Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

El Ánodo Polimérico Continuo Como Interceptor de Interferencias

Osvaldo C. D'Albuquerque[1], Rubén O. Bracco [2]

Abstract

In high power installations, such as HVAC o HVDC, it is usual to connect one part of the circuit to the ground for protective reasons (lightening strike) or in other cases for functional requirements (the use of the ground as a conductor). Transitory or permanent discharges may take place, leading to disruptive discharges or equipotential lines that may intercept buried metallic structures such as steel pipelines, producing the undesirable effect of corrosion.

This paper propose the use of the Continuous Polymeric Anode as an effective methodology to minimize the interferences, taking advantage of both its phisical properties (flexibility and linear geometry) and its condition an impressed current source. Some typical cases will be presented since each real situation to be solved requires a specific design.

Resumen::

En instalaciones eléctricas de potencia tales como HVAC o HVDC, se suele unir una parte de un circuito con el suelo por razones de protección (caída de rayos) o en otros casos por necesidades funcionales, como ser la utilización de la tierra como conductor. Se pueden producir descargas transitorias o permanentes, provocando descargas disruptivas o líneas equipotenciales que pueden interceptar estructuras metálicas enterradas tales como tuberías, produciendo en ellas los indeseables efectos de la corrosión.

Para minimizar las interferencias, se propone en este trabajo la utilización del Ánodo Polimérico Continuo, aprovechando tanto sus cualidades físicas (flexible y de geometría longilinea) como su condición de dispersor para corriente impresa. Se plantearán algunos casos típicos, siendo que cada problema real a resolver implicará un diseño específico.

Palabras clave: interferencia, corrosión, neutralización.

1 Ingeniero Industrial – U.B.A. (UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES) – Director – Raylam S.A.
2 Ingeniero Electricista – U.N.L.P. (UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA) – Profesor del Instituto del Gas y del Petróleo de la U.B.A.

Introducción

En primer término, presentamos el Ánodo Polimérico Continuo (en adelante abreviaremos APC) de corriente impresa, como puede verse en la **Figura 1** en versión completa como se usa para protección catódica de oleoductos, gasoductos, base de tanques AST y, en la **Figura 2** en una versión tipo cable (a la denominaremos aquí APC-C) más apta para aplicaciones especiales, como iremos viendo en cada caso desarrollado.

Los trabajos aquí comentados responden a los ejemplos más destacados de aplicación ya sea del APC o el APC-C, desde el perfeccionamiento de las puestas a tierra de los hilos de guarda en las torres de las líneas de alta tensión alterna (HVAC), siendo que dichas tomas, en muchos casos no guardan respecto a tuberías enterradas las distancias requeridas para que, de producirse un fenómeno de descarga de rayos, el ducto se encuentre a salvo de sufrir perforaciones.

Otro tema considerado es el efecto que una tubería protegida catódicamente puede producir sobre otras no protegidas que la crucen o sean paralelas. De tratarse de tuberías paralelas (de distinto dueño) ubicadas muy cercanas y que ambas tengan revestimiento pobre, la interferencia hará que deban considerarse medidas de excepción.

Un problema especial, lo constituye la eventual utilización de la tierra como conductor de líneas HVDC, no ya en ciudades sino fuera de ellas, pues la distribución a los consumidores se efectúa mediante AC.

1).-Problemas derivados de líneas HVAC

1.1.-) Descarga de corriente hacia la tierra por fallas y caída de rayos en los hilos de guardia

Haremos aquí una aparente digresión inicial, porque se trata de un diseño particular de una toma de tierra, mediante APC-2, utilizable tanto para la conexión final de los hilos de guarda como para otras necesidades específicas. Las líneas eléctricas HVAC aéreas, más allá de recorrer en general zonas con escasa o nula cantidad de población, a veces se desarrollan en zonas suburbanas de ciudades, corriendo por la estrecha acera donde están enterrados los ductos de servicio de gas; en ambos casos, se derivan los hilos de guarda a las tomas de tierra ubicadas en el entorno de las bases, integrando con dichas tomas un electrodo múltiple.

Es precisamente en la conexión final a la toma de tierra de las torres o columnas, donde se han producido diversos problemas, porque este conductor generalmente tiende a corroerse estando inmerso en la tierra y no bien resguardado. La consecuencia, superado un cierto tiempo, es la corrosión de ese conductor con el siguiente aumento de resistencia de contacto con dicha masa y por tanto de toda la toma, y aún a veces el corte de la conexión, interrumpiéndola, por lo que la derivación de corriente sigue una trayectoria hacia la tubería pues la ve como «toma de tierra sustitutiva», produciendo un daño que concluye generalmente con una perforación en las tuberías adyacentes.

Como antecedente de accidente por descarga eléctrica accidental de una torre hacia tierra en una zona suburbana, puede nombrarse el acaecido en la zona de la ciudad de San Juan en 1993

donde la acción eléctrica perforó una tubería mayor de distribución de gas generando luego un incendio con llamas de unos 10 m de altura, felizmente sin victimas ni daños materiales a terceros dado la zona donde sucedió. **(Figura 3)**

Independientemente de lo considerado, se entiende que las tomas de tierra en si responderán a las reglas de ingeniería para el lugar de que se trate: su diseño se efectuará una vez caracterizado el suelo, y con los materiales adecuados. Por otra parte, una de las formas de aumentar el contacto del electrodo unitario con el terreno circundante, es variar su diámetro y longitud, con la consiguiente variación de la resistencia de puesta a tierra, rodeándolo con mezcla compensadora de muy baja resistividad (aproximadamente 20 Ω.cm) que pueden proporcionar los comercios de la especialidad.

Se propone que en el tramo en consideración, es decir la conexión final a la toma de tierra y en el interior de la masa acondicionadora, se efectúe en la versión del APC -C (según **Figura 2)**, que por su construcción (cable de cobre AWG 6 rodeado de polímero semiconductor) otorga un camino de baja resistencia sin descuidar la protección del conductor mismo. El conductor, en este caso el APC-C se instala con aros o discos centradores tanto en su parte inferior como superior, constituyendo un electrodo tipo «pica», con mezcla acondicionadora para un diámetro conjunto de 0, 2 m. **(Figura 4)**

La toma indicada responde primordialmente a regímenes de corriente estacionarios (corriente continua) o cuasi estacionarios (corriente alterna de frecuencia industrial), por lo es de aplicación para el caso propuesto.

Por otra parte, el llamado hilo de guarda, en su ubicación por sobre la línea propiamente dicha, puede capturar rayos (cuya frecuencia de. producción dependerá del nivel isoceráunico de la zona) y lo descargará a tierra (como onda de impulso) por la toma que en cada torre existe, en porcentajes distintos según la proximidad de cada una de ellas al lugar donde se ha producido la caída. Si dicha descarga se produce en el espacio intermedio entre dos torres, cada una de ellas absorberá el 35% de la corriente y las siguientes a cada lado un 10% y un 5% las más lejanas; en cambio de incidir directamente en una torre esta absorberá el 60% y las adyacentes un 15% y un 5% las alejadas [1]. **(Figura 5)**

La disipación de la corriente tipo de impulso proveniente de rayos, exigen tomas de tierra de especial diseño, las cuales a veces no pueden desarrollarse adecuadamente en estrechos derechos de paso compartidos sin afectar las estructuras enterradas asociadas. Como consecuencia, las tomas de tierra en dichos tramos se suelen diseñar como en el caso de estado estacionario, similarmente a lo indicado en figura 4 (con APC-C rodeado de mezcla compensadora), o sea el electrodo tipo «pica», con profundidades de entre 3 m y 6 m (con resistencias acordes con la resistividad del entorno), lo cual implica que las tomas de tierra próximas al lugar donde cayó el rayo podrán ser recorridas por corrientes tales que sea necesario regenerar las mismas.

1.2.-) Interferencia electromagnética en ductos de transmisión

Nos referimos aquí al efecto adverso que pueden tener las grandes líneas de transmisión sobre oleoductos o gasoductos ubicados en el mismo derecho de paso, dado el acoplamiento electromagnético. Una tensión senoidal pura teóricamente no produciría daños, pero una tensión alterna real si, ya que se hace presente cierta asimetría entre los ciclos positivo y negativo.

En algunas publicaciones se cita que corrientes alternas inducidas en el acero de las tuberías del orden de 20 A/m² prácticamente no tienen efectos corrosivos, tornándose peligrosas más allá de los 100 A/m² [2].

En [3] se señalan diversos efectos indeseados sobre las tuberías enterradas, dando consideraciones acerca del diseño de dispositivos de protección. Entre los métodos empleados para evitar que sobre el tubo haya una tensión peligrosa para el ser humano (máximo 15 VAC) esta la conexión a una toma de tierra de tierra concentrada y de muy bajo valor (lumped grounding). Sin embargo, en la mayoría de los casos esta alternativa es de difícil realización práctica por las dificultades que presentan los altos valores de resistividad, siendo económicamente inviable.

En base a esas consideraciones, se ha utilizado Ánodo Polimérico Continuo (APC) para el diseño de una «pantalla eléctrica», y este material anódico estará energizado y conectado a la tubería en forma segmentada, contando además con un desacoplador de corriente continua. Esto se debe que en el momento de recibir una corriente de descarga el dispositivo se desconecta pasando a ser una toma de tierra «ad-hoc». **(Figura 6)**

Otra metodología empleada es la denominada «cancellation wires», que consiste en instalar líneas de conductor enterradas (no energizadas) en el derecho de paso, generalmente del lado opuesto de la tubería a la HVAC, con el propósito de mitigar las tensiones inducidas. Dado que no se logran evitar interferencias conductivas, además de los cuidados que exige su instalación, las tensiones inducidas en los propios conductores, así como otros inconvenientes no hacen atractiva esta técnica para el uso del APC-C.

No obstante, se propone el uso del Ánodo Polimérico Continuo APC-C para el método de control de gradiente de potenciales (gradient control wires), mediante un diseño en el cual dos (2) líneas de APC-C se ubican a ambos lados de la tubería, y estando además ambas líneas conectadas cada cierto trecho con tomas de tierra **(Figura 7),** se logra una atenuación de los potenciales de alterna hasta valores admisibles como se ha consignado a título ilustrativo.

2).-<u>Interferencia entre ductos de transmisión</u>

2.1).- De un ducto protegido catódicamente con otros sin proteger

En este apartado consideraremos una aplicación en suelo patagónico de Argentina, en las cercanías de la planta de bombeo Puesto Hernández (Provincia de Neuquén). El lugar, es cruzado por el Oleoducto Trasandino, que tiene origen en territorio argentino y final en territorio chileno, es decir su traza va aproximadamente de este a oeste, y cruza alli por sobre varios ductos y a poca distancia, estando estos bien revestidos, sin protección catódica con recorrido prácticamente perpendicular al primero.

Dado que el oleoducto fue proyectado y construido con protección catódica en base a dispersores discretos, la acción de los mismos interferia con potencial a las otras tuberías, lo cual no era admisible, por lo que se recurrió al Ánodo Polimérico Continuo APC-1 por su aplicación de corriente continua en forma distribuida, reemplazando al sistema original en un tramo de 3500 m.

2.2).- Entre ductos paralelos protegidos catódicamente

Nos referiremos a dos tuberías paralelas, un gasoducto y un poliducto, que circulan desde el

norte argentino, el primero de 24” va hasta la ciudad de Buenos Aires recorriendo unos 1750 km y el segundo de 12” hasta la Planta de San Lorenzo con longitud menor, en la provincia de Santa Fe, por el mismo derecho de paso.

Originalmente, hace más de 45 años, ambos ductos eran propiedad de empresas estatales (Gas del Estado e YPF, respectivamente) las cuales son hoy día empresas privadas distintas. El revestimiento de ambas tuberías en el momento de la construcción, respondía a lo usual en esa epoca, o sea revestimiento compuesto por fibra de vidrio y asfalto. Con el paso del tiempo fue aumentando la conductividad de dicha cobertura hasta tornarse “pobre”, de acuerdo con la clasificación dada en [4].

Ello originó cambio de revestimiento en algunos tramos, refuerzos de protección catódica y aun cambio de tuberías, especialmente en el gasoducto. Debe destacarse que en la epoca de construcción del mismo (año 1960) no estaban disponibles los «smart pig» por lo que, en muchos casos, las válvulas de paso se instalaban en diámetro menor al de la tubería, por lo que este ducto no fue la excepción y se instalaron válvulas de 16” en un ducto de 24”.

No fue posible pasar un «smart pig» hasta 1985, luego del cambio de válvulas para tener un paso pleno que posibilitara la aplicación de tal instrumento, por lo que el ducto sufrió antes diversos reventones (blow up) no pudiéndose tener algún grado de previsión en la mayoría de ellos, ya que no se podía apreciar la clásica «curva de la bañera», típica del mantenimiento de segunda generación.

Por lo expuesto precedentemente, podrá comprenderse el estado en que se encontraba el gasoducto previo a todas las actualizaciones que se hicieron para un funcionamiento seguro; en tramos donde el ducto se encontró en perfecto estado pero el revestimiento era obviamente pobre aunque estaba adherido, se evitó el cambio del mismo y si recordamos lo expresado anteriormente en cuanto a que por el mismo derecho de paso y muy cercano corre el poliducto construido en la misma época, puede deducirse la interferencia de los respectivos sistemas de protección catódica.

Finalmente la solución compartida se logró aplicando protección catódica por corriente impresa mediante el uso del **Á**nodo **P**olimérico **C**ontinuo, de aplicación, entre otras, indicada especialmente como el citado.

·3).-<u>Problemas derivados de potenciales positivos</u>.

3.1).- Compensación de interferencia por potenciales positivos estáticos.

El caso real aquí presentado se desarrolló en la zona montañosa, cercana a la ciudad colombiana de Manizales. Existía en un lugar denominado Alto de Letras (unos 3700 msnm) una tubería de 20”, revestida con FBE, que presentaba problemas por potenciales positivos en un tramo parcial de unos 8 km, sobre un total de 330 km.

El origen de dichos potenciales fue atribuido a causas geológicas por cuerpos minerales existentes que producían el fenómeno, por lo que se diseño un sistema para interceptar dichos potenciales y mitigar o anular el efecto indeseado, en base a APC.

> Para el detalle analítico y practico de esta aplicación, nos remitiremos al Paper presentado en Río Pipeline 2001 [5]. **(Figuras 8 y 9).**

3.2).- Introducción a la mitigación de interferencia por puestas a tierra de líneas HVDC

Este caso particular surge como consecuencia de los esquemas operativos que se pueden adoptar, temporaria o permanentemente, en líneas HVDC. En efecto, en configuración monopolar pueden tener retorno metálico, por tierra o por mar [10], mientras en configuración bipolar generalmente la conexión a tierra cumple función similar al neutro de los sistemas de corriente alterna trifásicos; en el caso de asimetrías lleva a tierra la diferencia de ambos polos.

Esos casos, son precisamente de interés por los problemas de corrosión que pueden originar sobre tuberías a veces no tan cercanas, como asimismo a los seres humanos por la eventual elevada tensión de paso. En este sentido, debemos tener en cuenta lo consignado en la Tabla 4 de [3], que expresa que para que una corriente circulante por el organismo humano no produzca un shock doloroso como máximo debe ser de 8 mA

En algunas publicaciones, se da en primera aproximación una fórmula simplificada para el cálculo de la tensión de paso, considerando suelo homogéneo: $E_{paso} = I_c\ (1000 + 6\ \rho_s)$, donde: I_c es la máxima corriente corporal permisible y ρ_s es la resistividad del suelo. Sin embargo, la situación real es más complicada, pues la tierra no responde a una capa única con una sola resistividad sino que es multicapa, con diferentes resistividades cada una de ellas, y el diseño de la toma de tierra de líneas HVDC, por ejemplo, debe ser efectuado por métodos computacionales, habiendo diversos modelos a seguir, todos ellos abarcando gran espacio debido por supuesto, a la gran corriente a transmitir.

En [6] se dan ejemplos de distintos suelos multicapa, graficando el campo eléctrico en [V/km] de acuerdo con la distancia desde el electrodo de toma de tierra. Toma como peligroso para el ser humano un gradiente mayor 10 de Volts per km, mientras que valores aun bastante menores pueden sin embargo causar problemas de corrosión en tuberías u otras estructuras metálicas enterradas.

Cualquiera de los modelos utilizados por los autores, implica campos eléctricos que se extienden más allá de los 10 km desde los electrodos y aun llegando a los 100 km de ellos. Siendo nuestro propósito utilizar el APC con los fines de subsanar el efecto de la interferencia sobre tuberías, y dado que el problema depende de diversas variables como ser: el diseño del electrodo de puesta a tierra, la constitución geológica del suelo y deformación de las curvas equipotenciales, la distancia entre el electrodo y la tubería, entre otras variables, cada caso particular deberá efectuarse «taylor made» con las mediciones que surjan en el lugar.

Deberán hacerse mediciones particulares y para ello, conceptualmente, nos referiremos a algunas indicaciones dadas en [7], en cuanto a que entre las primeras mediciones a realizar está la amplitud del gradiente de potencial eléctrico interferente así como su polaridad, agregando los puntos o áreas de entrada y salida de corriente, con relación a la estructura interferida en estudio.

Las interferencias pueden ser anódicas o catódicas, siendo las primeras las que producen variaciones positivas y lo contrario las segundas, inaceptables obviamente ambas si los potenciales de protección catódica se apartan de los estándares de norma. Identificada la existencia del problema, deben hallarse las medidas mitigatorias que sean de aplicación al caso particular.

Entre esas medidas se encuentran las siguientes, entre las cuales el proyectista deberá seleccionar la más adecuada a su problema:

- El ***«drenaje eléctrico» unidireccional (conductor metálico):*** se coloca desde el punto o salida de corriente desde la estructura interferida hasta el retorno a la fuente de interferencia. En la ciudad de Buenos Aires se efectuaron oportunamente varios drenajes de este tipo, desde tuberías de distribución de gas cercanas a vías de trenes subterráneos que trabajan en corriente continua, uniendo ambas estructuras en puntos previamente identificados.

  Si bien esta medida mitigatoria es una solución eficiente y realizable según el caso mediante el Ánodo Polimérico Continuo APC-C , no parece ser conveniente en caso de grandes distancias entre estructuras, sobre todo si en el trayecto a recorrer por el drenaje existen dificultades, ya sea geográficas, bosques, u otras. Por otra parte si en esas zonas recorridas existen otras tuberías enterradas, eventualmente puede producirse una interferencia secundaria, según lo describe [7].

- ***Red de tomas de tierra de la zona anódica*:** con el diseño adecuado la corriente retorna a través del terreno, debiéndose lograr una baja resistencia respecto al suelo, por lo que se propone una malla o red en arreglo de electrodos múltiples de pica o de banda. En el primer caso, se propone que la «pica» unitaria sea la sustitutiva descripta en el apartado 1.1. En la segunda alternativa, podrán usarse por banda tiras de APC-C, en este caso instaladas en tierra sin la adicción de mezcla compensadora.

  No obstante, más allá de las numerosas configuraciones que se pudieren adoptar con dicha base y teniendo en cuenta todos los factores intervinientes (entre otros espacio adecuado para el desarrollo de la red o malla), deberá consultarse algún tratado de la especialidad como el indicado en [8].

- La ***polarización mediante protección catódica adicional*** es recomendada en algunos trabajos [9], y puede realizarse mediante Ánodo Polimérico Continuo (APC-1). Sin embargo en [7] se hace hincapié en que esta alternativa se puede usar «para mitigar los efectos de las corrientes vagabundas cuando el nivel de interferencia sea bajo».

4).- <u>Conclusiones</u>

En este trabajo se presenta, en forma abreviada, el uso del Ánodo Polimérico Continuo, tanto en su versión indicada para corriente impresa (a la que para esta presentación denominamos APC-1) y a su versión tipo cable (APC-C), en diversas aplicaciones principalmente derivadas de situaciones prácticas (principalmente ocurridas en Argentina) para ambos modelos, demostrando su utilidad más allá de las aplicaciones en protección catódica por corriente impresa distribuida. Así tenemos: la aplicación para derivación a tierra en torres HVAC, siguiendo entre otras con las aplicaciones para el diseño de tomas de tierra, el método del control del gradiente de potenciales para disminuir la interferencia electromagnética en ductos afectados por HVAC, la mitigación de interferencia entre un conducto protegido catódicamente y otros sin o con protección, la solución a potenciales positivos en alta resistividad (Manizales, Colombia), así como una introducción a la compensación de interferencias por corriente continua derivada de líneas HVDC.

De esta manera entendemos queda demostrada la versatilidad del Ánodo Polimérico Continuo como compensador o interceptor de interferencias.

5.-Referencias Bibliográficas

[1] - MARCELIC, Pedro. **Líneas y redes eléctricas**. Buenos Aires: Biblioteca Ediar de Ingeniería, 1957.

[2] - KOERTS, H.C.; WETZER, J.M. **Literature survey on corrosion of underground metallic structures induced by alternating currents.** European Copper Institute, 2001.

[3] - NACE Standard RP 0177 2000 (Now NACE SP0177). **Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems.** NACE International, 2002**.**

[4]- NACE Standard TM 0102. **Measurement of Protective Coating Electrical Conductance on Underground Pipelines.** NACE International, 2002.

[5] – RIVERA PAEZ, Laura S.; VELANDIA, Fernando; BRACCO, Rubén O. **Solución a potenciales positivos en suelos de alta resistividad mediante protección catódica distribuida.** IBP 1801, 2001.

[6]- THUNEHED, H; ASTRÖM, U; WESTMAN, B. **Geophysical and geological pre-investigations for HVDC-electrodes.** IEEE Power Africa 2007, Conference.

[7] - UNE-EN-50162. **Protección contra la corrosión debida a corrientes vagabundas provenientes de sistemas de corriente continua.** AENOR, 2005.

[8] - De la VEGA ORTEGA, Miguel. **Problemas de Ingeniería de las puestas a tierra**. Editorial Limusa, 2006.

[9] - KOSHCHEEV, L.A. **Environmental characteristics of HVDC overhead transmission lines.** Vladivostok, Russia, 2003

[10]- ROSENBERG, Henry. **HVDC projects based on mutual understanding between involved parties with respect to corrosion protection.** CEOCOR, 2001

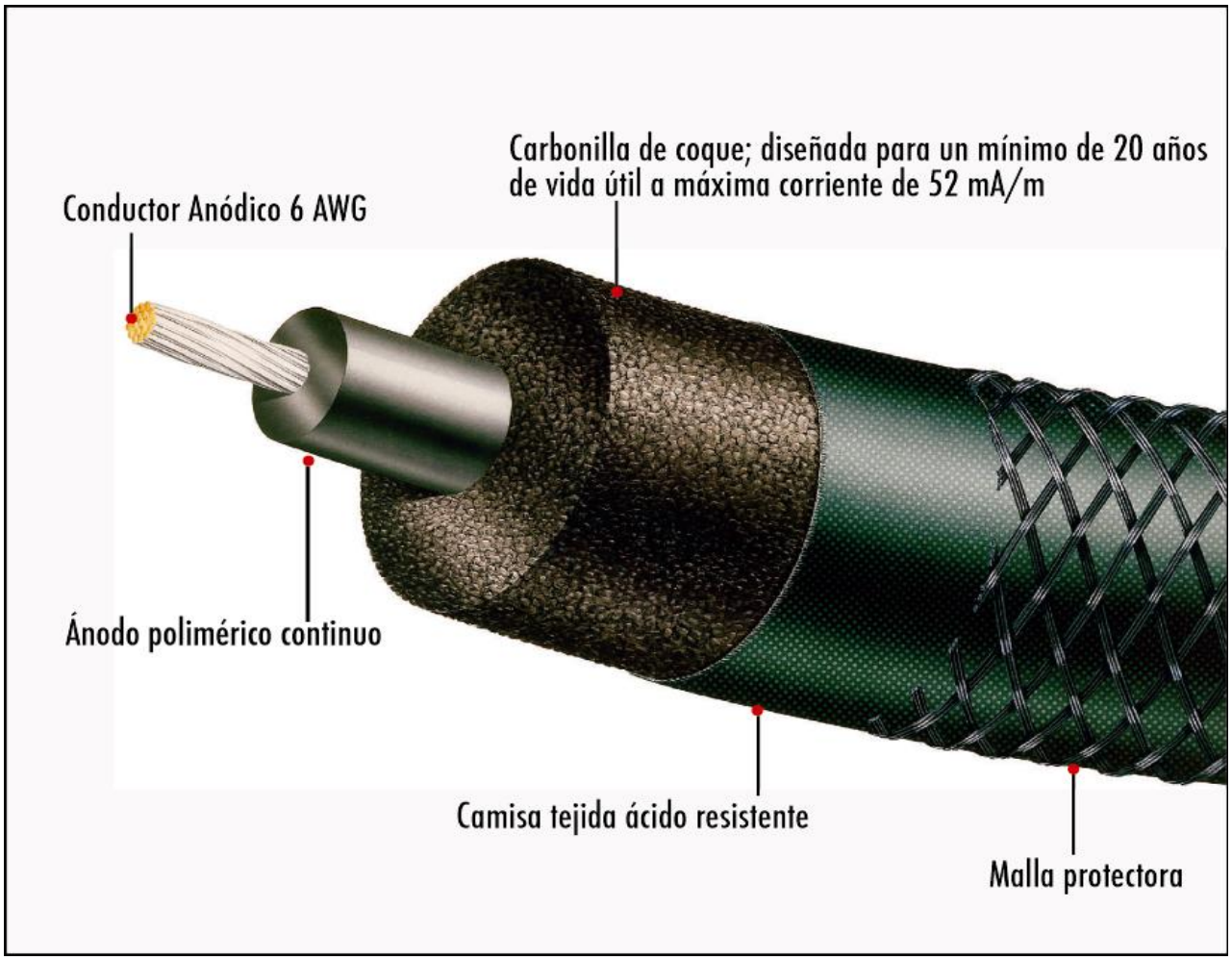

Figura 1 : Ánodo polimérico Continuo (APC-1)

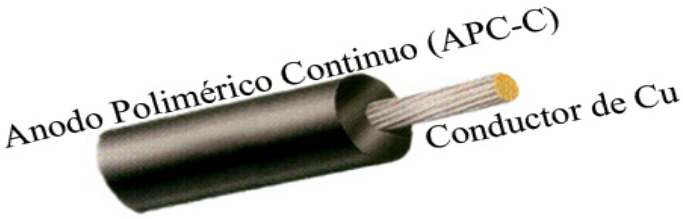

Figura 2: Ánodo polimérico Continuo (APC-C)

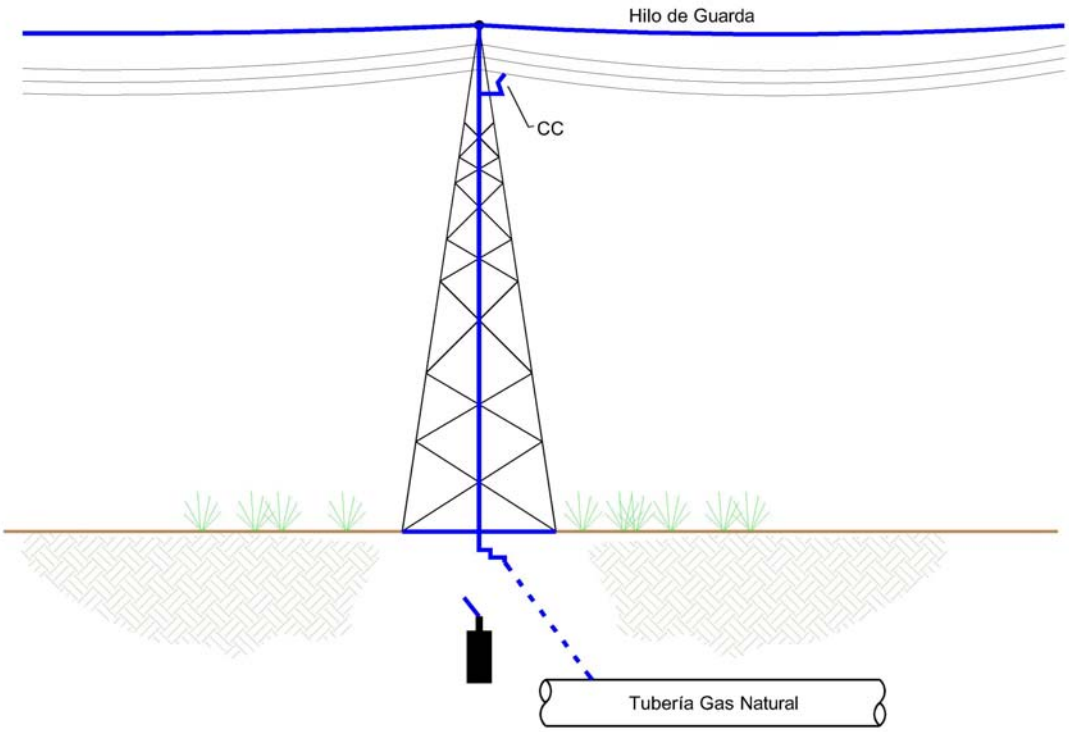

Figura 3: Corte por corrosión de la conexión a puesta a tierra

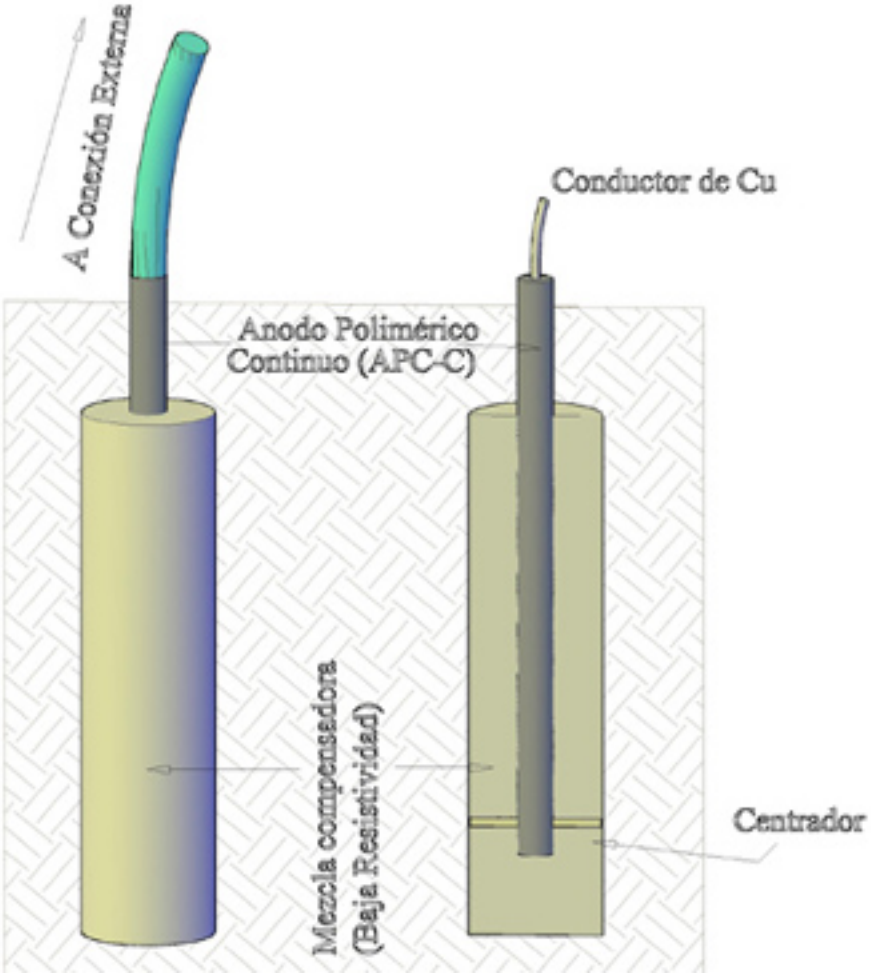

Figura 4: Electrodo tipo propuesto

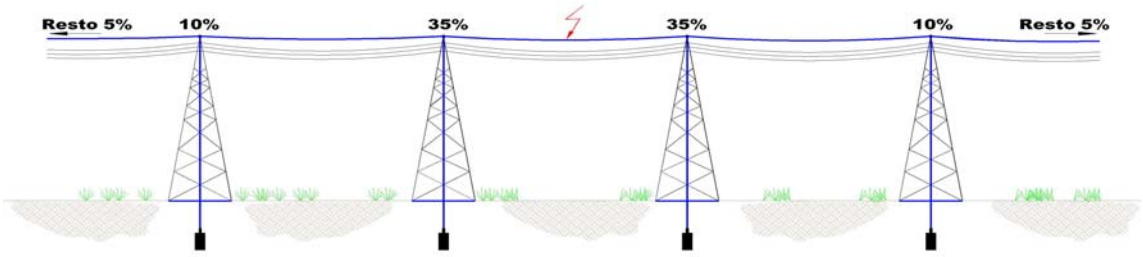

Figura 5: Incidencia ponderada de la acción de rayos

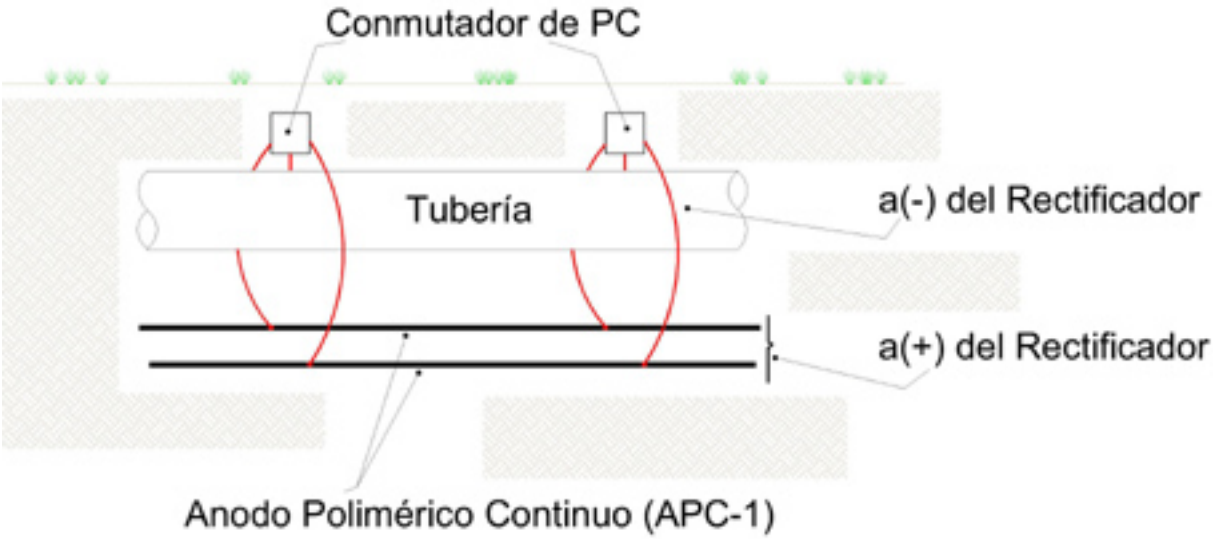

Figura 6: Pantalla eléctrica

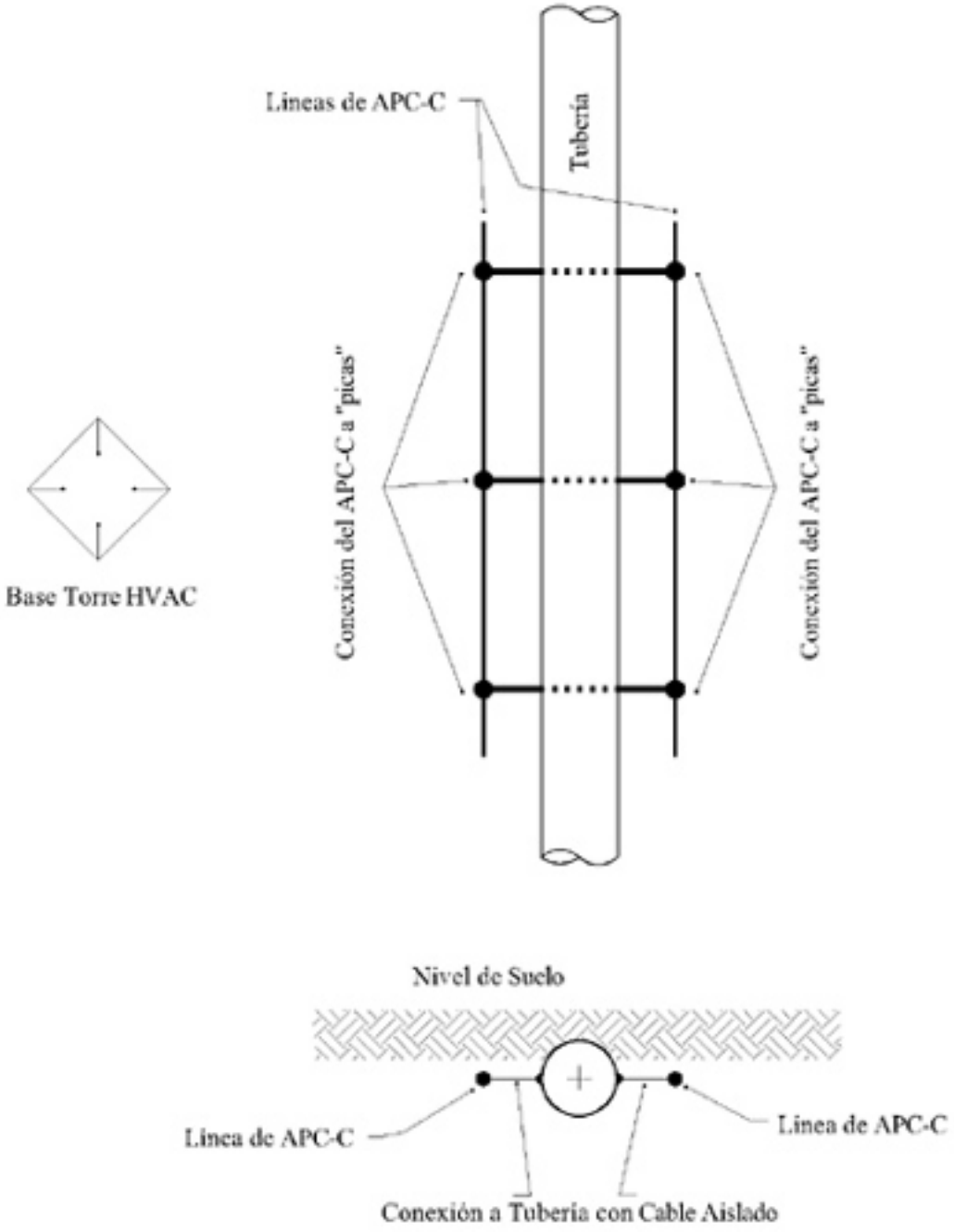

Figura 7: Método de control del gradiente de potenciales

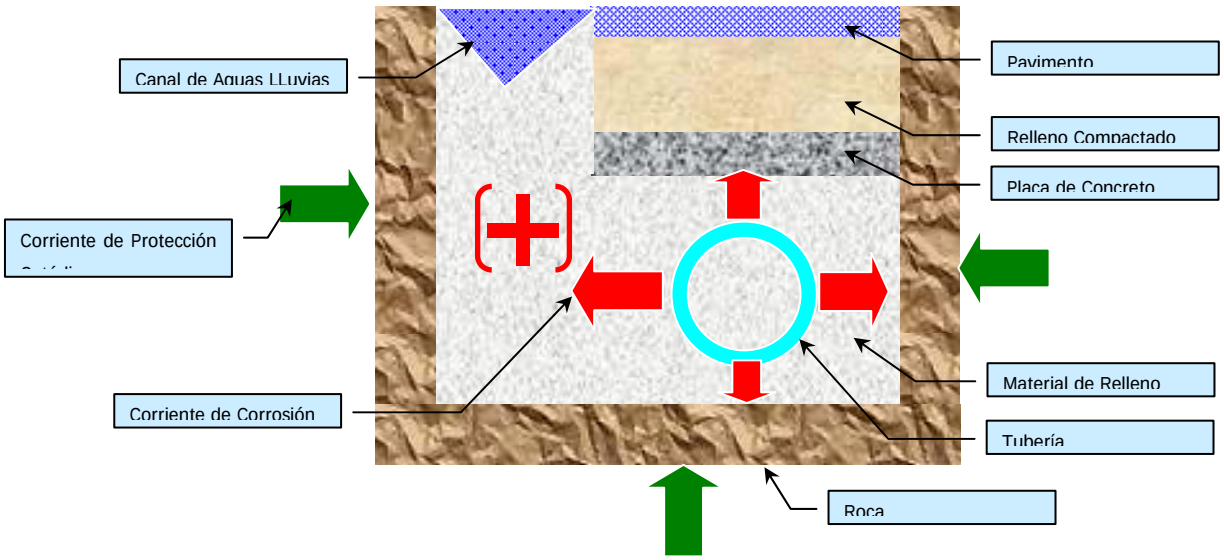

Figura 8: El Problema (Potenciales positivos)

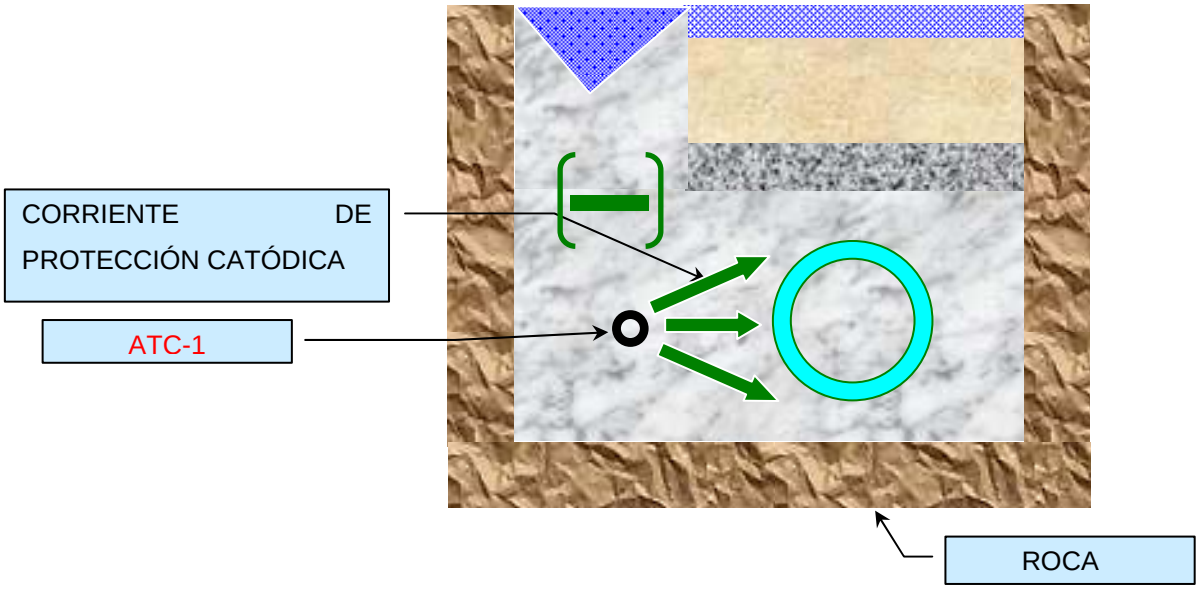

Figura 9: La Solución (Protección catódica in-situ mediante APC-1)