

# Procesos de corrosión debidos a corrientes alternas inducidas (60 Hz)<sup>(\*)</sup>

E. Vera<sup>(\*)</sup>, J. Villarreal<sup>(\*\*)</sup> y J. H. Panqueva<sup>(\*)</sup>

**Resumen** Se determinó el fenómeno por el que una señal de c.a. de tipo sinusoidal genera fenómenos de corrosión en un acero en contacto con un electrolito agresivo. Para ello, se realizaron pruebas electroquímicas cuando una señal de las anteriores características está presente en la interfase metal-electrolito, con y sin protección catódica. Los resultados permitieron postular una relación empírica que determina la cinética del proceso corrosivo ejercido por la acción de la señal alterna. Se determinó, desde un punto de vista físico, el fenómeno por el cual la señal de c.a. genera un estado de corrosión sobre la probeta.

Palabras clave: **Corrosión inducida. Tensión alterna. Protección catódica. Interferencia eléctrica. Tensión inducida.**

## Corrosion processes due to induced alternating currents (60 Hz)

**Abstract** The phenomenon by which a sinusoidal a.c. signal damages a steel in contact with an aggressive electrolyte was determined. Thus, a series of electrochemical tests was carried out, when a signal of the previously mentioned characteristics is present in the metal-electrolyte interphase, both with cathodic protection and without it. The results allowed to postulate an empirical relationship that determines the corrosive process kinetics exerted by the action of an alternating signal. The phenomenon by which the AC signal generates a corrosion state over a probe was determined from the physical point of view.

Keywords: **Induced corrosion. Alternating voltage. Cathodic protection. Electric interference. Induced voltage.**

### 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se tiene un campo electromagnético variable atravesando un conductor de área  $A$ , se inducen tensiones sobre este conductor conocidas como “tensiones inducidas”, la ecuación que gobierna este fenómeno queda descrita por la notación maxwelliana:

$$E_B = \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dA \quad [1]$$

donde:  $E_B$  = Campo inducido, que se manifiesta físicamente como un potencial.

$A$  = Área de inducción.

$\vec{B}$  = Campo magnético alternante que atraviesa el conductor.

Una forma común de inducción de una señal de c.a. sobre un metal, en casos industriales, es la que se debe a los procesos de inducción electromagnética que un sistema de transmisión eléctrica energizado de alta tensión y de corriente alterna (c.a.) ejerce sobre los oleoductos enterrados que se encuentran con o sin protección catódica.

El incremento del trazado de oleoductos interactúa con el correspondiente aumento de áreas urbanas y suburbanas y, debido a la reducción de la disponibilidad de los derechos de vía, ha sido necesario trazar líneas de oleoductos y de conducción eléctrica de alta tensión por una ruta común, que se conoce como corredor compartido (en el caso colombiano “tramos del Oleoducto Cañolímón - Coveñas y la línea de interconexión eléctrica ISA”).

En trabajos anteriores, se ha señalado que, tanto en operaciones normales como en fallas de

(\*) Trabajo recibido el día 4 de agosto de 1995.  
(\*) Dpto. de Física. Facultad de Ciencias. Universidad Industrial de Santander. A.A. 678. Bucaramanga (Colombia).  
(\*\*) Instituto Colombiano del Petróleo. Centro de Investigación y Desarrollo. División de Ingeniería de Materiales-Área de Corrosión. A.A. 5185. Bucaramanga (Colombia).

conducción de fluido eléctrico, existen tres tipos fundamentales de interferencia eléctrica entre la línea de transmisión y el tubo de conducción del fluido o de gas (1-5). En la figura 1 se muestran estas clases de interferencia y las posibles repercusiones.

La interferencia por acoplamiento electromagnético se manifiesta como la inducción de una señal de sobretensión de c.a. en la tubería.

La realización del presente trabajo tuvo su origen en experiencias recogidas por los ingenieros encargados del área de corrosión de ECOPEPETROL, del Distrito Cañolímón-Coveñas, cuando al analizar el comportamiento del sistema de protección catódica del oleoducto, en tramos que van paralelos o se cruzan con la línea de interconexión eléctrica ISA (de 250 kV), encontraron que en estos tramos se induce una señal de c.a. de 60 Hz que se superpone a la señal de protección catódica de c.c. (6 y 7).

A nivel comercial existe *software* bastante elaborado (8 y 9), con el cual se pueden calcular los niveles de inducción electromagnética en los oleoductos, pero éstos no proporcionan suficiente información sobre los riesgos de corrosión que esta señal puede causar.

A nivel de laboratorio ya se han desarrollado investigaciones sobre el efecto corrosivo de una señal de c.a. sobre una interfase metal-electrólito (10-15), tendentes a evaluar el efecto que, en general, se presenta en los cables de conducción eléctrica subterráneos que intercambian corrientes con el electrólito que los rodea.

En el presente trabajo se propone un modelo descriptivo que trata de explicar por qué una señal de c.a. produce corrosión sobre un acero del tipo del utilizado en la construcción de oleoductos. Las pruebas realizadas consistieron en ensayos gravimétricos y medidas de polarización.

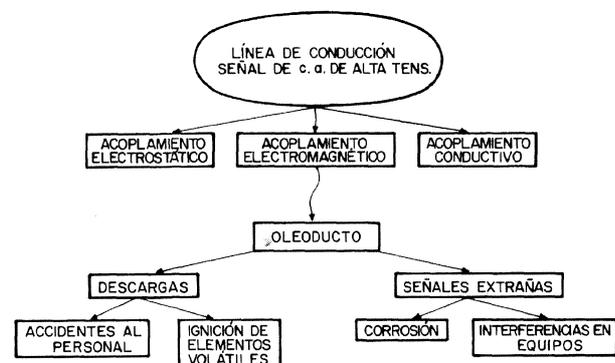


FIG. 1.— Fenomenología de la inducción electromagnética debida a líneas de conducción de alta tensión.

FIG. 1.— Phenomenology of electromagnetic induction due to high tension transportation lines.

Con los ensayos gravimétricos se intentó determinar tanto la severidad corrosiva de la señal de c.a. como la morfología del tipo de ataque que ocurría. Con los resultados de estas pruebas se estableció una ecuación empírica que relaciona la intensidad de la señal de c.a. con la velocidad de corrosión sufrida por la probeta. Con las medidas de polarización se quiso determinar el comportamiento cinético de los fenómenos electroquímicos de c.c. en la interfase metal-electrólito cuando en dicha interfase estaba presente una señal sinusoidal. Estos ensayos permitieron dilucidar una respuesta al por qué una señal de c.a. causa corrosión sobre la superficie de un metal inmerso en un electrólito en su estado de potencial de equilibrio. Los resultados obtenidos se compararon con los datos teóricos que se obtienen cuando en la ecuación de Butler Volmer se introduce un término sinusoidal.

## 2. RESULTADOS

### 2.1. Pruebas gravimétricas y análisis morfológico

Se desarrolló un diseño de ensayos en el cual una probeta testigo, de las mismas características metalúrgicas del material del oleoducto, estuvo sometida a condiciones experimentales tales que simularan el estado del oleoducto; estas condiciones fueron:

- Probeta testigo expuesta al electrólito agresivo, sin que ninguna señal eléctrica actúe sobre el testigo (blanco).
- Probeta testigo expuesta al electrólito agresivo, en presencia de una señal de c.a. en su interfase.
- Probeta testigo expuesta al electrólito agresivo, en presencia tanto de protección catódica por corriente impresa como de una señal de c.a. en su interfase.
- Probeta testigo expuesta al electrólito agresivo, en presencia sólo de protección catódica por corriente impresa.

La solución empleada es la estipulada por la norma ASTM G8-85, para pruebas de protección catódica a nivel de laboratorio. El pulido de los testigos se hizo hasta paño de 1 µm, con el único fin de fijar la reproducibilidad de estas pruebas. Así, se trata de simular alguna zona superficial del oleoducto en la cual está ocurriendo intercambio de corrientes con el electrólito que rodea el tubo, determinando, así, la severidad corrosiva de la c.a. en el metal desnudo, con y sin protección catódica.

La figura 2 muestra el montaje eléctrico general que se desarrolló para el ensayo, en el que en la interfase electroquímica se superponen dos señales

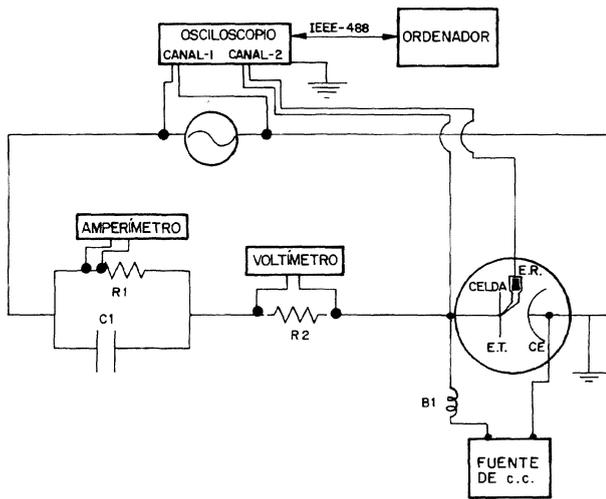


FIG. 2.— Esquema del sistema para superponer las señales de c.a. y de c.c. sobre la probeta testigo.

FIG. 2.— Fig. 2.- Scheme of the system used to superimpose AC and DC signals on the coupon.

diferentes de c.c. y de c.a. El monitoreo se hizo utilizando un osciloscopio Tektronix 2432A, que se interconectó a un ordenador, permitiendo de esta manera obtener registros impresos de los oscilogramas y realizar el análisis posterior de los datos. Los montajes para los otros tipos de pruebas se derivan de éste, eliminando algunos de los elementos presentes (16).

La figura 3 muestra un oscilograma del ensayo llevado a cabo en el laboratorio, en el cual se observa la señal oscilante de 60 Hz y alrededor de -1 V de c.c., tal y como se está presentando en los sitios

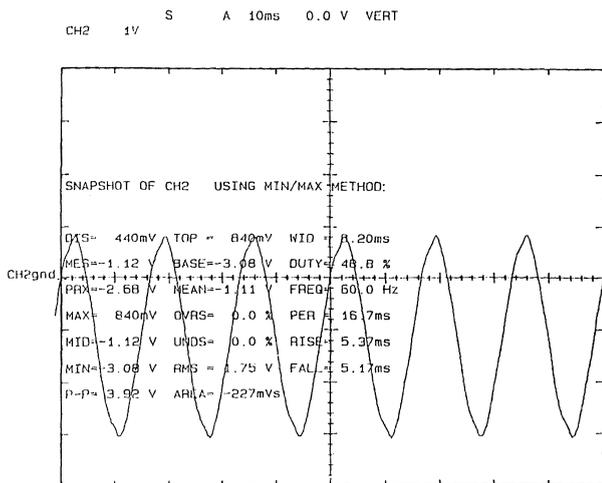


FIG. 3.— Oscilograma que muestra la superposición de las señales de c.a. y de c.c. en la interfase de la probeta testigo.

FIG. 3.— Oscilogram showing the superimpose of AC and DC signals in the interface of a coupon.

de protección óptima del oleoducto Cañolímón-Coveñas (6).

Las densidades de c.a. escogidas para la simulación, se basaron en los cálculos que se hicieron para los casos críticos del oleoducto, es decir, donde las características resistivas del suelo eran mínimas. La gama de densidades de corriente escogida permite establecer criterios de evaluación real. Sus valores se muestran en el respectivo eje de abscisas de la figura 4, en la que las velocidades de corrosión encontradas se muestran como una función de la señal de c.a. en mA/cm<sup>2</sup>, y del estado de protección catódica.

El análisis morfológico del material se llevó a cabo utilizando tanto microscopía óptica convencional como microscopía electrónica de barrido (SEM). La figura 5 muestra macroscópicamente (a 3 aumentos) el estado de una de las probetas, cuando a través de ella circula un señal de c.a. con densidad de corriente de 100 mA/cm<sup>2</sup>. En esta figura se puede observar como la señal de c.a. genera estados de corrosión muy localizados (*pitting*). La figura 6 muestra ampliada una de estas picaduras, una vez eliminados todos los productos de corrosión de la superficie de la probeta mediante la aplicación de un decapado químico.

Para la probeta blanca, se observó sólo una leve capa de productos de corrosión del hierro, que, al eliminarla, presentaba una corrosión uniforme normal.

En la probeta que estuvo sometida tanto a protección catódica como a la acción de una señal de c.a., no se observó ningún tipo de ataque. La inhibición de la corrosión llevada a cabo por la protección catódica sobre el efecto corrosivo de la señal de c.a. se explica con pruebas adicionales, dándose

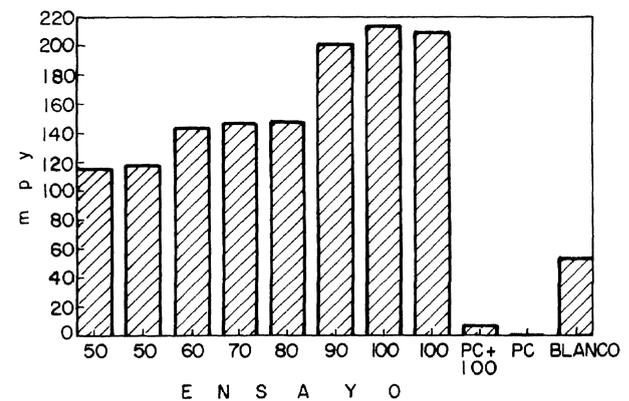


FIG. 4.— Diagrama de barras en el que se representa mpy frente a flujo de c.a. con y sin protección catódica.

FIG. 4.— Bar diagram of mpy vs AC flow with and without cathodic protection.

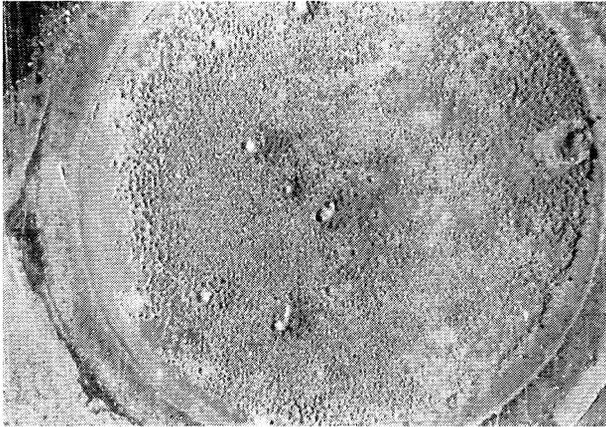


FIG. 5.— Estado de la superficie de la probeta testigo cuando a través de ella circuló una densidad de c.a. de 100 mA/cm<sup>2</sup>.

FIG. 5.— Surface state of the coupon when a 100 mA/cm<sup>2</sup> AC density circulated through it.

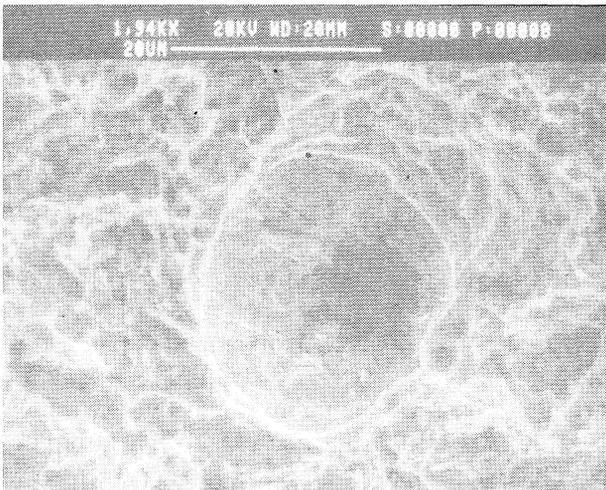


FIG. 6.— Ampliación de una picadura de la superficie de la probeta testigo que estuvo sometida a una densidad de c.a. de 10 mA/cm<sup>2</sup>. Los productos de corrosión se eliminaron mediante decapado químico.

FIG. 6.— Magnification of a pit on the surface of the coupon exposed to a 10 mA/cm<sup>2</sup> AC density. The corrosion products were eliminated by a chemical cleanser.

el argumento correspondiente en análisis de los resultados.

## 2.2. Medidas de potencial

Se llevaron a cabo medidas de potencial de reposo, con presencia de la señal de c.a., en la interfase metal-electrolito. El montaje experimental utilizado se muestra en la figura 7.

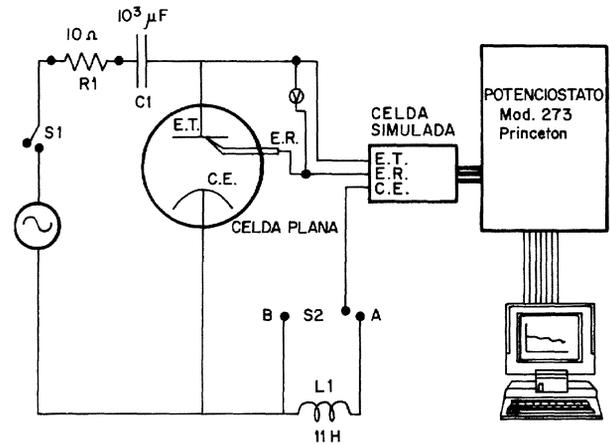


FIG. 7.— Montaje experimental para medir el estado de polarización de la probeta testigo que estuvo sometida a la acción de la señal de c.a.

FIG. 7.— Experimental assembly used to measure the polarisation state of the coupon exposed to the action of the AC signal.

Para la toma de los valores de potencial se utilizó un potenciostato de la marca Princeton, modelo 273A, por sus características de estabilidad y filtrado. En esta etapa se observó, como hecho principal, que a medida que aumenta la intensidad de la señal de c.a. en la interfase electroquímica, el potencial de corrosión de la probeta se desplaza en sentido activo, tal y como se puede observar en la figura 8. Este resultado indicó que en la interfase aparecía una componente de c.c., generada por la señal de c.a., que incrementaba el estado de polarización de la probeta en sentido activo.

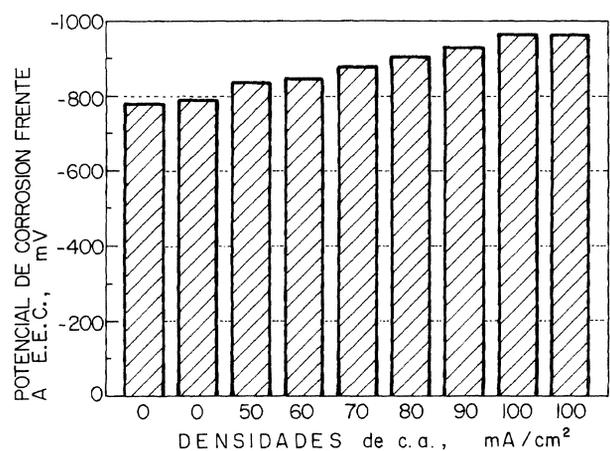


FIG. 8.— Tendencia de polarización del potencial de corrosión debido a la presencia de una señal de c.a. en la intercara del electrodo.

FIG. 8.— Polarization tendency of the corrosion potential due to the presence of an AC signal in the interface of the electrode.

### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 3.1. Pruebas gravimétricas y morfológicas

A partir de los datos gravimétricos obtenidos se realizó un análisis estadístico (17), que permitió predecir la cinética del proceso corrosivo. La relación que se encontró entre la señal de c.a., en intensidad de corriente, y la velocidad de corrosión, fue:

$$V = e^{(4,04643 + 0,013427\rho)} \quad [2]$$

donde:  $V$  = Velocidad de corrosión, mpy.

$\rho$  = Densidad de c.a., mA/cm<sup>2</sup>, que se superponía a la interfase.

Como se puede ver en esta ecuación, la cinética que domina el proceso de corrosión es de tipo exponencial.

Del análisis morfológico, se concluye que la señal de c.a. induce corrosión, cuya severidad aumenta en forma exponencial al incrementar la densidad de c.a., y con características de picado.

#### 3.2. Pruebas de polarización

Los datos que ofrece la figura 8 muestran cómo el potencial de reposo de la muestra bajo la influencia de la señal de c.a. se desplaza en sentido activo, desplazamiento que se incrementa con el aumento de la señal de c.a. Esto significa que los procesos de corrosión se ven favorecidos, pues la zona de inmunidad queda reducida drásticamente. Este desplazamiento indica que en la interfase de la probeta aparece una señal de c.c. generada por la acción de la señal de c.a. La aparición de esta señal de c.c. en la interfase se explica por la presencia de un proceso de rectificación faradéica debido a un comportamiento asimétrico de la interfase en los dos posibles estados de polarización de la onda (catódico y anódico), tal y como se concluye en la ecuación [4].

Cuando el nivel de intensidad de la señal de c.a. sobrepasa un umbral límite (en soluciones de alta conductividad dicho umbral es del orden de 50 mV), la interfase empieza a comportarse alinealmente, es decir, la ley de Ohm no se cumple para todos los procesos gobernados por señales de c.c.

El análisis desarrollado consistió en introducir en la ecuación de Butler-Volmer un término adicional relativo a la corriente de tipo sinusoidal:

$$i = i_0 \text{sen}(\theta) \quad [3]$$

término de tipo sinusoidal que simula la densidad de c.a. que aparece en la interfase. Para el desarrollo, se consideraron criterios de contorno, tales como polarización de c.c. externa nula. El resultado de este análisis fue:

$$\overline{\delta\phi} = \left( \frac{\beta_a}{1+k} \right) \ln \frac{e^{-k\xi/\beta_a}}{\xi/\beta_c} \quad [4]$$

donde:  $\overline{\delta\phi}$  = Potencial de c.c. promedio que aparece en la interfase.

$\beta_a, \beta_c$  = Pendientes anódica y catódica de Tafel.

$\kappa$  = Término adimensional.

$\xi$  = Cambio del potencial fluctuante de la señal de c.a.

Es conocido en corrosión el hecho de que, para algunos sistemas, tales como el utilizado en este trabajo, las pendientes de Tafel son diferentes (18). Ello permite sustentar que la generación de la componente en c.c. en la interfase se debe a la asimetría en el comportamiento de la interfase ante la presencia de campos eléctricos oscilantes.

Si el valor de  $k$ , se aproxima a 1, y las pendientes de Tafel son diferentes, el logaritmo neperiano va a ser diferente de 0, apareciendo entonces un potencial promedio en la interfase.

Cuando un campo eléctrico oscilante que describe el comportamiento de una corriente, tal como la dada en la ecuación [3], aparece en la interfase de un electrodo inmerso en un electrolito, los procesos físico-químicos que se desarrollan tienen un comportamiento asimétrico para cada  $\lambda/2$  ( $\lambda$ : longitud de onda de la señal sinusoidal) del campo eléctrico oscilante, apareciendo una componente de campo eléctrico constante que se manifiesta como un potencial cuando se mide por medio de un electrodo de referencia, tal y como se describe en la ecuación [4].

Este resultado concuerda con el hecho de que cuando sobre la interfase aparece la protección catódica, la corrosión resulta inhibida debido a que el campo eléctrico estacionario y constante, que polariza en dirección activa, es inhibido por el campo eléctrico estacionario y constante impuesto por la protección catódica.

Este proceso de inhibición se debe al hecho de que las líneas de campo tienen características vectoriales, y al sumarse dos de estas líneas que tienen sentido contrario (polaridad invertida), se anula el efecto físico que describen estas líneas de campo.

Cabe aclarar que los procesos corrosivos que ocurren sobre la superficie metálica están gobernados completamente por campos eléctricos estacionarios constantes, siendo el campo eléctrico variable responsable sólo de crear el campo de polarización.

#### 4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un diseño de ensayos con el que se pudo evaluar electroquímicamente la incidencia de un flujo de corriente alterna sinusoidal a través de la superficie de un acero protegido por un recubrimiento, y en regímenes de protección catódica por corriente impresa.

Se encontró que un flujo máximo de 100 mA/cm<sup>2</sup> de c.a., actuando sobre una superficie de acero en contacto con un electrólito agresivo, incrementa la velocidad de corrosión en un 75,14 %.

Pero una adecuada protección catódica disminuye en un 96,3 % el efecto corrosivo simultáneo del electrólito agresivo y de la corriente alterna sinusoidal.

#### Agradecimiento

Los autores agradecen al Instituto Colombiano del Petróleo y al Distrito Canolímón-Coveñas, de ECOPEPETROL, el apoyo económico para la ejecución del proyecto. Igualmente agradecen a los Ingenieros Msc. Clemente Retamoso y Custodio Vásquez, de la Universidad Industrial de Santander (Colombia), la evaluación crítica del trabajo.

#### REFERENCIAS

- (1) TORRES, A. y PENA, A. Estudio de voltajes inducidos en el oleoducto Cañolímón-Coveñas. Consultoría Colombiana. Bogotá D.E. Sep., 1990.
- (2) DABKOWSKI, J. y TAFLOVE, A. Mutual Desing Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas

Transmission Pipelines. Electric Power Reasearch Institute. Research project 742-1.

- (3) PEABODY, A.W. Control of Pipeline Corrosion. National Association of Corrosión Engineers (NACE). 1967.
- (4) DABKOWSKI, J. Induced AC on Pipelines. Paper Number 240, Corrosion/90. Las Vegas, Nevada. 1990.
- (5) DABKOSWKI, J. The Calculation of Magnetic Coupling from Overhead Transmission Lines. IEEE, Vol. PAS-100, 8 (1981) 8.
- (6) VILLARREAL, J. y Área de Corrosión del Distrito Cañolímón-Coveñas. Comunicación Privada. ECOPEPETROL. Colombia, 1990.
- (7) Comunicación interna del Distrito Cañolímón-Coveñas al Instituto Colombiano de Petróleo (ICP). ECOPEPETROL. Colombia, 1990.
- (8) DAWALIBI, F.P. y SOUTHEY, R.D. An Efecctive Tool to Analyze Pipeline Interference Problems. Pipeline Industrie. Sep., 1988.
- (9) DAWALIBI, F.P. Computerized Analysis of Power and Pipelines Proximity Effects. IEEE. Vol PWRD-1, No. 2. Apr. 1986.
- (10) VENKATESH, D. y CHIN DER-TAU. *Israel J. Chem.*, 18, 1979:
- (11) Barker, G. *Nature*, (4.604), 1958: 25.
- (12) HIDEO, I. *J. Am. Chem. Soc.*, 83, 1961: 3.763.
- (13) DEVAY, J. *Acta Chemica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 52, 1967: 201-203.
- (14) DEVAY, J. *Acta Chemica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 53, 1967.
- (15) BERTOCCI, U. Corrosión Induced by an Alternating Voltage: A Comparison Between Theorical Predictions and Experimental Results. Corrosion/79, Paper No. 242. Atlanta, Georgia. 1979.
- (16) VERA, E. Tesis Magister en Ciencias: Física. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia), 1993.
- (17) Statgraphics, Graphic Software Systems, Inc. Versión 2.16, 1985.
- (18) VILLARREAL, J. *Boletín CIT*, Colombia, año 5, No. 8, Ago., 1992.