



TECNOLOGÍA TOTAL
INGENIERÍA EN INTEGRIDAD Y CORROSIÓN

INTERFERENCIA AC EN SISTEMAS DE DUCTOS



Normas de referencia

- NACE Standard RP0177, Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems.
- CGA Standard OCC-3, Recommended Practice OCC-3 for the Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Pipelines, Metallic Structures and Corrosion Control Systems.
- AGA and EPRI Catalog L51278 Vol. 1 and Vol 2. Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas Transmission Pipelines.
- IEEE Standard 80, Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- NFPA Standard 70, National Electric Code.
- OSHA Standard 2207, Construction Safety and Health Regulations.

Documentos de referencia

- Peabody, A. W., and A. L. Verhiel, "The Effects of High Voltage Alternating Current (HVAC) Transmission Lines on Buried Pipe Lines," Paper No. PCI-70-32, Presented at the Petroleum and Chemical Industry Conference, Tulsa, Oklahoma, Sept. 15, 1970.
- Kirkpatrick, E. L. "Induced AC Voltages on Pipe Lines May Present a Serious Hazard," Pipe line and Gas Journal, October, 1997; Dabkowski, J., "A
- Statistical Approach to Designing Mitigation for Induced AC Voltages on Pipelines," Materials Performance, August, 1996.
- Pipeline and Gas Industry, June 1999, Vol 82 No. 6. Induced AC creates problems for pipelines in utility corridors, John S. Smart - John S. Smart Consulting.
- Engineers, Houston Texas; Dirk L. Van Oostendorp – Paragon Engineering Services, Houston, Texas; and William A. "Bud" Wood, ARCO Pipeline Company, Houston, Texas.

Documentos de referencia (cont.)

- "Lightning Phenomena," Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 4th Ed., Westinghouse Electric Corp., East Pittsburgh, PA, 1964; Lichtenstein.
- Joram, "AC and Lightning Hazards on Pipe Lines," Materials Performance, December, 1992.
- Gleekman, L. W., Materials Performance, Vol. 12, No. 8, August, 1973.
- "The Polarization Cell Replacement — PCR," Dairyland Electrical Industries Bulletin, No. 1100 (manufacturer's technical literature); Von Baeckmann, W., et. al.
- Handbook of Cathodic Corrosion Control, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1997.

Antecedentes

- Incremento en la cantidad de líneas de alta tensión.
- Trenes electrificados por AC.
- Revestimientos de gran aislamiento.
- El uso de corredores utilitarios. (derecho de vía compartido)
- Incremento en las cargas de corriente en los conductores.
- Mejores recubrimientos disponibles en el mercado.



Riesgos de la inducción AC

- Riesgos de corrosión AC:
 - 709 casos conocidos (23 en Europa, año 2000).
 - 4 fugas por corrosión AC. (Fuente: Geocor, WWI Procast S.L., año 2,000).
- Riesgo de seguridad.

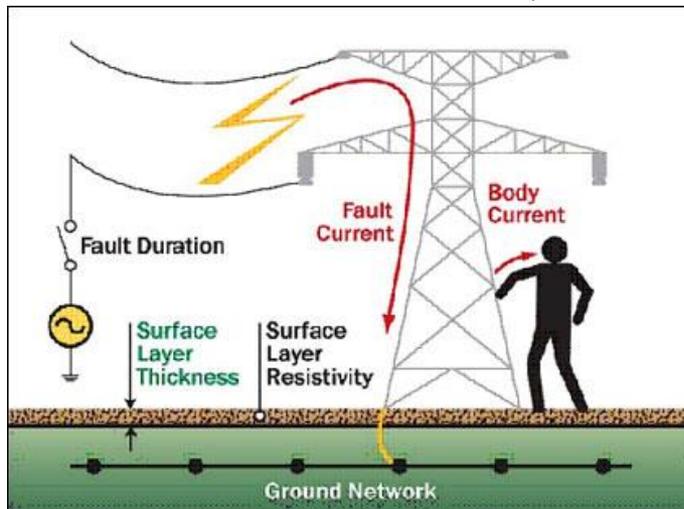
Riesgos de seguridad – Voltajes de toque

El voltaje de toque (“touch voltage”) es definido como la diferencia de potencial entre una estructura metálica enterrada y un punto sobre la superficie del terreno, separado por una distancia igual al alcance horizontal máximo normal (aproximadamente un 1metro).

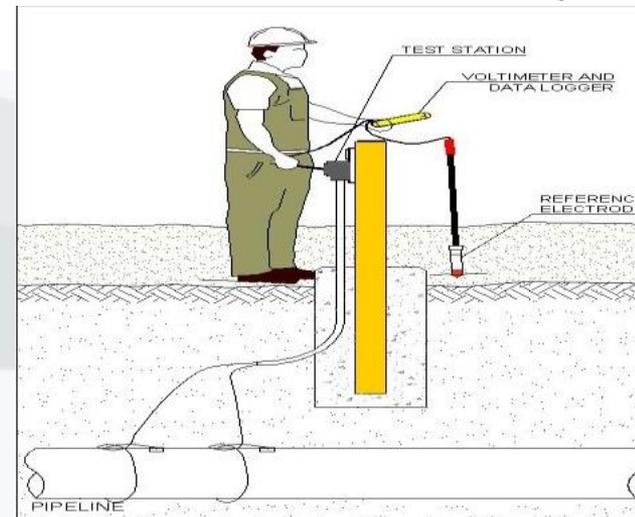
Riesgos de seguridad – Voltajes de toque (Cont.)

Considerando la Resistencia del cuerpo humano y la Resistencia entre el pie y la tierra (la cual depende de la resistividad del suelo ρ ohm-m), varias ecuaciones han sido desarrolladas para predecir los máximos voltajes que pueden ser tolerados desde una mano hasta el pie (voltaje de toque) o desde pie a pie (voltaje de paso) para distintos pesos de cuerpo como sigue:

$$V_{\text{touch}_{70}} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$



$$V_{\text{touch}_{50}} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

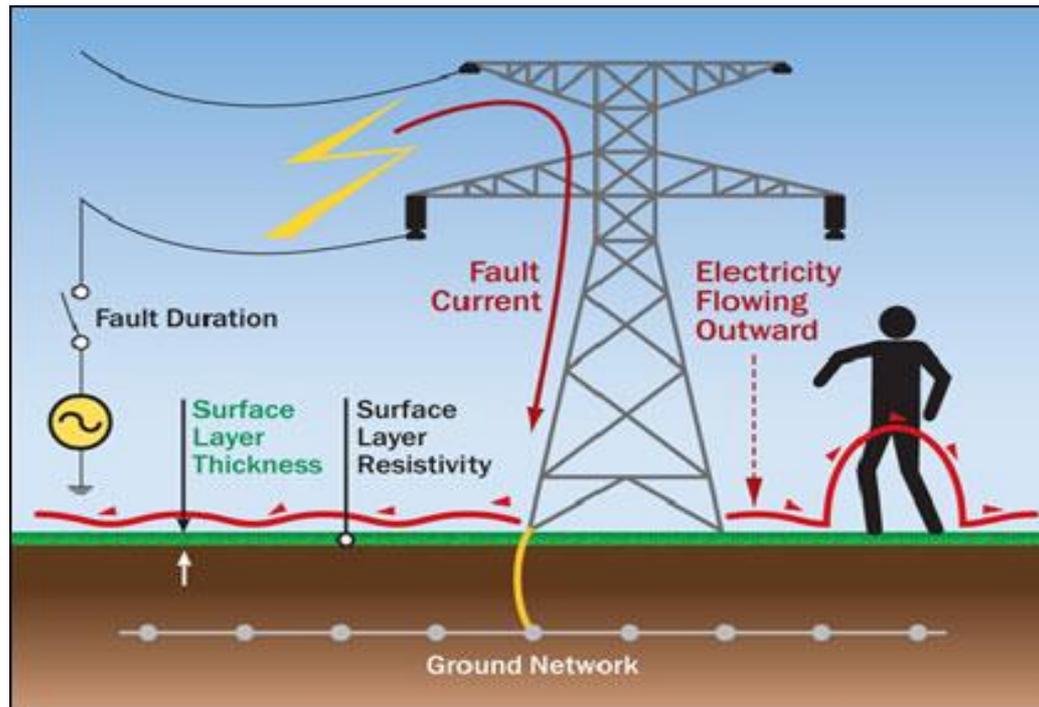


Riesgos de seguridad – Voltajes de paso

El voltaje de paso (“step voltage”) es la diferencia de potencial entre dos puntos sobre la superficie del terreno separado por una distancia de un paso (aproximadamente un 1m) en la dirección del máximo gradiente de potencial.

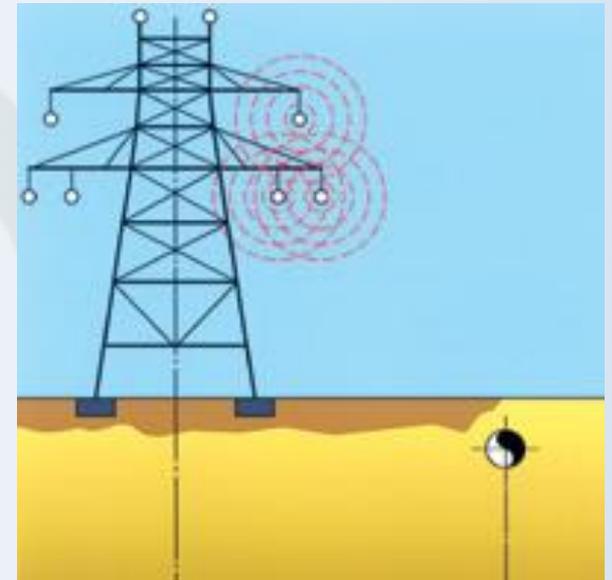
$$V_{\text{step}_{10}} = (1000 + 6\rho) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$V_{\text{step}_{50}} = (1000 + 6\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$



Interferencias AC

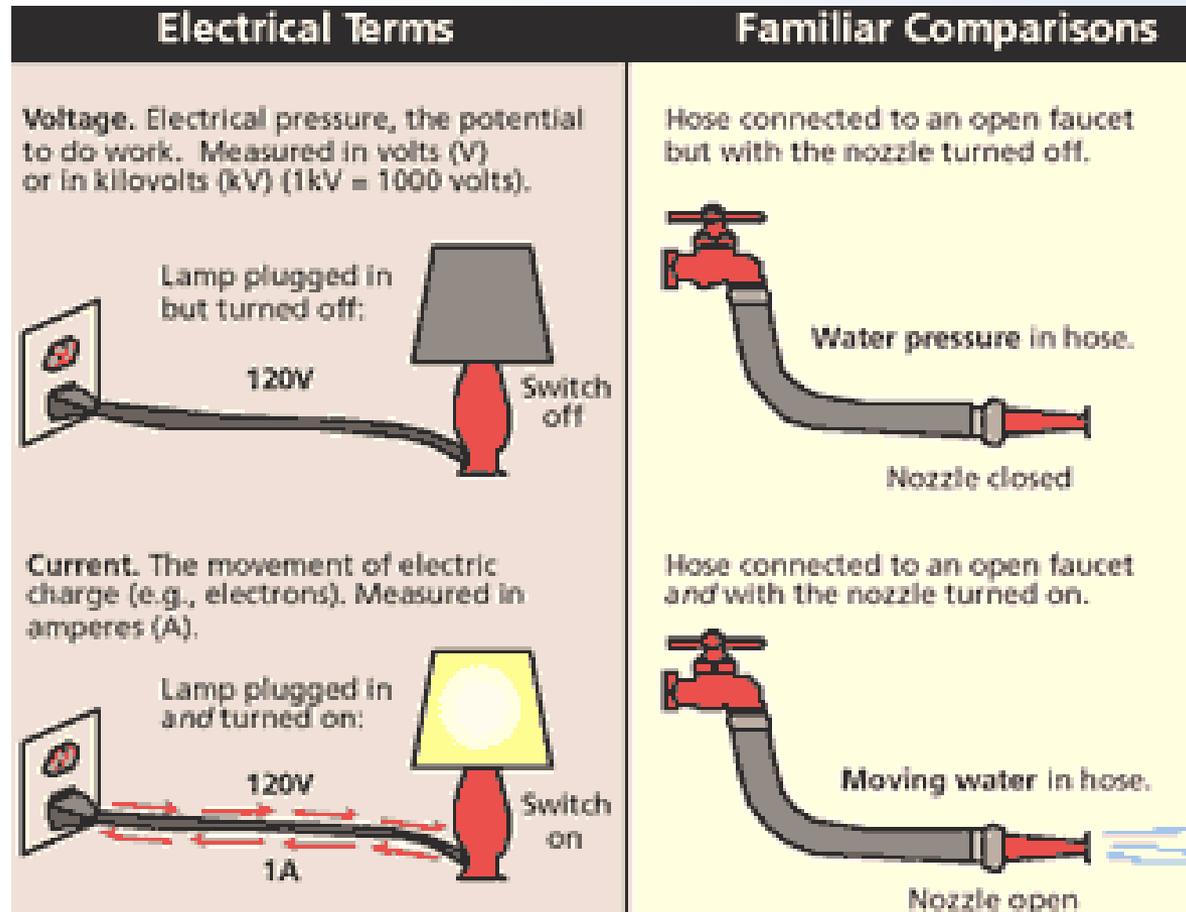
- Se presenta cuando existen tuberías próximas a las líneas de transmisión de alta tensión y sistemas de distribución.
- Se crea un campo magnético por el flujo de corriente alternante.
- Cualquier objeto metálico sujeto a un campo electromagnético alterno exhibirá un voltaje inducido. Además, fallas en los conductores de potencia a la tierra pueden causar altas corrientes en las estructuras enterradas.



Formas de inducción de corrientes y voltajes AC

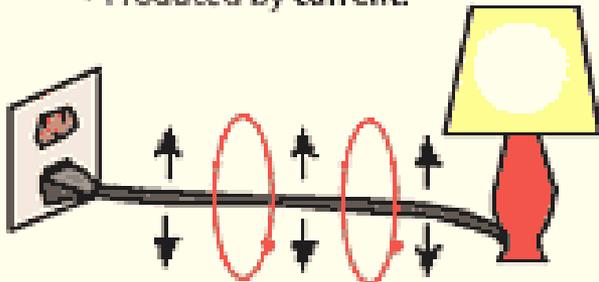
- **Inducción electrostática o capacitiva**, donde la estructura actúa como un lado del capacitor con respecto a la tierra. Esta es importante únicamente cuando la estructura es aérea.
- **Inducción electromagnética o inductiva**, donde la estructura actúa como un simple giro secundario de un transformador de núcleo de aire en la cual la línea de poder aérea es la primaria. Este tipo de inducción podría ocurrir cuando la estructura es tanto aérea como bajo tierra.
- **Acople resistivo o conductivo**, donde la potencia AC es transmitida a la tierra y luego fluye sobre y fuera de la estructura enterrada.

Formas de inducción de corrientes y voltajes AC



Formas de inducción de corrientes y voltajes AC (cont.)

A Comparison of Electric and Magnetic Fields

Electric Fields	Magnetic Fields
<ul style="list-style-type: none">• Produced by voltage.	<ul style="list-style-type: none">• Produced by current.
	
<p>Lamp plugged in but turned off. Voltage produces an electric field.</p>	<p>Lamp plugged in and turned on. Current now produces a magnetic field also.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Measured in volts per meter (V/m) or in kilovolts per meter (kV/m).• Easily shielded (weakened) by conducting objects such as trees and buildings.• Strength decreases rapidly with increasing distance from the source.	<ul style="list-style-type: none">• Measured in gauss (G) or tesla (T).• Not easily shielded (weakened) by most material.• Strength decreases rapidly with increasing distance from the source.

Tesla (T) es el estándar internacional $1 T = 10,000 G$

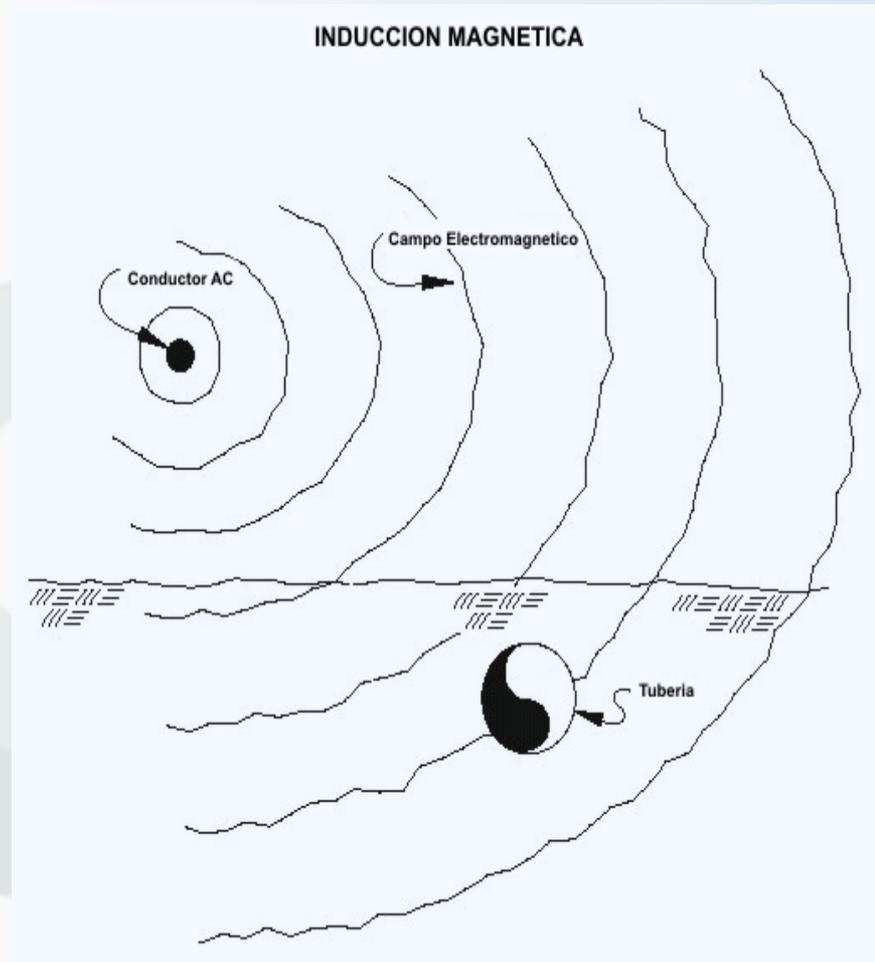
Interferencias AC

Cuando una línea de alta tensión transporta una carga de corriente eléctrica, se produce un campo magnético alrededor de los cables el cual se acopla a las tuberías que fluyen paralelas causando un voltaje y una corriente alternante inducida.



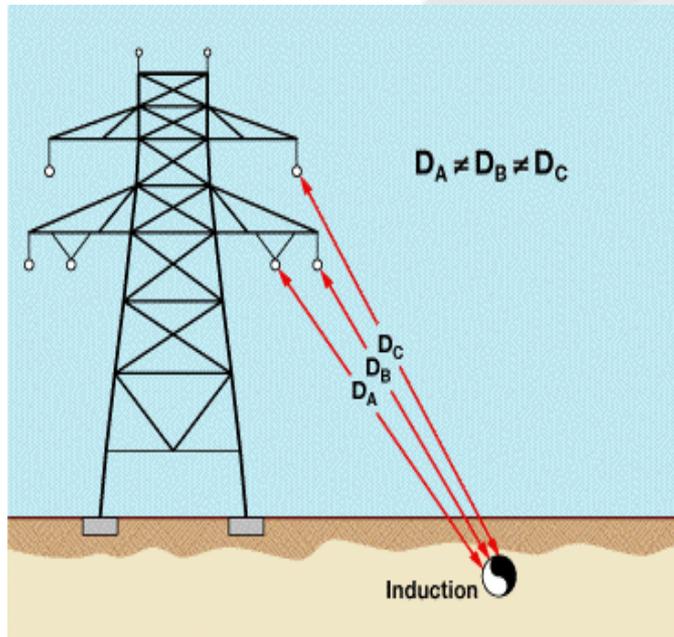
Potencial inducido sobre una tubería

Donde exista una tubería recubierta, eléctricamente continua y paralela a un sistema de transmisión AC por largos espacios (usualmente medido en kilómetros), podría existir una inducción de voltaje en la tubería



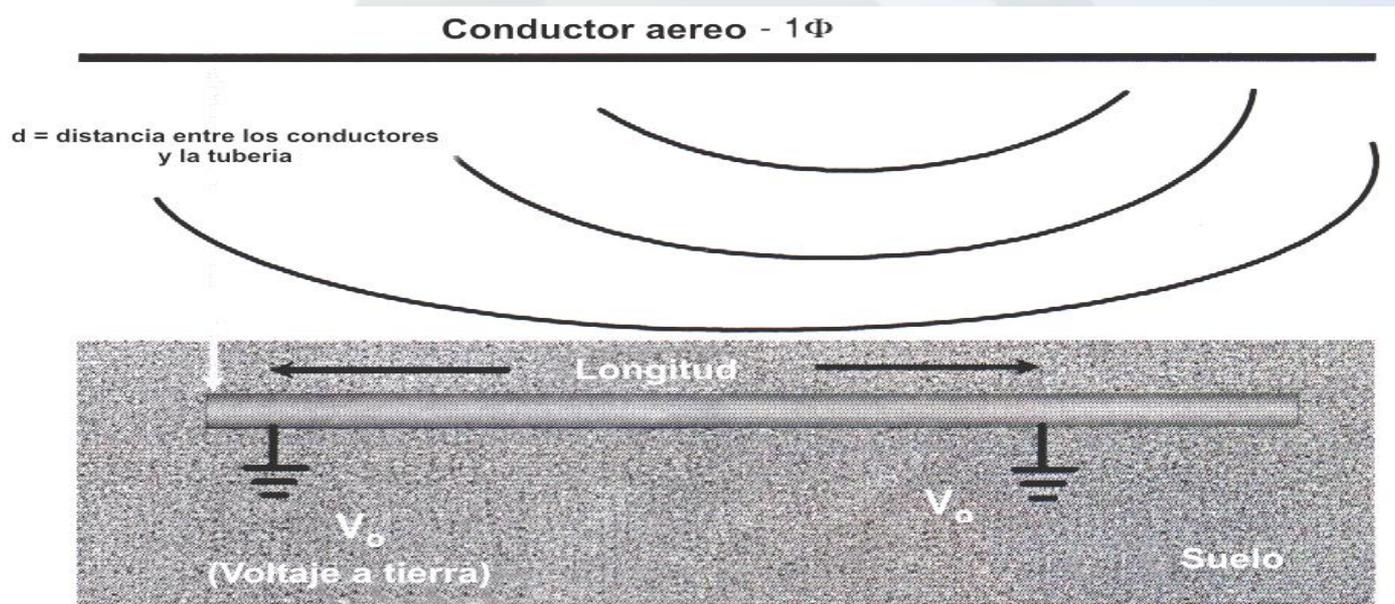
Diferentes distancias entre la tubería y cada fase de la línea de transmisión

- Si una tubería está lo suficientemente cerca y paralela a la línea de transmisión eléctrica, el campo electromagnético “penetrará” la tubería en ángulos rectos

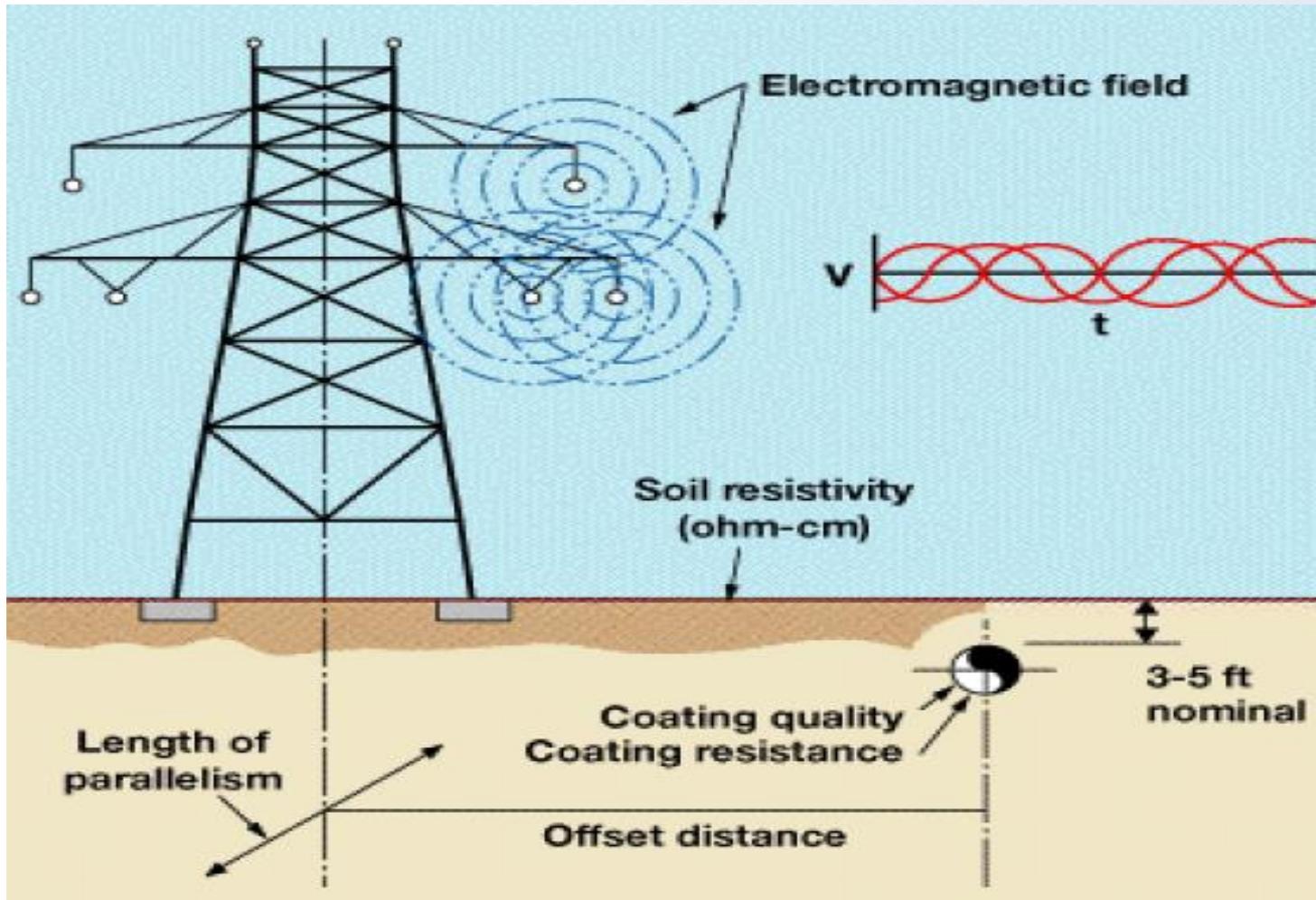


Voltajes AC inducidos electromagnéticamente

La magnitud de corriente parásita resultante es directamente proporcional a la fase de la corriente ($I\phi$) y de magnitudes relativas como a la longitud (L) de exposición mutua; y es inversamente proporcional a la distancia relativa (d) entre la estructura y los conductores de la línea de potencia.

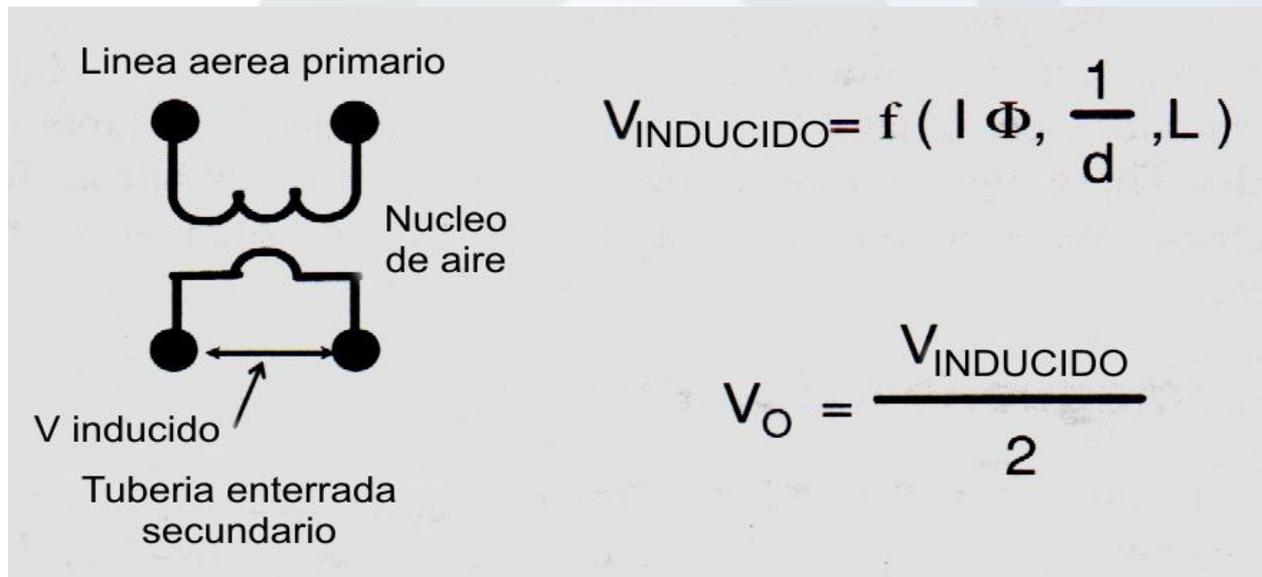


Voltajes AC inducidos electromagnéticamente (cont.)



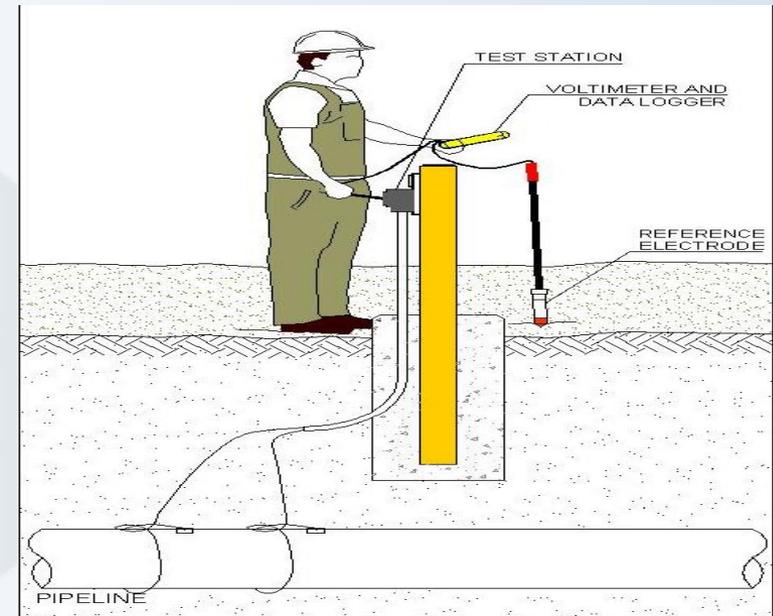
Voltajes AC inducidos electromagnéticamente (cont.)

- La tubería actúa como un simple giro secundario de un transformador de núcleo de aire, y las líneas de potencia AC aéreas son primarias. El voltaje inducido (V_{inducido}) aparece al otro lado del final de la tubería.
- El voltaje a tierra (V_o) en cada extremo de la estructura es la mitad del voltaje total inducido.



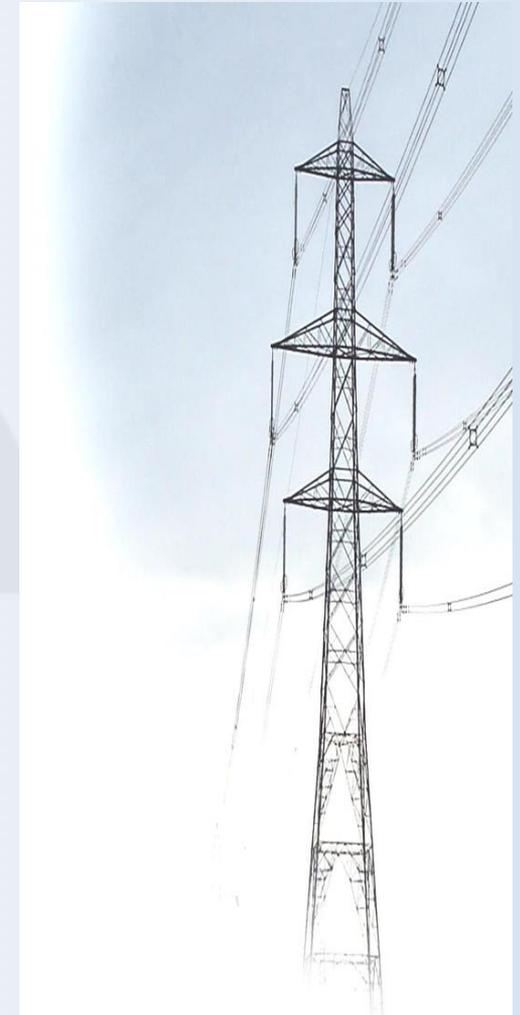
Identificación de las corrientes AC

- Las corrientes debidas a interferencias AC pueden ser fácilmente identificadas mediante la medición de potenciales de voltaje AC de la estructura con respecto a la tierra”.
- El electrodo de referencia usado para mediciones de protección catódica puede ser usado como contacto a tierra., no obstante la norma NACE RP0177 recomienda que se realice con una varilla metálica como referencia.



Consideraciones en estudios de mitigación AC

- Causas de interferencia en la tubería.
- Cálculo de la inducción.
- Cálculo del Campo Eléctrico Longitudinal (LEF).
- Cálculo del nivel de voltaje.
- Principales factores que influyen el voltaje inducido.
- Corrosión por interferencias AC.
- Características de la corrosión AC.
- Factores que afectan la corrosión AC.
- Métodos de mitigación.
- Sistemas de aterrizamiento.



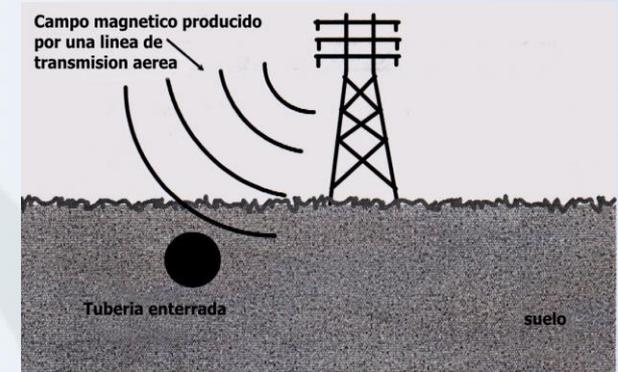
Causas de interferencia en la tubería

- Magnitud de corriente en los conductores de fase de la misma línea de transmisión (conductiva).
- Corrientes de falla en la línea de transmisión (Interferencia inductiva y conductiva).
- Inyección de corrientes en el tubo (fallas a tierra). (Interferencia conductiva).
- Densidad de flujo magnético.
- Campo eléctrico longitudinal



Cálculo de la inducción

- Determinar las distancias y ubicaciones apropiadas de los conductores en la geometría del derecho de vía.
- Usando la ecuación de Carson, determinar los campos eléctricos longitudinales (LEF) conducidos por la tubería a lo largo de su completa longitud.
- Determinar la constante de propagación y la impedancia característica de los parámetros eléctricos y físicos de la estructura (tubería).
- Desarrollar un modelo del circuito con la estructura y resolverlo para determinar el voltaje y la corriente inducida (Con software especializado).



Cálculo del campo eléctrico, longitudinal y de nivel de voltaje

- Campo eléctrico longitudinal (LEF):

$$E = - \left[z_{\phi o}^T - z_{so}^T * Z_{ss}^{-1} * Z_{s\phi} \right] * I \quad \text{volts/m}$$

Donde:

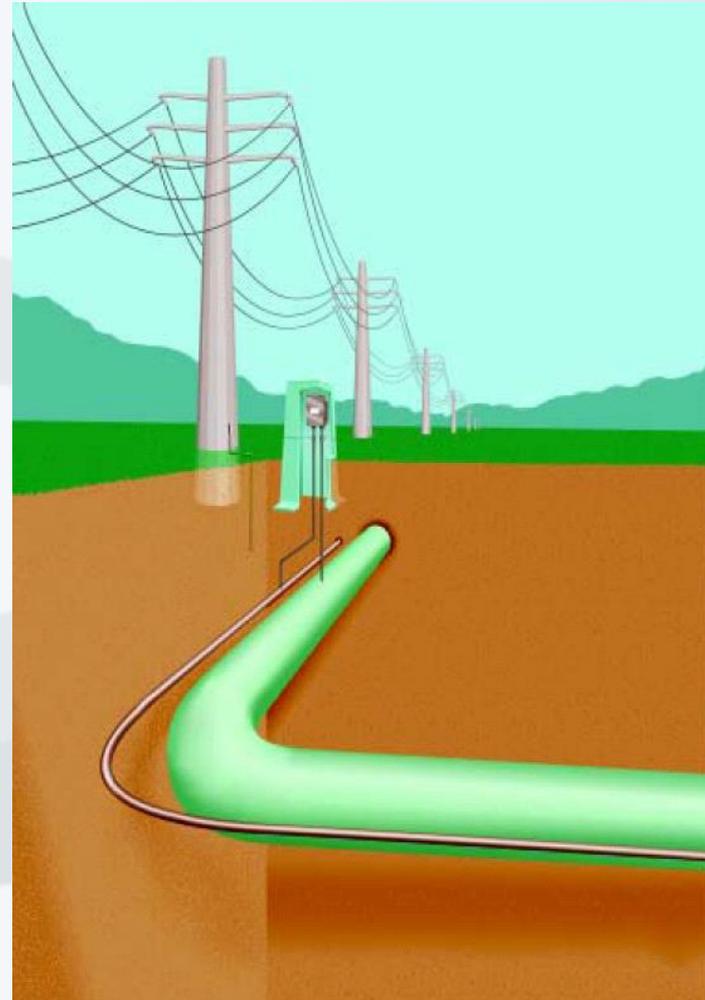
- $n\phi$ conductores en fase activa, y
- ns cables de protección pasiva

- Nivel de Voltaje:

$$V(x) = \frac{E_o}{\gamma} \frac{\{ [Z_2(Z_1 - Z_o) - Z_1(Z_2 + Z_o)e^{\gamma L}] e^{-\gamma x} - [Z_1(Z_2 - Z_o) - Z_2(Z_1 + Z_o)e^{\gamma L}] e^{\gamma(x-L)} \}}{[(Z_1 + Z_o)(Z_2 + Z_o)e^{\gamma L} - (Z_1 - Z_o)(Z_2 - Z_o)e^{-\gamma L}]}$$

Principales factores que influyen en el voltaje inducido

- La resistencia del recubrimiento de la tubería, fuerza o dureza dieléctrica y calidad.
- La resistencia longitudinal de la tubería.
- La longitud a la cual se encuentra paralela el sistema eléctrico de transmisión y la tubería.



Corrosión por interferencia AC

- Menor que la experimentada por DC ($\pm 1\%$).
- f (metal, densidad de corriente alterna inducida).
- El cobre sufre mucho menos daño que el acero.
- Metales activo-pasivos (acero inoxidable y aluminio), daño más grande.
- Puntos de descarga (orificios 1cm^2).
- Arco eléctrico (Rayos).



Características de la corrosión AC

- Orificio hemisférico.
- Condiciones de pH altos.
- Montículo duro como producto de la corrosión es producido sobre el orificio.
- Apariencia dendrítica, brillantes, con pequeñas “montañas” en los centros de los hoyos.



Características de la corrosión AC (cont.)

- Densidades de corriente $< 20 \text{ A/m}^2$, la corrosión no es probable.
- Densidades de corriente AC entre $20 \text{ y } 100 \text{ A/m}^2$, la corrosión es impredecible.
- Densidades de corriente $> 100 \text{ A/m}^2$, debe esperarse corrosión.



Métodos de monitoreo – Unidad de monitoreo remoto / datalogger

Aplicaciones:

- Medición de densidad de corrosión de corriente alterna (AC).
- Monitoreo de enlaces críticos.
- La integridad y calidad de la mitigación (AC).
- Estudios de campo CP - ferrocarril eléctrico, líneas de transmisión, y cruce de gasoductos.
- Prueba de punto de monitoreo CP (protección catódica).



WATCHDOG P2S-AC

Identificación de corrosión AC

INFORMACIÓN	SI	NO
¿Presencia de Voltaje AC en la tubería?		
¿Presencia de una discontinuidad en el recubrimiento (Usualmente muy pequeña hasta algunos centímetros)		
¿Presencia de corrosión?		
¿Los valores de protección catódica mostraron criterios aceptables?		
¿Valores de pH típicamente altos > 10 ?		
¿La forma del pitting de corrosión es una esfera cilíndrica (Como el negativo de una esfera)?		
¿El pitting de corrosión es más grande que la discontinuidad en el recubrimiento?		
¿Los productos de corrosión pueden ser fácilmente removidos en una sola pieza?		
¿Después de la remoción de los productos de corrosión, una capa dura negra queda visible en la superficie del acero?		
¿Terreno de baja/muy baja resistividad?		
¿Presencia de un área grande de recubrimiento levantada (un halo es visible alrededor del acero en el pitting de corrosión)		
¿Presencia de una capa más allá del área corroída o entre los productos de corrosión con altas concentraciones de carbonato de calcio?		
¿Presencia de magnetita entre los productos de corrosión (fácilmente determinada por la presencia de un imán)?		
¿Presencia de una formación de suelo tipo "piedra dura"?		

Formulario de probabilidad de riesgo por corrosión AC. GEOCOR, AC CORROSIÓN IN A PROTECTED PIPELINE.

Identificación de corrosión AC (cont.)

INFORMACIÓN	SI	NO	OBSERVACIONES A LA RESPUESTAS
¿Presencia de Voltaje AC en la tubería?	X		Si ha existido en los primeros 2 años de construcción, niveles que se estiman entre 5-12 V _{AC} y a partir del tercer año se introduce aterrizamiento de la tubería en las válvulas a través de SSD que baja los voltajes inducidos por debajo de 3 V _{AC} aproximadamente.
¿Presencia de una discontinuidad en el recubrimiento (Usualmente muy pequeña hasta algunos centímetros)	X		Efectivamente se correlaciona adecuadamente con el tipo de morfología encontrada en las picaduras, lo cual se puede observar a detalle en el Anexo 1.
¿Presencia de corrosión?	X		Si efectivamente hay presencia de corrosión en todas las picaduras encontradas.
¿Los valores de protección catódica mostraron criterios aceptables?	X		Efectivamente cierto y una preocupación debido a que a pesar de obtener potenciales adecuados de protección catódica se presente la anomalía.
¿Valores de pH típicamente altos > 10 ?			No se realizó la prueba.
¿La forma del pitting de corrosión es una esfera cilíndrica (Como el negativo de una esfera)?	X		Efectivamente, Ver Anexo 1.
¿El pitting de corrosión es más grande que la discontinuidad en el recubrimiento?	X		Efectivamente se pudo apreciar esto en la indicación No. 14 que fue evaluada en campo.
¿Los productos de corrosión pueden ser fácilmente removidos en una sola pieza?	X		No se realizó la prueba.
¿Después de la remoción de los productos de corrosión, una capa dura negra queda visible en la superficie del acero?	X		Efectivamente, ver las diferentes indicaciones del Anexo 1.
¿Terreno de baja/muy baja resistividad?	X		Efectivamente, Valores promedio de 180 ohm-cm para las dos muestras de arena de campo.
¿Presencia de un área grande de recubrimiento levantada (un halo es visible alrededor del acero en el pitting de corrosión)	X		Efectivamente el recubrimiento es levantado y la corrosión progresa bajo el recubrimiento. La mancha (halo) no se presenta en todos las picaduras.
¿Presencia de una capa más allá del área corroída o entre los productos de corrosión con altas concentraciones de carbonato de calcio?		X	Se presenta en algunos pitting.
¿Presencia de magnetita entre los productos de corrosión (fácilmente determinada por la presencia de un imán)?			No se realizó la prueba.
¿Presencia de una formación de suelo tipo "piedra dura" en los productos de corrosión?	X		Efectivamente la mayoría de las picaduras presentan este tipo de formación.

Factores que afectan la corrosión AC

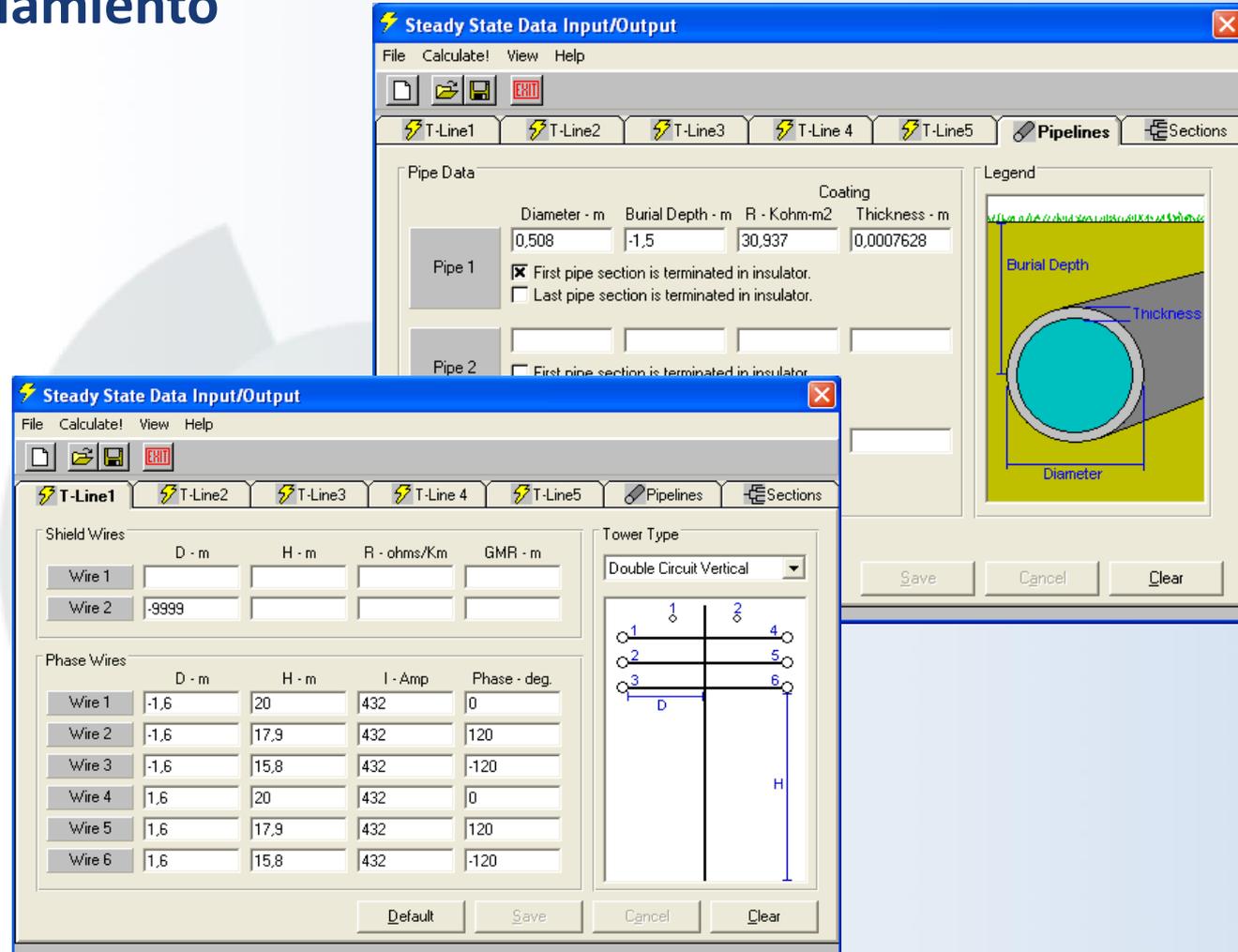
- La densidad de corriente AC sobre las velocidades de corrosión.
- Densidad de corriente CP.
- Frecuencia AC.
- Ambiente.
- Temperatura.
- Tiempo.
- Área superficial del acero (tamaño del defecto en el recubrimiento).



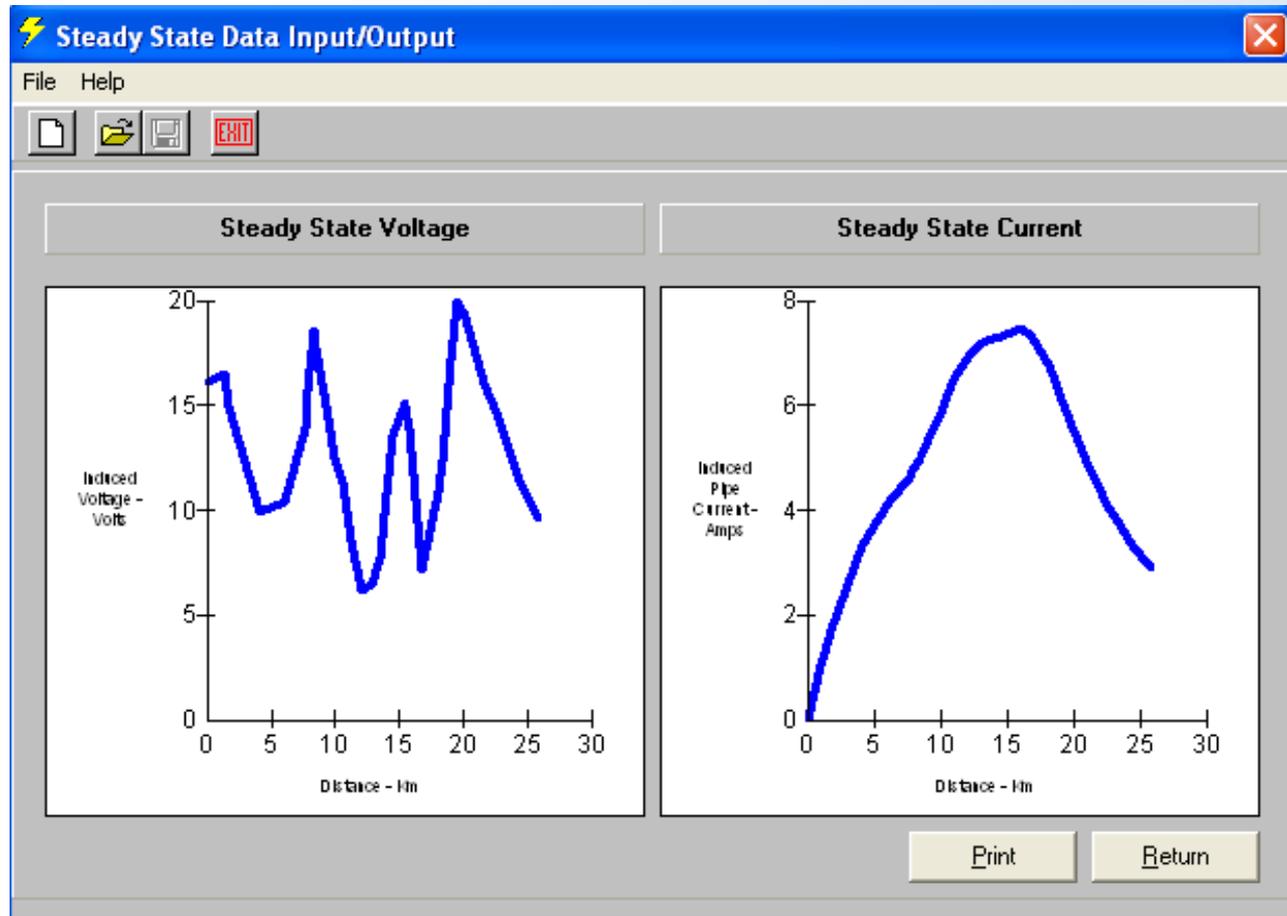
Fotos Fuente: 1er caso de corrosión AC determinado por TECNOLOGÍA TOTAL en Perú.

Software de modelamiento

Usando software de es posible rápidamente predecir los niveles de AC inducida en un proyecto antes de construir el ducto o simular una situación actual para diseñar correctivos.



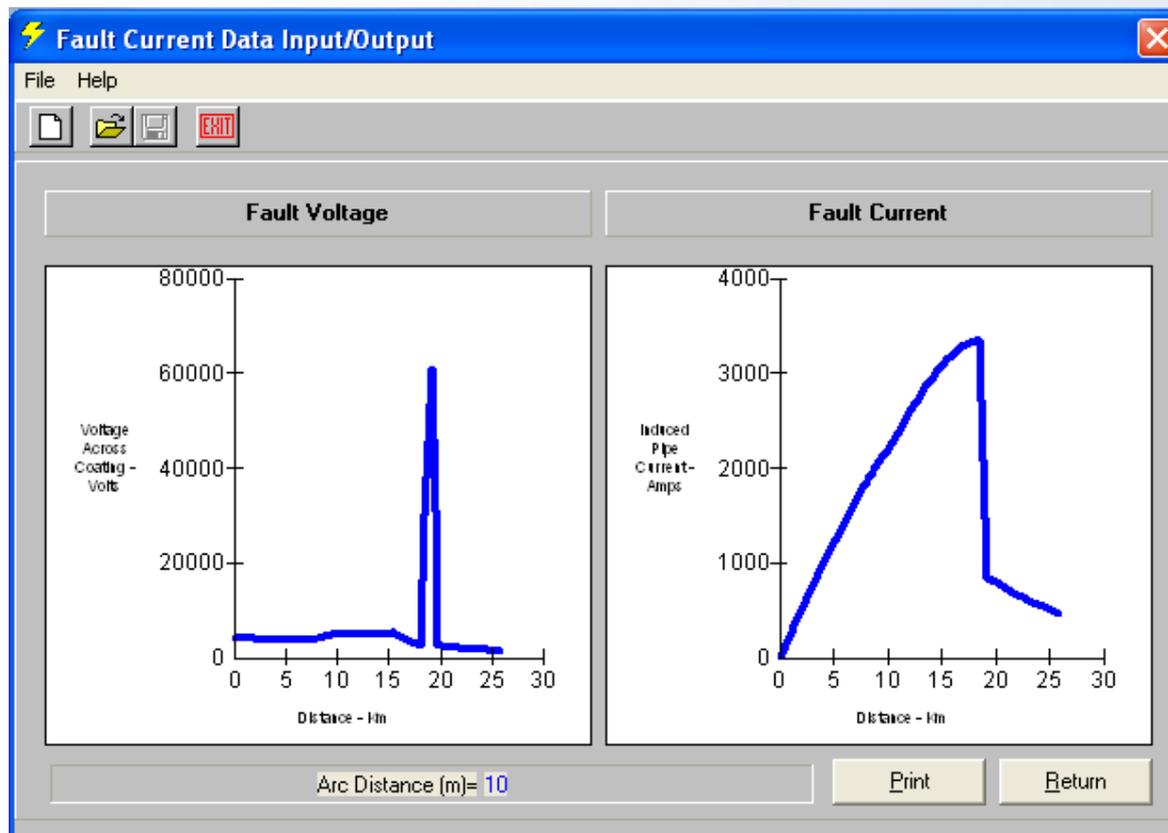
Software de modelamiento



Resultados de modelación estado estable

Software de modelamiento (cont.)

Con los resultados del modelamiento se diseñan las medidas correctivas.



Resultados de modelación condiciones de falla

Métodos de mitigación

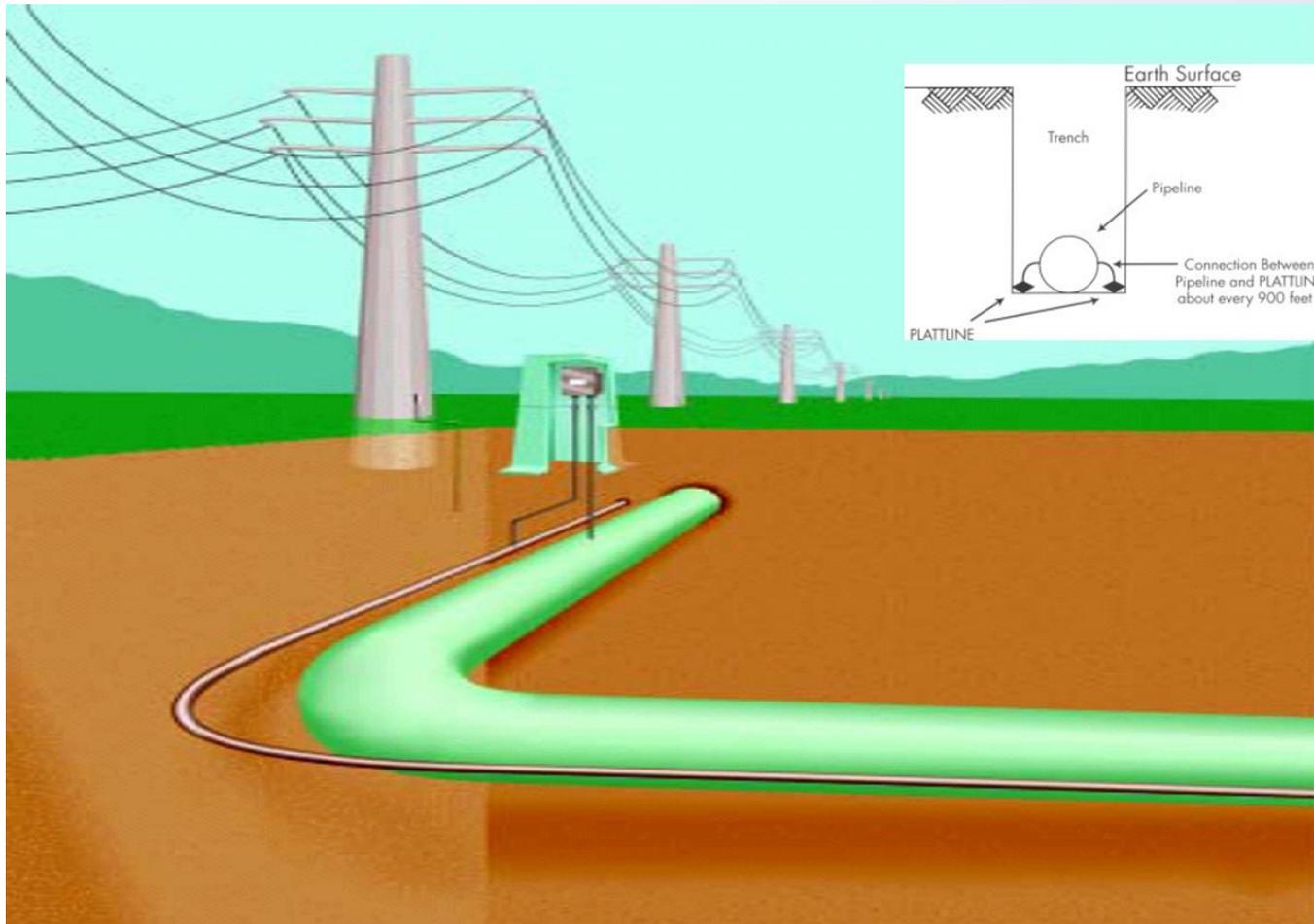
- Separación significativa entre la tubería y el sistema HVAC (Etapa de Diseño y construcción).
- Sistemas de aterrizamiento.
- Accesorios y equipos (PCRs)



Sistemas de aterrizamiento – Ánodos de zinc continuos

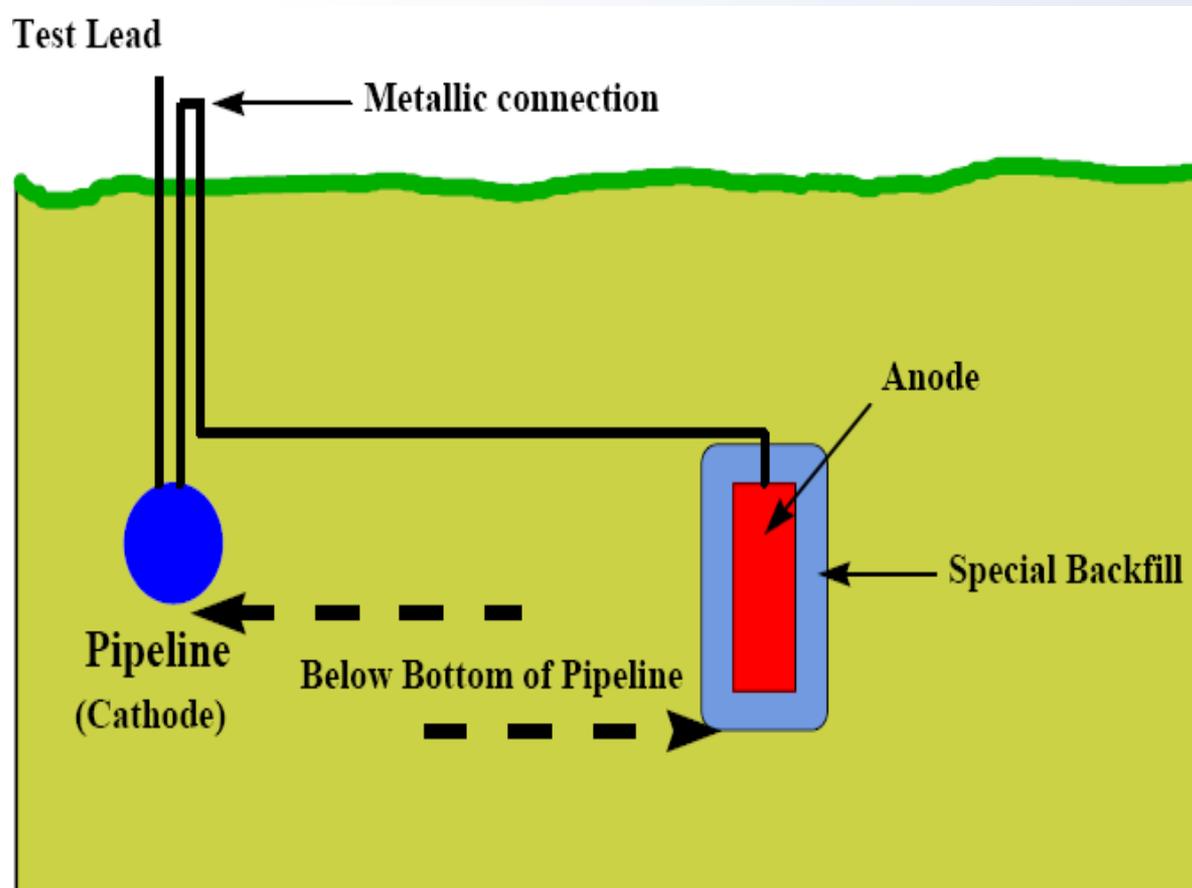
Product Size	 Super	 Plus	 Standard	 Small
Cross section	1" x 1-¼" 25.4 x 31.75 mm	5/8" x 7/8" 15.88 x 22.22 mm	1/2" x 9/16" 12.7 x 14.28 mm	11/32" x 13/32" 8.73 x 10.32 mm
Weight	2.4 lbs/ft 3.570 kg/m	1.2 lbs/ft 1.785 kg/m	0.6 lbs/ft 0.8925 kg/m	0.25 lbs/ft 0.372 kg/m
Diameter of wire core	0.185" 4.70 mm	0.135" 3.43 mm	0.130" 3.30 mm	0.115" 2.92 mm
Coil length, standard	100 ft 30.5 m	200 ft 61 m	500 ft 152 m	1000 ft 305 m
Coil I.D., standard	36" 91.44 cm	36" 91.44 cm	12" 30.5 cm	12" 30.5 cm
Packaging	Steel banded, random wound open coils.	Steel banded, random wound open coils.	Wood reels	Wood reels

Sistemas de aterrizamiento – Ánodos de zinc continuos

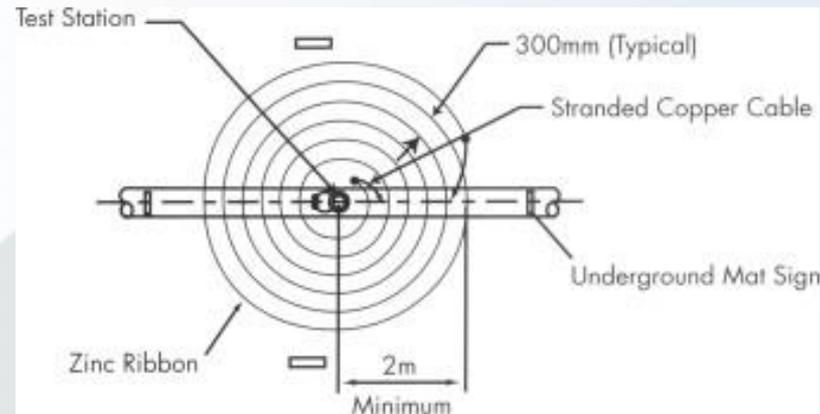


Ánodos de Zinc continuos

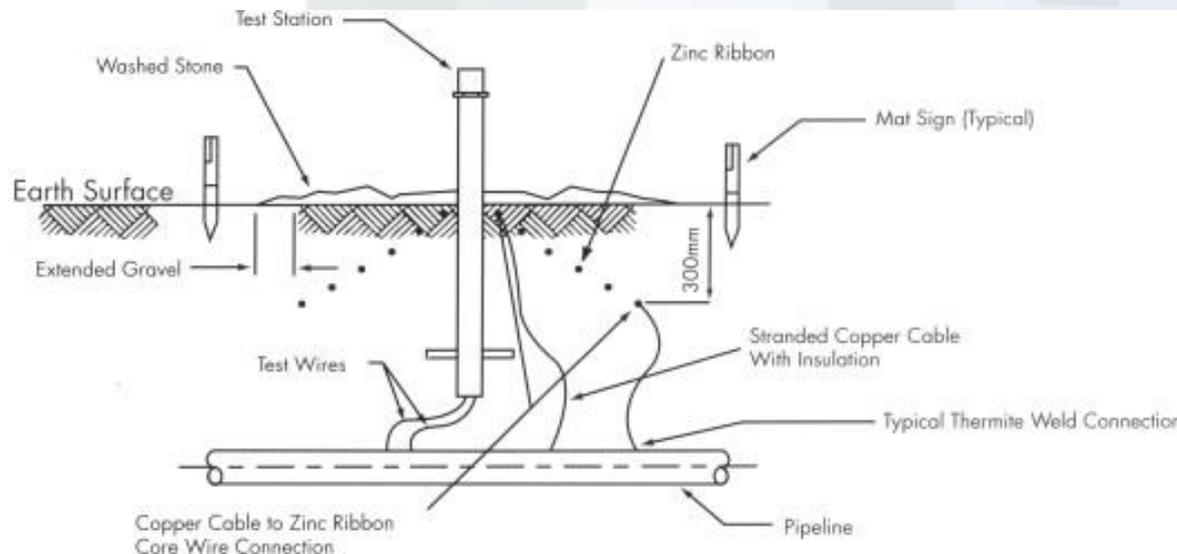
Sistemas de aterrizamiento – Ánodos galvánicos distribuidos



Sistemas de aterrizamiento – Ánodos galvánicos distribuidos (cont.)



Tapetes enterrados y cables de control.



Sistemas de aterrizamiento – Accesorios y equipos

- Celdas de polarización.
- PCRs.
- Unión directa a otros oleoductos o estructuras.
- Acople de la tubería al casing.



Kirk Cell



PCR



TECNOLOGÍA TOTAL
INGENIERÍA EN INTEGRIDAD Y CORROSIÓN

