

Comunicación por Líneas de Potencia Eléctrica PLT Usando el Plasma del Efecto Corona

S. Á. J. Flórez

Resumen—Este trabajo describe el análisis y los resultados obtenidos al medir el patrón de onda estacionaria de una guía de onda dieléctrica circular llena con plasma a baja presión para estudiar el canal de comunicaciones en el plasma del efecto corona en las líneas de transmisión de energía eléctrica. Por medio de la ecuación de onda estacionaria, se determinan las constantes de atenuación y de fase del plasma que llena la guía de onda dieléctrica. El dispositivo experimental para medir el patrón de onda estacionaria de ondas superficiales consiste de dos espiras conductoras móviles que se mueven axialmente. Una espira conectada al generador se sitúa en un extremo del tubo sirviendo de transmisora y la otra es conectada al osciloscopio, y esta lectura es proporcional a la intensidad del campo eléctrico relativo en la posición axial de la sonda circular. Finalmente se discuten los resultados experimentales obtenidos con el prototipo construido, las posibles aplicaciones de este método y los trabajos futuros.

Palabras clave— Guía de ondas dieléctricas, descargas eléctricas, atenuación, efecto corona, PLT, potencia eléctrica transmitida.

I. INTRODUCCIÓN

AUNQUE se dispone de una gran variedad de sistemas alternativos de comunicaciones para ser utilizados como soporte en los sistemas de transmisión de energía eléctrica tales como la fibra óptica, las comunicaciones por radiofrecuencia con antenas convencionales de microondas en radio-enlaces terrestres, las comunicaciones móviles y satelitales, etc., también se utilizan los sistemas PLC (Power Line Communications) de comunicación a través de las líneas de transmisión de potencia eléctrica como medio para enviar telecomandos entre subestaciones y también para la transmisión de datos. Estos sistemas requieren dispositivos complejos y de comportamiento muy crítico, ya que deben hacer el filtrado y la amplificación, además de la modulación apropiada, dificultades que deben ser resueltas por los operadores de suministro de energía eléctrica. Los sistemas PLC en líneas de alto voltaje (Power Line Carrier) funcionan a frecuencias del orden de 500kHz con tasas de transmisión

máximas de 1Mbps, mientras que PLC (Power Line Communications) utiliza frecuencias entre 1 y 30 MHz, y en voltajes bajos y medios, con velocidades de hasta 200Mbps.

La tecnología para la transmisión de datos sobre la red eléctrica PLT (Power Line Telecommunications) ha venido siendo utilizada por las empresas de transmisión de energía eléctrica, permitiendo mayores progresos tecnológicos y aprovechando la política de liberalización del bucle de abonado. Esto ha permitido al sistema PLT la transmisión de voz, vídeo y datos sobre las redes de transmisión de energía eléctrica. El tendido eléctrico para interiores está constituido por pares de cobre que tienen capacidad en ancho de banda para guiar señales eléctricas desde el nivel DC hasta 300 kHz. Esta característica de la red eléctrica limita la transmisión de datos a velocidades bajas y medias, y de cierto tipo de información (únicamente voz, datos). Además dicho medio de transmisión es susceptible al ruido eléctrico, lo que atenúa la portadora digital, reduce la relación señal a ruido (SNR), incrementa la probabilidad de error de los datos digitales y disminuye la distancia de cobertura. La tecnología para la transmisión de datos ha sido implementada por las empresas de transmisión de potencia eléctrica permitiendo mayores progresos tecnológicos y aprovechando las ventajas de las políticas gubernamentales de promoción y de diversificación de alternativas. Las redes de potencia eléctrica de baja y mediana tensión ofrecen muchas posibilidades para que los operadores instalen nuevos sistemas de comunicación en regiones de difícil recepción. Aunque existe una gran variedad de alternativas de sistemas de transmisión de datos a través de las líneas de potencia eléctrica utilizadas para suministrar potencia, se pueden proponer otras posibilidades de a partir de los fenómenos electromagnéticos, expresados en las ecuaciones de Maxwell y aplicadas a la propagación en medios dieléctricos. Las líneas de potencia eléctrica utilizan aisladores eléctricos de materiales como neopreno, alúmina, magnesia, esteatita, cordierita, pirofilita, silimanita (fibrolita), circonita o zircón plástico, plástico reforzado con fibra de vidrio, celulosa, y materiales compuestos, etc. Sobre el plasma producido por el efecto corona en las líneas de transmisión de potencia eléctrica se pueden transmitir (envío y recepción) de datos digitales a través de los cables eléctricos de distribución de energía eléctrica y de sus infraestructuras.

El efecto corona se manifiesta por luminiscencias o penachos azulados que aparecen alrededor del conductor, más o menos concentrados en las irregularidades de su superficie. La descarga va acompañada de un sonido silbante y de olor de ozono. Si hay humedad apreciable, se produce ácido nitroso. La corona se debe a la ionización del aire. Los iones son

Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por el CINTEX, de la Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, por la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia, a través del proyecto 358/2007 y por el Instituto InvBiTel/GAC.

S.Á.J. Flórez es docente de planta en el Programa de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad del Quindío, Cra. 15, Cll. 12N, Edificio de Ingeniería, 3° Piso, Armenia, Colombia (correos e.: samuellangel@uniquindio.edu.co; samjaram@gmail.com).

repelidos y atraídos por el conductor a grandes velocidades, produciéndose nuevos iones por colisión.

El aire ionizado resulta conductor (si bien de alta resistencia) y aumenta el diámetro eficaz del conductor metálico. En las líneas de transmisión, el efecto corona origina pérdidas de energía y, si alcanza cierta importancia, produce corrosiones en los conductores a causa del ácido formado. Este trabajo describe el análisis y los resultados obtenidos al aplicar el modelo de onda estacionaria en líneas de transmisión al canal de comunicaciones en el plasma del efecto corona en las líneas de transmisión de energía eléctrica. Se determinan las constantes de atenuación y de fase y finalmente se discuten los resultados experimentales obtenidos con el prototipo construido, las posibles aplicaciones de este método y los trabajos futuros.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL EFECTO CORONA

En un campo uniforme, a 25 °C y 760 mm de presión, la ionización por choque aparece al tener un valor máximo de 30 kv/cm, que corresponde a 21.1 kv/cm sinusoidal. En el caso de las líneas aéreas de transmisión de energías, se ha demostrado que el fenómeno depende del radio del conductor. El valor del gradiente de potencial para el cual aparece la ionización en la superficie del conductor se llama gradiente superficial crítico, en kV/cm eficaz, dado por la (1)

$$g_0 = 30(1 - 0,7r) \quad (1)$$

donde r es el radio del conductor en cm. Existen fórmulas que suministran este valor en función de la presión barométrica y la temperatura ambiente. Pero estas fórmulas sirven para conductores de sección circular y perfectamente lisa. Los conductores de líneas aéreas están formados por varios alambres cableados y enrollados en hélice y tienen raspaduras propias de su fabricación e instalación. Esto hace aumentar el gradiente crítico, por encima de las estimaciones teóricas. Estos fenómenos permiten afirmar que la superficie de un conductor libera iones de ambos signos. Como la tensión es alterna, algunos son atraídos hacia el conductor, conforme su polaridad en el momento en que se considere mientras que otros, son rechazados y se alejan hacia moléculas neutras para formar iones pesados. Los que se alejan, debido a que disminuye el gradiente. Al cambiar la polaridad del conductor se reinicia la ionización por choque. Esta descripción indica por un lado que se requiere la energía necesaria para producir la ionización y por otro la necesaria para producir los movimientos de las cargas. La primera es importante y la forma de estimarla es

$$P_c = \frac{20.96 \times 10^{-6} f U_f^2 F}{\log_{10}\left(\frac{|DMG|^2}{r}\right)} \quad (2)$$

P_c = pérdidas por efecto corona en kW/km/fase.

f = Frecuencia en Hz

U_f = Tensión eficaz, entre fase y neutro, en kV

DMG = distancia media geométrica entre conductores, en m

r = radio del conductor, en m

U_0 = tensión eficaz, entre fase y neutro, en kV, que provoca la descarga

F = factor función de la relación U_f/U_0 y se toma de la Tabla I.

Tabla I. Valores para el factor función de la relación U_f/U_0

U_f/U_0	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5
F	0.0011	0.014	0.018	0.025	0.036	0.053	0.085	0.150	0.950

Esta fórmula es para buen tiempo, en otras condiciones, es necesario hacer intervenir los efectos correspondientes. Las pérdidas por efecto corona se pueden mantener en valores tolerables manteniendo la tensión a la que ocurre el fenómeno, más alta que la tensión entre fase y tierra en un 20 a 40%, para lo cual, es necesario que el diámetro del conductor sea grande o, en caso contrario, formando cada fase por medio de más de un conductor [1]. Esta cantidad de conductores por fase indica la tensión de transporte de la línea, por ejemplo: 1 conductor por fase 132 KV, 2 conductores 220 KV, 4 conductores 500 KV.

El efecto corona es un fenómeno eléctrico que se produce en los conductores de las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor. Dado que los conductores suelen ser de sección circular, el halo adopta una forma de corona, de ahí el nombre del fenómeno.

El efecto corona está causado por la ionización del aire circundante al conductor debido a los altos niveles de tensión, y por ende, de campo magnético, de la línea.

En el momento que las moléculas de aire se ionizan, éstas son capaces de conducir la corriente eléctrica y parte los electrones que circulan por la línea pasan a circular por el aire. Tal circulación producirá un incremento de temperatura en el gas, que se tornará de un color rojizo para niveles bajos de temperatura, o azulado para niveles altos. La intensidad del efecto corona, por lo tanto, se puede cuantificar según el color del halo, que será rojizo en aquellos casos leves y azulado para los más severos. La primera forma de efecto corona registrada fue el fuego de San Telmo.

En clima tormentoso en la mar, en ocasiones aparecían luces como flamas rojizas o azuladas en la parte superior de los mástiles de los barcos. Los marineros lo asociaban con una forma de protección y lo nombraron en honor a su patrono, Erasmo de Formia (Sant Elmo).

En el curso de las investigaciones sobre la electrostática en el siglo XVII, se observó por primera vez el mismo fenómeno en laboratorio. Por lo general, también se le daba el nombre de corona. Ahora normalmente se utiliza el término de efecto corona para describir este fenómeno de descarga de gas eléctrico externo.

Entre los efectos del efecto corona se encuentran: Generación de luz, ruido audible, ruido de radio, vibración resultante del viento eléctrico, deterioro de los materiales como consecuencia de un bombardeo de iones, generación de ozono, óxidos de nitrógeno y la presencia de humedad, ácido nítrico, y disipación de la energía.

El efecto corona se produce alrededor de conductores de línea, en los espaciadores y amortiguadores, en los aislantes eléctricos dañados - de cerámica o un material diferente de la cerámica, en los aislantes contaminados, en los extremos vivos de ensambles de aislantes y manguitos aisladores, y en cualquier punto de un equipo eléctrico donde la fuerza del campo eléctrico exceda los 3kV/m [2].

A. ¿Qué es el efecto corona?

El fuego de San Telmo fue quizás la primera forma de efecto corona registrada. En clima tormentoso en la mar, en ocasiones aparecían luces como flamas rojizas o azuladas en la parte superior de los mástiles de los barcos. Los marineros lo asociaban con una forma de protección y lo nombraron en honor a su patrono, San Telmo. En el curso de las investigaciones sobre la electrostática en el siglo XVII, se observó por vez primera el mismo fenómeno en el laboratorio. Por lo general, también se le daba el nombre de corona. Ahora normalmente se utiliza el término de efecto corona para describir este fenómeno de descarga de gas eléctrico externo.

B. Los Efectos:

- Generación de luz
- Ruido audible
- Ruido de radio
- Vibración resultante del viento eléctrico
- Deterioro de los materiales como consecuencia de un bombardeo de iones
- Generación de ozono, óxidos de nitrógeno y la presencia de humedad, ácido nítrico
- Disipación de la energía

C. El efecto corona puede ocurrir:

- Alrededor de conductores de línea
- En espaciadores y amortiguadores
- Aislantes dañados - de cerámica o un material diferente de la cerámica
- Aislantes contaminados
- En los extremos vivos de ensamblajes de aislantes y manguitos aisladores
- En cualquier punto de su equipo eléctrico, donde la fuerza del campo eléctrico excede los 3kV/m

Otra categoría de la descarga eléctrica en equipo de alta tensión es la descarga de intervalo. Se puede describir de la manera siguiente:

- Descarga de chispa ocurriendo entre dos superficies metálicas cualesquiera unidas eléctricamente
- Descarga de microchispa, ocurriendo en un intervalo de aire en miniatura formado entre una superficie conductora y una aislante
- Descarga de superficie ocurriendo a lo largo de las bandas secas en la superficie conductora de aislantes contaminados.

III. ONDAS ESTACIONARIAS EN EL PLASMA

La guía de onda dieléctrica llena de plasma es una interesante estructura para guiar ondas electromagnéticas. Como se muestra en la Fig. 1, consiste de un tubo de vidrio lleno de plasma y rodeado de un medio dieléctrico, en este caso aire. El radio interior del tubo de vidrio es a y el exterior es b . La estructura es capaz de transportar un modo transversal magnético, el modo TM. La característica principal de la estructura es que la energía necesaria para generar la señal

transmitida es suministrada por su propia onda superficial [3],[4].



Fig. 1. Tubo de vidrio lleno de plasma y rodeado de un medio dieléctrico.

Cuando la guíaonda dieléctrica es terminada por un cortocircuito, la magnitud del coeficiente de reflexión es la unidad y su fase es π . En este caso, el cuadrado de la magnitud del campo eléctrico relativo E_R a una distancia l de la espira transmisora está dado por (3), [4],

$$|E_R|^2 = e^{2\alpha l} \left[(1 + e^{-2\alpha l})^2 - 4e^{-2\alpha l} \cos^2(\beta l) \right] \quad (3)$$

Utilizando la (3), se puede evaluar la constante de fase β a partir de la distancia medida entre dos puntos adyacentes de intensidad de campo mínima. La constante de atenuación α puede evaluarse de la relación entre diferentes intensidades de campo medidas en diferentes posiciones axiales l_1 y l_2 . La ecuación que permite hallar dichas constantes puede escribirse como la (4)

$$1 + 2e^{2\alpha l_2} - 0.0008e^{2\alpha l_1} = 4 \cos^2(\beta l_2) \quad (4)$$

En una posición l de intensidad de campo nula, por ejemplo en el otro extremo del tubo dieléctrico, la (3) produce la (5)

$$2 \cos^2(\beta l) = 1 + \cosh(2\alpha l) \quad (5)$$

Combinando las ecuaciones (4) y (5), se obtiene la (6), y cuya raíz permite obtener el valor de la constante de atenuación del plasma α .

$$1 + 2 \cosh(2\alpha l) - 2e^{2\alpha l} = 0 \quad (6)$$

En la Fig. 2 hecha en Matlab se aprecia el valor correspondiente de $\alpha=0.0176 \text{ cm}^{-1}$ y $\beta=0.0538 \text{ cm}^{-1}$, calculado con la ecuación (7), para la longitud del tubo dieléctrico utilizado, $l=13.55 \text{ cm}$.

$$\beta = \frac{1}{l} \cos^{-1} \left[\sqrt{\frac{1 + 2e^{2\alpha l}}{4}} \right] \quad (7)$$

IV. MONTAJE EXPERIMENTAL

La lámpara fluorescente está formada por un tubo o bulbo fino de vidrio revestido interiormente con una sustancia que contiene fósforo y otros elementos que emiten luz al recibir una radiación ultravioleta de onda corta. El tubo contiene una

pequeña cantidad de vapor de mercurio y un gas inerte, habitualmente argón o neón, sometidos a una presión ligeramente inferior a la presión atmosférica. Asimismo, en los extremos del tubo existen dos filamentos hechos de tungsteno.

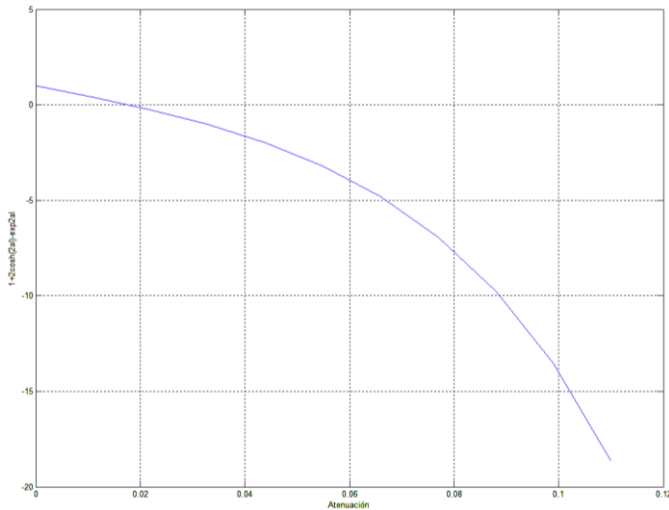


Fig. 2. Curva de la ecuación (6) para determinar el valor de la constante de atenuación $\alpha=0.0176 \text{ cm}^{-1}$ correspondiente a la raíz.

A. Elementos necesarios para su funcionamiento

En la Fig. 3 se aprecian los elementos de que consta la instalación de una lámpara. En esta figura se distinguen, aparte de la propia lámpara, dos elementos fundamentales: el cebador (también llamado "partidor" o starter) y la reactancia inductiva. El cebador (partidor) está formado por una pequeña ampolla de cristal rellena de gas neón a baja presión y en cuyo interior se halla un contacto formado por láminas bimetálicas.

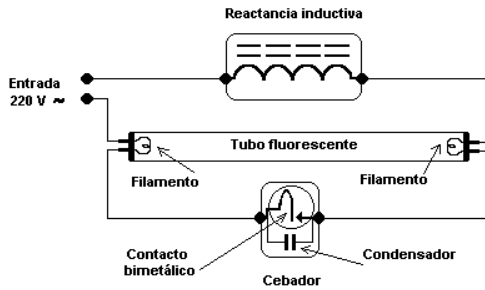


Fig. 3. Esquema de conexiones de una lámpara fluorescente.

En paralelo con este contacto se halla un condensador destinado a actuar de chupador de chispa o apagachispas. La presencia de este condensador no es imprescindible para el funcionamiento del tubo fluorescente pero si ayuda bastante a aumentar la vida útil del par bimetálico cuando es sometido a trabajar como interruptor de altos voltajes. Por esta razón se recomienda usar la iluminación fluorescente en regímenes continuos y no como iluminación intermitente. El elemento de reactancia inductiva está constituido por una bobina enrollada sobre un núcleo de chapas de acero, el cual recibe el nombre de *balastro* o *balasto* o "ballast". El término *balasto* no debe ser confundido con el material usado en la construcción de vías de ferrocarril.

B. El generador de ozono

Un generador de ozono utiliza el efecto corona para descomponer el oxígeno (O_2) del aire, estos átomos de oxígeno se recomponen en ozono (O_3) y son liberados en el ambiente. El efecto corona se debe a la acumulación de cargas eléctricas en los conductores, si esta acumulación de cargas eléctricas llega a la saturación, el aire circundante se vuelve ligeramente conductor y las cargas eléctricas escapan produciendo un sonido característico y emitiendo luz. Estos dispositivos son una especie de lámpara, como se muestra en la Fig. 4. Las lámparas para efecto corona son elementos que permiten una concentración de altos voltajes en su interior, facilitando las descargas eléctricas (efecto corona) hacia una malla metálica conectada a tierra, la cual cubre el cuerpo de la lámpara. Estas descargas de alto voltaje destruyen las moléculas de oxígeno y producen ozono. La Fig. 5 muestra el montaje para las medidas de las señales recibidas, mostradas en las Figs. 6 y 7.

Lámpara de efecto corona

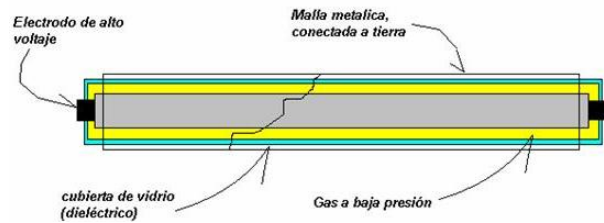


Fig. 4. Esquema de conexiones de una lámpara de efecto corona.



Fig. 5. Montaje experimental, los dos aros separados a una distancia de 5 cm

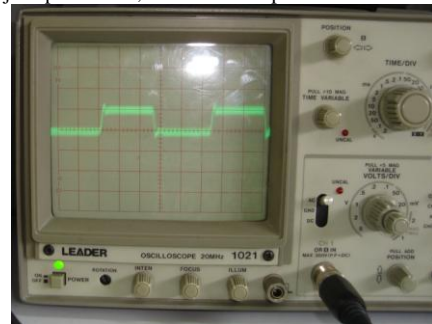


Fig. 6. Onda de salida a una distancia menor de 5 cm, con la lámpara apagada.

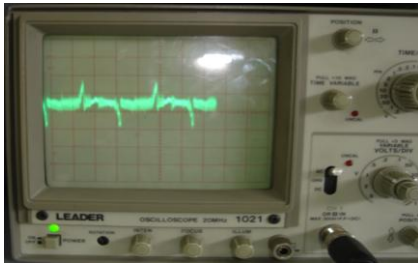


Fig. 7. Onda de salida a una distancia menor de 15 cm, con la lámpara encendida

En las Figs. 8 a 12 se muestran las curvas con los resultados obtenidos al enviar una señal de onda cuadrada. Como se puede apreciar en las curvas, a distancias menores de 20 cm y con frecuencias mayores a 10 kHz, la forma de la onda recibida fue más parecida a la transmitida. Puede observarse que prácticamente en casi todas las frecuencias medidas se midió una señal de voltaje mayor que con la lámpara apagada, lo que indica que el gas ionizado en el interior del tubo de vidrio puede servir como medio de transmisión de ondas electromagnéticas. También se pudo percibir que dicho medio se comporta como un filtro, por la distorsión que se evidenció al cambiar la forma de las señales transmitidas, especialmente a frecuencia superiores, por encima de 1MHz, como se muestra en la Fig. 13.

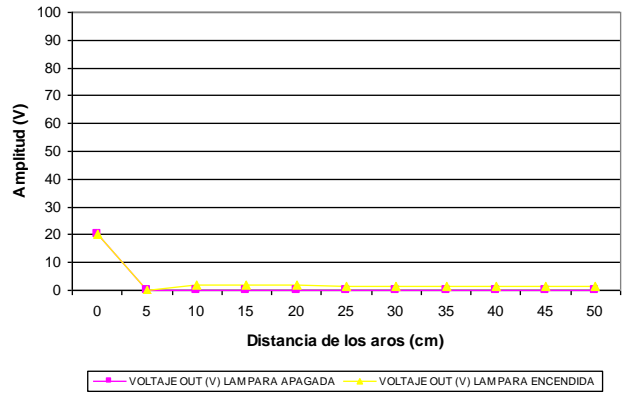


Fig. 10. Voltaje recibido a 10kHz con un voltaje transmitido pico a pico de 20 V.

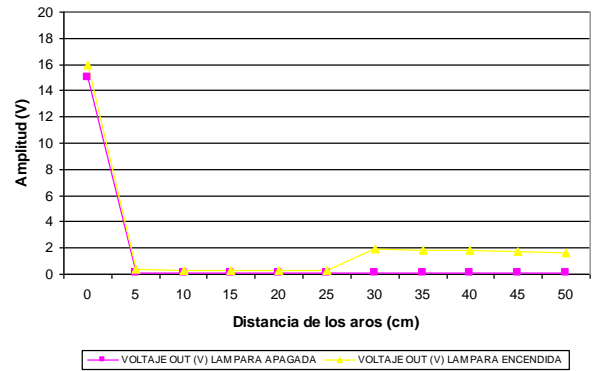


Fig. 11. Voltaje recibido a 100 kHz con un voltaje transmitido pico a pico de 15 V.

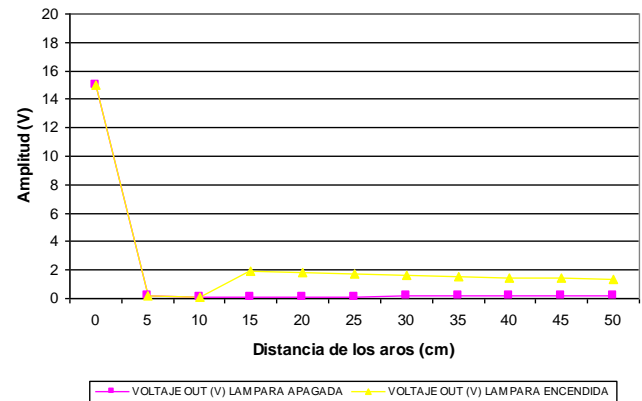


Fig. 12. Voltaje recibido a 1MHz con un voltaje transmitido pico a pico de 15 V.

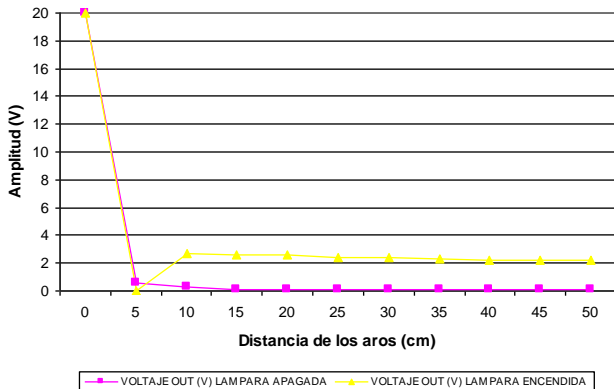


Fig. 8. Voltaje recibido a 100 Hz con un voltaje transmitido pico a pico de 20 V.

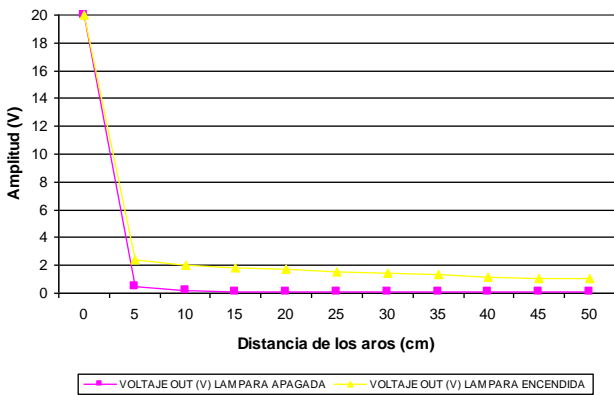


Fig. 9. Voltaje recibido a 1kHz con un voltaje transmitido pico a pico de 20 V.

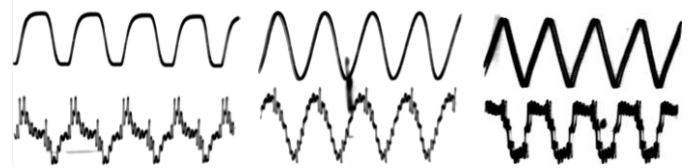


Fig. 13. Diferentes formas de señales enviadas y recibidas, a 1.027MHz. La superior es la transmitida y la inferior la recibida.

V. CONCLUSIONES

Es posible mejorar el desempeño de una línea de transmisión de energía eléctrica aprovechando el gas ionizado alrededor de los cables producidos por el efecto corona. Además de minimizar la atenuación de las señales transmitidas, es necesario disminuir el nivel de distorsión de amplitud y de fase del canal [5]. Éste método se puede utilizar para diagnosticar el ancho de banda que se puede obtener conociendo las dimensiones y los materiales de la línea de transmisión, disminuyendo la distorsión y mejorando el desempeño del sistema. Se ha modelizado el diseño de tubos dieléctricos con plasma como simulador del gas ionizado presente en líneas de potencia eléctrica por el efecto corona, partiendo de los datos sobre los parámetros físicos y electromagnéticos de la estructura. Estos métodos se podrán utilizar para recomendar cables de potencia eléctrica que se utilicen para transmisión de información. Este trabajo se continuará estudiando los efectos de otros materiales y comparando los resultados con los obtenidos utilizando la caracterización del canal como respuesta a la función impulso unitario. Al mejorar el desempeño de estas redes de alta tensión como transportadoras de información, pueden servir como red de acceso, lo que permitirá la competencia entre mayor número de operadores de telecomunicaciones y la convergencia de servicios, llegando a más usuarios y a menor costo. Además, posibilita aumentar el ancho de banda y puede competir con los sistemas tradicionales, porque facilita la instalación.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a C. F. Zapata R y a J. Rincón por su colaboración en la toma de medidas en el laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] M.A. Sobrevila, *Instalaciones de Potencia*, 1987, pp. 218-221.
- [2] R. M. Mujal. *Tecnología eléctrica*. Barcelona: Ediciones UPC. ISBN 84-8301-716-4, 2000.
- [3] C.C. Motta, A.D. Fonseca, G.H. Gomes y H.S. Maciel, Analysis of standing wave pattern of a surface wave argon discharge produced by microwave and electron density measurement, *Proc. of the IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica-IX SBMO*, Brasil, 2000, pp. 159-163.
- [4] C.C. Motta, A.D. Fonseca, G.H. Gomes y H.S. Maciel, Complex Permittivity Measurement in Dielectric Waveguide Filled with Argon Plasma, *Proc. of the International Microwave and Optoelectronics Conference-SBMO/IEEE MTT-S*, Brasil, 2001, pp. 273-276.
- [5] W.H Hayt, *Teoría Electromagnética*, Mc Graw Hill, Bogotá, 1979, pp. 385-423.

Samuel Ángel Jaramillo Flórez nació en Bogotá, Colombia, en Julio 16, 1954. Se graduó en Ingeniería Electrónica de la UPB (1978), y en Física de la Universidad de Antioquia (1988). Su experiencia de trabajo incluye la Universidad del Quindío en Armenia, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Medellín, Universidad EAFIT, Universidad UPB e Institución Universitaria Pascual Bravo, en Medellín, Colombia. Su campo específico de interés incluye alta frecuencia y comunicaciones ópticas. Jaramillo Flórez ha recibido becas de los gobiernos de España, Brasil y Colombia. Se graduó MSc. en la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil, en 1992, y está realizando estudios de doctorado en la Universidad Complutense de Madrid (UCM), España. Ha sido conferencista en eventos nacionales e internacionales sobre temas de su especialidad.