer más difícil la polarización de la línea y la consecución de niveles adecuados de protección. Esto significa una mayor demanda de corriente para lograr la protección.

Donde puedan haber condiciones de suelos inusuales es conveniente determinar el pH del suelo. Los resultados pueden tener un efecto considerable en el lugar seleccionado para los ánodos de sacrificio o el rectificador.

1.3.5 Corrosión anaeróbica

Generalmente, la corrosión anaeróbica puede sospecharse presente en áreas, donde la tubería está en contacto con suelo saturado con agua. Esto puede ser en proximidades de ríos, lagos o donde el drenaje es pobre, resultando en aguas estancadas. Si el agua está en movimiento, es poca la probabilidad de que la corrosión sea agravada por bacterias.

Áreas en donde se sospecha corrosión anaeróbica pueden ser desenterradas y examinadas. Un producto negro de corrosión, en el cual se sospeche sea sulfuro de

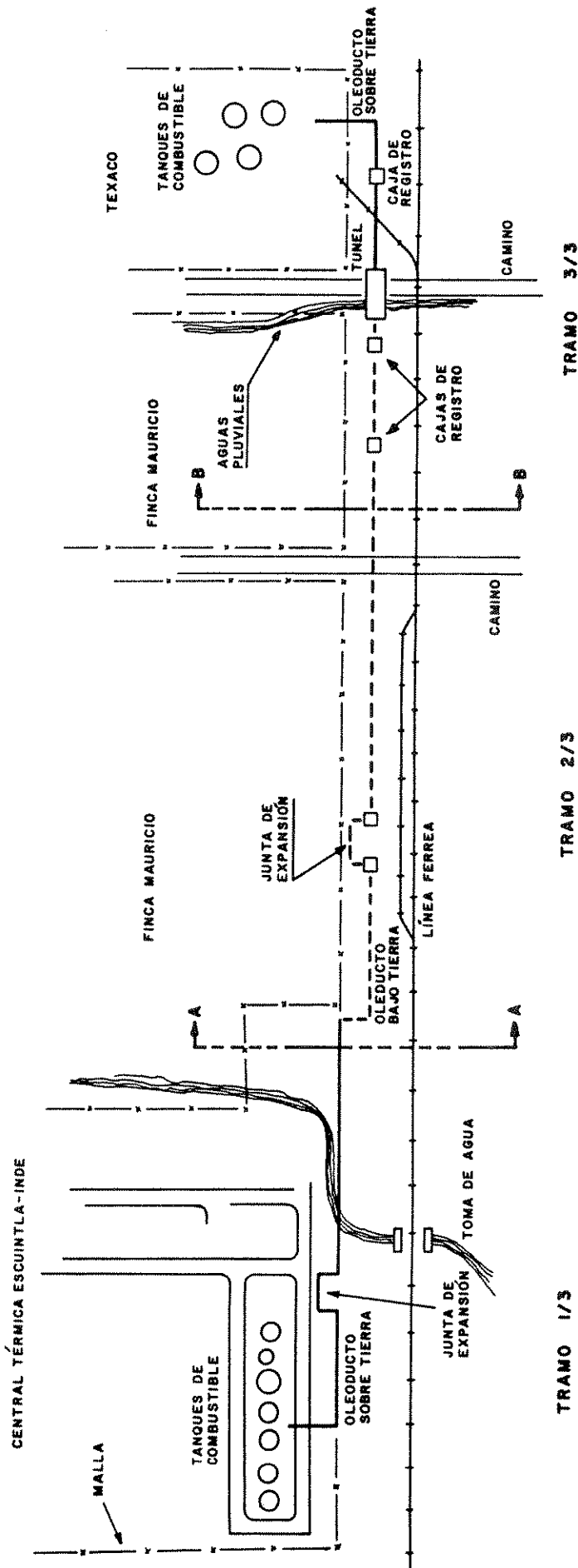


FIGURA No. 24
DIBUJO GENERAL DEL OLEODUCTO TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA-INDE

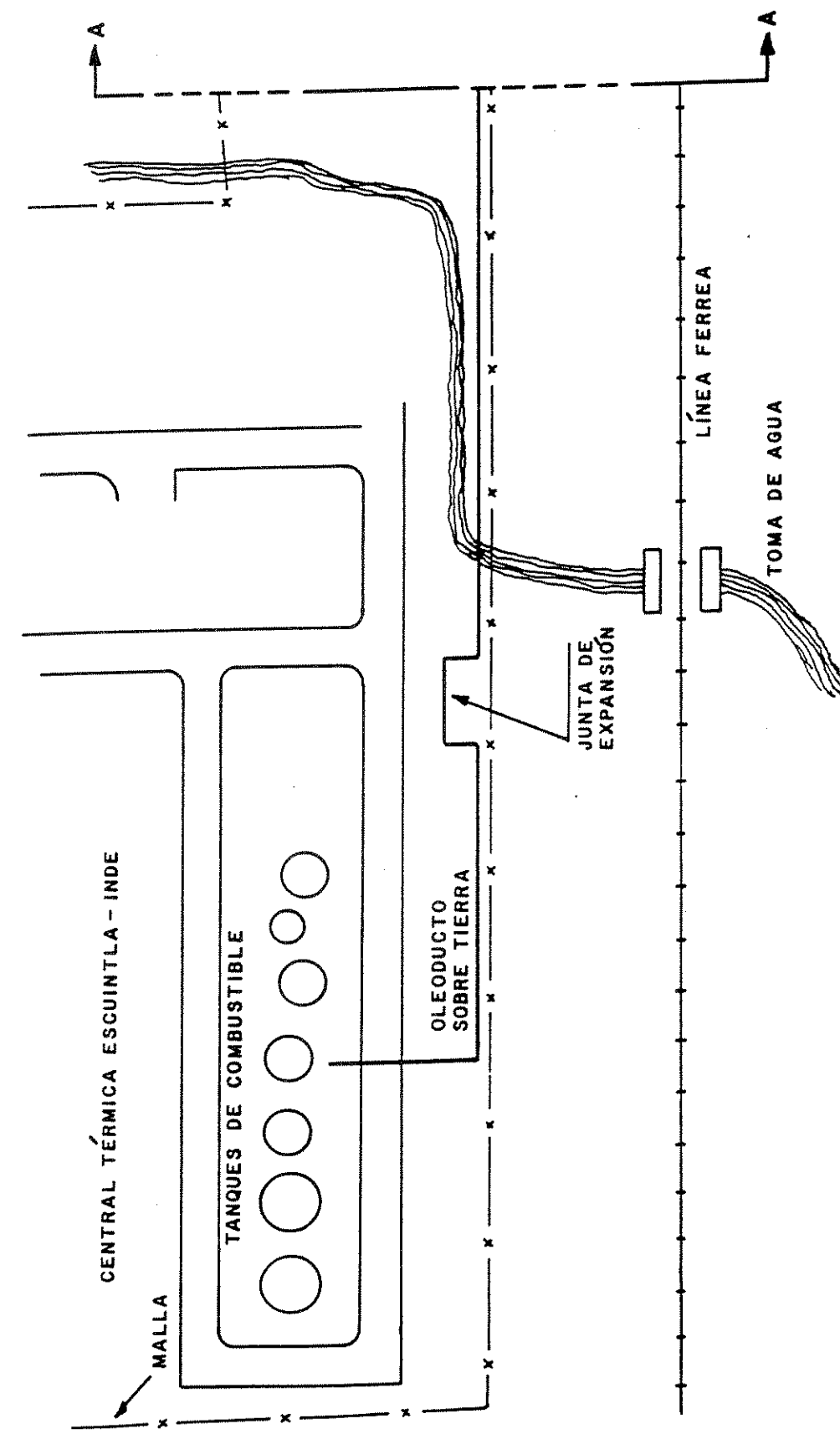


FIGURA No. 25

TRAMO 1/3 DEL OLEODUCTO TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA - INDE

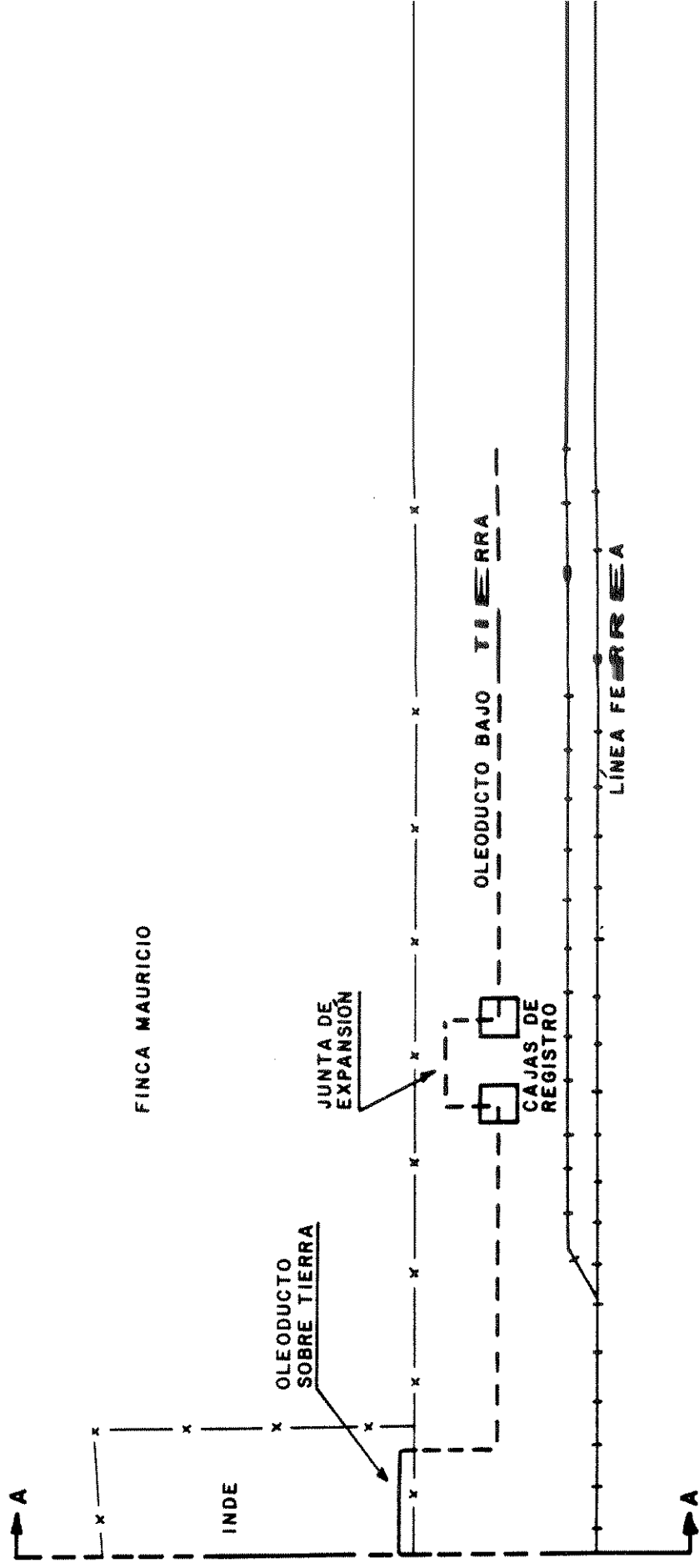


FIGURA No. 26

TRAMO 2/3 DEL OLEODUCTO TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ES

en asfalto en vez de tierra mojada. Por lo general las celdas de referencia tienen una tapadera protectora de plástico en el extremo cerámico, es necesario removerla antes de introducir la celda en la tierra.

Medir y registrar el potencial entre la estructura y la celda de referencia. Para mayor facilidad en la toma de mediciones se establecen terminales de prueba. Cuando una terminal del voltímetro se coloca directamente sobre la estructura, es necesario el cuidar de que la superficie metálica de la estructura esté limpia de suciedad, grasa, pintura u otra clase de recubrimiento. Puede ser necesario el limpiar la superficie o remover pintura u otro recubrimiento cerca de donde se colocará una terminal del voltímetro.

1.3.1.4 Planeación

En el caso de líneas de tuberías, por lo general, se planifica el tomar las mediciones a intervalos regulares de longitud. A fin de determinar la ubicación de los puntos de mayor actividad de corrosión, se requieren intervalos de corta longitud, 30 metros por ejemplo.

1.3.1.5 Interpretación de las mediciones

Las medidas de potencial pueden indicar varias cosas, incluyendo una idea general de que, tanto la corrosión ha progresado y la ubicación de los tramos o porciones de la línea donde la corrosión es más severa: "zonas anódicas". De igual forma se pueden detectar tramos sujetos a corrosión por "corrientes perdidas".

Si se toman medidas de potencial a lo largo de un tramo (excepto donde hay corrientes perdidas) y se promedian, se observará que mientras más nueva y menos corroída esté la línea, más alto será este promedio. Tuberías nuevas de acero con recubrimiento, pueden tener potenciales alrededor de -0.7 voltios respecto de una semicelda Cu/CuSO_4 . Líneas viejas sin recubrimiento pueden tener un promedio entre -0.1 y -0.3 voltios.

La localización de las "zonas anódicas" en el caso de tuberías sin recubrimiento puede llevarse a cabo mediante mediciones de potencial sobre la línea, tomados a intervalos regulares. En la Figura No. 18, se muestran potenciales obtenidos en un estudio que, realmente, se llevó a cabo, graficados en función de la longitud. Debido a que la caída de potencial a lo largo de la tubería es despreciable en tramos cortos, las diferencias obtenidas en las lecturas, son efectivamente diferencias en el potencial del suelo respecto de la tubería. No obstante, no se obtienen curvas suaves, pues, extremos son evidentes. En donde los valores son de mayor magnitud es donde se presenta mayor corrosión y en donde los valores son pequeños la corrosión es menor o no hay. De esta forma pueden detectarse las zonas de mayor corrosión.²³

En una línea sin recubrimiento, si las mediciones se llevan a cabo respecto de una semicelda de referencia colocada alejada (60 metros por ejemplo) y los valores obtenidos se grafican en función de la longitud se obtienen curvas como la indicada en la Figura No. 19. En este caso la curva tiene una apariencia más suave o continua, pero aún son evidentes extremos relativos. Tales extremos son, básicamente, resultado de diferencias de potencial de la tubería respecto del suelo más alejado, y son provocadas por corrientes de corrosión que fluyen en la tubería de acero. Un

extremo, normalmente, representa un punto hacia donde la corriente convencional está fluyendo desde ambas direcciones y está siendo descargada en la tierra o desde un punto de vista de corriente electrónica, representa un punto desde donde los electrones fluyen en extremos opuestos. Tales puntos constituyen "zonas anódicas" o áreas de corrosión.

En el caso de una tubería con un recubrimiento en buenas condiciones, el potencial entre la tubería y el suelo es enteramente evidencia de una caída de potencial a través del recubrimiento. Por esta razón, las medidas de potencial obtenidas entre la tubería y el electrodo colocado sobre la línea y alejados de la estructura son muy similares. Esta relación hace que las medidas de potencial en líneas con recubrimientos sean relativamente inconclusos en lo que a la localización de zonas anódicas respecta.²⁴

Si se encuentran áreas en donde hay problemas debido a "corrientes perdidas", esto se hará evidente en las medidas de potencial obtenidas. Donde no hay problemas de corrientes perdidas, una lectura obtenida en un punto a lo largo de la línea no presentará variaciones durante el período usual de observación. En contraste, cuando se presenta este fenómeno (debido a soldadura de corriente directa en los alrededores, por ejemplo) pueden obtenerse variaciones extremas y erráticas en las medidas de potencial tomadas en un punto en particular. En casos severos, la variación puede ser de varios voltios de magnitud.

1.3.2 Resistividad eléctrica del suelo²⁵

1.3.2.1 Definición e Importancia

La *resistividad* se define como la resistencia eléctrica de una unidad de volumen de material y es el recíproco de la conductividad.²⁶ La resistividad indica la habilidad relativa de un medio de transportar corrientes eléctricas.

Las mediciones de la resistividad del suelo son muy valiosas, ya que éstas permiten determinar la corrosividad del suelo en el cual se encuentra la estructura. Suelos con bajas resistividades son más propensos a ser más corrosivos que aquellos con altas resistividades, es decir, que, la corrosividad varía inversamente respecto de la resistividad.

1.3.2.2 Descripción del método

El *Método Wenner de cuatro electrodos* requiere que cuatro electrodos de metal, sean colocados a igual separación en una línea recta en la superficie del suelo, a una profundidad que no exceda del 5% de la separación mínima de los electrodos. (Ver Figura No. 20.) La separación de los electrodos debe ser seleccionada considerando el estrato de suelo de interés. La medida de resistividad resultante representa la resistividad promedio de un hemisferio de suelo de un radio igual a la separación de los electrodos.

Un voltaje es aplicado entre los electrodos exteriores, provocando un flujo de corriente y la caída de voltaje entre los electrodos interiores es medida, utilizando un voltímetro sensitivo. Alternativamente, la resistencia puede ser medida directamente. La resistividad, ρ , es entonces:

En cada punto de medición se registra la caída de voltaje en el tramo seleccionado junto con la polaridad de las conexiones de los instrumentos a fin de determinar la dirección del flujo de corriente (generalmente, se toma de positivo a negativo, es decir, corriente convencional) la resistencia del circuito es medida y la caída de voltaje observada es corregida, si es necesario. Conociéndose la resistencia del tramo de tubería, el flujo de corriente puede obtenerse mediante la Ley de Ohm.

El valor de la corriente puede graficarse junto con la dirección del flujo en función de la longitud de la línea, tal como se muestra en la Figura No. 22. Note que en el tramo estudiado la corriente convencional viaja desde ambas direcciones hacia un punto. Este debe ser un punto donde la corriente positiva es descargada (desde un punto de vista de corriente electrónica, es desde donde los electrones fluyen en ambas direcciones) y si no se toman medidas correctivas donde pueden tenerse problemas con corrosión.

Estudios de este tipo son más significativos en tuberías sin recubrimiento. En una tubería con recubrimiento en buenas condiciones la corriente sólo puede entrar o salir a través de defectos en el recubrimiento como rayaduras o picaduras. A pesar de que la densidad de corriente es mayor en estos defectos, la magnitud de la corriente en la tubería puede esperarse que sea menor que en tuberías sin recubrimiento (aunque no siempre).³³

1.3.4 Acidez del suelo

En muchas áreas, los suelos que se encuentran en la ruta de la tubería tendrán un pH de, aproximadamente, 7, es decir, neutro en lo que a acidez respecta.

En el caso de tuberías de acero, suelos alcalinos no representan problema alguno. Por otro lado, tuberías de aluminio pueden corroerse, considerablemente suelos altamente alcalinos. Una condición alcalina en la superficie de la tubería es un efecto secundario de la protección catódica. La protección catódica excesiva puede, por tanto, ser perjudicial para el aluminio.³⁴

Condiciones ácidas tienen el efecto de hacer más difícil la polarización de la línea y la consecución de niveles adecuados de protección. Esto significa una mayor demanda de corriente para lograr la protección.

Donde puedan haber condiciones de suelos inusuales es conveniente determinar el pH del suelo. Los resultados pueden tener un efecto considerable en el lugar seleccionado para los ánodos de sacrificio o el rectificador.

1.3.5 Corrosión anaeróbica

Generalmente, la corrosión anaeróbica puede sospecharse presente en áreas, donde la tubería está en contacto con suelo saturado con agua. Esto puede ser en proximidades de ríos, lagos o donde el drenaje es pobre, resultando en aguas estancadas. Si el agua está en movimiento, es poca la probabilidad de que la corrosión sea agravada por bacterias.

Áreas en donde se sospecha corrosión anaeróbica pueden ser desenterradas y examinadas. Un producto negro de corrosión, en el cual se sospeche sea sulfuro de

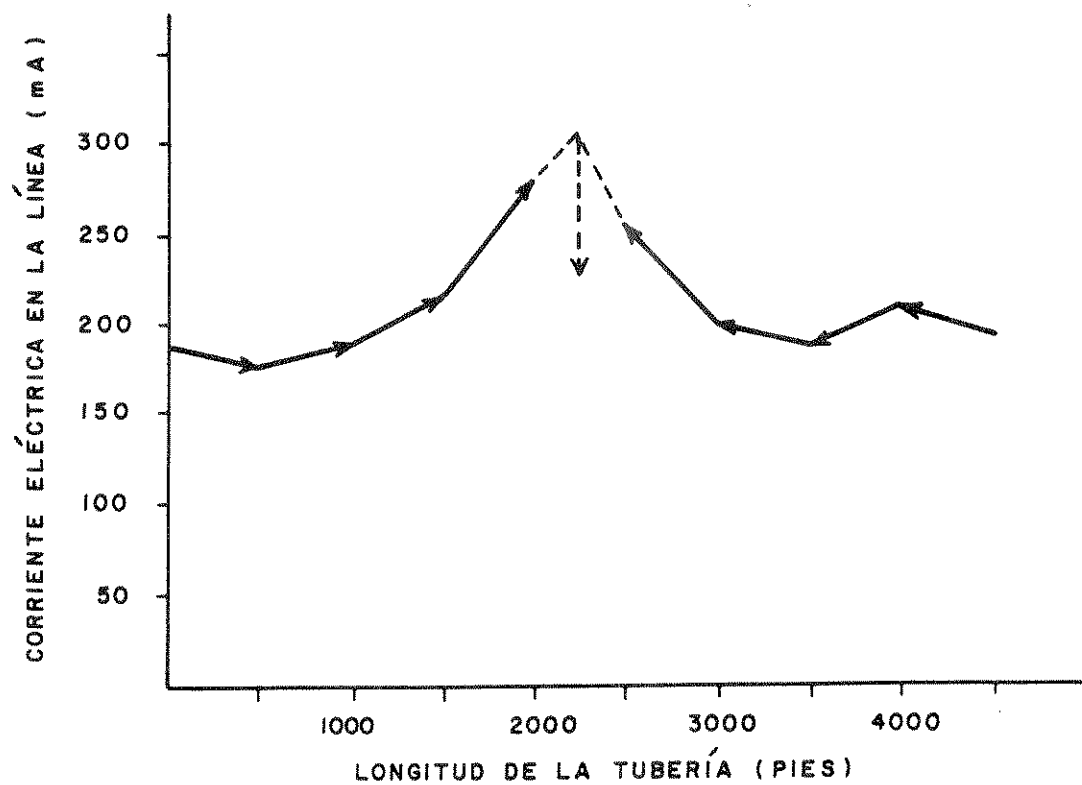


FIGURA No. 22
CORRIENTES GALVÁNICAS EN UNA TUBERÍA.

hierro, resultante de acción bacteriana, puede tratarse inmediatamente con ácido clorhídrico (HCl), un olor a huevo podrido, característico del sulfuro de hidrógeno es evidencia de que la corrosión es agravada por bacterias.³⁵

Hay otras formas de determinar este tipo de corrosión (como el uso de la prueba Redox, desarrollada por la compañía Analytical Measurements de Chatham, Nueva Jersey) las cuales no se discuten en esta tesis.

1.4 Determinación de la corriente requerida para alcanzar la protección catódica

Si el medio en el cual se encuentra la estructura representa una amenaza que puede dar origen a fallas durante el tiempo de uso previsto, es necesario el tomar medidas preventivas tal como la aplicación de recubrimientos, la limpieza o remoción del medio corrosivo, la protección catódica, etc. Se debe tener el criterio adecuado a fin de determinar las opciones disponibles y seleccionar las más apropiadas. No cae dentro del campo de estudio del presente trabajo la consideración o estudio de todas estas opciones.

Si se determina que existe una condición de corrosión y se desea diseñar un sistema de protección catódica, el siguiente paso es el determinar la cantidad de corriente requerida para alcanzar protección catódica completa. El objetivo al diseñar un sistema de protección catódica es la de escoger el sistema que proporcionará el grado de protección deseado, al mínimo costo, durante la vida proyectada de la estructura.

1.4.1 Norma NACE RP0169-92

Inicialmente, es necesario definir cuáles condiciones debe satisfacer una estructura de acero enterrada a fin de establecer si está protegida. El criterio para determinar si una estructura de acero se encuentra protegida catódicamente, está definido en la Norma RP0169-92 de la *National Association of Corrosion Engineers (NACE)*, titulada *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems* (Control de la Corrosión Externa en Sistemas de Tuberías Metálicas Enterradas o Subterráneas) en esencia, para estructuras de acero los requisitos son los siguientes:

- un voltaje negativo de, por lo menos, 0.85 voltios, medido entre la estructura y una celda de referencia cobre/sulfato de cobre, en contacto con la tierra directamente encima o a la par de la estructura,
- un cambio de voltaje negativo del potencial natural de, por lo menos, 300 milivoltios, medido entre la estructura y una celda de referencia cobre/sulfato de cobre en contacto con la tierra directamente encima o al lado de la estructura. Este criterio se aplica a estructuras que no están en contacto con metales de diferente composición,
- un cambio del voltaje de polarización de 100 milivoltios, medido entre la estructura y una celda de referencia saturada cobre/sulfato de cobre en contacto con la tierra directamente encima o al lado de la estructura. Este cambio de voltaje de polarización se determina interrumpiendo la corriente de

protección y midiendo el decaimiento de polarización. Cuando la corriente de protección se interrumpe, un cambio inmediato en el potencial estructura suelo ocurre. La lectura de potencial inmediatamente después del cambio, es la que debe utilizarse como base para medir el cambio del voltaje de polarización.³⁶

La cantidad de corriente requerida para proveer de protección catódica completa varía en un rango extremadamente grande, pero, en general, depende de los siguientes factores:

- resistencia eléctrica del recubrimiento,
- área expuesta de tubería, debido a defectos en el recubrimiento,
- propiedades del suelo: resistividad eléctrica, sustancias químicas presentes, condiciones de humedad, aireación, movimiento de aguas subterráneas, textura, etc,
- extensión relativa de las áreas anódicas y catódicas. Es difícil, si no imposible, el determinar esta relación, y no se determina en el campo. No obstante, en algunos casos, el flujo de corriente eléctrica en la línea se mide a fin de localizar áreas o secciones de descarga o ingreso de corriente,
- actividad bacteriológica,
- distribución de la corriente de protección catódica.

1.4.2 Método de densidad de corriente

A fin de determinar la magnitud de la corriente requerida para lograr la protección deseada, se consideran los siguientes dos métodos: el de densidad de corriente y la prueba de demanda de corriente, siendo el primero de éstos el que se describe a continuación.

Mediante estudios llevados a cabo por diferentes investigadores, se ha determinado la densidad de corriente, es decir, la cantidad de amperios por unidad de superficie de metal en contacto con el electrolito, necesaria para la protección catódica de una estructura en un ambiente dado.

La resistividad del suelo en donde la estructura se encuentra enterrada, tiene gran efecto en la densidad de corriente necesaria. Mientras más alta sea la resistividad, menor será la densidad de corriente necesaria. En el caso de estructuras con algún tipo de recubrimiento, la densidad de corriente requerida será considerablemente menor que la requerida por aquellas que tienen recubrimientos en malas condiciones o no tienen. La siguiente tabla da una idea de la densidad de corriente requerida para estructuras con recubrimientos en diversas condiciones.

En el caso de estructuras con algún tipo de recubrimiento, puede asumirse un porcentaje de metal al descubierto (por lo general 1%) y multiplicar este valor por una densidad entre 1 y 3 mA/pie².

El método de densidad de corriente no es tan confiable y exacto como una prueba de demanda de corriente, pero, es útil como guía en la preparación de la "prueba de demanda".

Condición del recubrimiento	Densidad de corriente (mA/pe ²)
sin recubrimiento	1 - 25
buenas condiciones	.005 - .01
regulares condiciones	.01 - .02
malas condiciones	más de .02

Tabla No. 3. Densidad de corriente requerida por estructuras con recubrimientos en diferentes condiciones.³⁷

1.4.3 Prueba de "demanda de corriente"

El método que permite obtener una muy buena aproximación de la magnitud de la corriente necesaria para proteger una estructura es la prueba de "demanda de corriente". Esta prueba, básicamente, consiste en establecer un sistema de protección catódica temporal, el cual está formado por una instalación temporal de ánodos y una fuente de corriente directa, ya sea una batería o una máquina de soldar, dependiendo de la magnitud de la corriente requerida.

El sistema de protección catódica temporal debe ser tan parecido al sistema de protección permanente final como sea posible, al grado de simular su operación. Puede ser necesario el establecer diferentes sistemas temporales, variando la ubicación de los ánodos, a fin de distribuir, adecuadamente, la corriente. La experiencia y criterio adecuado de aquellos a cargo de esta prueba es muy importante, ya que esto reducirá el trabajo requerido para establecer el mejor sistema de protección.

En el caso de que el sistema de tuberías a proteger sea complicado y grande, como es el caso en refinerías, el diseño del sistema de protección puede hacerse por fases. Puede concentrarse, primeramente, en proteger aquellas partes donde se haya tenido problemas debido a corrosión o donde se tenga el peor ambiente corrosivo. Una vez se instala el sistema temporal de protección, se ajusta la corriente a fin de alcanzar la protección en esta área. Seguidamente, se diseña e instala el sistema de protección permanente para esta área. Pruebas adicionales pueden llevarse a cabo y sistemas adicionales diseñarse e instalarse hasta alcanzar la protección total del sistema.

Los ánodos temporales pueden ser pedazos de chatarra, tubo de hierro, rieles de ferrocarril, barras metálicas, etc. Una vez se ha determinado la ubicación temporal de los ánodos, éstos se introducen en la tierra, dejando, aproximadamente, 15 cm. sobre tierra a fin de interconectarlos, eléctricamente. En suelos secos o de alta resistividad es ventajoso el excavar un pequeño hoyo en la parte superior del ánodo y llenarlo de una solución saturada de agua y sal. Esto reducirá la resistencia de contacto del ánodo y permitirá descargar una mayor corriente con un voltaje dado. Una vez instalados los ánodos, éstos se interconectan con un alambre o cable de calibre adecuado y éste se conecta a la terminal positiva de la fuente de corriente directa. La terminal negativa de la fuente de corriente se conecta a la estructura a proteger.

Una vez instalado el sistema temporal de protección, se procede a determinar ya sea la corriente requerida para lograr una protección deseada o la protección dada por una corriente determinada. Esto se logra tomando mediciones de potencial en varios puntos de la estructura a proteger.

Pruebas para determinar la interferencia con otras estructuras también pueden llevarse a cabo, para evaluar si otras estructuras en el área pueden verse afectadas. Estas pruebas de interferencia deben de llevarse a cabo mientras el sistema temporal de protección está en operación. Si problemas serios de interferencia se presentan, puede ser necesario el ubicar en otra posición los ánodos o tomar otras medidas. La corriente total requerida para la protección de la estructura, consistiría de la corriente transmitida a las estructuras aledañas a fin de eliminar la interferencia y de la corriente transmitida a la estructura a proteger.

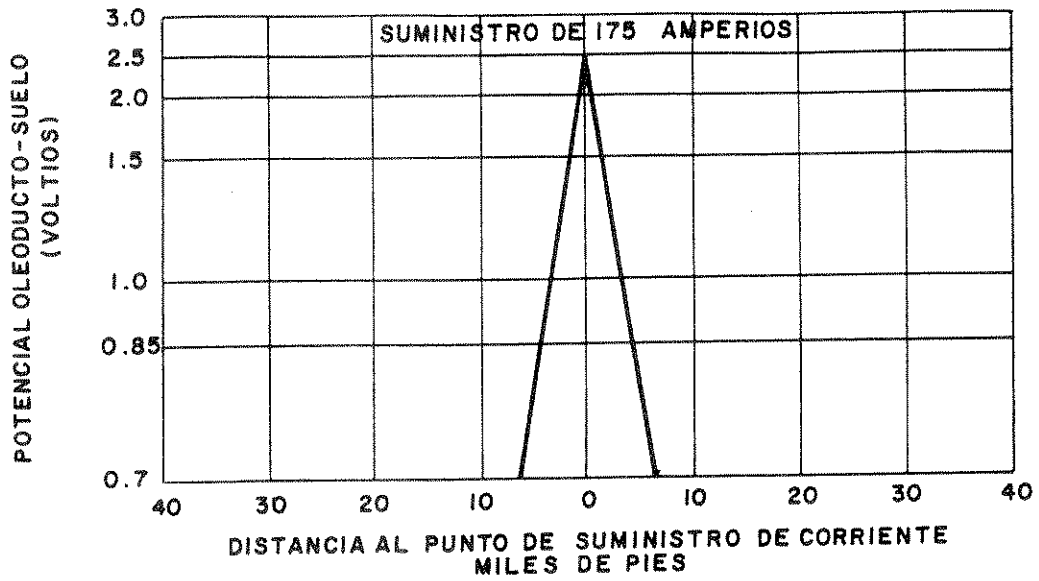
La prueba de demanda de corriente, no da más que una aproximación razonable de la corriente requerida. Pueden haber variaciones debido a varios factores, como el tamaño y ubicación final del banco de ánodos y efectos de polarización; estas variaciones pueden causar diferencias sustanciales en el funcionamiento entre la instalación temporal y la permanente.

No obstante el principio, es el mismo, pruebas de demanda de corriente son más fáciles de llevar a cabo en tuberías con recubrimientos en buenas condiciones, que en tuberías sin recubrimiento. En una tubería con recubrimiento, una cantidad pequeña de corriente aplicada en un punto puede llegar a proteger muchos kilómetros de tubería. En una tubería sin recubrimiento, una cantidad de corriente mucho mayor (requiriendo quizá el uso de una máquina de soldar como fuente de corriente directa) puede ser necesaria para proteger tan solo un kilómetro de la línea.

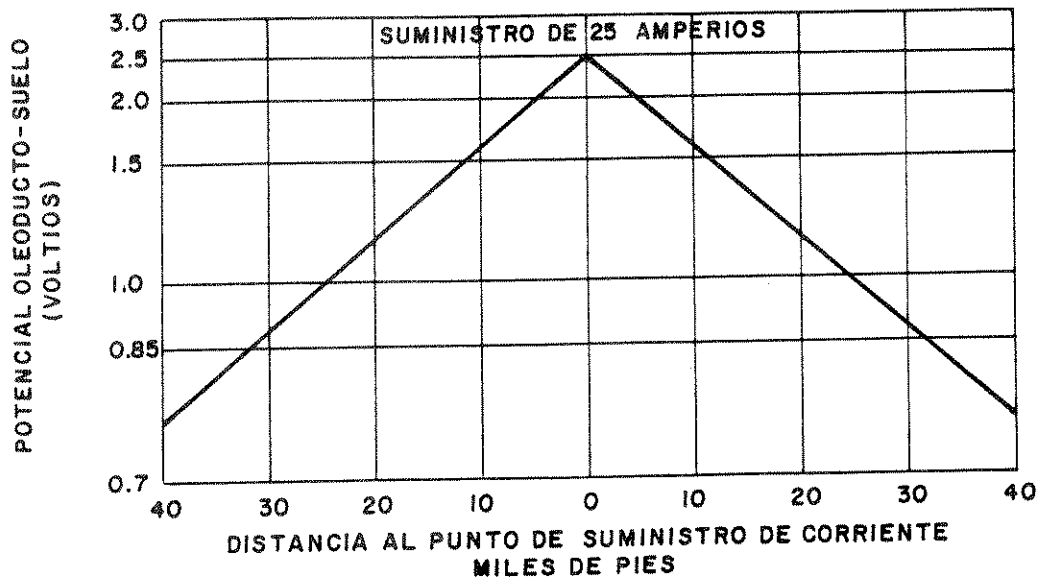
1.4.4 Atenuación del voltaje de protección

Los máximos valores de potencial estructura-suelo, usualmente, se encuentran cerca de los ánodos o bancos de ánodos y decrece exponencialmente en ambas direcciones a lo largo de la tubería. La rapidez con la que esta atenuación ocurre, depende de si la tubería tiene o no recubrimiento y su condición, de la resistividad del suelo, tamaño de la tubería y de la ubicación del suministro de la corriente (punto de la tubería donde están conectados los ánodos de sacrificio o donde está conectado el cable que viene del negativo del rectificador). Esta atenuación es influida en forma significativa por la condición del recubrimiento, siendo rápida para tuberías sin recubrimiento y relativamente lenta para tuberías con recubrimiento. En la Figura No. 23 se muestran curvas de atenuación típicas para dos tuberías de 8 pulgadas de diámetro en suelos similares. Una tubería no tiene recubrimiento y la otra tiene un recubrimiento en regulares condiciones. Nótese que 175 amperios protegen tan solo 9,200 pies de tubería sin recubrimiento, mientras que 25 amperios protegen 64,000 pies de tubería recubierta.³⁸

De acuerdo con la norma NACE RP0169-92 para que la tubería se considere protegida, catódicamente, se requiere que ésta tenga un potencial negativo de, por lo menos, 0.85 voltios respecto de una celda de referencia Cu/CuSO₄. La corriente suministrada que eleva el potencial a un valor mayor, produce sobreprotección y se considera energía desperdiciada. A fin de reducir este desperdicio, puede aumentarse el número de fuentes de corriente a lo largo de la tubería. La demanda



CURVA DE ATENUACIÓN PARA UNA TUBERÍA DE 8" DE DIÁMETRO SIN RECUBRIMIENTO



CURVA DE ATENUACIÓN PARA UNA TUBERÍA DE 8" DE DIÁMETRO CON RECUBRIMIENTO EN REGULARES CONDICIONES

FIGURA No. 23
CURVAS DE ATENUACIÓN PARA DOS TUBERÍAS

de corriente por unidad de longitud de la tubería disminuye a medida que se reduce la separación entre las fuentes de corriente. Es decir que una tubería puede protegerse con un número considerable de pequeñas fuentes de corriente, con un suministro de corriente menor al requerido por un pequeño número de fuentes. Esto es cierto para tuberías con o sin recubrimiento.

El potencial estructura-suelo no debe exceder de un valor dado, debido a que esto puede dañar el recubrimiento. Este valor depende del recubrimiento, tamaño del tubo y resistividad del suelo (por lo general se toma un valor negativo de 2.5 voltios).

Cuando se instalan diferentes fuentes de corriente a lo largo de una tubería, la separación entre ellas debe ser tal, que el efecto combinado de las fuentes proteja la tubería que se encuentra entre ellas.

1.5 Selección del tipo de sistema de protección

El escoger entre un sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio o de voltaje impuesto es, en gran parte, cuestión de criterio. El aspecto económico, la determinación de si el sistema es económicamente justificable, juega un papel muy importante en el diseño del sistema de protección final.

Los sistemas de protección mediante voltaje impuesto pueden utilizarse para suministrar una corriente variable, más, son utilizados, generalmente, para suministrar grandes cantidades de corriente, particularmente, cuando la corriente va a estar confinada a un área pequeña.

Un sistema de protección mediante ánodos de sacrificio, generalmente, se utiliza cuando pequeñas corrientes se requieren o cuando la interferencia con estructuras vecinas es problema. Los ánodos, generalmente, se colocan en lados alternos de la tubería para incrementar la distribución de la corriente y reducir la interferencia mutua entre ánodos.

1.6 Diseño del sistema de protección catódica

Al llevar a cabo la prueba de demanda de corriente y establecer el sistema temporal de protección más adecuado, se hizo ya, prácticamente, gran parte del diseño del sistema de protección (disposición de los ánodos, su ubicación, etc.).

Las fórmulas y ecuaciones que aquí se presentan son utilizadas para fines de estimación únicamente. Información precisa de la vida probable, capacidad de producción de corriente y otros datos importantes de los ánodos, pueden recibirse de la compañías que proveen equipos para sistemas de protección catódica.

1.6.1 Sistema de protección mediante ánodos de sacrificio

Una vez completadas las pruebas de demanda de corriente y ya que se ha determinado la corriente total de protección requerida, el siguiente paso es el diseñar el conjunto de ánodos que pueda proveer esta corriente. En este diseño, el tipo y vida aproximada de los ánodos debe considerarse.

La selección del material del cual está compuesto el ánodo de sacrificio, ya sea zinc o magnesio, debe ser tal que la diferencia de potencial entre el ánodo y la estructura permita elevar el potencial de la estructura a un valor adecuado de protección. Por ejemplo, el potencial de solución del zinc (utilizando relleno auxiliar) es de aproximadamente -1.1 voltios, medido respecto de una celda de referencia. Mientras que el potencial de solución del magnesio es de -1.55 voltios. Considerando un potencial estructura-suelo de -0.850 V como el criterio de protección adecuado de una tubería de acero, el potencial del zinc es de 0.25 voltios $(-0.85)-(-1.1)$ mientras que el de magnesio es de 0.70 voltios $(-0.85)-(-1.55)$.

La producción de corriente de un ánodo galvánico es inversamente proporcional a la resistencia del suelo en el cual se encuentra enterrado. La producción de corriente de un ánodo de magnesio de 17 libras enterrado en suelo de una resistividad de 1500 Ω -cm, utilizando relleno auxiliar, a 10 pies de distancia de la estructura a proteger es de, aproximadamente, 0.10 amperios por ejemplo. El mismo ánodo enterrado en suelo de 2000 Ω -cm tendría una producción de corriente de 0.075 amperios, mientras que en un suelo de 500 Ω -cm sería de 0.30 amperios, aproximadamente.

La siguiente ecuación utilizada con la Tabla No. 4, provee un medio para estimar la corriente producida por un ánodo de magnesio estándar, asumiendo un potencial estructura-suelo de -0.85 voltios, una distancia entre el ánodo y la estructura de 10 pies, resistividades de suelo arriba de 500 Ω -cm y una estructura sin recubrimiento o, pobremente, recubierta.

$$i = 150 * f / \rho$$

Donde i: corriente producida (amperios)
 ρ : resistividad del suelo (Ω -cm.)
 f: factor de la Tabla No. 4

En el caso de que la estructura tenga un buen recubrimiento, la corriente producida será, aproximadamente, 20 % menos.

La corriente suministrada por ánodos de zinc puede calcularse utilizando la ecuación anterior, sólo que el resultado debe multiplicarse por 0.27. En otras palabras, la corriente suministrada por ánodos de zinc es el 27% de la corriente suministrada por un ánodo similar de magnesio bajo las mismas condiciones. La corriente suministrada por instalaciones de múltiples ánodos, puede determinarse calculando la corriente suministrada por un solo ánodo y multiplicando tal valor por el debido factor de corrección, que se muestra en la siguiente tabla.

Tamaño del ánodo (libras)	Factor (f)
3	0.59
5	0.66
9	0.81
17	1
32	1.16
50	1.22

Tabla No. 4. Factor f.

No. de ánodos en línea	Espaciamiento entre ánodos verticales (en pies)			
	5	10	15	20
2	1.839	1.920	1.946	1.964
3	2.455	2.705	2.795	2.848
4	3.036	3.455	3.625	3.714
5	3.589	4.188	4.429	4.563
6	4.125	4.902	5.223	5.411
7	4.652	5.598	6.000	6.232
8	5.152	6.277	6.768	7.036
9	5.670	6.964	7.536	7.875
10	6.161	7.643	8.304	8.679

Tabla No. 5. Factor de corrección.

La tabla anterior se basa en la fórmula de E. D. Sunde para el cálculo de la resistencia a tierra de múltiples ánodos de 17 libras, instalados, verticalmente, y, en paralelo. Es importante recalcar que las anteriores fórmulas y tablas deben de usarse sólo como guías para estimar el suministro de corriente. El verdadero suministro puede determinarse hasta después de que la instalación de los ánodos ha sido completada.

La selección entre ánodos de zinc o de magnesio para varias aplicaciones de protección catódica es un problema de tipo económico, ya que el costo del magnesio por libra es, aproximadamente, el doble del precio de ánodos de zinc. El magnesio suministra mayores corrientes y, consiguientemente, se consume más rápido, aproximadamente, 2.5 veces más rápido que el zinc. El uso indiscriminado de magnesio puede resultar en la sobreprotección de la estructura y, consiguientemente, en mayores costos y desperdicio. Considerando todas las variables involucradas, el uso de ánodos de zinc es, por lo general, más económico en suelos con resistividades abajo de $1000 \Omega \cdot \text{cm}$.³⁹

La vida aproximada de los ánodos de sacrificio es también una importante consideración. Para propósitos de estimación, se considera que el zinc es capaz de producir 335 amperio-hora por libra y para el magnesio 500 amperio-hora por libra. Los fabricantes, por lo general, estiman que un ánodo de magnesio de 17 libras bajo condiciones típicas, puede producir, aproximadamente, 0.1 amperios por 10 años. La vida del ánodo puede calcularse de su pérdida de metal, bajo una producción de corriente determinada. Ánodos de magnesio pierden, aproximadamente, 17 libras por amperio-año y ánodos de zinc pierden, aproximadamente, 26 libras por amperio-año.

Las siguientes fórmulas pueden utilizarse para estimar la vida aproximada de ánodos de zinc o de magnesio, en base a una capacidad de producción de 335 amperio-hora por libra para el zinc y 500 amperio-hora para el magnesio. Donde la capacidad de producción de corriente requerida se conoce, es posible, por supuesto, calcular el peso necesario de los ánodos para una vida deseada.

$$L_m = 0.058 * W/i$$

donde L_m : vida de un ánodo de magnesio (años)
 W : peso del ánodo (libras)
 i : corriente producida por el ánodo (amperios)

$$L_z = 0.0385 * W/i$$

donde L_z : vida de un ánodo de zinc (años)
 W : peso del ánodo (libras)
 i : corriente producida por el ánodo (amperios)

Estas fórmulas se basan en eficiencias de producción de corriente de 90% para el zinc y de 50% para el magnesio. Un consumo completo de los ánodos se asume también.

1.6.2 Sistema de protección mediante voltaje impuesto

Una vez completadas las pruebas de demanda de corriente y ya que se ha determinado la corriente total de protección requerida, el siguiente paso es el diseñar el conjunto de ánodos que pueda proveer esta corriente y determinar el voltaje que el rectificador debe ser capaz de proveer. La selección de los ánodos se hace en base a consideraciones de la corriente que cada ánodo debe ser capaz de suministrar y la vida deseada de ellos. En esto la información de los proveedores de ánodos de sacrificio es de suma utilidad.

En la determinación del voltaje que el rectificador debe suministrar, el procedimiento es calcular la resistencia del circuito y multiplicarla por la corriente que el sistema debe suministrar. La resistencia del circuito de un sistema de protección catódica consiste en la resistencia del ánodo a la tierra, la resistencia del cable entre el ánodo y la estructura y la resistencia a tierra de la estructura. Pudiéndose determinar este último valor utilizando un "Vibroground" o un "Megger" de tres varillas. La resistencia eléctrica de los cables puede determinarse mediante tablas o información de los fabricantes.

La resistencia a tierra de un ánodo puede determinarse usando la ecuación de H. B. Dwight:

$$R = \rho / 2\pi L (\ln(4L/A) - 1)$$

donde R : resistencia a tierra del ánodo (Ω)
 ρ : resistividad del suelo (Ω -cm)
 L : longitud del ánodo (cm.)
 A : radio del ánodo (incluyendo el material de relleno auxiliar) (cm.)

Después de determinar la resistencia a tierra usando la ecuación anterior, puede determinarse la resistencia de un grupo de ánodos colocados en línea recta utilizando la siguiente ecuación:

$$R_t = R/n * F$$

donde R_f : resistencia de un grupo de ánodos colocados en línea recta.

R: resistencia a tierra de un solo ánodo.

n: número de ánodos en el grupo.

F: factor de corrección de la Tabla No. 6

La mayoría de valores publicados de resistencia de ya sea uno o varios ánodos están basadas en cálculos que suponen una resistividad uniforme de la tierra desde la superficie de la tierra a la profundidad de los ánodos. Ya que esta situación raramente se encuentra, tales curvas o tablas de tales valores sólo deben usarse para estimaciones.

No. de ánodos en línea **Espaciamiento entre ánodos verticales (en pies)**

	5	10	15	20	25	30
5	1.64	1.34	1.23	1.17	1.13	1.12
8	1.87	1.45	1.31	1.23	1.18	1.15
10	1.98	1.51	1.34	1.26	1.20	1.17
12	2.07	1.56	1.37	1.28	1.22	1.19
14	2.16	1.60	1.40	1.30	1.24	1.20
16	2.22	1.64	1.42	1.32	1.25	1.21
18	2.28	1.66	1.44	1.34	1.27	1.22
20	2.34	1.69	1.46	1.35	1.28	1.23
24	2.44	1.73	1.49	1.37	1.30	1.24
27	2.50	1.77	1.51	1.39	1.31	1.25
33	2.60	1.82	1.54	1.41	1.33	1.27

Tabla No. 6. Factor de corrección para la determinación de la resistencia a tierra de un conjunto de ánodos

Es una buena práctica al momento de diseñar, el proveer ánodos adicionales para satisfacer una demanda de corriente superior, en el caso de que nuevas estructuras sean añadidas al sistema o se deterioren los recubrimientos de las ya existentes. El voltaje necesario para proveer la corriente de protección necesaria puede calcularse multiplicando la resistencia total del circuito por la corriente de protección necesaria y añadiendo dos voltios para dar lugar a la diferencia de potencial entre el acero y los ánodos.

A veces un ahorro substancial en costos de electricidad, pueden lograrse reduciendo la resistencia total del circuito. Esto puede alcanzarse ya sea incrementando el número de ánodos, el espaciamiento entre ellos o el calibre del alambre.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL OLEODUCTO ENTRE LA REFINERÍA TEXACO Y LA CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA DEL INDE

Con el fin de llevar a cabo el diseño de la protección catódica del oleoducto, como se mencionó anteriormente, es necesario el conocer datos como el tamaño del tubo, espesor de la pared o cédula, peso por unidad de longitud, planos de la instalación, tipo de recubrimiento, mantenimiento dado o reparaciones, etc. La obtención de estos y otros datos necesarios (que datan de hace más de 20 años) fue complicada por la falta de registros en el INDE.

2.1 Descripción de la Central Térmica Escuintla del INDE

La *Planta Térmica Escuintla* está localizada en el kilómetro 61.5 de la carretera al Puerto de San José, Finca Mauricio, Departamento de Escuintla. La construcción de la obra dio inicio el 6 de julio de 1970 y se finalizó el 10 de julio de 1972 durante el gobierno del General Carlos Arana Osorio. Actualmente, forma parte del sistema nacional interconectado de suministro de energía eléctrica.

Se tienen dos unidades de generación mediante vapor, una de 30 megawatts marca BREDA y otra de 45 megawatts, marca AEG. Ambas unidades trabajan con fuel oil No. 6 para la generación del vapor.

Además, se cuenta con 6 unidades de gas (diesel) identificadas estas por un número de 1 a 6. Las unidades 1 y 2 son marca General Electric, cada una tiene una potencia nominal de 10 megawatts y no están en operación debido a defectos eléctricos y mecánicos. Las unidades 3 y 4, tienen una potencia de 20 megawatts y la unidad 5 de 35 megawatts, estando todas estas en operación y de marca Turbine Power Marine. La unidad 6 tiene una capacidad de 50 megawatts.

2.2 Descripción física del oleoducto

El oleoducto se instaló durante la construcción de la central térmica, entre los años 1,970 y 1,972.⁴⁰ Inicialmente, se instalaron dos tuberías, una de 4" para el

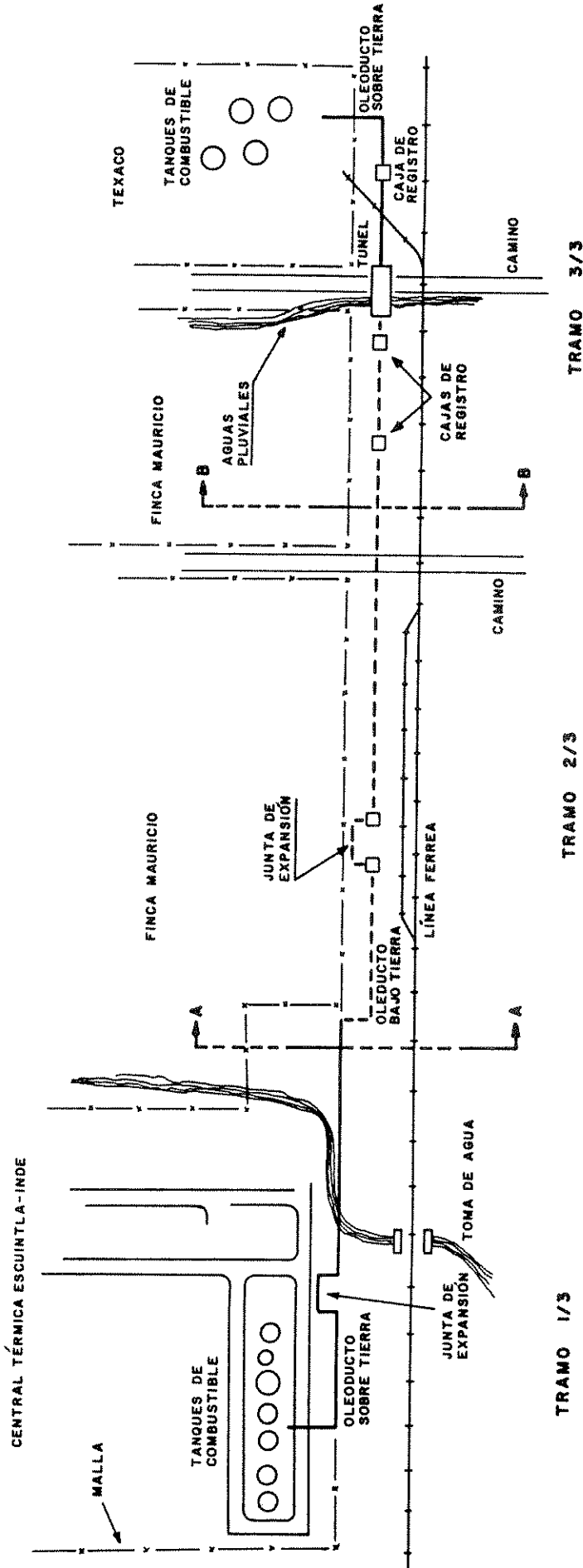


FIGURA No. 24
DIBUJO GENERAL DEL OLEODUCTO TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA-INDE

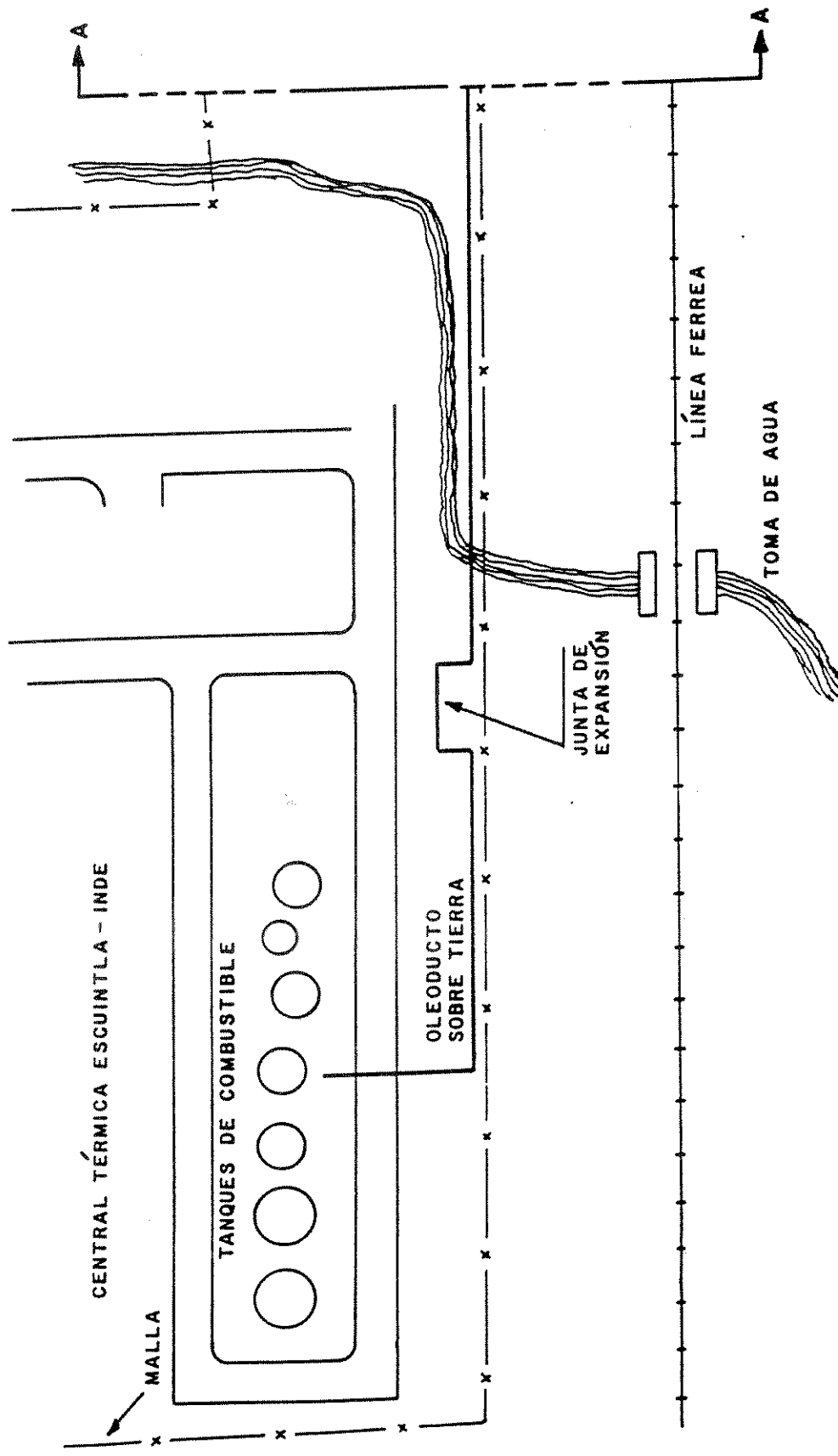


FIGURA No. 25

TRAMO 1/3 DEL OLEODUCTO TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA - INDE

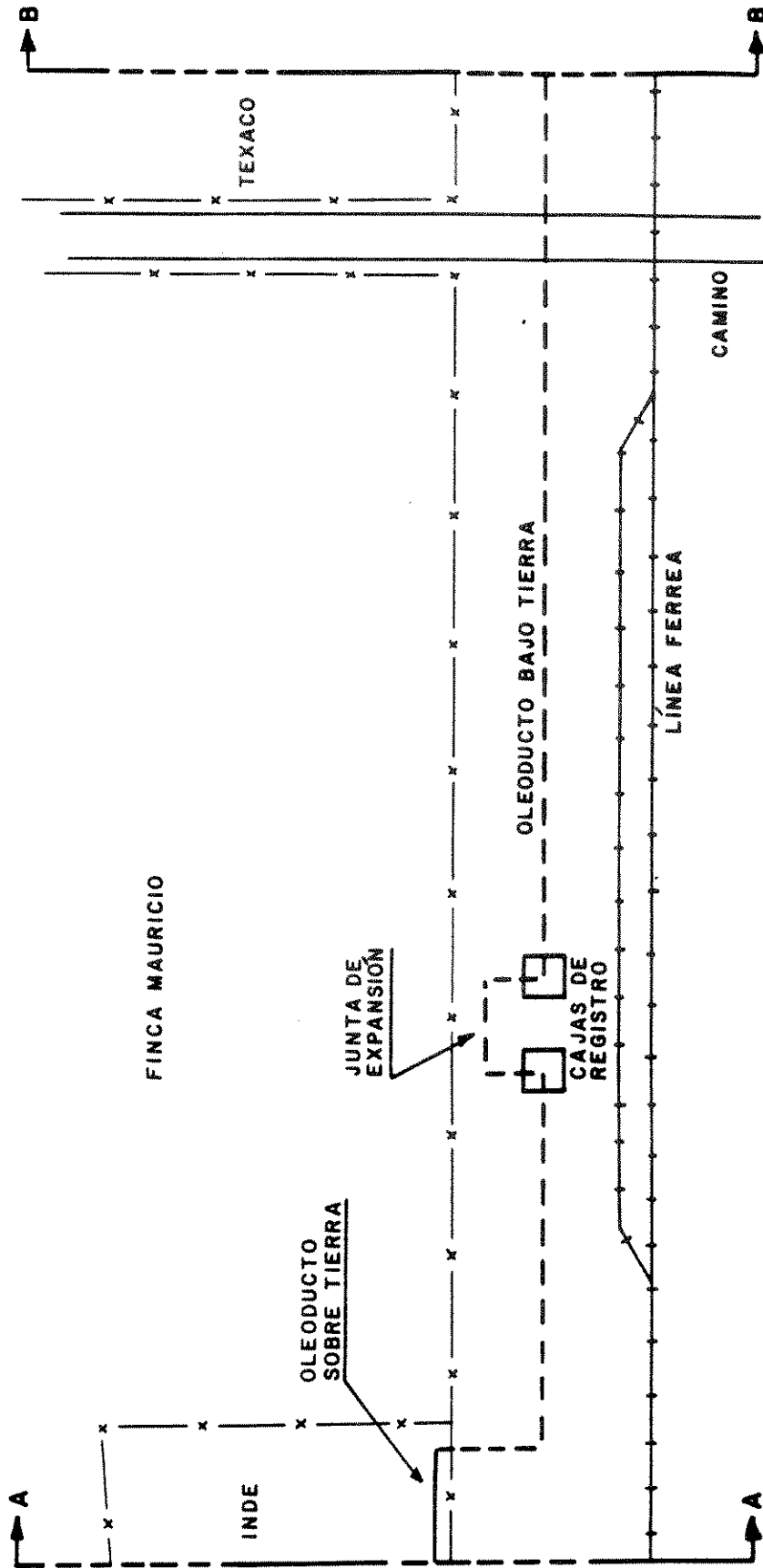


FIGURA No. 26

TRAMO 2/3 DEL OLEODUCTO TEXACO - CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA - INDE

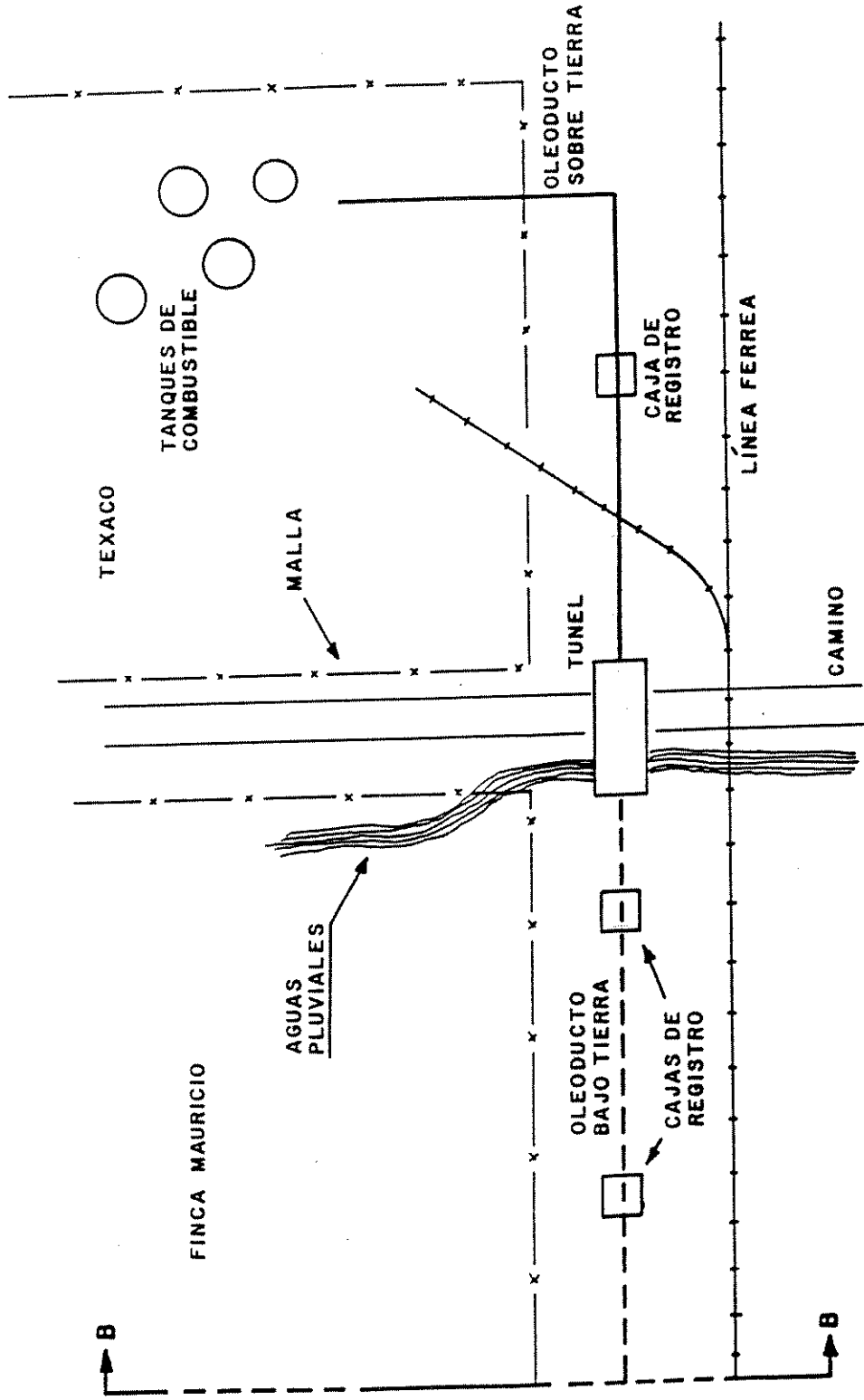
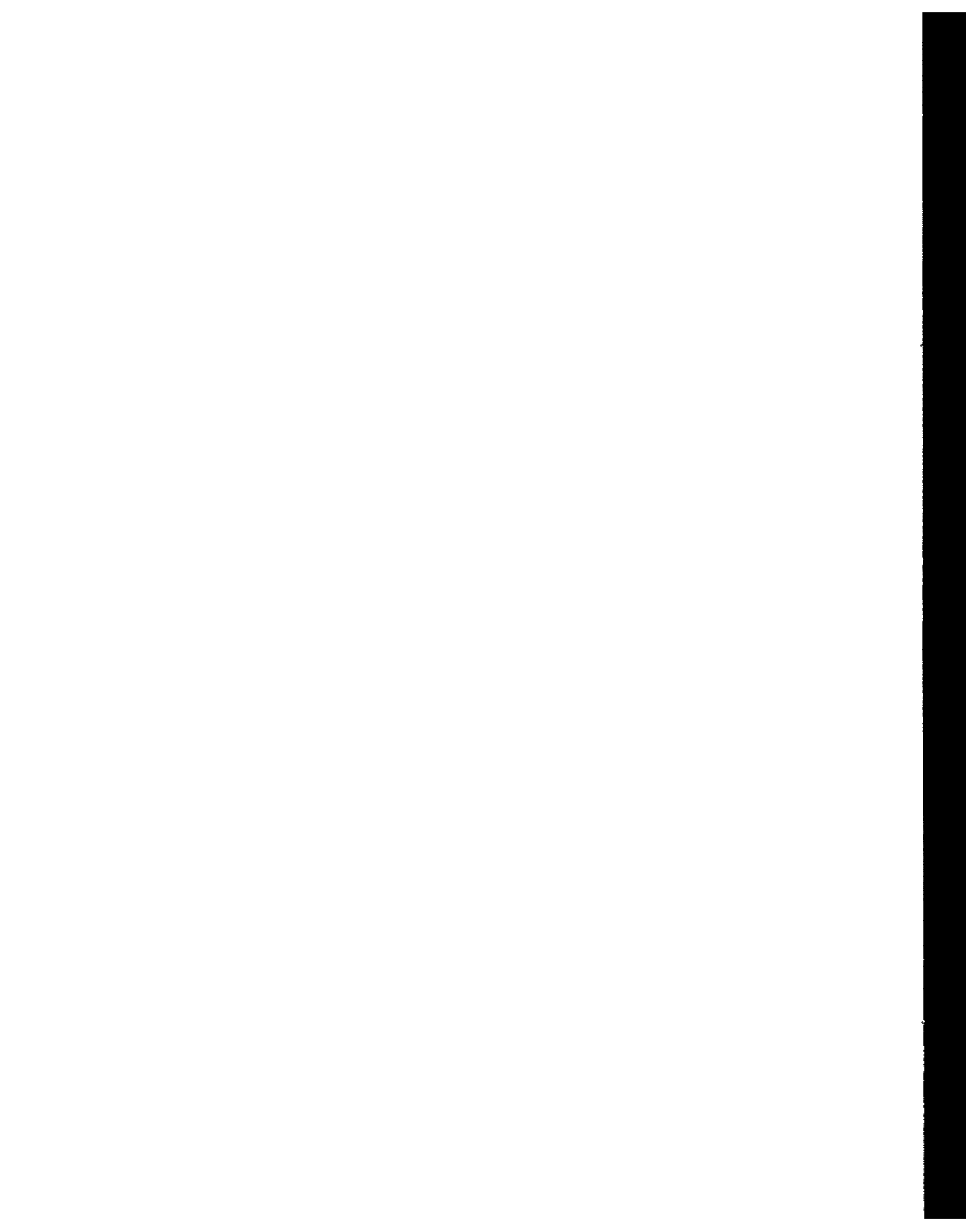


FIGURA No. 27

TRAMO 3/3 DEL OLEODUCTO TEXACO-CENTRAL TÉRMICA ESCUINTLA-INDE



CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE LAS MEDICIONES LLEVADAS A CABO

3.1 Procedimiento experimental

Con el fin de determinar la naturaleza y magnitud de la corrosión, se decidió llevar a cabo las siguientes mediciones:

- potencial oleoducto - suelo,
- resistividad eléctrica del suelo,
- resistencia eléctrica oleoducto - suelo,
- medición del pH del suelo,
- prueba de demanda de corriente.

Tales pruebas se llevaron a cabo durante la primera semana de agosto de 1,994. En días anteriores se habían tenido lluvias bastante fuertes, por lo que las condiciones de corrosión eran severas debido al alto contenido de humedad del suelo.

3.1.1 Potencial oleoducto-suelo

Las mediciones del potencial oleoducto-suelo se hicieron en 3 puntos diferentes en los cuales se podía hacer contacto con las 3 tuberías. Estos 3 puntos fueron: 1) donde la tubería se entierra del lado del INDE, 2) en una junta de dilatación, aproximadamente, a la mitad del tramo enterrado, y 3) donde la tubería se entierra del lado de TEXACO.

3.1.2 Resistividad eléctrica del suelo

Las mediciones de la resistividad eléctrica del suelo se llevaron a cabo a intervalos de 100 metros a lo largo del tramo enterrado del oleoducto. Esto se hizo utilizando un medidor Megger de 4 electrodos, de lectura directa, dejando una distancia de un metro entre los electrodos. Es decir, se determinó la resistividad

promedio a 1 metro de profundidad, que es la profundidad a la que el oleoducto está enterrado.

3.1.3 Resistencia eléctrica oleoducto-suelo

La medición de la resistencia eléctrica oleoducto-suelo se llevó a cabo utilizando un medidor "Megger" de tres electrodos. Ésta se determinó con el fin de calcular la resistencia total del circuito de protección catódica.

3.1.4 pH del suelo

La posibilidad de que el suelo que se encontraba en contacto con la tubería fuera ácido, se consideró remota. No obstante ello, debido a la posibilidad de medir el pH del suelo en los laboratorios de la refinería, se decidió llevarla a cabo como verificación. Se tomaron muestras del suelo en aquellos puntos donde se midió la resistividad eléctrica del suelo, es decir cada 100 metros.

3.1.5 Prueba de demanda de corriente

Una vez determinadas las condiciones de corrosión se procedió a llevar a cabo la prueba de demanda de corriente. Para ello, lo que se hizo, inicialmente, fue el colocar un "ánodo temporal" a 2 metros del oleoducto cerca de la junta de dilatación (se escogió este punto porque se podía hacer contacto con las tres tuberías y estaba en la parte central). Tal ánodo temporal, consistía en un tubo de hierro de 2" de diámetro y 2.25 m. de largo, enterrado, verticalmente, en el suelo. Se dejó un tramo de tubería de 25 cm. de longitud sobre el nivel del suelo, para llevar a cabo las conexiones eléctricas. Alrededor del tubo en la parte enterrada se echó sal a fin de reducir la resistencia del circuito. Antes de llevar a cabo la medición se cavó un poco alrededor del "ánodo temporal" y se echó agua, también, para reducir la resistencia del circuito.

Como fuente de corriente se utilizaron tres baterías de 12 voltios. Para modificar la corriente se varió el voltaje, variando el número de baterías, y sacando derivaciones de una de ellas. Las tres tuberías se interconectaron eléctricamente con un solo cable calibre No. 8 AWG, el cual se conectó al polo negativo del conjunto de baterías (ver Figura 28), tales conexiones se llevaron a cabo lijando, primeramente, una pequeña parte de la tubería y sujetando allí el cable fuertemente mediante una abrazadera. Después se conectó el ánodo temporal al polo positivo del conjunto de baterías.

La corriente eléctrica se varió y se midió el potencial tubería-suelo donde la tubería se entierra del lado de TEXACO y en la junta de dilatación. Se determinó la cantidad de corriente necesaria para elevar el potencial eléctrico de las tuberías del lado de TEXACO (que es donde el potencial sería menor ya que es el punto más alejado de la junta de dilatación todavía enterrado) hasta, por lo menos, -0.850 V respecto de la celda de referencia.

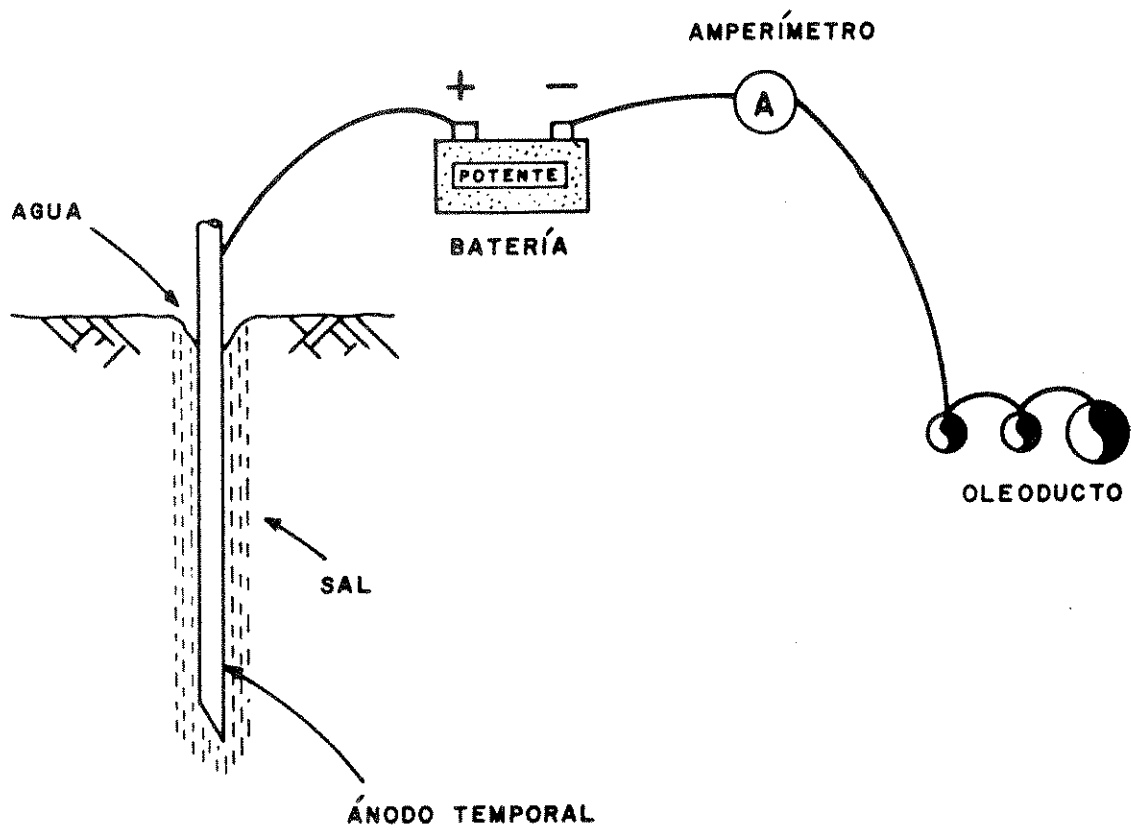


FIGURA No. 28
PRUEBA DE DEMANDA DE CORRIENTE

3.2 Resultados de las pruebas para la determinación de las condiciones de corrosión

3.2.1 Potencial oleoducto suelo

En la Tabla No. 8 se muestran los potenciales obtenidos para las tres diferentes tuberías, identificándose a cada una por su diámetro.

PUNTO	TUB. 2" (V)	TUB. 3" (V)	TUB. 4" (V)
INDE	- 0.284	- 0.278	- 0.237
Junta de dilatación	- 0.229	- 0.196	- 0.219
TEXACO	- 0.252	- 0.225	- 0.237

Tabla No. 8 Potencial oleoducto-suelo.

3.2.2 Resistividad eléctrica del suelo

La temperatura ambiente era 33 °C y la condición del suelo era de tierra negra húmeda. Las mediciones se hicieron cada 100 metros y se muestran los resultados en la siguiente tabla:

PUNTO	RESISTIVIDAD (Ω cm.)
0 m (lado INDE)	13,200
100 m	12,850
200 m	10,725
300 m	12,750
400 m	13,000
500 m (lado TEXACO)	13,275

Tabla No. 9. Resistividad eléctrica del suelo promedio a 1 metro de profundidad.

La resistencia oleoducto-suelo medida fue de 0.1 Ω .

3.2.3 PH del suelo

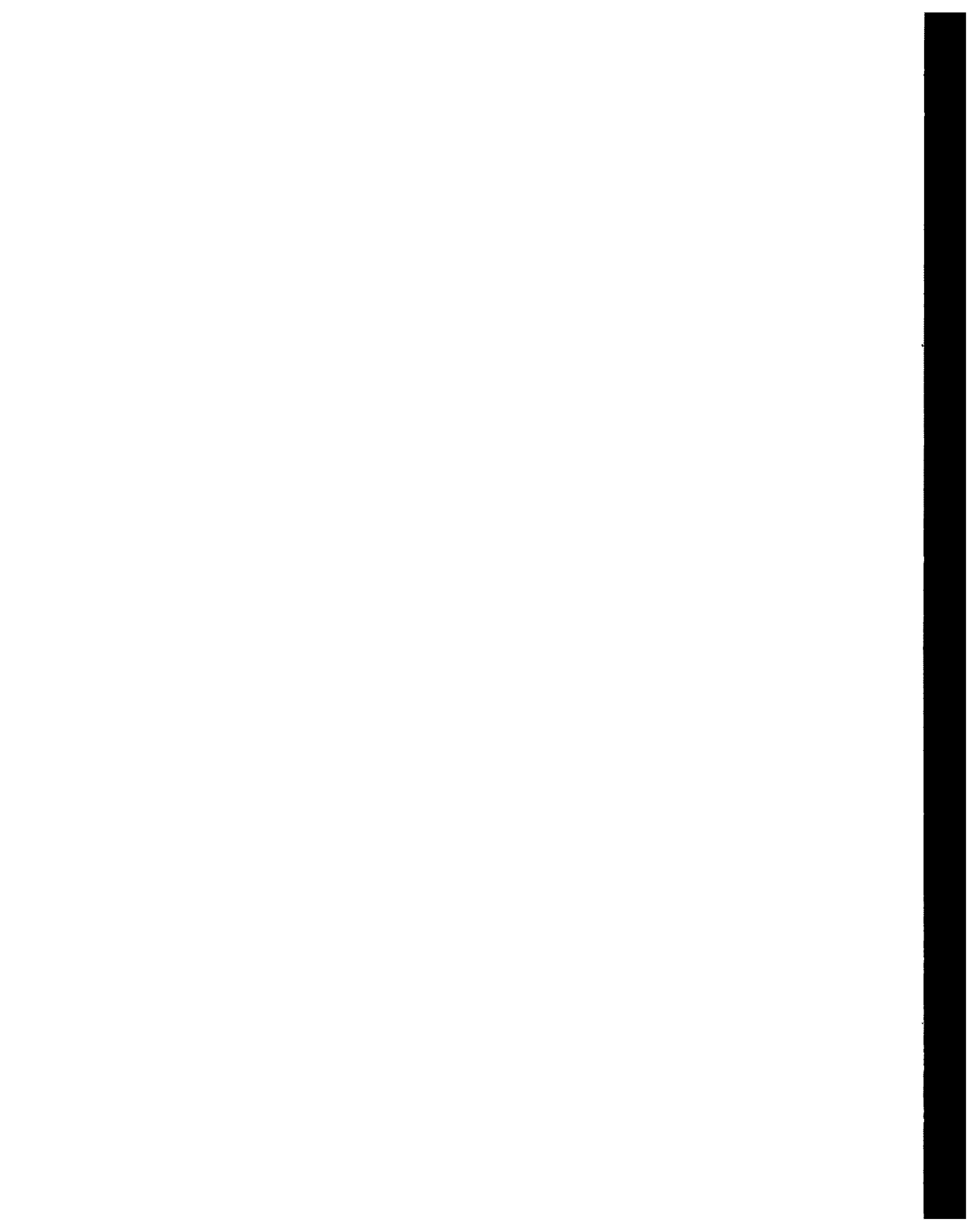
Las mediciones se hicieron cada 100 m. En la siguiente tabla se muestran los resultados reportados por ingenieros del laboratorio de la refinería:

PUNTO	pH DEL SUELO
0 m (lado INDE)	6
100 m	5
200 m	6
300 m	6.4
400 m	6
500 m (lado TEXACO)	5

Tabla No. 10. PH del suelo a lo largo del oleoducto.

3.3 Prueba de demanda de corriente

Al aplicar al conjunto de 3 tuberías una corriente de 8.3 amperios, se logró del lado de TEXACO un potencial tubería-suelo de -0.857 voltios y en la junta de dilatación uno de -2.1 voltios.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Evaluación de la condiciones de corrosión

Los potenciales oleoducto-suelo obtenidos, los cuales aparecen en la Tabla No. 8 se grafican en la Figura No. 29. Tal como puede apreciarse en la mencionada gráfica, los valores para las tres tuberías permanecen razonablemente constantes en toda su longitud (alrededor de -0.225 Voltios) esto indica que no hay celdas de corrosión que puedan determinarse de estos valores. El bajo valor obtenido era predecible, dada la antigüedad de la instalación y hecho de que el oleoducto no está recubierto.

Las mediciones de resistividad eléctrica del suelo obtenidas, aparecen graficadas en la Figura No. 30. En tal gráfica puede observarse que en toda la longitud de la tubería, la resistividad eléctrica del suelo permanece relativamente constante. Lo mismo ocurre con los valores de pH, de las muestras tomadas en los mismos lugares (ver Tabla No. 10 y Figura No. 31), esto indica que no hay variaciones apreciables en la composición del suelo a lo largo de la longitud de la tubería, de lo cual no pueden detectarse celdas de corrosión debido a variaciones en la composición del suelo.

Tal como era de esperarse el pH del suelo se encuentra en el intervalo neutro de la escala (neutro tendiendo ligeramente a ácido).

Por lo comentado anteriormente y debido a que la resistividad eléctrica promedio del suelo no puede clasificarse como corrosiva, se concluye de que las condiciones de corrosión no son severas. No obstante esto, debido a la importancia del oleoducto en lo que a suministro de combustible respecta y a su muy probable utilización por los siguientes 20 años, se recomienda protegerlo catódicamente.

4.2 Evaluación de la corriente requerida para alcanzar la protección

Debido a que ninguna de las tres tuberías se encuentra recubierta, el valor de la corriente requerida para protegerlas en los 500 metros que se encuentran enterradas es alto: 8.3 amperios.

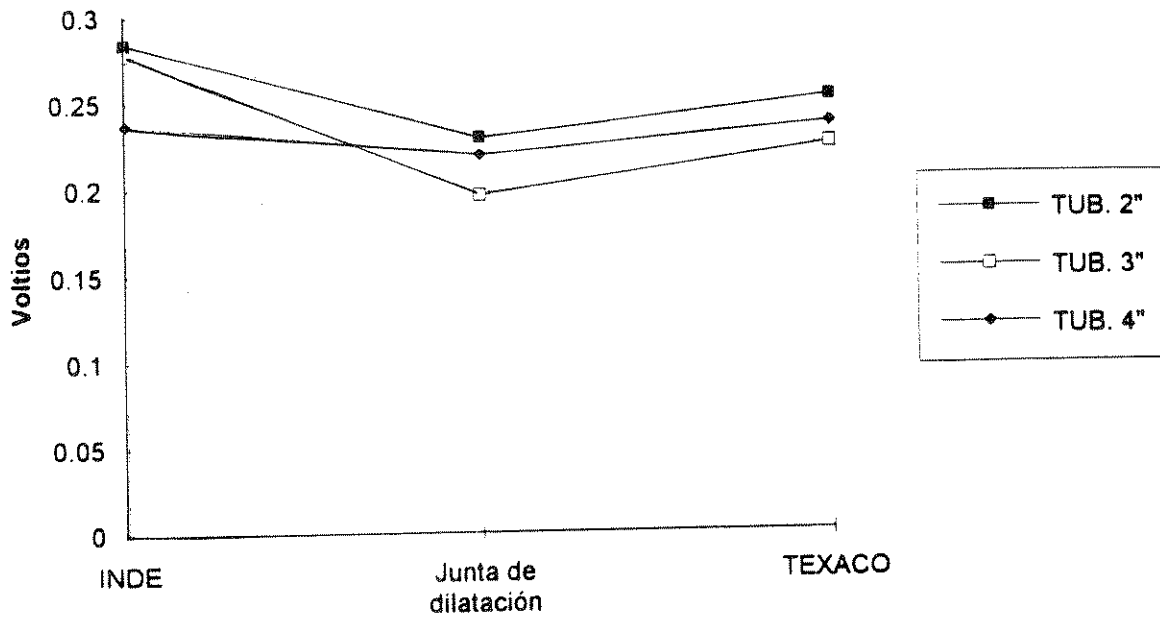


Figura No.29. Potencial oleoducto - suelo.

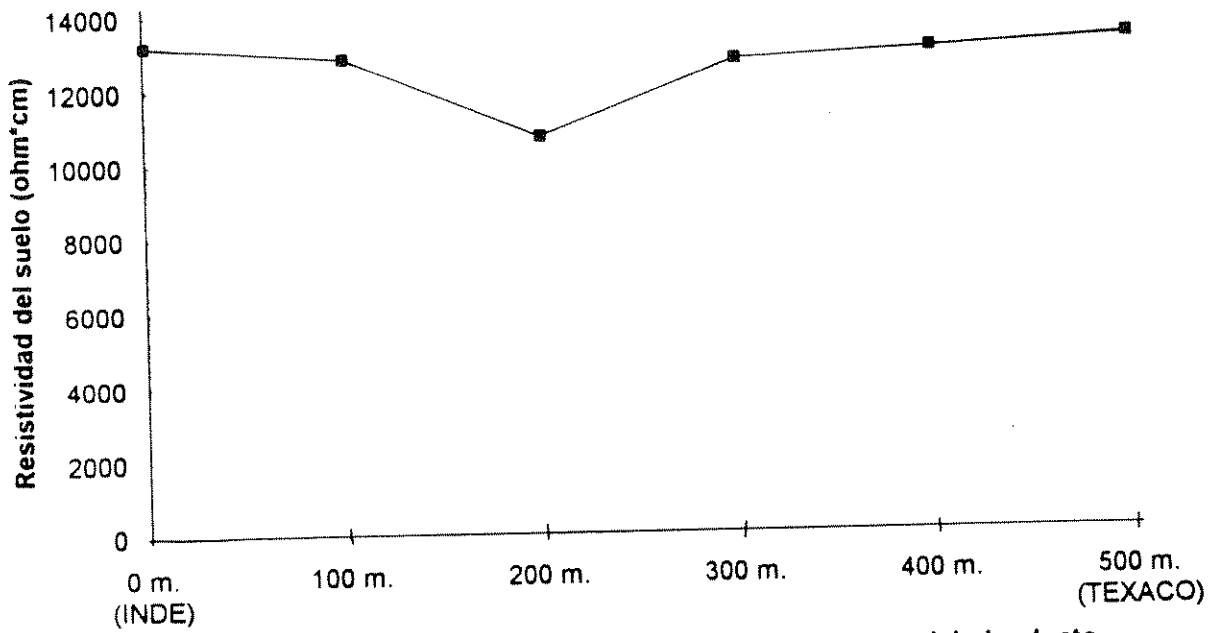


Figura No. 30. Resistividad eléctrica del suelo a lo largo del oleoducto.

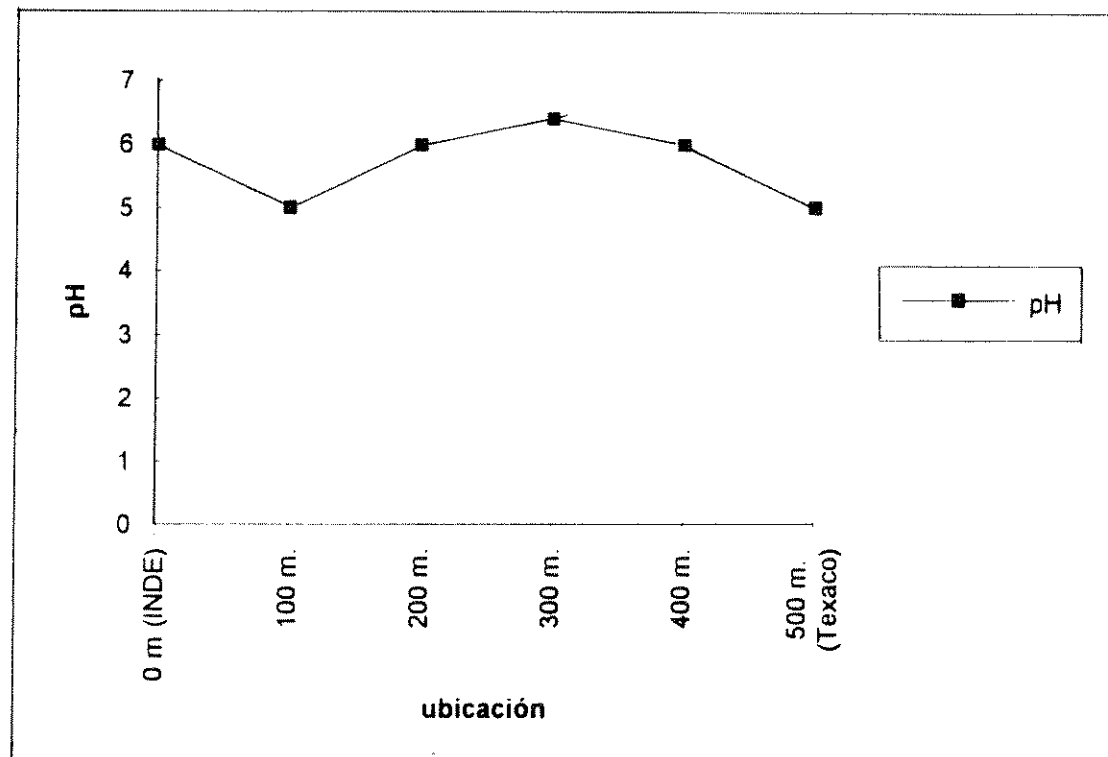


Fig. No. 31. pH del suelo

CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

5.1 Selección del tipo de sistema de protección

Debido a que el oleoducto en toda su longitud se encuentra sin ningún tipo de recubrimiento, la corriente requerida para proteger las 3 tuberías es considerable: 8.3 amperios.

Como se mencionó en la sección 1.6.1, la corriente suministrada por un ánodo de magnesio enterrado en un suelo de baja resistividad ($1500 \Omega \cdot \text{cm.}$) puede oscilar entre 0.10 y 0.30 amperios. De instalar un sistema de protección mediante ánodos de sacrificio, el número de ánodos a requerirse para lograr la protección adecuada podría llegar a ser demasiado grande. Al costo de los ánodos es necesario añadir los consiguientes costos de instalación.

De instalarse un sistema de protección catódica mediante voltaje impuesto, se tienen diversos factores que lo hacen más atractivo. Uno de ellos es que en terrenos del INDE, muy cerca de donde la tubería se entierra, años atrás estaba instalado un taller. Por este motivo se instaló un transformador en un poste de electricidad, el cual puede utilizarse como fuente de corriente alterna para un rectificador. Incluso, debido a que el oleoducto sólo transporta combustibles de baja volatilidad (fuel oil y diesel), no se requiere de un rectificador a prueba de explosión, lo que hace más económica la instalación. Otra ventaja de un sistema de este tipo, es que la corriente de salida del rectificador se puede regular y obtener la más adecuada. Además, se cuenta en el INDE con personal adecuadamente adiestrado en electricidad, que fácilmente puede instalar y dar mantenimiento a un sistema de este tipo, sin requerirse de personal externo. El número de ánodos a utilizarse, incluso, es considerablemente menor comparado con un sistema de protección mediante ánodos de sacrificio.

Debido a las razones anteriores se recomienda el instalar un sistema de protección mediante voltaje impuesto. La decisión final del tipo de rectificador y forma de instalarlo, así como su ubicación, se deja a criterio de los ingenieros electricistas del INDE (podría resultar muy conveniente el instalar un rectificador

enfriado por aire en el poste donde se encuentra el transformador). Como se demostrará más adelante, el voltaje necesario es de 10.31 voltios, y como ya se determinó, experimentalmente, la corriente requerida es de 8.3 amperios. Las características de voltaje y corriente del rectificador deben ser tales, que los valores anteriores caigan dentro de los rangos de operación con un adecuado margen de seguridad.

5.2 Selección de los ánodos de sacrificio

Los ánodos de sacrificio seleccionados para el sistema de protección son de grafito, marca UCAR⁴¹, de 3" de diámetro y 60" de longitud, centrado en un envase de lata de 8 pies de longitud y 8 pulgadas de diámetro y con relleno auxiliar de una resistividad no mayor a 50 Ω -cm. (peso aproximado 225 libras). Las condiciones del suelo son normales (no hay ácidos u otras condiciones severas) por lo que no se requieren ánodos impregnados con aceite o con recubrimientos especiales. Estos ánodos se seleccionaron por la experiencia de muchos años del fabricante y por la disponibilidad de información de sus productos. Por supuesto, puede seleccionarse otro tipo de ánodos, siempre que tengan propiedades parecidas. De acuerdo con el fabricante, en un suelo de 1200 Ω -cm y suministrando 1 amperio, este tipo de ánodo puede tener una vida útil de más de 20 años.

En este tipo de ánodos la máxima corriente permisible aceptada es de 3 amperios, no obstante, a fin de que el sistema tenga una vida útil de alrededor de 20, se limitará la corriente provista a 1 amperio/ánodo. Con el fin de obtener la corriente prevista de 8.3 amperios se requerirán, entonces, 8 ánodos.

5.3 Localización y profundidad de los ánodos

Los ánodos han de ser instalados verticalmente en línea recta paralelamente al oleoducto (ver Figura No. 32) a una distancia de 3 metros del oleoducto y con una distancia de separación entre cada uno de 50 metros. La disposición de los ánodos será la de un banco de ánodos colocado continuo, horizontal y paralelamente a la estructura. A fin de reducir el costo de la instalación, se puede acortar la distancia entre los ánodos y, consiguientemente, la longitud del banco de ánodos. Una modificación de este tipo produciría una mayor resistencia del circuito y, consiguientemente, un mayor voltaje requerido para producir la corriente dada, lo cual aumentaría los costos de funcionamiento del sistema. Con el fin de reducir costos, también se puede reducir el número de ánodos a un mínimo de 3, lo que produciría, también, una mayor resistencia del circuito y una menor vida del sistema.

Se recomienda que, primero, los ánodos sean instalados a una profundidad tal, que la humedad del suelo sea de 50% o más durante la mayor parte del año, a fin de que una resistividad del suelo baja (alrededor de 3000 Ω -cm.) permita obtener la corriente deseada a un voltaje razonable. La profundidad será entre 3 y 6 metros. A fin de instalar los ánodos basta con perforar agujeros de un diámetro de 9 pulgadas. Si se encuentra roca al perforar un agujero, puede buscarse otra posición cercana para la instalación de ese ánodo en particular, como caso extremo puede instalarse, horizontalmente, a la mayor profundidad posible.

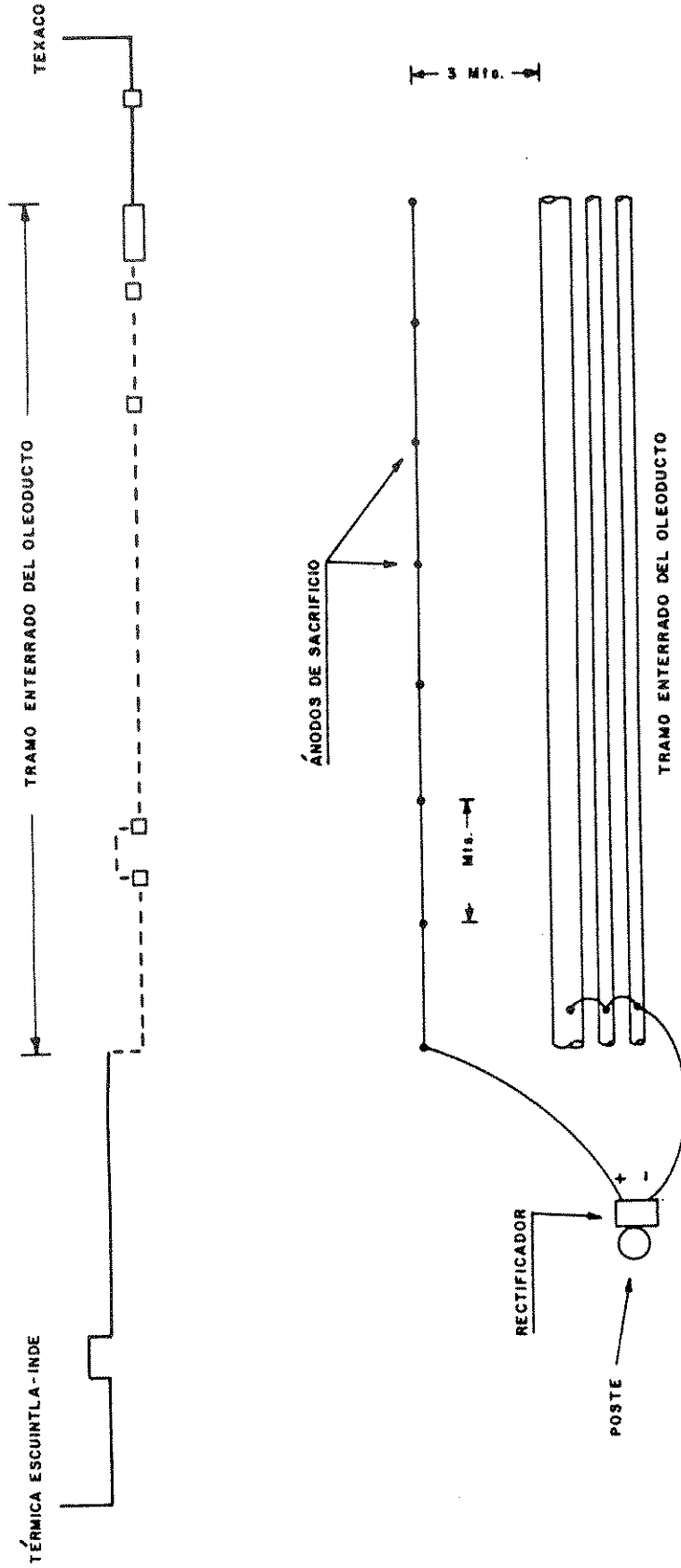


FIGURA No. 32
DISTRIBUCIÓN ÁNODOS DE SACRIFICIO

5.4 Selección del cable y soldadura

A cada ánodo de sacrificio viene conectado un cable No. 8 AWG con forro de polietileno HMWPE. Después de haber colocado los ánodos en sus respectivos agujeros y antes de rellenarlos (utilizando el material que se extrajo al hacer la excavación) es recomendable introducir tales cables en conducto plástico (o "conduit") a fin de protegerlos.

Una vez colocados los ánodos y rellenos los agujeros, los cables de los ánodos se conectarán al cable principal. El cable principal será de cobre, calibre No. 2 AWG. El forro aislante del cable será de 1/64", de color negro, de polietileno, tipo CP, de alto peso molecular. Tal cable irá preferiblemente dentro de conducto plástico (conduit) de 1" de diámetro enterrado, por lo menos, a 24 pulgadas de la superficie. Hay que tener presente que en el terreno donde estaría la instalación es utilizado para siembras agrícolas, por lo que hay que cuidar que al preparar el terreno y llevar a cabo la siembra no dañen la instalación. Las conexiones del cable de los ánodos al cable principal pueden hacerse ya sea soldadas o mediante otro tipo de conectores a compresión. Hay que cuidar que después de que se lleven a cabo tales conexiones sean debidamente aisladas, preferiblemente con resina epóxica (ver Figura No. 33). Como última opción puede utilizarse una gruesa capa de cinta de aislar. Es importante recalcar que los cables y conexiones deben estar debidamente aisladas, de no ser así, las partes expuestas se comportarán como ánodos de sacrificio y se producirá una rotura del cable o conexión, debido a una corrosión acelerada. El cable principal debe ir conectado a la terminal positiva del rectificador.

Ahora se procederá a determinar la resistencia total del circuito. La longitud total requerida para la instalación del cable principal es de, aproximadamente, 350 metros. la resistencia del cable No. 2 AWG es de, aproximadamente, 0.32874 Ω /1000 m. por lo que la resistencia del cable principal será de .115059 Ω . Utilizando la ecuación de H. B. Dwight, dada en la sección 1.6.2, se determinará la resistencia a tierra de un ánodo. Se tiene un suelo de 3000 Ω ·cm., una longitud de ánodo de 8 pies (243.84 cm.) incluyendo relleno auxiliar y un diámetro de 8 pulgadas(10.16 cm.):

$$R = \rho / 2\pi L (\ln(4L/A) - 1)$$

$$R = 3000 / 2\pi(243.84) (\ln(4(243.84)/10.16) - 1)$$

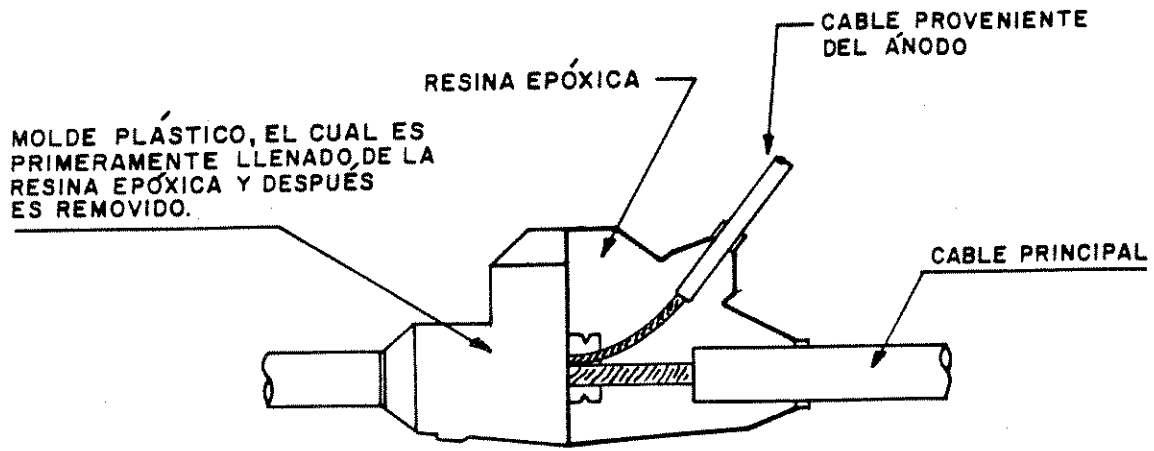
$$R = 6.98 \Omega$$

Después de determinar la resistencia a tierra de un solo ánodo, puede determinarse la resistencia del banco de ánodos colocados en línea recta utilizando la ecuación dada también en la sección 1.6.2:

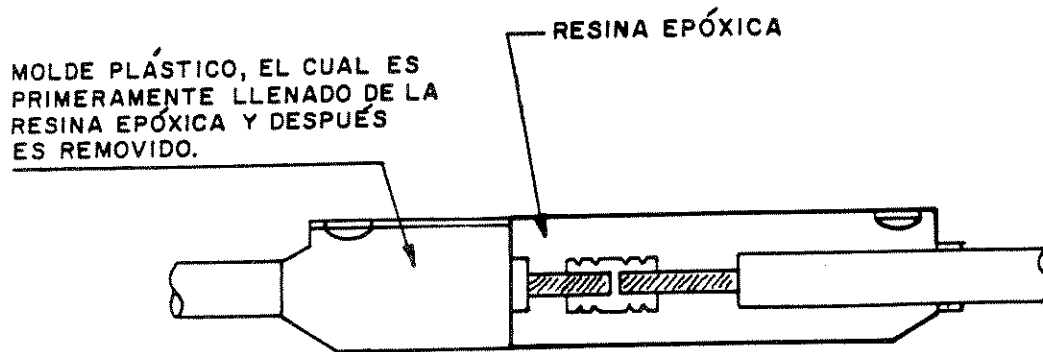
$$R_t = R/n * F = 6.98/8 * 1.12$$

$$R_t = 0.9772 \Omega$$

La resistencia a tierra del oleoducto fue de 0.1 Ω . Consiguientemente, la resistencia total del circuito es de 0.1 + 0.9772 + 0.115059, o sea, 1.192259 Ω . Por la ley de ohm el voltaje necesario que debe suministrar el rectificador es de 1.192259 x 8.3 = 9.90 Voltios (8.3 es la corriente en amperios requerida).



CONEXIÓN ENTRE EL CABLE PROVENIENTE DEL ÁNODO Y EL CABLE PRINCIPAL



CONEXIÓN ENTRE DOS CABLES

FIGURA No. 33

CONEXIÓN ENTRE CABLES Y SU AISLAMIENTO MEDIANTE RESINA EPÓXICA

El cable que conecta las tres tuberías al negativo del rectificador será también de cobre, calibre No. 2 AWG, con aislante de 1/64", de color negro, de polietileno, tipo CP, de alto peso molecular. La conexión del cable a las tuberías será mediante soldadura (ver Figura No. 34) al llevar a cabo tal soldadura, se deben tener todos los cuidados del caso. Después de haber llevado a cabo tales soldaduras debe aplicarse un recubrimiento sobre ellas, a fin de aislarlas. Un recubrimiento epóxico es apropiado.

Al poner en marcha el sistema de protección es importante seguir las instrucciones del fabricante del rectificador. Hay que recordar que la resistencia del circuito y la corriente de protección necesaria aquí medidos y calculados, constituyen únicamente aproximaciones de los valores reales. Después de poner en marcha el sistema, es necesario ajustar la corriente a fin de que la magnitud del potencial oleoducto-suelo esté arriba de 0.850 voltios en todo el tramo enterrado. Esto se puede verificar midiendo el potencial en los siguientes tres puntos: donde la tubería se entierra del lado del INDE, en la junta de dilatación y donde se entierra del lado de la refinería.

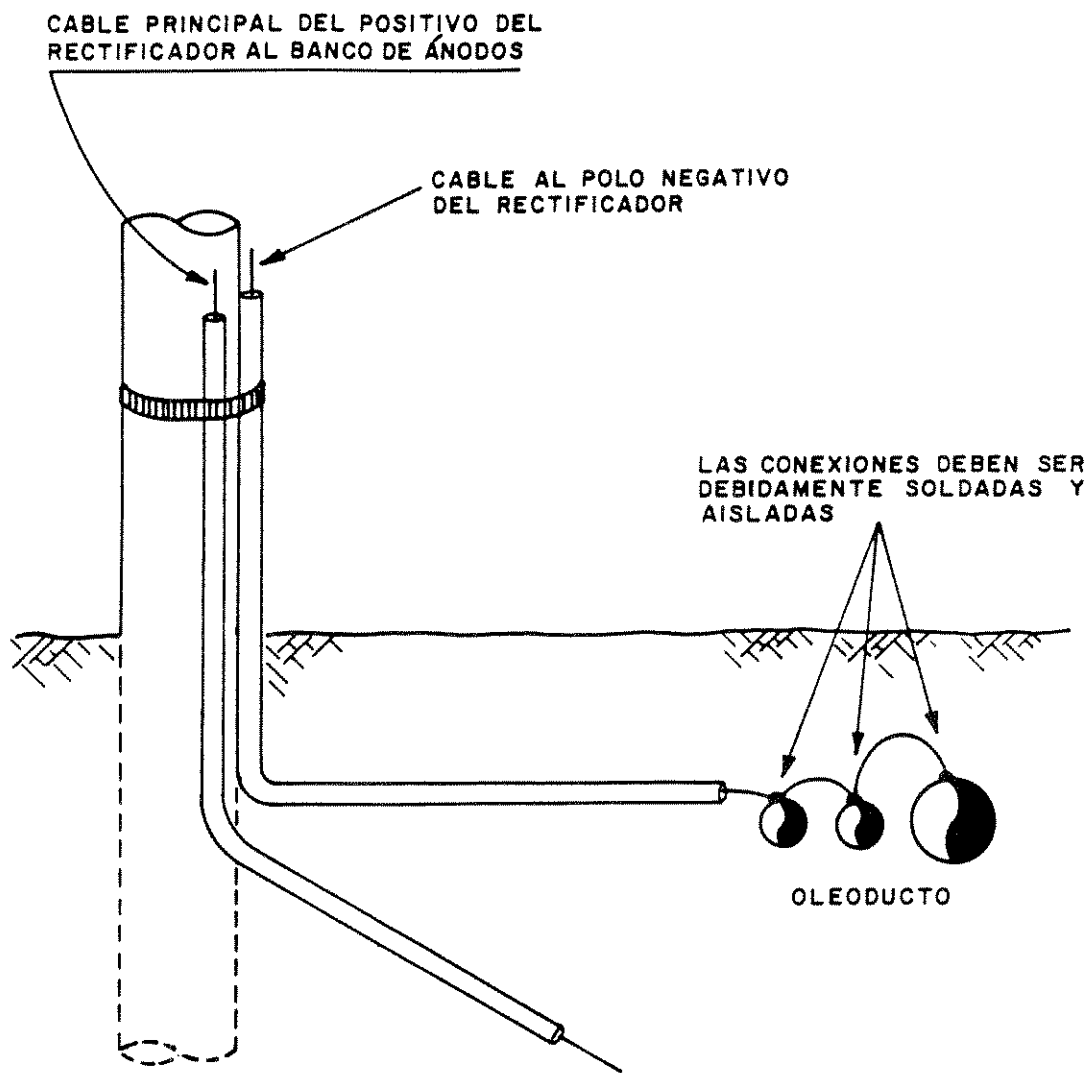
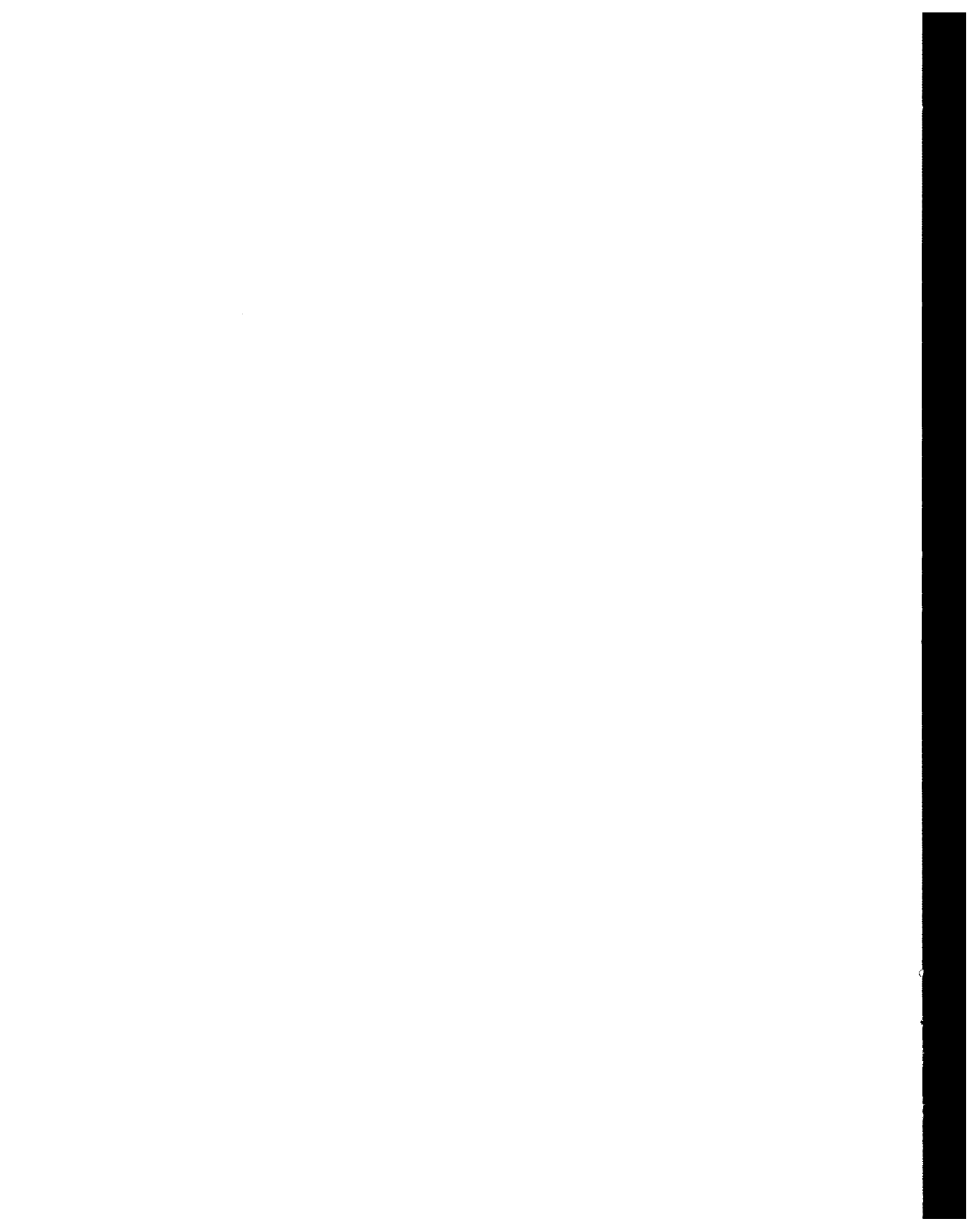


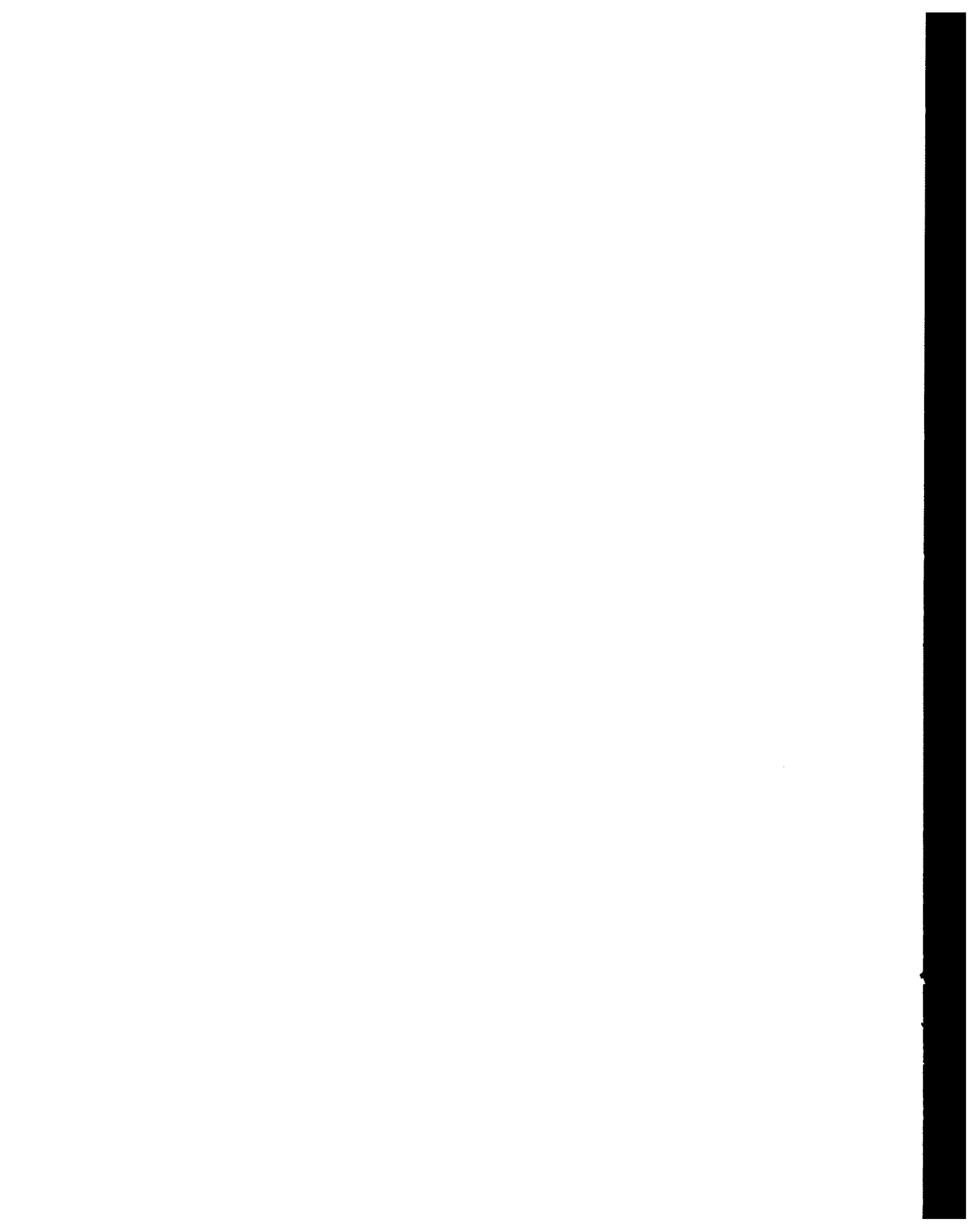
FIGURA No. 34

CONEXIÓN DE LAS TRES TUBERÍAS AL NEGATIVO DEL RECTIFICADOR



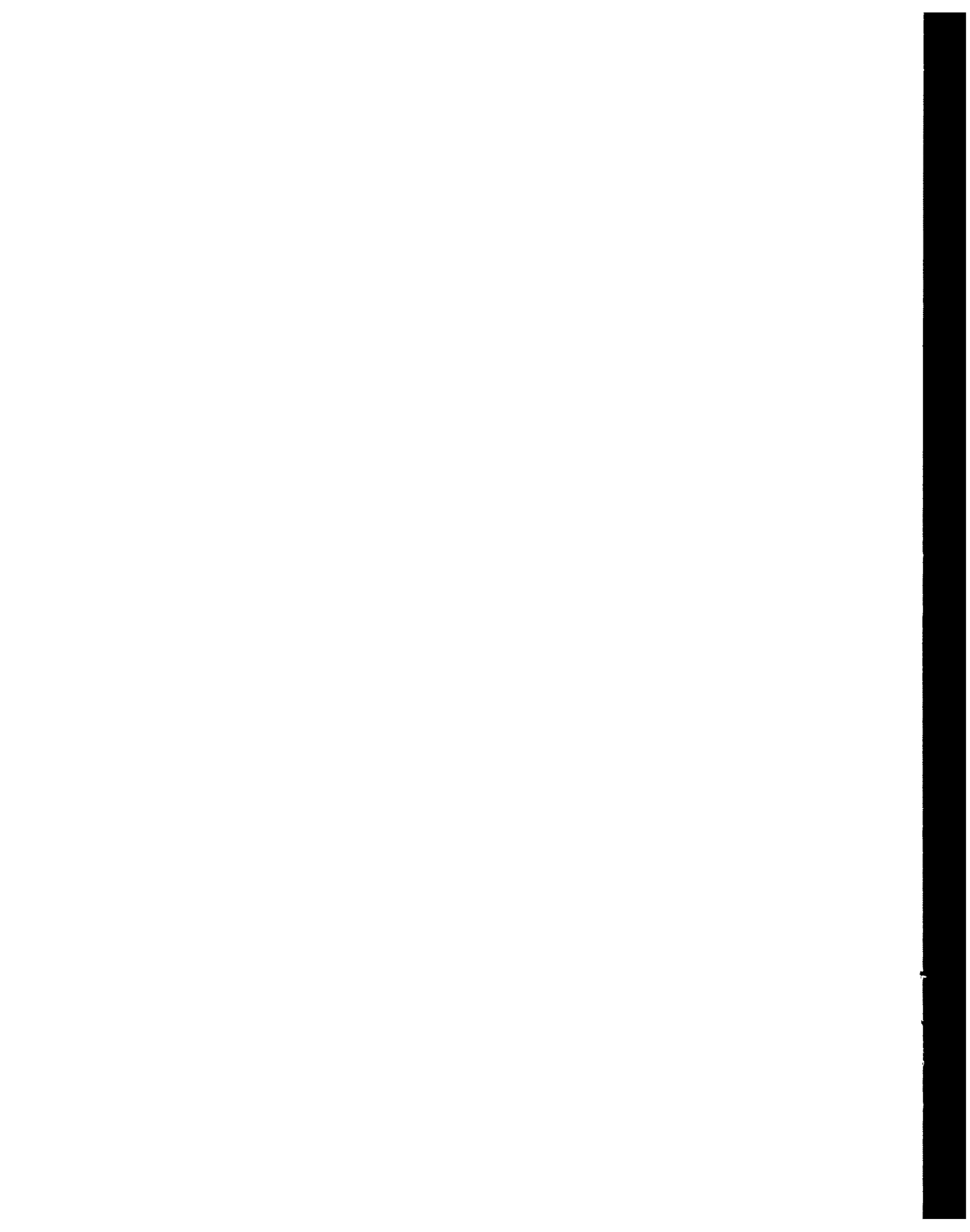
CONCLUSIONES

1. - Las condiciones de corrosión del oleoducto TEXACO - INDE, no son severas.
2. - Debido a la gran importancia que tiene la experiencia en el diseño de un sistema de protección catódica, en estructuras grandes o complejas, es conveniente el contar con la asesoría de expertos en este tipo de diseños.
3. - Debido a los efectos destructivos de la corrosión, los cuales a veces pueden llegar a ser catastróficos, en el diseño, montaje y mantenimiento de una estructura, es necesario el tomar medidas que la reduzcan o prevengan completamente.
4. - La protección catódica de estructuras es una técnica sumamente útil en la prevención de la corrosión de tuberías enterradas, si es aplicada, adecuadamente.
5. - En la prevención de la corrosión de oleoductos metálicos enterrados, la protección catódica de estructuras es mucho más simple y económica si se emplean recubrimientos adecuados.
6. - La manera más práctica de diseñar un sistema de protección catódica para una estructura enterrada consiste en montar un sistema de protección catódica temporal y modificarlo hasta alcanzar el sistema mejor adecuado, siendo éste un proceso en el cual la experiencia del diseñador tiene mucha importancia.
7. - Con el fin de que una estructura esté protegida, continuamente, por un sistema de protección catódica, es necesario que se implemente un programa de pruebas periódicas y mantenimiento preventivo.



RECOMENDACIONES

1. - No obstante las condiciones de corrosión del oleoducto TEXACO - INDE, no se consideran severas, debido a su importancia en el abastecimiento de combustible y a su muy probable utilización en los próximos 20 años, se recomienda su protección catódica.
2. - Al implementarse la protección catódica del oleoducto, convendría el diseñar un sistema de protección integral que incluyera a los tanques de almacenamiento de combustible.
3. - Se recomienda llevar a cabo una inspección más minuciosa del oleoducto y las pruebas necesarias a fin de evaluar su condición.



REFERENCIAS

- ¹ Para aquellos términos cuya definición está establecida por la norma o patrón G15-90a de la ASTM (American Society for Testing and Materials), *Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing (Terminología Patrón Relativa a Corrosión y Ensayos de Corrosión)* ésta es la que se aplica. En los restantes se da la definición, comúnmente, aceptada.
Ver: **ASTM (American Society for Testing and Materials)**. 1992 *Annual Book of ASTM Standards*. Editado por American Society for Testing and Materials, Filadelfia, vol. 03.02, 1992. Pp. 80-83
- ² La mayoría de fuentes de información en las cuales se basó esta tesis estaban en idioma inglés. Para algunos términos no fue posible obtener la traducción usual al español. "Banco de ánodos" es la traducción del autor para el término "anode bed" del idioma inglés.
- ³ **Galvele, José R.** *Corrosión*. Secretaría General de la OEA, Washington, 1979. p. 8
- ⁴ **ASTM (American Society for Testing and Materials)**. 1992 *Annual Book of ASTM Standards*. Editado por American Society for Testing and Materials, Filadelfia, vol. 03.02, 1992. P. 80.
- ⁵ **Askeland, Donald R.** *La Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1985. P. 502
- ⁶ *Ibid.*, p. 477-478.
- ⁷ *Ibid.*, p. 480.
- ⁸ **Flinn, Richard A. y Paul K. Trojan.** *Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones*. 3a. Ed. México, 1991. P.517-518.
- ⁹ Datos tomados de **Flinn**, *op. cit.*, P. 516
- ¹⁰ **Peabody, A.W.** Pipeline testing fundamentals. *Materials protection and performance*. Vol. 12, No. 2, Part 1, Feb. 1973. Pp. 25-26.

- 11 La mayoría de fuentes de información en las cuales se basó esta tesis estaban en idioma inglés. Para algunos términos no fue posible obtener la traducción usual al español. "Corrosión por corrientes perdidas" es la traducción del autor para el término "stray current corrosion" del idioma inglés.
- 12 **National Association of Corrosion Engineers (NACE).** *Corrosion Basics - An Introduction.* Edited by L.S. Van Delinder, Houston, 1984. P. 35.
- 13 *Ibid.*, p. 42.
- 14 **Fontana, M.G.** *Corrosion Engineering.* Third Edition. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1986. P. 68.
- 15 **Sudrabin, L.P.** A review of cathodic protection. Theory and practice for newcomers and oldtimers alike. *Materials protection and performance.* Vol. 2, No. 5, May 1963. P. 8.
- 16 **Cathodic Protection Services.** The exclusive CPS cylindrical zinc bracelet for cathodic protection on offshore pipelines. *Materials protection and performance.* Vol. 12, No. 2, Part 1, Feb. 1973. P. 58.
- 17 Duriron es la marca registrada de una especie de acero al silicio resistente a los ácidos. (**Robb, Louis A.** *Diccionario para ingenieros, español-inglés, inglés-español.* CECSA, México, 1993. P. 423)
- 18 **Morgan, J.H.** *Cathodic Protection.* Second Edition. National Association of Corrosion Engineers (NACE), Houston. p. 93.
- 19 *Ibid.*, p. 183.
- 20 **Peabody, A.W.**, *op. cit.*, p. 23.
- 21 **National Association of Corrosion Engineers (NACE).** *loc. cit.*, pp. 44-45.
- 22 **Clay and Bailey Mfg. Co.** *Corrosion control equipment for underground storage tanks & piping.* Clay and Bailey Mfg. Co. P.O. Box 8026, 40th Fremont Ave., Kansas City, Missouri 64129. P. 6
- 23 **Peabody, A.W.** *op. cit.*, p. 24.
- 24 *Loc. cit.*
- 25 El método estándar o patrón, equipo, procedimiento de campo, interpretación de resultados y todo lo relacionado con la medición de la resistencia eléctrica del suelo se encuentra normalizado por la ASTM en la norma G57-78, *Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.* El contenido de esta sección en su mayor parte se ha extraído de y se conforma a tal norma.
- 26 **ASTM,** *op. cit.*, p. 211
- 27 *Loc. cit.*

-
- 28 *Loc. cit.*
- 29 **ASTM**, *op. cit.*, pp. 211-212
- 30 *Ibid.*, p. 213
- 31 *Loc. cit.*
- 32 **Morgan, J.H.** *op. cit.* p. 59.
- 33 **Peabody, A. W.** *op. cit.*, p. 25.
- 34 *Loc. cit.*
- 35 **Peabody, A. W.** *op. cit.*, pp. 25-26.
- 36 **National Association of Corrosion Engineers.** *Standard RP0169-92 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.* National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1992. pp. 7-8.
- 37 **Morgan, J.H.** *op. cit.*, p. 160.
- 38 *Ibid.*, p. 172.
- 39 *Ibid.*, p. 189
- 40 Se tuvieron a la vista planos, propiedad del INDE, del oleoducto con fecha 4 de septiembre de 1,970 y planos propiedad de la refinería Texaco con fecha de 25 de enero de 1,972.
- 41 **Union Carbide Corporation**, Carbon Products Division. 270 Park Avenue, New York, N.Y. 10017. Estos ánodos también son distribuidos por:
BRANCE-KRACHY Company, Houston, Texas.
GENERAL CORROSION SERVICES, Atlanta, Georgia.
HARCO Corporation, Medina, Ohio.
WAYNE BROYLES ENGINEERING Corp. Houston, Texas.

Cuando la curva muestra un súbito aumento en la resistencia del circuito, es indicativo del agotamiento de los ánodos o falla del cable.

Después de que un sistema de protección catódica ha sido instalado y debidamente ajustado para alcanzar la protección deseada, pruebas periódicas para evaluar el nivel de protección deben de llevarse a cabo a intervalos regulares. Mensualmente al principio y después a intervalos más largos (3 meses), debe medirse el potencial oleoducto-suelo para las tres tuberías en los siguientes tres puntos: donde se entierra la tubería del lado del INDE, en la junta de dilatación, donde se entierra la tubería del lado de la refinería. La magnitud de tales mediciones debe estar siempre arriba de 0.850 voltios. Si tales valores son muy altos, es indicativo de desperdicio de corriente, y de una menor vida útil de los ánodos por lo que debe reducirse. Si tales valores son inferiores debe ajustarse la corriente, o, pueden ser indicativo de falla en alguna parte del sistema.

2. Mantenimiento y operación del rectificador

El mantenimiento y operación del rectificador de corriente, debe implementarse siguiendo las instrucciones del fabricante. Conviene destacar que es de suma utilidad el determinar, periódicamente, la eficiencia del rectificador. Una disminución demasiado grande en ésta, es indicativa de qué medidas correctivas deben de tomarse.

3. Mantenimiento de los cables

Como ya se explicó antes, el buen estado de los cables y conexiones es indispensable para el buen funcionamiento del sistema. Mucho cuidado debe tenerse al excavar en áreas donde estos cables están localizados. El dañar el aislamiento de los cables o de las conexiones, provocará que el cable expuesto se comporte como ánodo de sacrificio y se corra en forma acelerada. Al encontrarse un cable dañado, éste debe cambiarse por uno en buenas condiciones y las conexiones al resto del sistema deben ser debidamente aisladas.