

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 404 504**

51 Int. Cl.:

G01R 31/08 (2006.01)

G01R 31/11 (2006.01)

G01R 31/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.08.2007 E 07253367 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2012 EP 1892534**

54 Título: **Método diagnóstico para cables eléctricos utilizando técnica de tomografía axial**

30 Prioridad:

25.08.2006 US 840229 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

28.05.2013

73 Titular/es:

**INSTRUMENT MANUFACTURING COMPANY
(100.0%)
50 Utopia Road
Manchester, CT 06042, US**

72 Inventor/es:

MASHIKIAN, MATTHEW S.

74 Agente/Representante:

URÍZAR ANASAGASTI, José Antonio

ES 2 404 504 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método diagnóstico para cables eléctricos utilizando técnica de tomografía axial

ANTECEDENTESCampo técnico

- 5 **(0001)** La presente divulgación se refiere a métodos, sistemas y aparatos de ensayo diagnóstico de cable, y, más particularmente, a métodos, sistemas y aparatos de ensayo de cable que utilizan principios de "onda estacionaria" para facilitar la identificación y la ubicación del defecto (s) a lo largo de un cable de potencia

Técnica anterior

- 10 **(0002)** Con referencia a la figura. 1, los cables de potencia apantallados convencionales consisten generalmente en un conductor, normalmente fabricado de cobre o de aluminio, rodeado por un apantallamiento semiconductor concéntrico delgado, al que se hace referencia como la pantalla de conductor. La pantalla de conductor, a su vez, está rodeada por una capa concéntrica de aislamiento, cuyo espesor aumenta con la tensión nominal del cable. Esta capa de aislamiento, a su vez, se cubre con una segunda pantalla semiconductor concéntrica delgada, a la que se hace referencia como la pantalla de aislamiento. Un blindaje metálico concéntrico, en forma de hilos concéntricos, cintas de metal superpuestas u otra estructura similar rodea a este blindaje. Todo el conjunto se aloja en una capa de aislamiento

- 15 que protege el cable contra la entrada de agua, así como daños físicos y químicos. El conductor de cable se mantiene típicamente a un voltaje elevado, mientras que el blindaje de metal exterior se mantiene a potencial de tierra. Mientras los componentes del cable se pueden basar en diferentes diseños, el aislamiento de cable moderno es generalmente de los dos tipos siguientes:

- 20 (a) papel impregnado en aceite o cinta de polímero impregnada en aceite (construcción laminada), y (b) polímero seco extruido. Los cables se describen como teniendo una configuración co-axial.

- 25 **(0003)** A medida que envejecen los cables en servicio, sus capas de aislamiento pueden desarrollar deficiencias que supongan un riesgo de precipitar un fallo del cable. Como resultado del envejecimiento, el aislamiento laminado podría hacerse más débil en toda su longitud, pero más a menudo desarrollará deficiencias discretas como resultado de la entrada de agua, la falta de suficiente aceite u otras condiciones estructurales y / o ambientales. Se conoce que el aislamiento extruido de polímero envejece en determinadas localizaciones debido a huecos, impurezas, salientes, difusión de agua en forma de árboles ("árboles de agua") y otras anomalías. Se han hecho esfuerzos para abordar las propiedades y el rendimiento de composiciones aislantes de polímero. Véase, por ejemplo, la patente de EE.UU. N ° 6.521.695 a Peruzzotti et al. Sin embargo, las limitaciones asociadas con los aislamientos de polímero utilizados en la fabricación de cables de potencia, junto con impurezas u otras condiciones que obligan a que se concentre la tensión eléctrica, podrían producir defectos carbonizados en forma de árboles, llamados árboles eléctricos, y dar lugar finalmente a fallos tempranos/indeseables en los cables.

- 35 **(0004)** Los propietarios de cables desean extender tanto como sea posible la vida útil de funcionamiento de sus cables, y evitar interrupciones durante el servicio normal. Los cables deben, por lo tanto, someterse a un ensayo inicial de correcta puesta en marcha después de la instalación, y periódicamente a ensayos de diagnóstico (ensayos de mantenimiento) durante el servicio para identificar y corregir los posibles puntos débiles. Excluyendo los ensayos de resistencia de alta potencia ("HiPot"), los ensayos de diagnóstico por lo general pertenecen a una de dos categorías generales: (a) evaluación global de la condición de aislamiento del cable, y (b) evaluación por descarga parcial de puntos débiles discretos. Los ensayos específicos siguientes están disponibles comercialmente bajo cada categoría:

(a) Evaluación global de la condición

- 45 **(00005)** Los ensayos globales de evaluación de condición están diseñados generalmente para evaluar el deterioro general de ciertas propiedades aislantes (dieléctrico) del cable. Se indican tres métodos de ensayo específicos:

- 50 * Medición del factor de disipación total del cable cuando se somete a varios niveles de voltaje a una frecuencia fija (por ejemplo, 50/60Hz, o 0,1 Hz). El factor de disipación se refiere a menudo como tangente delta (la tangente trigonométrica del ángulo por el que la corriente total conducida por el cable difiere de la conducida por un condensador ideal equivalente sin pérdidas). La tangente delta ($\tan\delta$) es una medida de las pérdidas dieléctricas en el cable.

- Medición del factor de disipación global y la constante dieléctrica de la totalidad del cable en función de diversas frecuencias mientras que la tensión puede asumir varios niveles diferentes. Este método también se conoce como espectroscopia dieléctrica.
- 5 • Medición del tiempo que tarda un cable para recuperar su tensión después de que ha sido cargado a un nivel de tensión determinado con una corriente continua (cc) y en cortocircuito momentáneamente o, alternativamente, la magnitud de la tensión recuperada en un tiempo dado. Otro método dual es la medición de corriente como una función del tiempo después de haber cortocircuitado permanentemente el cable. El primer método se refiere a menudo como método de "la tensión de retorno", y el segundo como el método de "corriente de relajación ". Ambos métodos se basan en principios de polarización dieléctrica / relajación.
- 10 b) Medición de descarga parcial
- (0006)** Defectos discretos a menudo emiten una señal eléctrica muy pequeña de muy corta duración (una descarga parcial) cuando el cable se somete a un esfuerzo de tensión superior a un nivel umbral. Como la tecnología de radar, el sitio de una descarga parcial puede ser ubicado con precisión por medio de métodos basados en ondas electromagnéticas progresivas y sus reflexiones.
- 15 **[0007]** Técnicas adicionales de la técnica anterior para la detección de fallos y defectos en cables eléctricos se describen en la literatura de patentes. La patente de EE.UU. N ° 4.887.041 a Mashikian et al. describe un método y un aparato para detectar las ubicaciones de fallos incipientes en una línea de potencia aislada. En una realización ejemplar de la patente Mashikian 041, el método implica abrir un extremo de la línea de potencia (si no está adecuadamente terminado para reflejar pulsos de alta frecuencia), aplicar una tensión de excitación al otro extremo de la línea de potencia en un punto de excitación, detectar un primer pulso de alta frecuencia producido por una descarga en la línea de potencia y transmitido por la línea de potencia al punto de excitación, detectar una primera reflexión del pulso desde el extremo abierto de la línea de potencia al punto de excitación, detectar el tiempo de transmisión de un reflejo del primer pulso desde el punto de excitación hasta el extremo abierto de la línea de potencia y vuelta al punto de excitación, y dividir el tiempo entre la detección del primer pulso y el primer pulso reflejado por el tiempo de respuesta detectado. La patente de Mashikian describe además métodos que detectan pulsos de descarga que se producen en un intervalo predeterminado de magnitud del voltaje de excitación y pulsos de descarga que residen dentro de rangos predeterminados de magnitudes. Los sitios de descarga pueden ser detectados utilizando sea pulsos de tensión reflejada o pulsos de corriente reflejada
- 20
- 25
- 30 **(0008)** Una enseñanza de la técnica anterior se proporciona en la patente de EE.UU. N ° 5.272.439 a Mashikian et al. La patente '439 de Mashikian describe un método y aparato para localizar un fallo incipiente en un punto a lo largo de la longitud de una línea de potencia
- que, en realizaciones de ejemplo, implica la aplicación de un voltaje de excitación en un extremo abierto de la línea de potencia. El pulso de la señal transmitida a lo largo de la línea de potencia al extremo abierto se pasa a través de un filtro de paso alto para eliminar la
- 35 parte de la señal que está a una frecuencia por debajo de la tensión de excitación y sus armónicos. La señal filtrada se amplifica y pasa a través de un filtro de paso de banda para eliminar una porción de alta frecuencia de la señal que contiene una gran proporción de
- 40 ruido en relación con la frecuencia de la frecuencia de descarga parcial desde el fallo incipiente. Esta señal filtrada se pasa a un dispositivo de almacenamiento digital adaptado para ser activado por una señal de una amplitud predeterminada, y el dispositivo de almacenamiento digital activado recibe la señal amplificada directamente desde el amplificador y almacena los datos digitales sobre la amplitud y tiempo para los picos de la señal amplificada durante un período de tiempo predeterminado. Los datos digitales almacenados se procesan para identificar los picos que reflejan el punto de descarga parcial en la línea de potencia.
- 45 **[0009]** Adaptaciones prácticas de los anteriores métodos de localización de descargas parciales y su utilidad en la realización de ensayos de diagnóstico en cables instalados se describen en varias publicaciones técnicas, un ejemplo reciente de las cuales es el artículo publicado en el número de julio / agosto de 2006 de la revista Electrical Insulation del IEEE, vol. 22, N° 4, titulada "Defectos revelados en los cables de media tensión por ensayos Off-Line de descargas parciales a frecuencia industrial", por M. Mashikian y A. Szatkowski
- 50 **(0010)** Los métodos de diagnóstico de descargas parciales son generalmente eficaces en la búsqueda de cavidades, hendiduras hechas con herramientas, protrusiones de pantallas o blindajes y árboles eléctricos en cables con aislamiento de polímero extruido. Tales métodos son también generalmente eficaces en la localización de zonas defectuosas en aislante laminado impregnado en aceite debido a causas como la falta de aceite, papel quebradizo con formación carbonizada de tipo árbol (comúnmente conocido como rastreo) y / o glóbulos de agua. Sin embargo, las técnicas de descarga parcial no son eficaces en la identificación directa de la
- 55 ubicación de árboles de agua en aislamiento de polímero extruido, ni son tales métodos eficaces en la

identificación / localización de humedad no condensada en laminados impregnados de aceite. A este respecto, se observa que la humedad - sin existencia de agua condensada- podría constituir una causa importante de fallo en los cables aislados de papel impregnado en aceite. Humedad, árboles de agua, y agua conducen a un aumento localizado del factor de disipación y, posiblemente, de la constante dieléctrica del aislamiento. A pesar de la importancia de estos factores en el rendimiento del cable, un ensayo de evaluación del estado global puede ser incapaz de detectar esta condición sin ambigüedad, al menos en parte debido a que estos métodos proporcionan valores medios que cubren toda la longitud del cable. Ninguno de los métodos de evaluación global puede localizar tales defectos discretos y, a menos que los defectos discretos estén localizados con precisión, el método de diagnóstico pierde su atractiva ventaja económica y valor/fiabilidad general.

[0011] En consecuencia, subsiste la necesidad de métodos, sistemas y aparatos para detectar y localizar con precisión defectos y potenciales defectos en cables de potencia. Estas y otras necesidades son satisfechas por los métodos, sistemas y aparatos aquí descritos.

[0012] La patente EE.UU. 6.472.885 describe un método y un aparato para la medición de permitividad compleja de materiales dieléctricos. El aparato incluye un montaje de ensayo de línea de transmisión TEM o cuasi-TEM, que contiene el material dieléctrico bajo ensayo, una serie de conjuntos únicos de carga reflectante para inducir reflexiones en el montaje, un analizador que mide magnitud y fase, un kit de calibración personalizado y un ordenador con software computacional. M S Mashikian en "Diagnóstico preventivo en ensayos de cables subterráneos", IEEE / PES Conferencia y Exposición sobre Transmisión y Distribución, NY, Vol. 1, 2001 analiza ensayos de diagnóstico preventivo de cables subterráneos con métodos de ensayo diagnóstico, incluyendo espectroscopia dieléctrica para medir la permitividad y la pérdida dieléctrica en función de la frecuencia y la tensión.

RESUMEN

[0013] La presente invención proporciona un método para ensayar cables de acuerdo con la reivindicación 1 y un sistema para ensayar cables de acuerdo con la reivindicación 11. La presente descripción se refiere a métodos, sistemas y aparatos de ensayo diagnóstico de cables que ventajosamente utilizan principios de "onda estacionaria" para facilitar la identificación y localización de defecto (s) a lo largo de un cable de potencia. Los métodos / sistemas divulgados son efectivos para medir factores de disipación y constantes dieléctricas asociadas con el aislamiento de cable blindado de potencia en cualquier número de puntos o secciones a lo largo de la longitud axial del cable. Los métodos / sistemas divulgados también son eficaces para determinar cambios localizados en la resistencia y la inductancia de un cable, es decir, parámetros asociados con el conductor de cable. En esencia, los métodos/ sistemas descritos realizan lo que puede denominarse como tomografía axial, permitiendo determinar la pérdida dieléctrica o factor de disipación y la constante dieléctrica del aislamiento así como la resistencia y la inductancia del sistema de conductor de cable en uno o más puntos / secciones predeterminados del cable a lo largo de su eje.

[0014] De acuerdo con las realizaciones de ejemplo de la presente descripción, la técnica de tomografía axial descrita para localizar defectos de un cable se puede emplear a varias frecuencias de funcionamiento, tales como 10-1000kHz (en el extremo superior), y

50 o 60 Hz, 1 Hz, 0,1 Hz, etc. (en el extremo inferior). Al operar en un rango de frecuencias, la técnica divulgada funciona eficazmente como lo que puede denominarse "espectro-tomografía," combinando la tomografía axial con espectroscopia dieléctrica. Características, funciones y beneficios adicionales de los sistemas, métodos y aparatos divulgados serán evidentes a partir de la descripción detallada que sigue.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[0015] Para ayudar a los expertos ordinarios en la técnica en la fabricación y el uso de los sistemas, métodos y aparatos descritos, se hace referencia a las figuras que se acompañan, en donde:

La figura 1 es una vista en sección transversal de un cable de potencia convencional;

Las figuras 2 (a), 2 (b) y 2 (c) son equivalentes de circuito de un aislamiento de cable blindado de potencia;

La figura 3 (a) es un diagrama que muestra un ejemplo de cable dividido en "n" secciones iguales a lo largo de su longitud axial, en el que el cable es energizado por una tensión "Vin" y termina con una impedancia de carga ZL.

La figura 3 (b) es el esquema del circuito eléctrico de cada sección de cable en la figura 3 (a).

La figura 4 es un diagrama esquemático de un sistema de ejemplo para implementar los métodos / técnicas divulgados;

Las Figuras 5-7 son gráficos de tensión para un cable homogéneo de ejemplo de acuerdo con la presente divulgación;

La Figura 8 es un diagrama esquemático de una configuración de ejemplo de cable mixto según la presente divulgación;

5 Las Figuras 9-10 son gráficos de voltaje para una configuración de ejemplo de cable mixto según la presente divulgación;

La figura 11 es un diagrama esquemático de un cable ramificado de ejemplo según la presente divulgación; y

10 FIGURAS 12-14 son representaciones gráficas de amplitud de tensión para el cable ramificado de ejemplo en tres frecuencias distintas.

FIGURAS 15-16 son ejemplos de "tomogramas" de un cable que tiene dos zonas defectuosas con elevada $\tan\delta$ y constante dieléctrica.

DESCRIPCIÓN DE REALIZACIÓN(ES) DE EJEMPLO (S)

15 **[0016]** Los métodos, sistemas y aparatos divulgados de ensayo diagnóstico de cables, utilizan principios de "onda estacionaria" para identificar y localizar defecto (s) a lo largo de un cable de potencia. Como se describe aquí, los métodos/ sistemas divulgados son eficaces para medir el factor de disipación ($\tan\delta$) y la constante dieléctrica (ϵ') asociados al aislamiento de un cable de potencia, así como la resistencia (R_c) y la inductancia (L_c) asociadas con el sistema conductor en puntos determinados a lo largo de la longitud axial del cable. Los métodos/ sistemas divulgados ofrecen ventajas significativas para los ensayos de cable y la identificación/ ubicación de defectos relacionada.

20 **[0017]** Con referencia a la figura. 2 (a), el diagrama de circuito esquemático representa un aislamiento de cable blindado de potencia sometido a una fuente de tensión alterna, $V = V_m \sin(\omega t)$, donde V_m es la amplitud de la tensión y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, siendo f la frecuencia en Hz. El aislamiento de los cables se muestra como una capacitancia pura, C , a través de la cual está conectada una resistencia, R , que representa las pérdidas dieléctricas. C se expresa en faradios y R en ohmios. La figura. 2 (b) es un diagrama "fasor" que muestra la corriente I_c , que pasa por el condensador ideal, la corriente, I_R , que pasa por la resistencia, y la corriente total I , que es la suma de las dos corrientes mencionadas anteriormente. El ángulo, δ , entre I y I_c se llama ángulo de factor de disipación y representa el efecto de la pérdida dieléctrica que ocurre en el aislamiento del cable. El factor de disipación, que se define como $\tan\delta$, puede mostrarse igual a $1/\omega RC$

30 **(0018)** Una notación alternativa equivalente, a menudo utilizada por los físicos (en oposición a los ingenieros), es la siguiente: el cable se supone que se representa por la capacitancia compleja siguiente en lugar de por una combinación de una resistencia en paralelo con una capacitancia: $C^* = C_0 (\epsilon' - j \epsilon'')$, donde ϵ' se llama la constante dieléctrica, ϵ'' el índice de disipación, y C_0 la capacitancia geométrica (capacitancia de la misma construcción de cable con aire como su medio aislante) del aislamiento del cable. La magnitud "j" es la raíz cuadrada de la cantidad negativa "-1". La intensidad I , que pasa por esta capacitancia compleja es, por tanto: $I = V \times \omega j C = V \omega C_0 (\epsilon'' + j \epsilon')$ El diagrama fasor se redibuja en la figura 2 (c) sobre la base de esta nueva forma de la corriente I . La tangente trigonométrica del ángulo δ , $\tan\delta$, ahora se expresa como la relación ϵ''/ϵ' . La ventaja de esta notación es que el ensayo de tomografía axial permitiría determinar ϵ'' y ϵ' , así como $\tan\delta$. Las dos representaciones anteriores son equivalentes entre sí de acuerdo con las siguientes relaciones:

40
$$C = \epsilon' C_0 \text{ and } 1/R = \omega C_0 \epsilon''$$

[0019] El cable conductor se representa como una combinación en serie de una resistencia dependiente de la frecuencia, R_c , y un reactancia inductiva, ωL_c como se muestra en la figura. 3 (b).

45 **[0020]** Volviendo a la figura. 3 (a), la fuente de tensión en el extremo emisor del cable suministra una potencia compleja, S_{in} , que es la suma de la potencia real, P_{in} , y la potencia reactiva, Q_{in} , relacionadas entre sí por la relación siguiente:

$$S_{in} = V_{in} \times I_{in}^* = P_{in} + jQ_{in} \quad [1]$$

La cantidad I_{in}^* denota el conjugado complejo de la intensidad de entrada I_{in} . Una relación similar existe en el extremo receptor, o carga, del cable:

$$S_L = V_L \times I_L^* = P_L + jQ_L \quad [2]$$

5 [0021] La energía compleja disipada en el cable consta de dos componentes, el primero es la energía compleja, S_c , disipada en el conductor de cable, y el segundo es la energía compleja, S_d , disipada en el material dieléctrico, o en el aislamiento, del cable. A medida que envejece un cable, excepto en pocos casos excepcionales, la energía compleja disipada en el conductor se mantiene constante, mientras que la disipada en el aislamiento del cable tiende a aumentar. Todos los ensayos globales de diagnóstico actuales pretenden determinar los cambios en la disipación de energía del aislamiento del cable. En la presente descripción, la impedancia del conductor, $R_c + j\omega L_c$, se permite que varíe, también, a lo largo del eje del cable. Aplicando el principio de conservación de energía a esta situación, la energía compleja, S_d , disipada en el aislamiento, se encuentra por la relación:

$$S_d = S_{in} - S_L - S_c \quad [3]$$

10

[0022] Dividiendo la ecuación [3] en sus componentes reales e imaginarios, se obtienen las relaciones siguientes:

$$P_d = \sum_i V_i^2 \omega C_i \tan \delta_i = \sum_i V_i^2 \omega C_o \epsilon''_i = P_{in} - P_L - \sum_i I_i^2 R_{ci} \quad [4]$$

$$Q_d = \sum_i V_i^2 \omega C_i = \sum_i V_i^2 \omega C_o \epsilon'_i = Q_{in} - Q_L - \sum_i I_i^2 \omega L_{ci} \quad [5]$$

15

[0023] Ecuaciones similares a [4] y [5] se pueden escribir para varios valores de impedancia de carga Z_L , impedancia de fuente, Z_s y frecuencia, ω . Si el cable se divide en n secciones (no necesariamente de igual dimensión), se necesita un mínimo de n ecuaciones para resolver estas ecuaciones. La solución determinará los valores de $\tan \delta$ y C , o ϵ' y ϵ'' para cada sección a lo largo de la longitud axial del cable, proporcionando así un tomograma axial del aislamiento del cable. El proceso anterior es típicamente implementado en dos etapas distintas: primero, se supone que el conductor es homogéneo y se calculan las variaciones de los parámetros de aislamiento. En base a estos valores, se vuelven a calcular los perfiles de tensión y de intensidad a lo largo del cable. En un segundo paso, se resuelven las ecuaciones [4] y [5], suponiendo que los valores calculados de los parámetros de aislamiento son conocidos, mientras que los parámetros de conductor, R_c y L_c , son las variables desconocidas. A través de un proceso iterativo, se calculan todos los parámetros de aislamiento conductor, de manera que pueden generarse cuatro (4) tomogramas axiales diferentes

20

25

30

35

40

[0024] Con este contexto matemático, los sistemas y métodos de la presente divulgación establecen los perfiles de e intensidad a lo largo del cable con el principio de "ondas estacionarias". Para los fines de los métodos / sistemas descritos, se utilizan principios de onda estacionaria estableciendo una tensión alterna a una frecuencia relativamente alta, por lo general en la orden de 10-1000 kilohercios (kHz) en el cable de potencia a ensayar. El voltaje se conecta al cable en el extremo "emisor" (ver representación esquemática en la figura. 3 (a)). Esta tensión establece un patrón de onda progresiva, que se refleja en el extremo opuesto "receptor" del cable. La combinación de la onda progresiva delantera y su reflexión establece un patrón de "onda estacionaria" dentro del cable. Cabe destacar que cada sección de cable se somete a una tensión alterna de frecuencia ω , pero con diferente amplitud. Más particularmente, una onda de tensión se desplaza desde la fuente de tensión hacia la carga a una velocidad que está influenciada por parámetros tales como los materiales del cable y la construcción del cable. La tensión yendo hacia delante puede ser denotada como V^+ . En la carga, una porción de la onda se refleja, estableciendo un voltaje V^- . La parte reflejada de la onda de tensión se determina por el valor de la impedancia de carga y la impedancia característica del cable. La parte reflejada de la onda se puede determinar matemáticamente, si se conocen la impedancia de carga, Z_L , conectada en el extremo receptor del cable y la impedancia característica, Z_0 , del cable. Una vez que la parte reflejada de la onda progresiva se ha determinado / calculado, es posible calcular la tensión e intensidad de la "onda estacionaria" en cualquier punto o sección a lo largo de la longitud axial del cable. En efecto, en cualquier punto / sección a lo largo del cable, la

tensión (o intensidad) instantánea es la suma $V^+ + V^-$ (o $I^+ + I^-$) sobre la base de las ondas que se desplazan en las direcciones hacia adelante y reflejada, respectivamente. Puesto que ambas ondas son sinusoidales, la suma de las dos ondas es también sinusoidal

5 **[00025]** Los patrones de tensión e intensidad se pueden determinar ya sea por aplicación de ecuaciones convencionales de onda estacionaria, o a partir de la solución de la representación del circuito discreto de la figura. 3 (a), donde las secciones no necesitan tener la misma longitud. Inicialmente, los valores de tensión e intensidad se basan en los valores globales de los parámetros de cable R_c , L_c , C y R , obtenidos para condiciones de carga conocidas, incluyendo condiciones de corto y circuito abierto, por mediciones directas de magnitudes de tensión corriente intensidad en los extremos de envío y recepción del cable. Estos valores
10 iniciales de los parámetros del cable pueden ser modificados, de forma iterativa, a medida que se obtienen las soluciones de ecuaciones tales como [4] y [5].

15 **[0026]** En ausencia de condiciones cambiantes, la combinación forma una onda que parece ser estacionaria (no se mueve o permanece quieta). En realidad, cada punto a lo largo del cable está sometido a una tensión sinusoidal de la misma frecuencia que la frecuencia de la fuente; sin embargo, en cada punto / sección, la amplitud de la tensión resultante es diferente. Cada onda de tensión estacionaria también va acompañada por una onda de intensidad estacionaria. Con referencia a las Figs. 5-7, se representan resultados experimentales para un ejemplo de cable homogéneo que tiene las siguientes características / parámetros y condiciones de ensayo:

20 Longitud (L) = 200m
Velocidad de onda (u) = 160 m / μ s
Frecuencia (f) = 200 kHz (figura 5); 400 kHz (figuras 6-7)
Longitud de onda (λ) = 800m; 400m
Impedancia característica de cable (Z_0) = 20 Ω

25 Como se muestra en los gráficos anteriores, la amplitud de la tensión en diversas posiciones axiales a lo largo del cable se calcula basándose en las condiciones de ensayo de acuerdo con la presente descripción.

30 **[00027]** Con referencia a la figura. 8, se representa esquemáticamente una configuración de ejemplo de cable mixto. El cable mixto incluye una primera parte / componente que se fabrica a partir de polietileno reticulado (XLPE) y una segunda parte / componente que se fabrica con un cable de aislamiento de papel impregnado en aceite - cubierta de plomo (PILC). Con referencia a las Figs. 9-10, se representan resultados experimentales para la configuración indicada de cable mixto que tiene las siguientes características / parámetros y condiciones de ensayo:

PILC

35 **[0028]**
Impedancia característica del cable (Z_0) = 15 Ω
Longitud (L) = 600m
Velocidad de la onda (u) = 140 m / μ s

XLPE

40 **[0029]**
Impedancia característica del cable (Z_0) = 18 Ω
Longitud (L) = 200m
Velocidad de la onda (u) = 160 m / μ s

Impedancia de la fuente

[0030]
 $R_s = 0$ o 15 Ω

[0031] Como se muestra en las Figs. 9-10, amplitudes de tensión son medidas / derivados para varios puntos / secciones a lo largo de la longitud de la configuración de ejemplo de cable mixto aquí descrita a frecuencias de 200 kHz y 90 kHz de acuerdo con la presente descripción.

5 **[0032]** Volviendo a la figura. 11, se proporciona un diagrama esquemático de un cable ramificado de ejemplo. Incorporados en la ilustración esquemática de la figura. 11 están características / parámetros relacionados con un ejemplo de realización del mismo. Las amplitudes de tensión para el cable ramificado del ejemplo se proporcionan en las gráficas de las Figs. 12-14. Como se muestra allí, las amplitudes de tensión se miden / derivan de posiciones axiales a lo largo de las ramas de cable respectivas a frecuencias de 80 kHz, 120kHz, y 160kHz.

10 **[0033]** Mediante la variación de la impedancia de carga, la impedancia de la fuente o la frecuencia de la fuente de tensión, o las tres, un número de veces (por ejemplo, "n" veces o más), pueden establecerse ventajosamente las ecuaciones necesarias para resolver $\tan \delta$.

15 Cabe destacar que el factor de disipación a estas altas frecuencias no debe cambiar significativamente con una modesta variación de frecuencia, y por lo tanto puede suponerse que es constante. Sin embargo, este supuesto no es una condición necesaria para aplicar el método descrito y, en otras realizaciones de ejemplo de la presente divulgación pueden incluirse variaciones potenciales de factor de disipación debidas a variaciones de frecuencia en las ecuaciones matemáticas asociadas con los sistemas / métodos divulgados. Si es necesario o se desea, la misma operación puede llevarse a cabo intercambiando el extremo de envío y el extremo receptor del cable, generando la mitad de las ecuaciones necesarias en cada una de estas operaciones

20 **[0034]** La figura. 15 y la figura 16 son ejemplos de tomogramas axiales obtenidos en un modelo de cable de 240m de largo en el que se simularon dos áreas con elevado $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ y un área con constante dieléctrica elevada, ϵ' .

25 **[0035]** El procedimiento anterior permite la determinación de un perfil de factor de disipación a lo largo de la longitud de cable usando una amplia gama de frecuencias de excitación, por ejemplo, frecuencias de 10-1000kHz. Con el fin de realizar la técnica de tomografía axial divulgada usando frecuencias significativamente inferiores, por ejemplo, frecuencias de 50/60Hz, 1 Hz o 0,1 Hz, u otras, la amplitud V_m de la tensión de excitación es generalmente modulada con la frecuencia más baja deseada. El resultado es una fuente de excitación "modulada en amplitud" que se describe matemáticamente como:

$$V = V_m \sin(\omega_1 t) \sin(\omega t) \quad [6]$$

30 donde ω_1 es la menor frecuencia de modulación (por ejemplo, 60 Hz o 0,1 Hz). Con un apropiado sistema de circuitos y/o software, puede separarse la energía asociada con cada una de las dos frecuencias, ω y ω_1 . Así, el perfil de factor de disipación a cada una de estas frecuencias se puede calcular de acuerdo con las técnicas matemáticas antes descritas. El uso de esta técnica de amplitud modulada permite realizar "espectroscopia dieléctrica" por tomografía axial (espectrotomografía).

35 **[0036]** Por ello, en una realización ejemplar, el método/técnica de detección de cable divulgado implica los siguientes pasos:

(a) conectar una fuente de tensión alterna a un cable en un "extremo de envío" del mismo;

(b) aplicar una tensión al cable a una primera frecuencia para crear una onda progresiva a lo largo del cable que se refleja en el "extremo receptor" del mismo;

40 (c) permitir establecer un patrón de onda estacionaria a lo largo del cable por la onda progresiva y la reflexión de la misma;

(d) medir la pérdida total de potencia compleja (S_{in}) en el extremo emisor del cable

(e) medir o calcular la potencia compleja, (S_L), disipada en la impedancia de carga (Z_L);

45 (f) repetir los pasos anteriores durante una de: (1) la variación de al menos una de (i) la impedancia de carga (Z_L) conectada a el extremo receptor del cable, (ii) la primera frecuencia de la fuente de tensión, (iii) la impedancia de salida de la fuente de tensión, (iv) una combinación de la impedancia de carga (Z_L), la impedancia de salida de la fuente de tensión, y la primera frecuencia de la fuente de tensión, y (v) las combinaciones de las mismas, (2) el intercambio de extremos de cable emisor y receptor y (3) una combinación de los mismos;

- 5 g) calcular la tensión de onda estacionaria en cualquier punto / sección del cable en base a la impedancia de carga (Z_L) conectada en el extremo receptor del cable, y la impedancia característica (Z_0) del cable, o resolviendo el modelo de circuito discreto del cable como se muestra en la figura. 13(a), los parámetros de cable globales, R_c , L_c , C y R , habiendo sido determinados por mediciones de tensión corriente intensidad en los extremos de envío y recepción del cable bajo condiciones específicas de carga;
- (h) calcular la pérdida de potencia compleja, S_c , en el sistema conductor;
- (i) determinar el factor de disipación, $\tan\delta$, y la constante dieléctrica, ϵ' , en puntos/secciones predeterminadas a lo largo del eje del cable;
- 10 (j) volver a calcular los perfiles de tensión e intensidad de acuerdo con los nuevos valores de los parámetros de cable;
- (k) determinar los valores de la resistencia (R_c) y la inductancia (L_c) del conductor
- (l) si se justifica, repetir (g) a (k) con parámetros de cable corregidos.

15 **[0037]** La impedancia característica, Z_0 , del cable se puede conseguir a través de cálculos teóricos o por medición directa, de acuerdo con uno de los métodos de ejemplo siguientes :

- 20 (1) Midiendo la tensión, V_{in} , a través del cable y la intensidad I_{in} , dentro del cable en la fuente de tensión cuando la impedancia de carga es cero (cortocircuito) o infinita (circuito abierto). La impedancia de cortocircuito se define como $Z_{SC} = V_{in} / I_{in}$ cuando la carga es cero. La impedancia de circuito abierto se define como $Z_{oc} = V_{in} / I_{in}$ cuando la carga es infinita. La impedancia característica del cable es entonces igual a la raíz cuadrada del producto de Z_{SC} y Z_{oc} .
- (2) Cambiando la impedancia de carga Z_L hasta que la tensión V_{in} en el extremo fuente del cable y la tensión a través de la carga son iguales. Esto ocurre cuando Z_L es igual a Z_0 . La relación de Z_{SC} y Z_{oc} también se puede utilizar para determinar la constante de propagación del cable (constante de fase y atenuación), así como la velocidad de propagación, siempre que la longitud del cable sea conocida.

25 **[0038]** En otro ejemplo de realización de ejemplos de la presente descripción, los resultados obtenidos por descarga parcial y tomografía axial pueden combinarse, proporcionando de ese modo una potente herramienta de diagnóstico que es enormemente superior a todas las herramientas actualmente existentes

Sistemas de cable mixto

30 **(0039)** Los métodos, sistemas y aparatos de la presente divulgación tienen también una utilidad ventajosa para sistemas de cable mixto, es decir sistemas de cable donde dos o más clases de cable, tales como de aislamiento laminado de polímero extruido e impregnado en aceite, están interconectados entre sí. Estos cables tienen diferente impedancia característica Z_0 , y velocidad. Se pueden escribir ecuaciones basándose en la "impedancia de entrada" de cada cable, Z_{in} , su longitud, la velocidad de la onda electromagnética asociada con él, y la frecuencia de la fuente de tensión. Estas ecuaciones permitirán la determinación de la tensión en cada punto a lo largo del sistema de cable mixto. La velocidad /longitud de cable se puede medir de un ensayo de reflectometría con indicación temporal (TDR), tal como se conoce a partir de ensayos de la técnica anterior de descargas parciales realizados por el beneficiario de la presente solicitud, o puede ser estimado por cálculo

Sistemas de cables ramificados.

40 **[0040]** Los sistemas de cable con múltiples ramas pueden ser ensayados con éxito de acuerdo con la presente divulgación, siempre que una impedancia de carga variable esté conectada al extremo de cada rama. Los cálculos de tensión pueden, también, conseguirse por medio de las fórmulas la impedancia de entrada aquí descritas.

Configuración del hardware

45 **(0041)** Una configuración de ejemplo de sistema para poner en práctica los métodos / técnicas de la presente divulgación se ilustra en la figura. 4. En la ilustración esquemática de la figura. 4, los componentes señalados son los siguientes:

Elemento 1: fuente de tensión de frecuencia variable con amplitud modulada y controlable a distancia;

Elemento 2: dispositivo de medición de intensidad;

Elemento 3: dispositivo de medición de tensión;

Elemento 4: Digitalizador

Elemento 5: microordenador con medios para comunicar con digitalizador / receptor / transmisor (elemento 6) de forma inalámbrica o por cable de potencia u óptico;

5 Elemento 6: Digitalizador / receptor / transmisor que comunica con microordenador (elemento 5) y / o consola de control (elemento 9) de forma inalámbrica o a través de cable de potencia / óptico;

Elemento 7: Sistema de comunicación inalámbrica;

Elemento 8: impedancia variable controlable remotamente;

Elemento 9: Consola del operador del control remoto;

Elemento 10: Sistema de comunicación de fibra óptica .

10 Por ello, como se representa esquemáticamente en la figura. 4, en el extremo cercano (o extremo emisor) del cable, el sistema puede incluir:

- Una fuente de frecuencia controlable variable o de frecuencia variable de amplitud modulada (para el ensayo de espectro-tomografía) con una impedancia variable en serie, Z_S ;

- Uno o más dispositivos para la medición de la tensión e intensidad instantánea;

15 • Un digitalizador para digitalizar las mediciones;

- Un microordenador para calcular potencia y el perfil de tensión a lo largo del cable; y

- Una consola de control para el operador con medios para comunicar a distancia con el extremo de carga por vía inalámbrica o a través del cable de potencia bajo ensayo;

20 • Filtros analógicos o digitales, según sea necesario, para separar las frecuencias de modulación de las altas frecuencias "portadoras"

En el extremo remoto, se proporciona el siguiente hardware de acuerdo con el ejemplo de realización representado en la figura. 4:

- Una impedancia de carga controlable a distancia

- Un dispositivo de medición de tensión / intensidad, y

25 • Un digitalizador y medios para comunicar con el microordenador de extremo cercano por un sistema inalámbrico o a través del propio cable de potencia.

[0042] Se proporciona generalmente un ordenador / procesador para resolver el conjunto de "n" (o más) ecuaciones con "n" incógnitas para producir los valores del factor de disipación en cada una de las "n" secciones del cable. El ordenador / procesador está generalmente adaptado para ejecutar software de sistema que está adaptado para calcular el perfil de tensión a lo largo del cable, la potencia neta disipada por el aislamiento de cable para cada configuración de impedancia de carga, y la solución del sistema de "n" (o más) ecuaciones

30

"n" valores desconocidos de $\tan\delta$ y ϵ . Además, el software incluirá medios para mostrar los tomogramas ($\tan\delta$ vs. posición de cable) y para realizar operaciones de filtrado de los datos. La programación de dicho software está totalmente dentro de los conocimientos de expertos normales en la técnica, basándose en la divulgación aquí establecida en cuanto a las "n" (o más) ecuaciones a resolver simultáneamente de acuerdo con la presente divulgación.

35

Aunque el método, sistema y aparato para ensayo diagnóstico de cables se ha descrito aquí con referencia a realizaciones de ejemplo de los mismos, la presente divulgación no está limitada a dichas realizaciones de ejemplo. Más bien, los métodos, sistemas y aparatos descritos están sujetos a variaciones, modificaciones y / o mejoras sin apartarse del espíritu o alcance de la presente divulgación como se define por las reivindicaciones.

40

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para realizar ensayos de diagnóstico de un cable que comprende:
 - a. conectar una fuente de tensión alterna al cable en un "extremo emisor" del mismo;
 - 5 b. aplicar una tensión al cable a una primera frecuencia para crear una onda progresiva a lo largo del cable que se refleja en el extremo receptor del mismo;
 - c. establecer una onda estacionaria a lo largo del cable por la onda progresiva y la reflexión de la misma;
 - d. medir la pérdida total de potencia compleja (S_{in}) en el extremo emisor del cable;
 - 10 e. medir o calcular la potencia compleja (S_L) disipada en la impedancia de carga (Z_L) y (S_C) en el cable conductor;
 - f. repetir los pasos anteriores durante uno de:
 - (1) la variación de al menos una de (i) la impedancia de carga (Z_L) conectada en el extremo receptor del cable, (ii) la primera frecuencia de la fuente de tensión, (iii) la impedancia de salida de la fuente de tensión, (iv) una combinación de la impedancia de carga (Z_L), la impedancia de salida de la fuente de tensión y la frecuencia de la fuente de tensión, y (v) combinaciones de las mismas,
 - 15 (2) el intercambio de los extremos emisor y receptor del cable y
 - (3) una combinación de los mismos;
 - g. calcular la tensión de onda estacionaria en al menos un punto o sección del cable sobre la base de la impedancia de carga (Z_L) conectada en el extremo receptor del cable, y la impedancia característica (Z_0) del cable, o la solución de la representación discreta del cable cuyos parámetros globales R_c , L_c , R y C se han determinado por medición y cálculo, donde R_c es la resistencia dependiente de la frecuencia del conductor de cable, L_c es la reactancia inductiva del conductor de cable, C y R son la capacitancia pura y la resistencia del aislamiento de cable respectivamente, representando pérdidas dieléctricas, y
 - 20 h. determinar un factor de disipación ($\tan\delta$) y una constante dieléctrica (ϵ') en un punto o sección predeterminado a lo largo del eje del cable.
2. El método según la reivindicación 1, que incluye además identificar o localizar un defecto de cable en base al factor de disipación.
3. El método según la reivindicación 1, en el que el cable es un cable de potencia apantallado.
4. El método según la reivindicación 1, en el que los factores de disipación y constantes dieléctricas se determinan en una pluralidad de puntos o secciones a lo largo del cable.
5. El método según la reivindicación 4, en el que las impedancias características de cable se calculan en la pluralidad de puntos o secciones a lo largo del cable.
6. El método según la reivindicación 4, en el que la pluralidad de factores de disipación y constantes dieléctricas calculados son eficaces para establecer funcionalmente al menos una representación axial tomográfica y una representación espectro-tomográfica del estado del cable.
7. El método según la reivindicación 1, en el que dicho cable se selecciona del grupo que consiste en un cable lineal, un cable mixto, un cable ramificado, y combinaciones de los mismos.
8. El método según la reivindicación 1, en el que al menos uno del factor de disipación ($\tan\delta$) y la constante dieléctrica (ϵ') para un punto o sección dado del cable se utiliza para identificar un defecto de cable.
9. El método según la reivindicación 1, en el que la primera frecuencia está entre unos 10 kHz y 1000 kHz.
10. El método según la reivindicación 1, en el que una amplitud de la primera frecuencia es modulada a una frecuencia relativamente baja.
11. Un sistema para ensayar cables, que comprende:
 - a. una fuente controlable de frecuencia variable y su impedancia en serie, Z_s ;

- b. al menos un dispositivo para medir al menos una de la tensión instantánea y la intensidad instantánea en un primer extremo de un cable;
 - c. un filtro para separar frecuencias moduladas de frecuencias portadoras, en el primer extremo del cable;
 - 5 d. una unidad de procesamiento que está adaptada para calcular un factor de disipación ($\tan\delta$) y constante dieléctrica (ϵ') en un punto o sección predeterminado a lo largo del eje del cable en base, al menos en parte, en una onda estacionaria establecida en tal cable en el primer extremo del cable;
 - e. una impedancia de carga controlable en un segundo extremo del cable;
 - 10 f. un dispositivo de medición adaptado para medir al menos una de tensión e intensidad en el segundo extremo del cable; y
 - g. medios de comunicación para transmisión de datos entre la impedancia de carga controlable, el dispositivo de medición en el segundo extremo del cable, y la unidad de procesamiento.
12. El sistema según la reivindicación 11, en el que la fuente controlable de frecuencia variable está adaptada para modular con una frecuencia más baja en un extremo del primer cable.
- 15 13. El sistema según la reivindicación 11, que comprende además unidades de digitalización adaptadas para digitalizar al menos una de las mediciones de tensión e intensidad.
14. El sistema según la reivindicación 11, que comprende además una consola de control en comunicación con al menos un componente de sistema.
- 20 15. El sistema según la reivindicación 14, en el que la consola de control se comunica con uno o más componentes del sistema a través de señales inalámbricas o a través del propio cable de ensayo.
16. El sistema según la reivindicación 11, en el que la unidad de tratamiento está adaptada para resolver "n" o más ecuaciones con "n" cantidades desconocidas para obtener valores de factor de disipación en cada una de "n" secciones del cable.

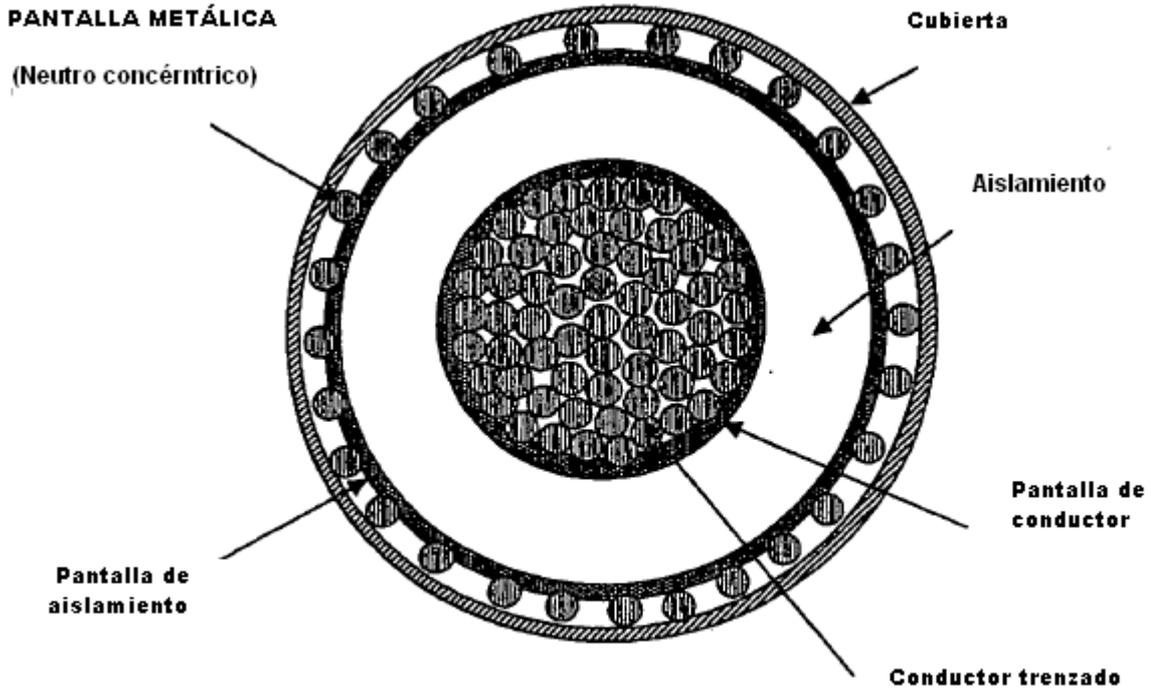


FIG. 1

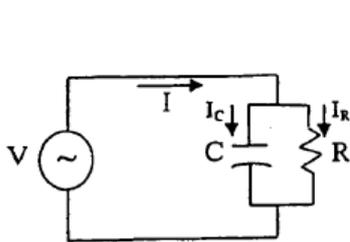


FIG. 2(a)

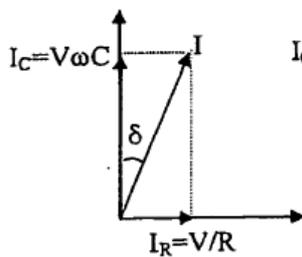


FIG. 2(b)

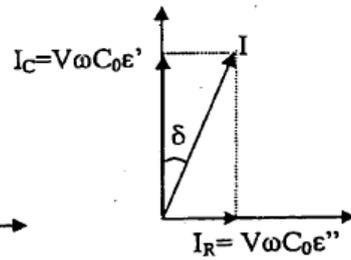


FIG. 2(c)

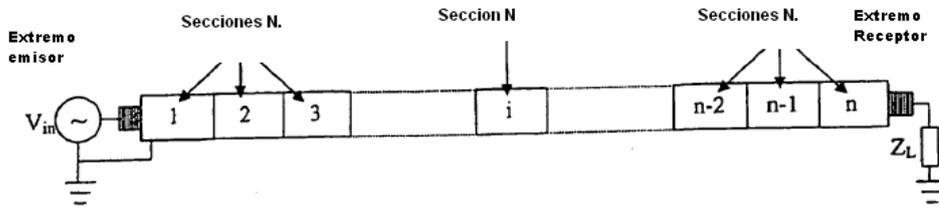


FIG. 3(a)

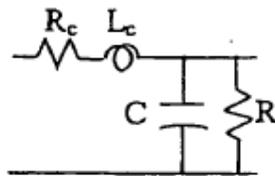


FIG. 3(b)

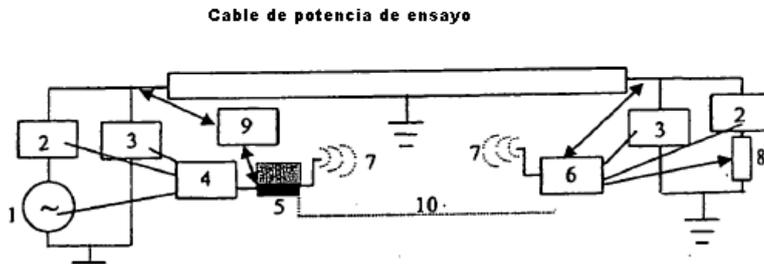


FIG. 4

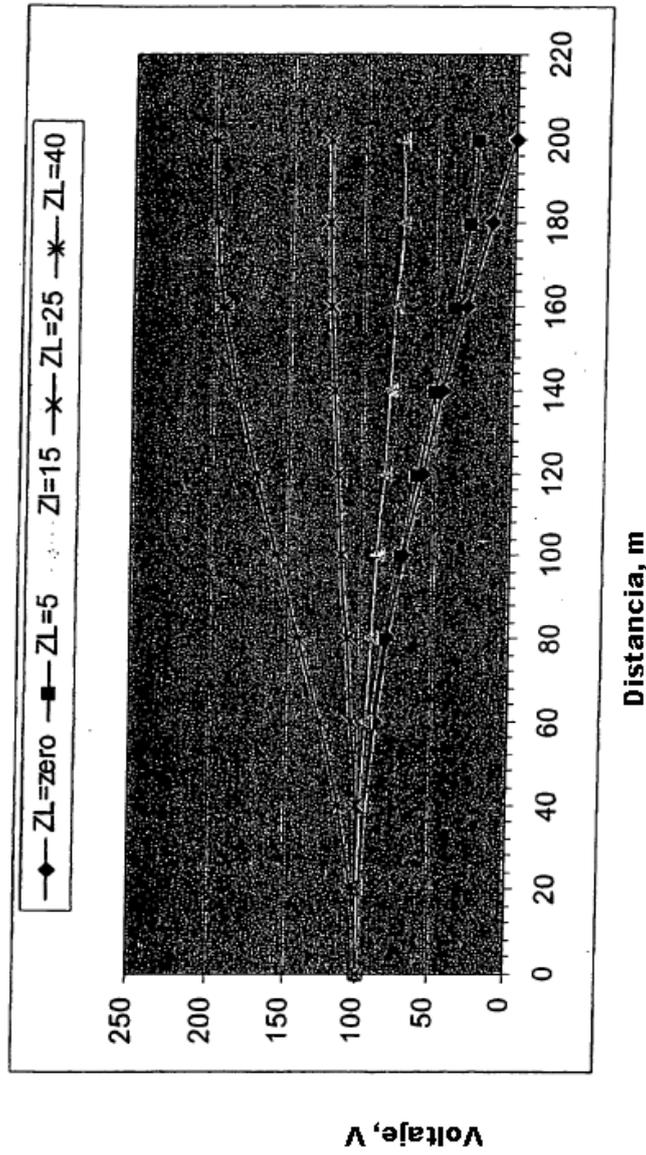
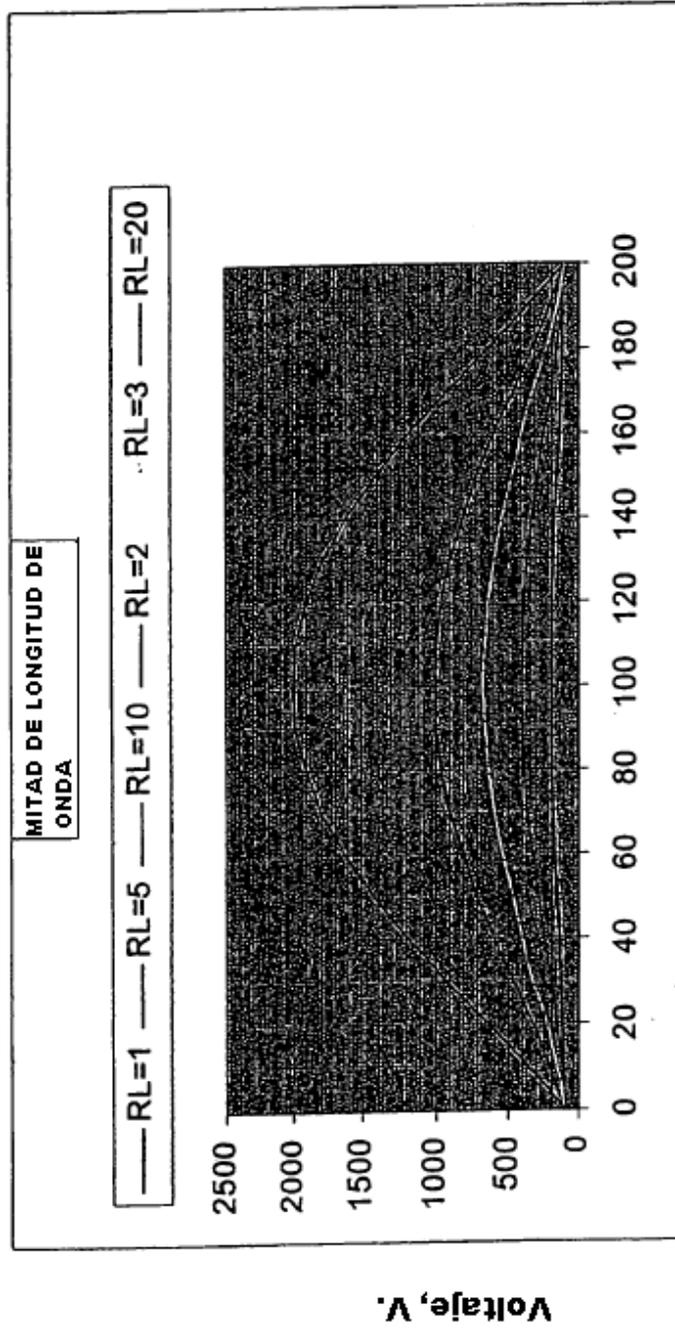


FIG. 5



Distancia, m

FIG. 6

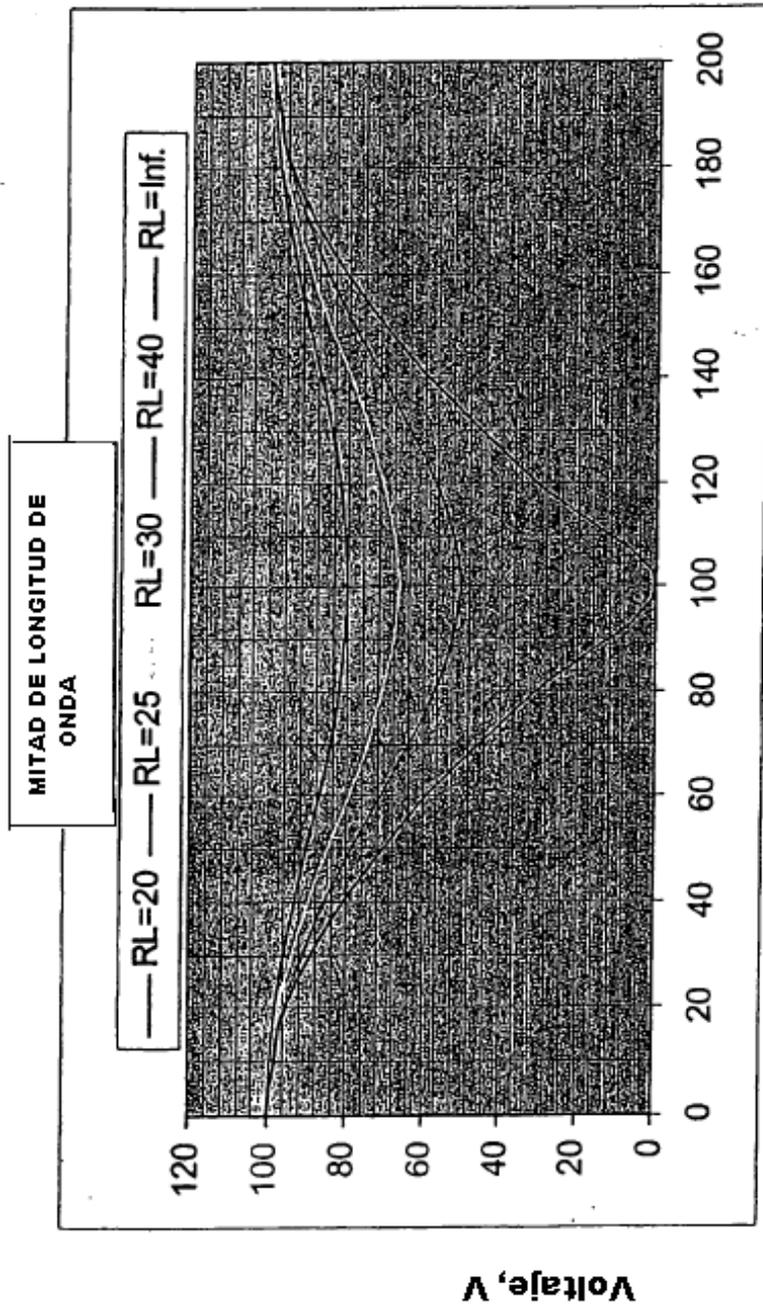


FIG. 7

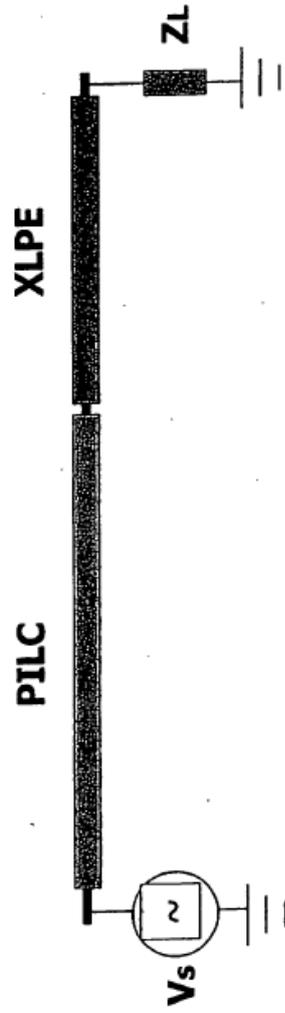
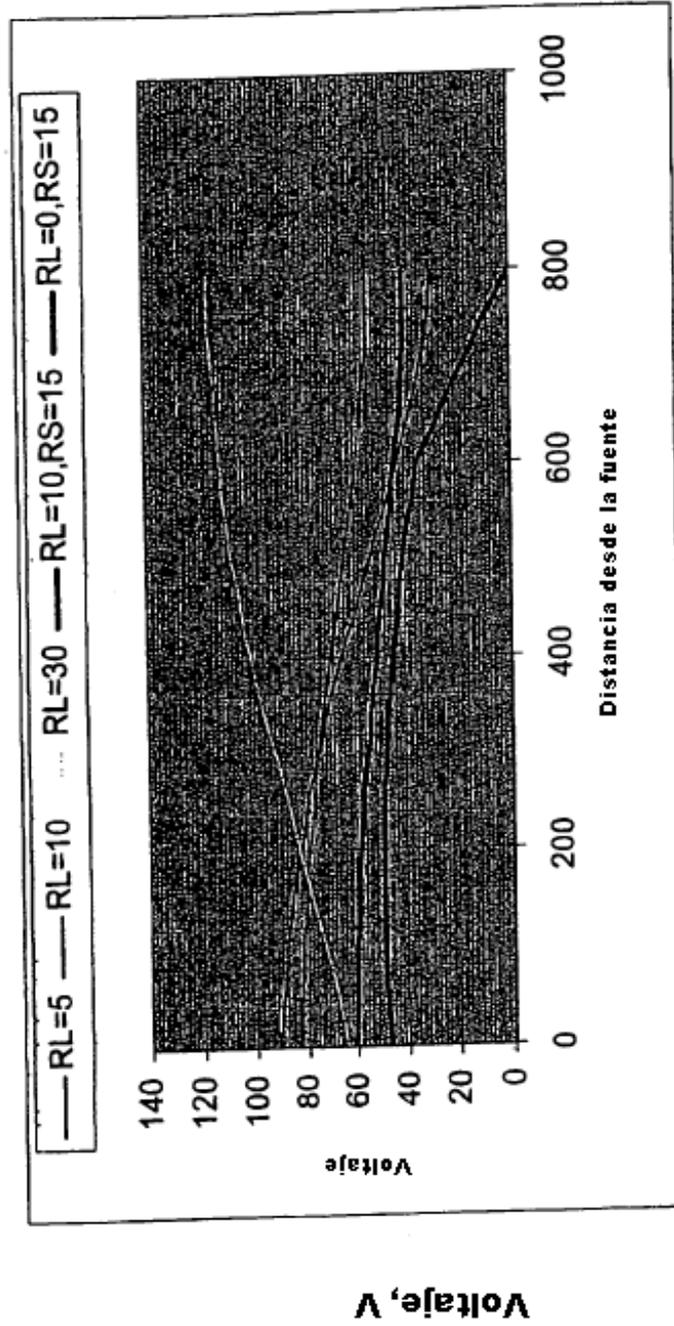
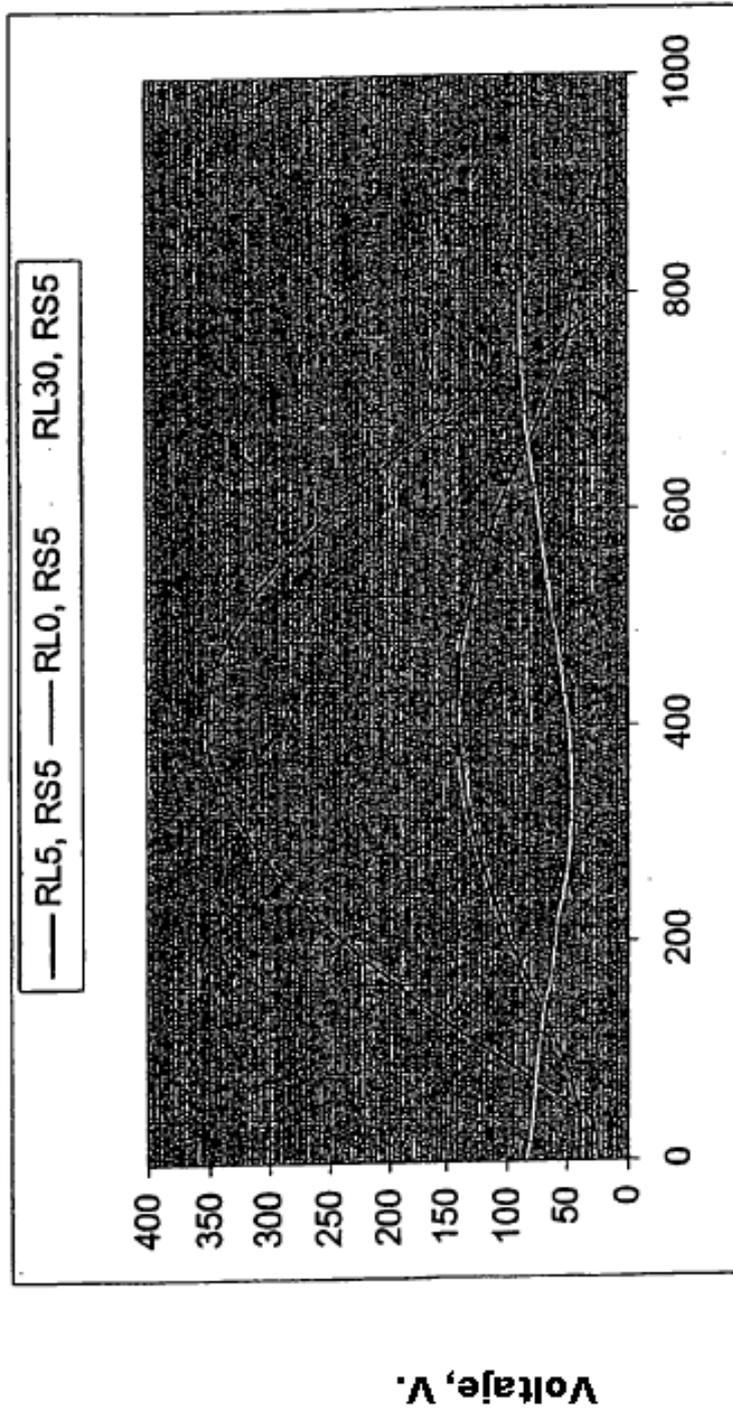


FIG. 8



Distancia, m

FIG. 9



Distancia, m

FIG. 10

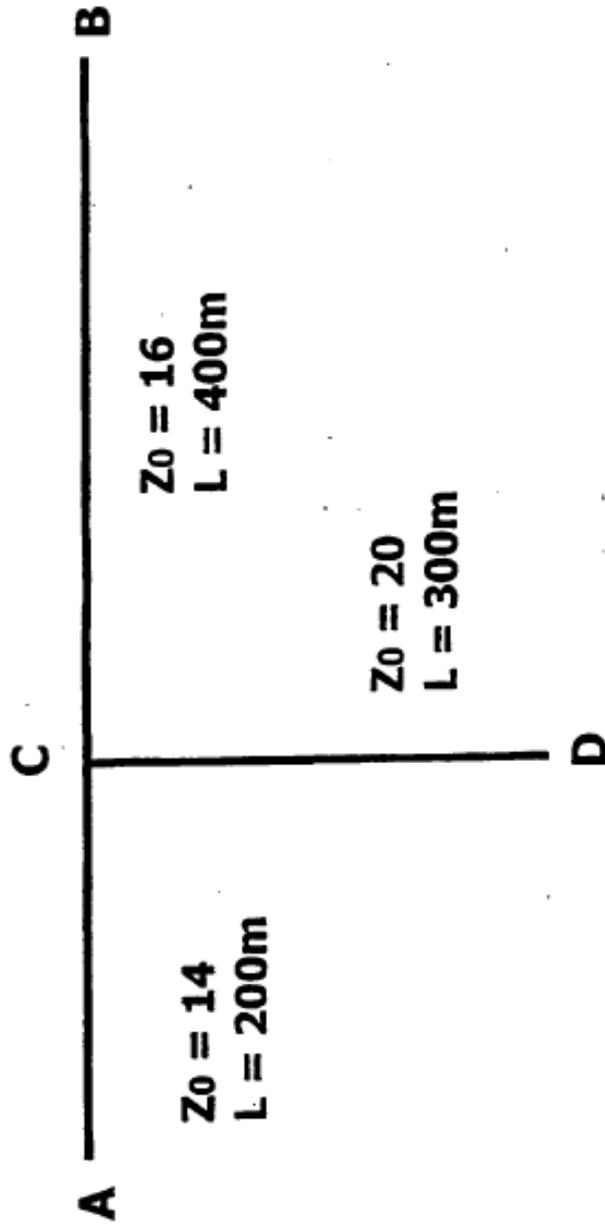


FIG. 11

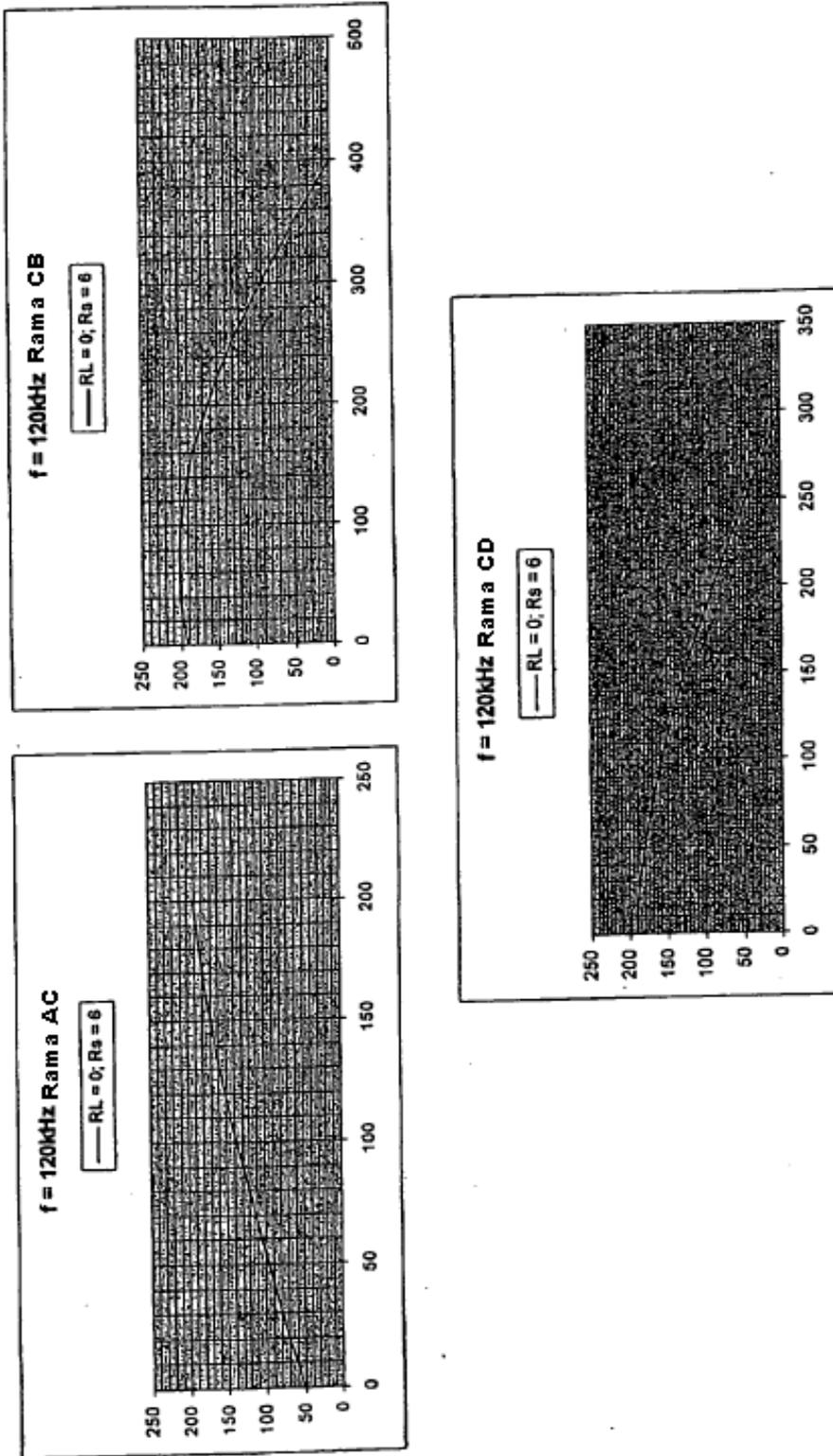


FIG. 12

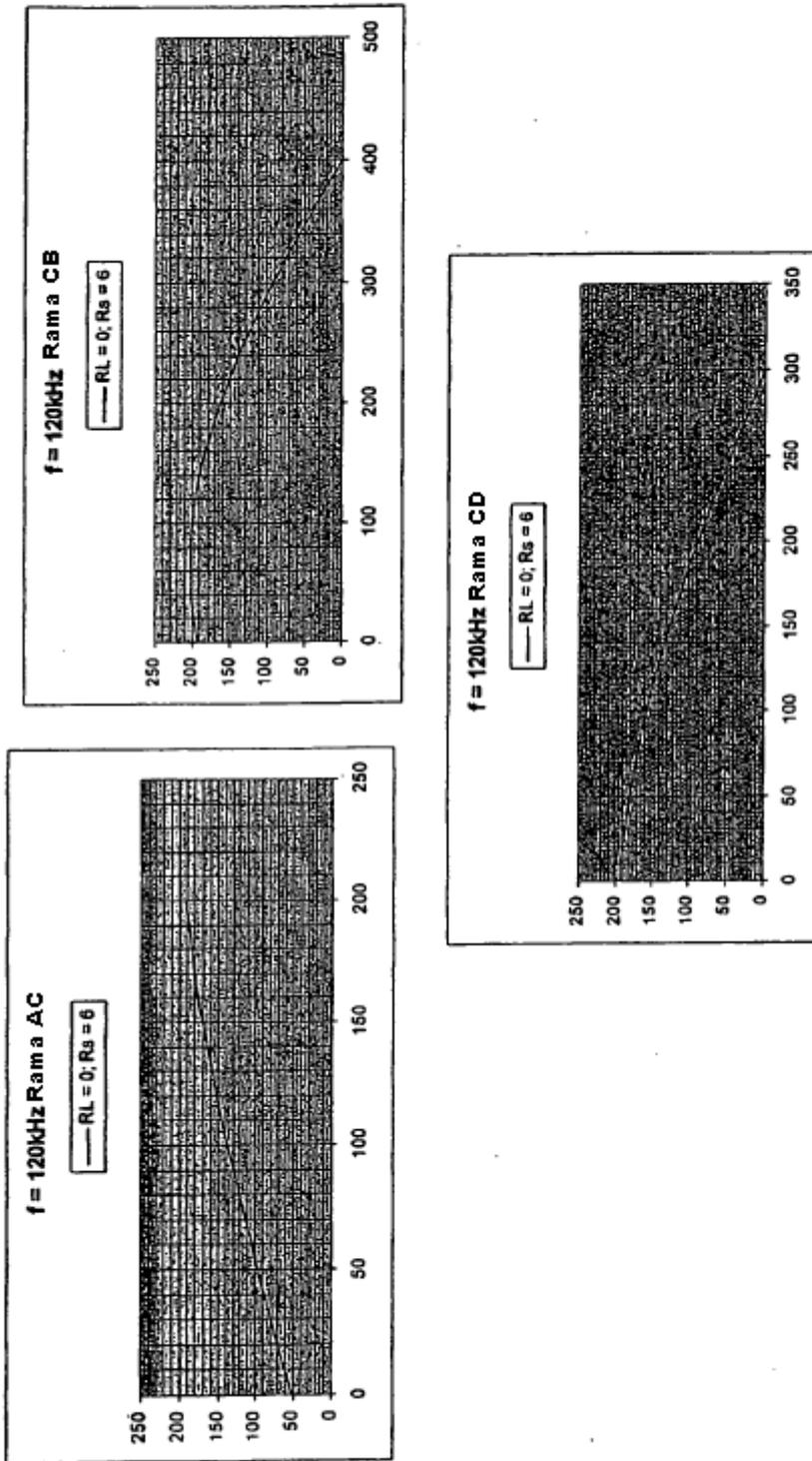


FIG. 13

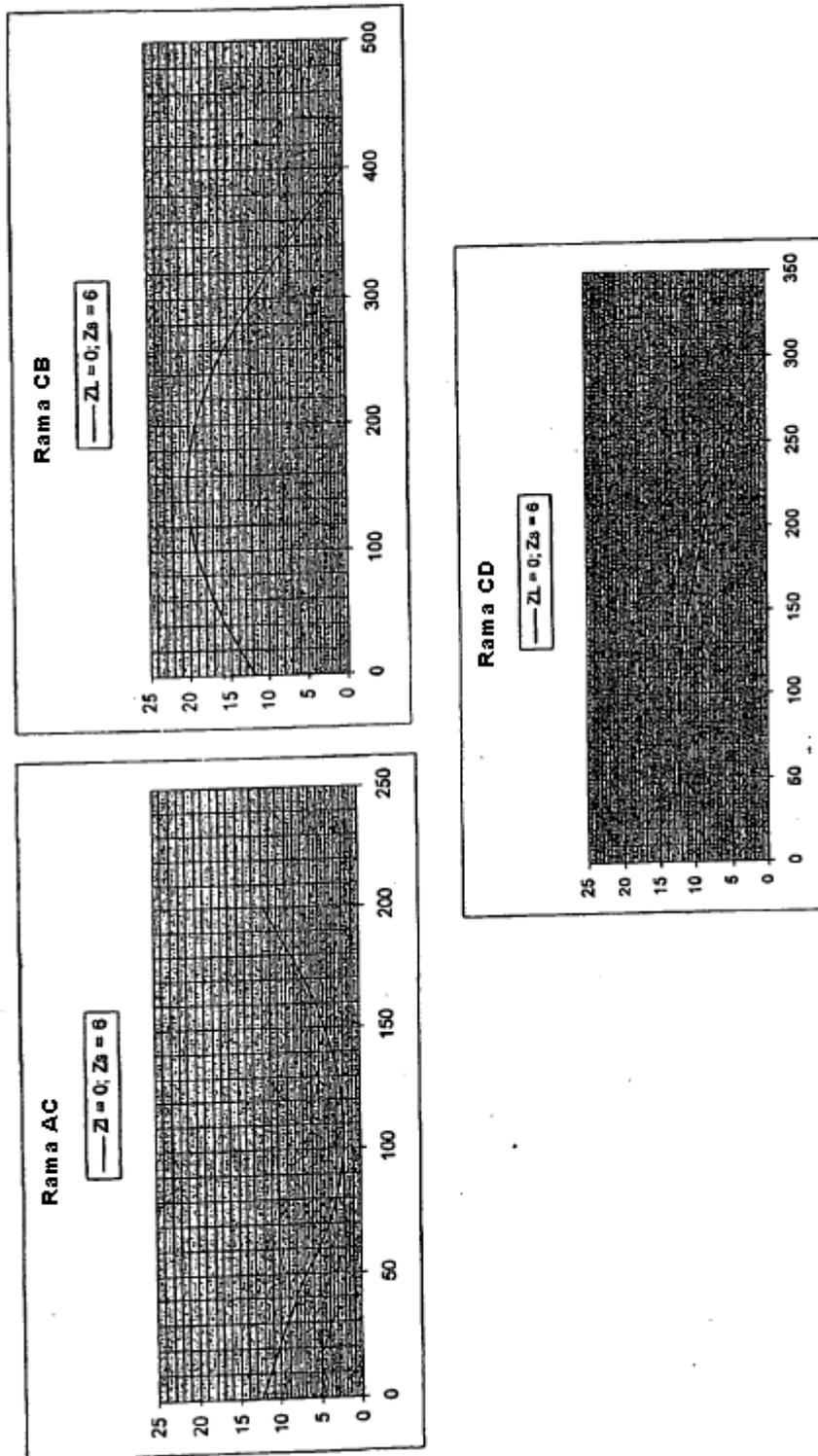


FIG. 14

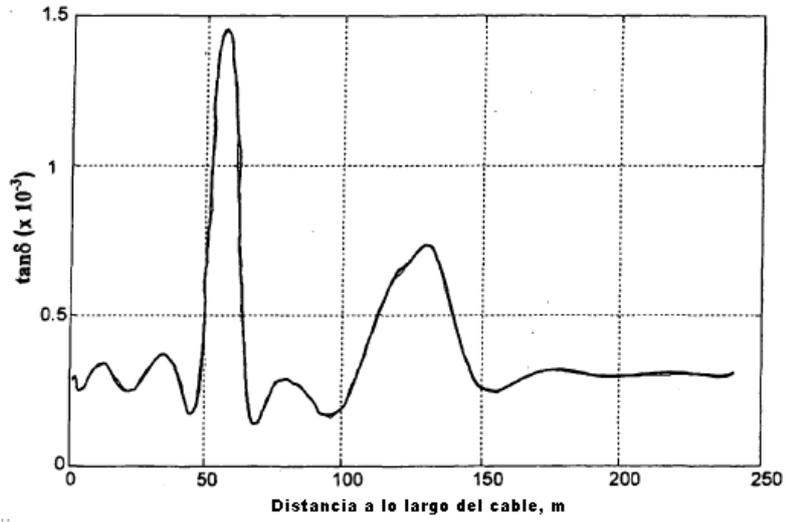


FIG. 15

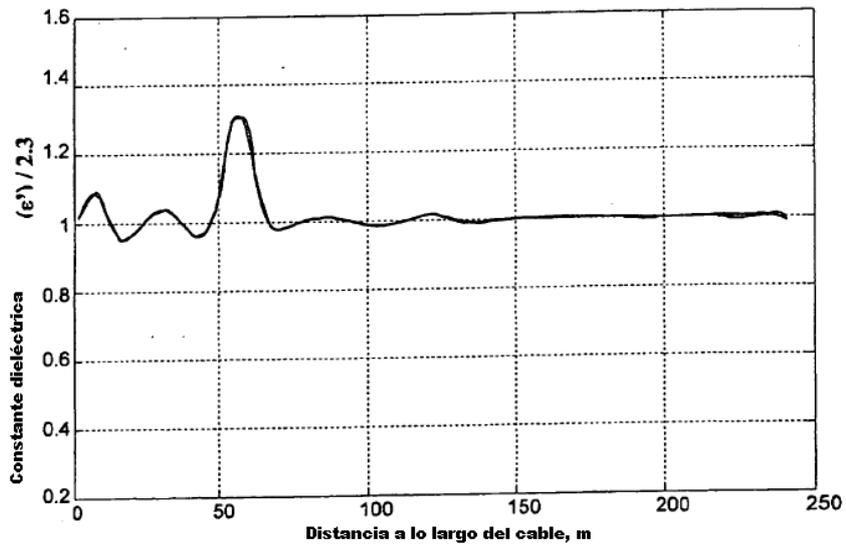


FIG. 16