

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 674 680**

51 Int. Cl.:

<b>G01R 31/08</b>	(2006.01)
<b>G01R 31/02</b>	(2006.01)
<b>H04B 3/46</b>	(2015.01)
<b>G01R 31/11</b>	(2006.01)
<b>G01R 31/12</b>	(2006.01)
<b>G01R 31/14</b>	(2006.01)
<b>G01R 27/04</b>	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.10.2013 PCT/NO2013/050182**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **01.05.2014 WO14065674**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.10.2013 E 13849244 (2)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.03.2018 EP 2912481**

54 Título: **Procedimiento y sistema para monitorizar el estado de cables eléctricos**

30 Prioridad:

**24.10.2012 NO 20121245**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**03.07.2018**

73 Titular/es:

**WIRESAN AS (100.0%)  
Kveldroveien 7  
1407 Vinterbro, NO**

72 Inventor/es:

**FANTONI, PAOLO FRANCO**

74 Agente/Representante:

**DURAN-CORRETJER, S.L.P**

**ES 2 674 680 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**

Procedimiento y sistema para monitorizar el estado de cables eléctricos

5 INTRODUCCIÓN

La presente invención da a conocer un sistema y un procedimiento para la monitorización de cables eléctricos instalados, en base a un análisis de resonancia de líneas. La monitorización comprende, por ejemplo, monitorización del estado y diagnóstico en tiempo real de los cables eléctricos. En toda la presente descripción, el sistema se denomina asimismo LIRA (Line Resonance Analysis System, sistema de análisis de resonancia de línea). Los cables tienen longitudes que varían desde unos pocos metros hasta varios cientos de kilómetros, dependiendo de la estructura y de la atenuación del cable.

15 ANTECEDENTES

El sistema LIRA (sistema de análisis de resonancia de línea) se basa en la teoría de líneas de transmisión, una teoría establecida y bien documentada que está en la base de otras dos técnicas existentes de detección de fallos de cables conocidas como "reflectometría en el dominio temporal" (TDR, Time Domain Reflectometry) y "reflectometría en el dominio de la frecuencia" (FDR, Frequency Domain Reflectometry).

Una línea de transmisión es la parte de un circuito eléctrico que proporciona una conexión entre un generador y una carga. El comportamiento de una línea de transmisión depende de su longitud en comparación con la longitud de onda  $\lambda$  de la señal eléctrica que viaja en la misma. La longitud de onda se define como:

25 
$$\lambda = v/f \tag{1}$$

en la que  $v$  es la velocidad de la señal eléctrica en el cable (denominada asimismo la velocidad de fase) y  $f$  es la frecuencia de la señal.

30 Cuando la longitud de la línea de transmisión es mucho menor que la longitud de onda, tal como ocurre cuando el cable es corto (es decir, de unos pocos metros) y la frecuencia de la señal es baja (es decir, de unos pocos KHz), la línea no tiene influencia sobre el comportamiento del circuito. Entonces la impedancia del circuito ( $Z_{in}$ ), vista desde el lado del generador, es en todo momento igual a la impedancia de carga.

35 Sin embargo, si la longitud de la línea es mayor que la longitud de onda de la señal, ( $L \geq \lambda$ ), las características de la línea desempeñan una función importante y la impedancia del circuito vista desde el generador no coincide con la carga, excepto para algunos casos muy particulares.

40 La tensión  $V$  y la corriente  $I$  a lo largo del cable están gobernadas por las siguientes ecuaciones diferenciales, conocidas como las *ecuaciones del telefonista*:

$$\frac{d^2V}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V \tag{2}$$

$$\frac{d^2I}{dz^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)I \tag{3}$$

45 en las que  $\omega$  es la frecuencia radial de la señal,  $R$  es la resistencia del conductor,  $L$  es la inductancia,  $C$  es la capacidad y  $G$  es la conductividad del aislamiento, todas ellas con respecto a una unidad de longitud del cable.

50 Estos cuatro parámetros caracterizan completamente el comportamiento de un cable cuando está siendo atravesado por una señal de alta frecuencia. En la teoría de líneas de transmisión, el comportamiento de la línea se estudia normalmente como una función de dos parámetros complejos. El primero es la *función de propagación*

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \tag{4}$$

55 escrita a menudo como

$$\gamma = \alpha + j\beta \tag{5}$$

60 en la que la parte real  $\alpha$  es la *constante de atenuación* de la línea y la parte imaginaria  $\beta$  es la *constante de propagación*, que está relacionada asimismo con la velocidad de fase  $v$ , la frecuencia radial  $\omega$  y la longitud de onda  $\lambda$  mediante:

$$\beta = \frac{2\pi f}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \quad (6)$$

El segundo parámetro es la *impedancia característica*

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (7)$$

Utilizando (4) y (7) y resolviendo las ecuaciones diferenciales (2) y (3), la impedancia de la línea para un cable a una distancia  $d$  del extremo es:

$$Z_d = \frac{V(d)}{I(d)} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_d}{1 - \Gamma_d} \quad (8)$$

En la que  $\Gamma_d$  es el *coeficiente de reflexión generalizado*

$$\Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\gamma d} \quad (9)$$

y  $\Gamma_L$  es el *coeficiente de reflexión de la carga*

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (10)$$

En (10),  $Z_L$  es la impedancia de la carga conectada al extremo del cable.

A partir de las ecuaciones (8), (9) y (10), es fácil ver que cuando la carga coincide con la impedancia característica,  $\Gamma_L = \Gamma_d = 0$  y entonces  $Z_d = Z_0 = Z_L$  para cualquier longitud y frecuencia. En todos los demás casos, la impedancia de la línea es una variable compleja gobernada por la ecuación (8), que tiene la forma de las curvas de la figura 1 (amplitud y fase en función de la frecuencia).

Existen procedimientos basados en la teoría de líneas de transmisión para intentar localizar fallos locales en cables (no es posible una estimación de la degradación global) mediante una medición de  $V$  (ecuación (2)) como una función del tiempo y evaluando el retardo temporal entre la onda incidente y la onda reflejada. Se encuentran ejemplos de dichos procedimientos en las patentes U.S.A. números 4.307.267 y 4.630.228 y en las publicaciones U.S.A. números 2004/0039976 y 2005/0057259.

En la patente U.S.A. número 7966137B2 se da a conocer un procedimiento y un sistema para monitorizar el estado de un cable eléctrico mediante el análisis de una señal multifrecuencia aplicada al cable. Este procedimiento y este sistema dados a conocer detectan cambios de impedancia a lo largo del cable. El sistema y el procedimiento de monitorización dados a conocer en la patente U.S.A. número US 7966137B2 se denominan técnica LIRA (sistema de análisis de resonancia de línea). La técnica LIRA da a conocer una transformación en el dominio de la impedancia de la línea (tanto en amplitud como en fase), denominado asimismo el dominio de  $t'$ , y aplica análisis de frecuencia a este dominio. Las etapas involucradas en este proceso son:

1. Enviar una señal de ancho de banda extendido a través del cable y medir la señal reflejada.
2. Estimar la impedancia de la línea en todo el ancho de banda, en base a las señales enviada y reflejada.
3. Analizar la impedancia de la línea para obtener información acerca de las características del cable, estado global del cable, puntos de degradación local.

El sistema LIRA (sistema de análisis de resonancia de línea) mejora la sensibilidad y la precisión de la detección analizando la impedancia de entrada del cable (ver la ecuación (8) y la figura 1). La detección y localización de la degradación local, así como la evaluación de la degradación global son proporcionadas mediante:

una estimación sin ruido de la impedancia de entrada de la línea como una función de la frecuencia (ancho de banda 0-X MHz, en la que X depende de la longitud del cable), y análisis espectral de la impedancia de entrada de la línea, para detectar y localizar puntos de degradación (ver la explicación detallada). Estas etapas se explican en detalle más adelante.

El procedimiento LIRA da a conocer la posibilidad de detectar degradaciones en una fase temprana, especialmente en cables más largos que unos pocos kilómetros. En este caso, el procedimiento LIRA puede estimar la posición de la parte problemática, con un error de estimación dentro del 0,3% de la longitud del cable.

5 Además, es posible una evaluación global del estado del cable, lo que es importante para una estimación de la vida residual del cable en aplicaciones en entornos severos (por ejemplo, en aplicaciones nucleares y aeroespaciales).

10 Sin embargo, el procedimiento descrito en la patente U.S.A. número US 7966137B2 tiene limitaciones en cuanto a la sensibilidad en la terminación del cable y dentro de áreas del cable en las que se han identificado cambios de impedancia y asimismo en relación con la severidad de la degradación del cable.

## RESUMEN DE LA INVENCION

15 El objetivo de la invención es resolver, o por lo menos paliar los problemas indicados anteriormente.

En un aspecto, la invención da a conocer un procedimiento para monitorizar el estado de un cable eléctrico, comprendiendo dicho procedimiento:

20 - aplicar una onda de señal de banda ancha con una frecuencia  $f$  a un primer extremo del cable eléctrico, en el que la onda de señal de banda ancha es modulada en fase y amplitud mediante por lo menos una impedancia del cable, del cable eléctrico,

25 - obtener, en el primer extremo del cable, la onda de señal de banda ancha modulada en fase y amplitud, transmitida y reflejada por el cable eléctrico,

30 - calcular una impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia  $f$  especificada mediante una amplitud y una fase, para la onda de señal de banda ancha reflejada obtenida,

- trasladar a un dominio de tiempo  $t'$  la impedancia compleja del cable calculada;

35 - calcular una frecuencia  $f'$  en el dominio de tiempo  $t'$ , en el que la frecuencia  $f'$  es la frecuencia fundamental de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $w'$  y amplitud  $A$  en el dominio de tiempo  $t'$  debida a una reflexión de onda de la onda de señal de banda ancha a una distancia  $d$  desde un extremo del cable, y en que la frecuencia  $f'$  se calcula aplicando:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

40 en la que  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v_r$ , es la velocidad de fase relativa estimada de una señal eléctrica en el cable;

- llevar a cabo un análisis espectral de potencia tanto en amplitud como en fase de la impedancia compleja del cable en el dominio de tiempo  $t'$  para encontrar y localizar cualquier degradación local del aislamiento del cable;

45 - identificar componentes de frecuencia  $f''_1, f''_2, \dots, f''_n$  en el espectro de potencia del dominio de tiempo  $t'$  debidas a reflexiones de onda de la onda de señal de banda ancha en posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, debiéndose las reflexiones de onda a discontinuidades en parámetros eléctricos del cable; y

calcular cada una de las posiciones  $x_i$  aplicando:

50 
$$x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2}$$

- establecer una relación entre una parte real y una imaginaria de una transformada de Fourier del espectro de impedancia de fase del espectro de potencia en un intervalo en torno a, por lo menos, una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, e

55 - identificar cambios de impedancia, por lo menos, en una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable a partir de dichas partes real e imaginaria.

60 En una realización, identificar cambios de impedancia incluye identificar, por lo menos, uno de un cambio ascendente de la impedancia, un cambio descendente de la impedancia, un punto de alta impedancia o un punto de baja impedancia. Se identifica un punto de alta impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es positiva. Se identifica un punto de baja impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es negativa. Se

identifica un cambio ascendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es positiva. Se identifica un cambio descendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es negativa.

5 En una realización, el procedimiento puede comprender además identificar un segmento de cable con una impedancia menor, como un cambio descendente de la impedancia en el inicio del segmento de cable seguido por un cambio ascendente de la impedancia en el final del segmento de cable. Además, el procedimiento puede comprender identificar un segmento de cable con una impedancia mayor, como un cambio ascendente de la impedancia en el inicio del segmento de cable seguido por un cambio descendente de la impedancia en el final del segmento de cable.

10 En otro aspecto, la invención da a conocer un procedimiento para monitorizar el estado de un cable eléctrico, comprendiendo dicho procedimiento:

15 - aplicar una onda de señal de banda ancha con una frecuencia  $f$  a un primer extremo del cable eléctrico, en que la onda de señal de banda ancha es modulada en fase y amplitud mediante, por lo menos, una impedancia del cable del cable eléctrico,

20 - obtener, en un primer extremo del cable, la onda de señal de banda ancha modulada en fase y amplitud, transmitida y reflejada por el cable eléctrico,

25 - estimar/calcular una impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia  $f$  especificada por una amplitud y una fase, para la onda de señal de banda ancha reflejada obtenida,

- trasladar a un dominio de tiempo  $t'$  la impedancia compleja del cable calculada;

30 - calcular una frecuencia  $f'$  en el dominio de tiempo  $t'$ , en que la frecuencia  $f'$  es la frecuencia fundamental de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $w'$  y amplitud  $A$  en el dominio de tiempo  $t'$  debida a una reflexión de onda de la onda de señal de banda ancha a una distancia  $d$  de un extremo del cable, y en que la frecuencia  $f'$  se calcula aplicando:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

35 en que  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v_r$  es una velocidad de fase relativa estimada de una señal eléctrica en el cable;

- llevar a cabo un análisis espectral de potencia tanto en amplitud como en fase de la impedancia compleja del cable en el dominio de tiempo  $t'$  para encontrar y localizar cualquier degradación local del aislamiento del cable;

40 - identificar componentes de frecuencia  $f''_1, f''_2, \dots, f''_n$  en el espectro de potencia del dominio de tiempo  $t'$  debidas a reflexiones de onda de la onda de señal de banda ancha en posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, debiéndose las reflexiones de onda a discontinuidades en parámetros eléctricos del cable; y

calcular cada una de las posiciones  $x_i$  aplicando:

$$45 \quad x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2}$$

comprendiendo además establecer la severidad de la degradación local de un defecto identificado en el aislamiento del cable en, por lo menos, una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, mediante el análisis de una reflexión de segundo orden de la señal de banda ancha en dicha posición del defecto identificado.

50 En una realización, el procedimiento puede comprender establecer la diferencia entre la altura de un pico de reflexión de primer orden y la altura de un pico de reflexión de segundo orden en el espectro de potencia y evaluar la atenuación del cable para normalizar la altura de cualquier pico a cualquier distancia de la terminación.

55 Además, los procedimientos de acuerdo con los aspectos anteriores pueden comprender también establecer una medida del estado del extremo del cable mediante el análisis de un pico de terminación en el espectro de potencia, que comprende establecer una relación entre la diferencia  $dy$  entre los dos valles a cada lado del pico de terminación y la altura  $dz$  del pico de terminación.

60 En una realización, el procedimiento comprende además, estimar, utilizando el analizador, la velocidad de fase relativa estimada  $v_r$ , en que la estimación de la velocidad de fase relativa estimada  $v_r$  incluye:

## ES 2 674 680 T3

- evaluar, por lo menos, dos frecuencias de resonancia de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;
- identificar dos valores consecutivos de frecuencia de resonancia  $f_k$  y  $f_{k+1}$ , respectivamente, de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;
- calcular un primer valor de una velocidad de fase relativa  $V_r$  del cable, aplicando

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

en la que L es la longitud del cable;

- calcular la frecuencia fundamental  $f'$  del cable, en el dominio de tiempo  $t'$  utilizando la primera velocidad de fase relativa  $V_r$  y aplicando

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0};$$

- calcular un segundo valor  $f''$  de la frecuencia fundamental  $f'$  hallando un valor de pico máximo en el dominio de tiempo  $t'$  en un intervalo que se puede seleccionar en torno a  $f'$ , y

- calcular la estimación de la velocidad de fase relativa  $v_r^{final}$  aplicando

$$v_r^{final} = \frac{2L}{v_0 f''}$$

En otro aspecto, la invención da a conocer un sistema para monitorizar el estado de un cable eléctrico, comprendiendo dicho sistema:

un analizador para calcular la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia  $f$  especificada mediante una amplitud y una fase;

un medio de generación para generar una onda de señal de banda ancha que tiene que ser modulada en fase y amplitud mediante una impedancia del cable, estando la onda de señal de banda ancha aplicada a un primer extremo del cable, en que la frecuencia  $f$  es una frecuencia de la onda de señal de banda ancha;

un módulo de obtención para obtener en el primer extremo del cable la onda de señal de banda ancha modulada en fase y amplitud por medio de la impedancia del cable;

un medio de traslación para trasladar la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  a un dominio de tiempo  $t'$ ,

un analizador para calcular una frecuencia  $f'$  en el dominio de tiempo  $t'$ , en que la frecuencia  $f'$  es la frecuencia fundamental de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $\omega'$  y amplitud A en el dominio de tiempo  $t'$  debida a una reflexión de onda de la onda de señal de banda ancha a una distancia d de un extremo del cable, y en que la frecuencia  $f'$  se calcula aplicando:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

en la que  $V_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $V_r$  es la velocidad de fase relativa estimada de una señal eléctrica en el cable,

en que dicho analizador lleva a cabo un análisis espectral de potencia tanto de amplitud como de fase de la impedancia compleja del cable en el dominio de tiempo  $t'$  para encontrar y localizar cualquier degradación local del aislamiento del cable,

en que dicho analizador identifica componentes de frecuencias  $f''_1, f''_2, \dots, f''_n$  en el espectro de potencia del dominio de tiempo  $t'$  debidos a reflexiones de onda en las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, debiéndose las reflexiones de onda a discontinuidades en parámetros eléctricos del cable, y

en que dicho analizador calcula cada una de las posiciones  $X_i$  aplicando:

$$x_i = \frac{v_r v_0 f_i''}{2}$$

5 en que dicho analizador establece además una relación entre una parte real y una parte imaginaria de una transformada de Fourier de un espectro de impedancia de fase del espectro de potencia en un intervalo en torno a, por lo menos, una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, y

- la identificación de cambios de impedancia en las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable a partir de dicha parte real y dicha parte imaginaria.

10 La identificación de cambios de impedancia puede incluir identificar, por lo menos, uno de un cambio ascendente de la impedancia, un cambio descendente de la impedancia, un punto de alta impedancia o un punto de baja impedancia. Se identifica un punto de alta impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es positiva. Se identifica un punto de baja impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es negativa. Se identifica un cambio ascendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es positiva. Se identifica un cambio descendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es negativa.

15 En una realización, el sistema puede comprender además identificar un segmento de cable con una impedancia menor como un cambio descendente de la impedancia al inicio del segmento de cable seguido por un cambio ascendente de la impedancia al final del segmento de cable. El sistema puede comprender además identificar un segmento de cable con una impedancia mayor como un cambio ascendente de la impedancia al inicio del segmento de cable seguido por un cambio descendente de la impedancia al final del segmento de cable.

20 Además, el establecimiento de la severidad de la degradación local de un defecto identificado en el aislamiento del cable, por lo menos, en una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable se puede llevar a cabo analizando una reflexión de segundo orden de la señal de banda ancha en la posición de dicho defecto identificado. El sistema puede comprender además establecer una diferencia entre la altura de un pico de reflexión de primer orden y la altura de un pico de reflexión de segundo orden en el espectro de potencia, y normalizar la diferencia de altura a una altura de un pico de terminación en el espectro de potencia. El establecimiento de una medida del estado del extremo del cable puede ser llevado a cabo por el sistema analizando un pico de terminación en el espectro de potencia, que comprende establecer una relación entre la diferencia  $dy$  entre los dos valles a cada lado del pico de terminación y la altura  $dz$  del pico de terminación.

En una realización adicional del sistema, el analizador puede funcionar para:

35 evaluar, por lo menos, dos frecuencias de resonancia de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;

identificar dos valores consecutivos de frecuencia de resonancia  $f_k$  y  $f_{k+1}$  respectivamente, de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;

40 calcular un primer valor de una velocidad de fase relativa  $v_r$  del cable, aplicando

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

en que  $L$  es la longitud del cable;

45 calcular la frecuencia fundamental  $f'$  del cable utilizando la primera velocidad de fase relativa  $v_r$  y aplicando

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0},$$

50 calcular un segundo valor  $f''$  de la frecuencia fundamental  $f'$  encontrando un valor de pico máximo en el dominio de tiempo  $t'$  en un intervalo que se puede seleccionar alrededor de  $f''$ , y calcular la estimación de la velocidad de fase relativa  $v_r^{final}$  aplicando

$$v_r^{final} = \frac{2L}{v_0 f''}$$

55 La invención da a conocer un sistema de monitorización del estado de un cable eléctrico, comprendiendo el sistema un medio de generación que proporciona una señal de referencia CH0; un medio de obtención que obtiene dicha señal de referencia CH0 y una señal CH1, siendo dicha señal CH1 la señal de referencia CH0 después de la modulación de amplitud y de fase mediante una impedancia del cable  $Z_{DUT}$  del cable eléctrico; y un medio de análisis

que calcula la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia de señal aplicada, basada en la señal de referencia CH0 y la señal CH1, y analiza dicha impedancia del cable proporcionando una evaluación del estado del cable y/o de un fallo del cable.

5 Dicho medio de generación se puede hacer funcionar para proporcionar una señal de referencia CH0 seleccionada de un grupo que consiste en una señal de barrido que tiene un ancho de banda de frecuencia de  $w_1$  a  $w_2$  (pudiendo ser seleccionadas ambas).

El medio de obtención puede ser un osciloscopio de almacenamiento digital.

10 El sistema LIRA (sistema de análisis de resonancia de línea) puede monitorizar la degradación global, progresiva, del aislamiento del cable debida condiciones de entornos severos (por ejemplo alta temperatura, humedad, radiación) y detectar la degradación local del material aislante debida a efectos mecánicos o a condiciones ambientales locales anómalas.

15 El sistema LIRA se puede utilizar para detectar y monitorizar la degradación del aislamiento y la rotura de la línea en toda clase de cables eléctricos (cables de alimentación y de señal); es decir cables en la generación, distribución y transmisión de energía, cables en industrias de procesos, cables en la industria aeroespacial, cables en instalaciones marítimas, terrestres y submarinas, y para identificar la posición del daño/rotura. La monitorización y la detección se pueden llevar a cabo en tiempo real desde un emplazamiento remoto.

20 El sistema LIRA mejorado, según la presente invención, proporciona mejoras en relación con los dos aspectos siguientes:

25 1. Evaluación de la severidad de la característica localizada y mejor comprensión del comportamiento de parámetros eléctricos en la posición del daño; es decir, si la impedancia está aumentando o disminuyendo. Evaluar si la impedancia está aumentando o disminuyendo. Esto ayuda a evaluar la causa del daño. Por ejemplo, la penetración de agua o de humedad tiene siempre como resultado una disminución de la impedancia.

30 2. El estado del cable en la terminación, que se explicará en detalle más adelante.

El sistema LIRA mejorado, según la presente invención, permite monitorizar los estados en la terminación del cable. Establecer el estado del extremo del cable es particularmente importante en entornos como, por ejemplo, la industria petrolera y gasista, el fondo de perforación en pozos petrolíferos, instalaciones submarinas, centrales nucleares, distribución de transmisión de energía y otros emplazamientos de difícil acceso.

35 La invención se define en las reivindicaciones adjuntas.

#### 40 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

A continuación se describirán realizaciones de la invención haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

45 la figura 1 muestra una representación gráfica de la amplitud y la fase de la impedancia compleja de la línea, en función de la frecuencia, según la ecuación (8);

la figura 2 muestra un diagrama funcional de un algoritmo de detección de puntos;

50 la figura 3 es un espectro de potencia de la impedancia de fase en un dominio de  $t'$ , en el que el eje x se ha trazado a escala a la distancia desde el inicio del cable ( $d=300$  m);

la figura 4 es un espectro de potencia de la impedancia de fase en el dominio de  $t'$ , en el que el componente de frecuencias es visible en  $x = 200$ , debido a un cambio en la capacidad de 20 pF en un segmento de cable de 30 cm;

55 la figura 5 es una señal resultante de la parte real de la ecuación (18), que es una onda senoidal amortiguada de frecuencia radial  $\omega'$  y amplitud A en el dominio de  $t'$ ;

la figura 6 es un gráfico de la fase de Z en el dominio de  $t'$  para  $A=1$  en la ecuación (19);

60 la figura 7 es un gráfico de una función semiperiódica de la función de fase (18);

la figura 8 es un gráfico de los componentes de la función  $f(x)$  en la ecuación (28);

65 la figura 9 muestra un ejemplo de una visualización LIRA para los primeros tres armónicos de la ecuación (29), según una realización de la presente invención;

la figura 10 es una ilustración esquemática de los efectos de C y L en los indicadores de envejecimiento LIRA, según una realización de la presente invención;

5 la figura 11 muestra la curva característica LIRA de un segmento de un cable con mayor impedancia, y en que este segmento es mayor que la resolución del LIRA, según una realización de la presente invención;

10 la figura 12 muestra una imagen de visualización de una curva característica LIRA para un aumento de la impedancia (-5 pF/m, resolución = 1,5 m) según se muestra en la figura 11, desde 50 m hasta 60 m a partir del inicio del cable, según una realización de la presente invención;

la figura 13 muestra la curva característica LIRA desde un segmento de un cable con menor impedancia, en que el segmento es mayor que la resolución del LIRA, según una realización de la presente invención;

15 la figura 14 muestra una imagen de visualización de una curva característica LIRA para una disminución de la impedancia (+5 pF/m, resolución = 1,5 m) según se muestra en la figura 13, desde 50 m hasta 60 m a partir del inicio del cable, según una realización de la presente invención;

20 la figura 15 es una imagen de visualización de la amplitud en voltios de un espectro de impedancia del cable (partes real e imaginaria) en la posición del salto, como una función de la distancia del punto para un único salto de impedancia, negativo (SP-), y en que el espectro en la posición del salto de impedancia es imaginario puro y negativo, según una realización de la presente invención;

25 la figura 16 muestra el valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto mostrada en la figura 15, en que el valor complejo es imaginario puro y negativo para SP-, según una realización de la presente invención;

30 la figura 17 es una imagen de visualización de la amplitud en voltios de un espectro de impedancia del cable (partes real e imaginaria) en la posición del salto, en función de la distancia del punto para un solo salto de impedancia, positivo (SP+) y en la que el espectro en la posición del salto de impedancia es imaginario puro y positivo, según una realización de la presente invención;

35 la figura 18 muestra el valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto de impedancia mostrado en la figura 17, en que el valor complejo es imaginario puro y positivo para SP+, según una realización de la presente invención;

la figura 19 muestra un segmento de un cable con una mayor impedancia y la correspondiente curva característica LIRA mostrada debajo, y en que este segmento de cable es más corto que la resolución del LIRA, según una realización de la presente invención;

40 la figura 20 muestra un segmento de un cable con una impedancia menor y la correspondiente curva característica LIRA mostrada debajo, y en que este segmento de cable es más corto que la resolución del LIRA, según una realización de la presente invención;

45 la figura 21 es una imagen de visualización de la amplitud en voltios de un espectro de impedancia del cable (partes real e imaginaria) en la posición del salto, como una función de la distancia del punto (m) para un punto de baja impedancia, como el mostrado en la figura 20, en que el punto de impedancia es más corto que la resolución del LIRA (DP-); el espectro en el punto es real puro y negativo, según una realización de la presente invención;

50 la figura 22 muestra el valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto de impedancia de las figuras 20 y 21: en que el valor complejo es real puro y negativo para DP-, según una realización de la presente invención;

55 la figura 23 es una imagen de visualización de una curva característica LIRA para un punto DP- (+5 pF/m para 1 m, resolución = 1,5 m) como el mostrado en las figuras 20 a 22 en una posición de 50 m desde el inicio del cable, según una realización de la presente invención;

60 la figura 24 es un espectro (partes real e imaginaria) de un punto de alta impedancia del cable como el mostrado en la figura 25, en el que la longitud del punto de impedancia es más corta que la resolución del LIRA (DP+), y en el que el espectro en el punto es real puro y positivo, según una realización de la presente invención;

la figura 25 muestra el valor complejo del espectro de impedancia de fase de la figura 24 en la posición del salto de impedancia, en que el valor complejo es real puro y positivo para DP+, según una realización de la presente invención;

la figura 26 muestra la curva característica LIRA para un punto DP+ (-5 pF/m para 1 m, resolución = 1,5 m) como el mostrado en las figuras 19, 24, 25 a una distancia de 50 m desde el inicio del cable, según una realización de la presente invención;

5 la figura 27 muestra una imagen de visualización en la que se muestra cómo la severidad de la degradación local está correlacionada con las alturas de punta de la curva característica LIRA, según una realización de la presente invención;

10 la figura 28 muestra una imagen de visualización de una curva característica de terminación equilibrada (BTS, Balanced Termination Signature) en un extremo del cable, para un cable en condiciones de equilibrio (un cable correcto)  $BTS=0$ , según una realización de la presente invención;

15 la figura 29 muestra una imagen de visualización de una curva característica de terminación equilibrada (BTS) en un extremo del cable, para un cable con una terminación de elevada capacidad (impedancia baja), en que ( $BTS > 0$ ), en que  $BTS = \Delta Y/\Delta Z * 100$ , según una realización de la presente invención; y

20 la figura 30 muestra una imagen de visualización de una curva característica de terminación equilibrada (BTS) en un extremo del cable, para un cable con una terminación de baja capacidad (impedancia alta), en que  $BTS < 0$ , según una realización de la presente invención.

## DESCRIPCIÓN DETALLADA

En toda la descripción y en las reivindicaciones, el término monitorizar se debe interpretar de manera amplia e incluye, por ejemplo, la monitorización del estado global/local, la diagnosis en tiempo real y la detección de defectos.

25 El sistema de monitorización y análisis, según la invención, se puede implementar como módulos de software. El sistema de monitorización se puede implementar en un sistema de hardware portátil. El hardware comprende un módulo de entrada para su conexión con el cable a monitorizar. El software de análisis y monitorización puede llevar a cabo el procedimiento y proporcionar el resultado del análisis para el cable automáticamente. No obstante, es posible asimismo una intervención manual mediante un operador del sistema de monitorización y análisis.

30 • **El módulo de simulador LIRA.** El simulador LIRA funciona en el dominio de la frecuencia aplicando las ecuaciones de línea de transmisión (ecuaciones 1 a 10). Además de esto, utiliza un modelo estocástico para evaluar las incertidumbres en los parámetros eléctricos del cable, debidas a tolerancias de fabricación y a cambios en el entorno. Los parámetros del cable y los parámetros de carga para la conexión real del cable son introducidos en el módulo de simulador LIRA.

40 El modelo estocástico evalúa y aplica variaciones estadísticas (utilizando una distribución normal con desviación estándar seleccionada por el usuario) en los parámetros eléctricos (L, C y R) a lo largo del cable, debidas a tolerancias de fabricación y a ruido del entorno.

45 • **El módulo de analizador LIRA.** Éste puede funcionar en modo real o de simulación. En el primer caso, toma la entrada del módulo de obtención de señal de la tarjeta de obtención, en el segundo caso la entrada procede del módulo de simulador LIRA. El analizador LIRA es el núcleo del sistema de monitorización del cable.

El analizador LIRA funciona en los dominios tanto de tiempo como de frecuencia, llevando a cabo las siguientes tareas:

- 50 ° Estimar y mostrar el espectro de frecuencia de la impedancia de entrada de la línea.
- ° Calcular las frecuencias de resonancia. Las frecuencias de resonancia se calculan a partir del espectro de impedancia y corresponden a valores de frecuencia en los que la fase es cero.
- 55 ° Estimar la impedancia característica del cable  $Z_{DUT}$ . Ésta se calcula asimismo a partir del espectro de impedancia. La impedancia característica es el valor de la amplitud de la impedancia en cualquier máximo (o mínimo) local de la fase de la impedancia.
- ° Estimar la longitud del cable, si no es conocida.
- 60 ° Detectar áreas de degradación local y localizarlas.
- ° Detectar cambios de carga.
- ° Analizar y mostrar el espectro de frecuencia para identificar cambios de impedancia y puntos de impedancia, calcular las componentes real e imaginaria del espectro de fase de la impedancia y analizar alturas de puntas.

**Diagnos y localización de degradación local**

5 La impedancia de la línea se calcula como el promedio de la función de transferencia en una ventana desde la señal de referencia CH0 hasta la señal modulada de impedancia CH1, que tiene como resultado el cálculo de la amplitud y la fase de la impedancia de la línea  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia (ver la ecuación (11)). Una vez se ha calculado la impedancia de la línea, se analiza el estado del cable mediante el examen del contenido de frecuencia de los componentes de amplitud y de fase de la impedancia compleja. Esto se explicará a continuación.  $Z_{DUT}$  se puede calcular en hardware, y en este caso no se contemplan CH0 y CH1.

10 La ecuación (8) es la expresión matemática de la función de la figura 1. De hecho, la impedancia de la línea  $Z_d$  (para un cable a una distancia  $d$  desde el extremo del cable) es un parámetro complejo y la figura 1 muestra tanto su amplitud como su fase. La forma pseudo-periódica de la fase se debe a la periodicidad de  $\Gamma_d$ , ecuación (9), que se puede reescribir como:

15 
$$\Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\alpha d} e^{-2j\beta d} \quad (12)$$

en la que la amplitud disminuye con  $d$  (la longitud del cable) debido a la atenuación  $\alpha$  (la fase es periódica si  $\alpha = 0$ ). El periodo de  $\Gamma d$  (y por tanto el de la fase de la impedancia de la línea) es  $1/2\beta$ , considerando  $d$  como la variable independiente, o  $1/2d$ , considerando  $\beta$  como la variable independiente (tal como en la figura 1).

Utilizando la expresión para una constante de propagación  $\beta$  a partir de la ecuación (6), la ecuación (12) se puede reescribir como:

25 
$$\Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\alpha d} e^{\frac{-2j\omega d}{v}} \quad (13)$$

$$\Gamma_d = \Gamma_L e^{-2\alpha d} e^{\frac{-4j\pi f d}{v}} \quad (14)$$

en las que  $f$  es la frecuencia de la señal aplicada que viaja a lo largo de un cable de longitud  $d$  y  $v$  es la velocidad de fase de la señal eléctrica en el cable.

Suponiendo que  $f$  es la variable independiente y escribiendo las siguientes equivalencias:

35 
$$f \rightarrow t' \quad (15)$$

$$\frac{4\pi d}{v_r v_0} \rightarrow \omega' \quad (16)$$

en la que  $v_r = v/v_0$ ,  $v_r$  es la velocidad de fase relativa de la señal eléctrica en el cable y  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío.

40 
$$\Gamma_L e^{-2\alpha d} = A \quad (17)$$

La ecuación (14) queda como:

45 
$$\Gamma_d = A e^{-j\omega' t'} \quad (18)$$

La ecuación (18) es la expresión matemática (en notación compleja) de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $\omega'$  y amplitud  $A$ . En el caso sin pérdidas ( $\alpha = 0$ )  $A=1$ , en los cables con pérdidas del mundo real  $\alpha$  es una función creciente de la frecuencia de la señal, de tal modo que la amplitud  $A$  es una función decreciente de  $t'$ , teniendo como resultado la oscilación amortiguada de la figura 1. La frecuencia de esta función (en el dominio de  $t'$ ) es:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0} \quad (19)$$

55 en la que  $f'$  es la frecuencia fundamental de la función de fase en el dominio de  $t'$  debida a la reflexión de onda a la distancia  $d$  (la terminación del cable). Se debe observar que la expresión de  $f'$  tiene dimensión de tiempo, y es el tiempo transcurrido para que una onda llegue a la terminación a la distancia  $d$  y se refleje hacia atrás. La transformada de Fourier (espectro de potencia) de la fase de la impedancia, en el dominio de  $t'$ , tiene un aspecto, por

ejemplo, como en la figura 3, en la que el eje se ha trazado a escala a d en la frecuencia fundamental proporcionada en la ecuación (19). En la figura 3, el eje x se ha trazado a escala a la distancia desde el inicio del cable (d=300 m).

5 Cuando a la distancia x la onda encuentra una discontinuidad en los parámetros eléctricos del cable (por ejemplo, un pequeño cambio en el dieléctrico de aislamiento), será visible otra reflexión desde la distancia x, que podría añadir un nuevo componente de frecuencia en el espectro de potencia de la fase de la impedancia, en que la frecuencia (por la ecuación (19)) sería:

$$f'' = \frac{2x}{v_r v_0} \quad (20)$$

10 Y por lo tanto:

$$\frac{f'}{f''} = \frac{d}{x} \quad (21)$$

15 Si la longitud del cable es conocida, el conocimiento de  $f'$  y  $f''$  a partir del espectro de potencia de la fase de la impedancia (en el dominio de  $t'$ ) es suficiente para el cálculo de la posición x:

$$x = d \frac{f''}{f'} \quad (22)$$

20 Si d no es conocido, se puede utilizar el conocimiento de la velocidad de fase relativa  $v_r$  (a partir de la hoja de datos del cable o midiéndola en una muestra de cable del mismo tipo) para calcular la posición x en base a la ecuación (19):

$$x = \frac{v_r v_0 f''}{2} \quad (23)$$

25 El resultado final es entonces una punta en cualquier posición en la que un cambio (incluso un cambio muy pequeño) de parámetros eléctricos (principalmente debido a un cambio del valor del dieléctrico) produce una onda reflejada de la señal de referencia aplicada. Esta reflexión aparece como un componente de frecuencia del espectro de amplitud/fase de la impedancia de la línea. La frecuencia de la onda reflejada es una función lineal de la distancia desde el extremo del cable hasta la desviación. La figura 4 muestra una transformada de Fourier (espectro de potencia) de la impedancia de fase en el dominio de  $t'$ , en donde una reflexión debida a un cambio de parámetros eléctricos del cable en la posición x = 200 m desde el inicio del cable es visible como un componente de frecuencia en x = 200. En el caso de la figura 4, esta punta se debe a un cambio de capacidad de 20 pF en un segmento de 30 cm del cable bajo prueba.

35 Cuando se monitoriza el estado de un cable, pueden estar presentes una serie de discontinuidades (n) en los parámetros eléctricos del cable. Cada una de estas discontinuidades aparecerán en el espectro de potencia como diferentes puntas de componente de frecuencia  $f^n$ , y sus posiciones  $x_n$  identificadas tal como se ha explicado anteriormente.

40 Para tener una buena sensibilidad y una buena resolución digital es importante trabajar con el mayor ancho de banda posible, lo que está no obstante limitado por la atenuación del cable. Ejemplos típicos del ancho de banda son un ancho de banda de 100 MHz para cables de 30 m y un ancho de banda de 20 KHz para cables de 120 km. Los cables largos requieren anchos de bandas estrechos para superar la atenuación creciente del cable, que es función de la frecuencia.

### Monitorización de la degradación global

50 La monitorización de los cambios globales en el estado del cable viene dada por:

Procedimiento 1: estimación y monitorización de la *velocidad de fase relativa*.

Procedimiento 2: procedimiento CBAC (Central Band Attenuation Correlation, correlación de la atenuación de la banda central)

55 Igual que para la degradación local y su diagnosis, el procedimiento para la degradación global se basa asimismo en aplicar una señal de referencia CH0 al cable, teniendo la señal de referencia un ancho de banda de frecuencia de  $w_1$  a  $w_2$ , que es a continuación modulada en fase y amplitud mediante la impedancia del cable  $Z_{DUT}$  del cable bajo prueba, proporcionando la señal CH1.

60

Procedimiento 1: la *velocidad de fase relativa* se calcula mediante el sistema LIRA a través de un proceso en dos etapas:

5 1. Se estima un primer valor aproximado utilizando 2 valores de frecuencia de resonancia consecutivos en la impedancia de la línea, aplicando las ecuaciones siguientes: a cualquier resonancia, la longitud del cable L es exactamente igual a la mitad de la longitud de onda o a cualquier múltiplo de la misma (esto es cierto cuando el cable está abierto en los extremos, pero se pueden tener en cuenta fácilmente diferentes reactancias de carga), o, utilizando la ecuación (1):

$$L = \frac{v_r v_0}{2f_k} k \quad (24)$$

10 en la que L es la longitud del cable,  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $v_r$  es la velocidad de fase relativa y  $f_k$  es la frecuencia de pico de la resonancia k-ésima.

15 Aplicando la ecuación (24) a dos picos de resonancia consecutivos, se obtiene:

$$v_r = \frac{2L(f_{k+1} - f_k)}{v_0} \quad (25)$$

20 La ecuación (25) es utilizada por el sistema LIRA para evaluar un primer valor de  $v_r$ , después de la estimación de la impedancia de entrada del cable y del cálculo de las frecuencias de resonancia. Se debe observar que cualquier desplazamiento de la reactancia de carga debería ser eliminado por el término diferencial en la ecuación. La razón por la que este valor es aproximado es que  $v_r$  es una función lentamente decreciente, pero se ha supuesto constante en la ecuación (25).

25 2. El valor de  $v_r$  encontrado en la etapa 1 se utiliza para calcular el valor aproximado de la frecuencia fundamental  $f'$  (dominio de  $t'$ , ver la descripción anterior y la figura 3), como:

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0} \quad (26)$$

30 El sistema LIRA busca el pico máximo  $f''$  en la transformada de Fourier (espectro de potencia) en el dominio de  $t'$ , en un intervalo que puede ser seleccionado por el usuario alrededor de  $f'$ . Cuando a partir del espectro se encuentra un valor preciso de  $f''$  (denominado  $f''$ ), la ecuación (19) se resuelve para  $v_r$  como:

$$v_r^{final} = \frac{2L}{v_0 f''} \quad (27)$$

35 que es el valor final y preciso de la velocidad de fase. La velocidad de fase disminuye con la degradación del aislamiento del cable

40 Procedimiento 2: procedimiento CBAC (Central Band Attenuation Correlation, correlación de la atenuación de la banda central)

$$\Gamma_d = A e^{-j\omega' t'} \quad (18)$$

45 La ecuación (18) es la ecuación (en notación compleja) de una onda senoidal de frecuencia radial  $\omega'$  y amplitud A (considerando solamente la parte real de la función compleja de la ecuación 18) en el dominio de  $t'$ . Si la atenuación  $\alpha$  no es 0, A es una constante decreciente y la señal resultante es una onda senoidal amortiguada, tal como se muestra en la figura 5. La figura 5 muestra la GRC (parte real) en función de  $t'$ .

50 Al escribir la ecuación (8) para la impedancia de la línea de entrada Z utilizando la ecuación (18) para  $\Gamma_d$ , se obtiene

$$Z = Z_0 \frac{1 + A e^{-j\omega' t'}}{1 - A e^{-j\omega' t'}} \quad (27)$$

55 La ecuación (27) es una función compleja que representa la amplitud y la fase de la impedancia de la línea Z a una distancia d del extremo del cable. Representar la fase de la impedancia de la línea Z en el dominio de  $t'$  cuando A=1 (atenuación cero y terminación abierta o cortocircuitada), proporciona el gráfico que se muestra en la figura 6.

El gráfico de la figura 6 es una onda cuadrada de frecuencia radial  $\omega'$  (ecuación 16) y amplitud  $\pi/2$ . Si la atenuación  $\alpha$  no es cero (el caso real), entonces A es menor que 1 y decae a cero cuando t' tiende a infinito, la forma de la fase de la función (16) se desplaza hacia una función semiperiódica con la misma frecuencia  $\omega'$ , tal como se muestra en la figura 7.

5 La razón para este cambio se puede explicar si se escribe la ecuación de una onda cuadrada en serie de Taylor:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right) \quad (28)$$

10 La ecuación (28) es la suma infinita de los armónicos impares comenzando con la onda senoidal fundamental de periodo 2d. La figura 8 representa estos componentes y el resultado final. Físicamente hablando, en una línea de transmisión la onda senoidal fundamental de periodo 2d corresponde a la primera reflexión desde la terminación del cable. Los componentes armónicos se deben a reflexiones de orden superior y su amplitud (en el dominio de t') disminuye con el término  $1/n$ , en que n es el orden del armónico. Por esta razón, cuando no se considera el término de atenuación (tal como en la ecuación (28)), el número infinito de reflexiones tienen como resultado una fase de impedancia cuadrada, tal como se muestra en la figura 6 o en la figura 8.

15 La adición del término de atenuación tiene como resultado una atenuación progresiva de la amplitud de los armónicos, con la consecuencia de que la onda fundamental aumenta su importancia con respecto a los armónicos superiores (figura 7). Incluyendo el término de atenuación (y el coeficiente de reflexión, si la terminación no está abierta o cortocircuitada), la ecuación (28) se convierte en:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right) \Gamma_R^n e^{-2\alpha dn} \quad (29)$$

25 Integrando a lo largo de d y pasando a unidades de dB, se llega a:

$$\alpha_{dB/km} = \frac{\left((TP_1 - TP_3)_{dB} - 9.54 + 20 \log(\Gamma_R^2)\right)}{d} 250 \quad (30)$$

30 En que TP1 y TP2 son las amplitudes del armónico fundamental y del tercer armónico de la fase de la impedancia y  $\alpha$  la atenuación del cable por unidad de longitud en el centro del ancho de banda. Cuando la terminación del cable está cortocircuitada o abierta, los coeficientes de reflexión son 1 (o -1), de tal modo que el término logaritmo en la ecuación (30) desaparece.

35 La ecuación (30) muestra que la atenuación del cable en el centro del ancho de banda es proporcional a la diferencia entre TP1 y TP2, que el sistema LIRA puede estimar con precisión. La figura 9 muestra un ejemplo de visualización LIRA de los primeros 3 armónicos. El pico terminal frente al tercer armónico es por lo tanto un indicador estable del envejecimiento térmico global del cable.

40 Pruebas extensivas en EPRI y TECNATOM demuestran que existe una buena correlación entre el estado de envejecimiento térmico de un cable (especialmente para cables aislados EPR) y su atenuación en la banda media.

45 Estas pruebas muestran asimismo que la atenuación a frecuencias bajas permanece prácticamente sin cambios, la impedancia característica casi no varía (con desviación estándar grande) y la velocidad de fase tiende a disminuir (con desviación estándar grande). Se descubrió que en todos los casos la atenuación en la banda media es mayor para cables no envejecidos.

Estos resultados parecen confirmar que el envejecimiento térmico produce un aumento significativo en la inductancia del cable, conjuntamente con algún cambio en la capacidad dieléctrica.

50 En sistema LIRA,  $\alpha$  se normaliza a una longitud del cable de referencia (por defecto, 20 m), para tener en cuenta las diferencias entre cables largos y cortos.

La atenuación  $\alpha$  viene dada por:

$$\alpha = K \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (31)$$

55

En que R es la resistencia del alambre (invariante con el envejecimiento), C es la capacidad del aislamiento y L la inductancia del cable

5 La ecuación (31) muestra que la atenuación  $\alpha$  es función de la relación entre la capacidad del aislamiento C y la inductancia del cable L, que presenta un cambio con el envejecimiento. La correlación resultante entre envejecimiento y  $\alpha$  puede ser compleja y no monótona, aunque un comportamiento monótono es un requisito importante para un indicador de envejecimiento.

10 Para resolver este problema, el valor de la atenuación se corrige utilizando la impedancia característica y la relación de velocidad de fase, ambas calculadas mediante el sistema LIRA.

Quando  $\alpha$  se divide por la impedancia característica Z0 y por el cuadrado de la velocidad de fase relativa VR, se tiene:

$$15 \quad \alpha = K \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \div \sqrt{\frac{L}{C}} \div \left( \frac{K'}{\sqrt{LC}} \right)^2 = K'' C^2 = CBAC \quad (32)$$

CBAC es entonces un indicador sensible solamente a cambios en la capacidad del aislamiento.

20 Si en cambio se multiplica por el cuadrado de VR:

$$20 \quad \alpha = K \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \div \sqrt{\frac{L}{C}} \times \left( \frac{K'}{\sqrt{LC}} \right)^2 = K'' L^{-2} \quad (33)$$

la inversa de esto es CBAL, un indicador sensible solamente a cambios en la inductancia del cable.

25 La figura 10 muestra el concepto de los efectos de aislamiento de la capacidad del aislamiento C y la inductancia L del cable sobre los indicadores de envejecimiento LIRA.

**Descomposición espectral de los cambios de impedancia del cable: relación real-imaginaria del espectro de impedancia de fase para calcular la dirección y el tamaño del punto (enfoque BTS)**

30 Tal como se ha explicado en detalle anteriormente, el sistema de análisis de resonancia de línea dado a conocer en la patente U.S.A. número 7966137B2 da a conocer una curva característica LIRA. Se muestra un ejemplo de una curva característica LIRA en la figura 11. La curva característica LIRA sigue los cambios en la impedancia del cable a lo largo del cable. La curva característica LIRA es un espectro de potencia transformado en una función de la distancia desde el inicio del cable al que se aplica la señal CHO.

35 Tal como se muestra en la figura 11, la curva característica LIRA ha identificado un cambio en la impedancia del cable en las posiciones a y b en la figura 11. La resolución de LIRA se muestra mediante las líneas verticales de la figura 11. Sin embargo, dado que el sistema LIRA solamente detecta cambios en la impedancia del cable, la curva característica LIRA tal como se muestra en la figura 11 no dice nada acerca del estado del cable entre los dos cambios de impedancia del cable identificados en a y b. Dado que además los cambios de impedancia están dentro de la resolución del sistema LIRA, el sistema LIRA de la patente U.S.A. número 7966137B2 de la técnica anterior no puede proporcionar más información sobre la naturaleza del cambio de impedancia.

45 La impedancia del cable aumenta (se incrementa) como resultado de un cambio en uno o varios de los parámetros siguientes:

1. **Disminución** de la capacidad dieléctrica
- 50 2. **Aumento** de la auto-inductancia del cable
3. **Aumento** de la resistividad del conductor y/o de la protección
4. **Disminución** de la conductividad del aislamiento (raro)

55 Los efectos 1 y 2 son más sensibles a alta frecuencia, mientras que los efectos de 3 y 4 son más sensibles a baja frecuencia.

60 Los cambios en la impedancia del cable en sentido opuesto provocan una **disminución** de la impedancia (descenso).

Son factores frecuentes para los cambios de impedancia:

- Aumento (disminución) de la temperatura (subida (bajada) de la capacidad del dieléctrico, bajada (subida) de la impedancia)
- Entrada de agua/humedad (subida de la capacidad dieléctrica, bajada de la impedancia)
- Bajada de la resistencia de aislamiento (subida de la conductividad, bajada de la impedancia)
- Impacto mecánico (en cualquier sentido)
- Radiación gamma (normalmente subida de la impedancia)

Un problema con la curva característica LIRA, tal como se describe en la patente U.S.A. número US7966137B2, es que una punta de la curva característica puede ser provocada por cualquiera de los factores siguientes, enumerados a continuación. Los diferentes factores están identificados por un nombre de evento. Este nombre de evento será utilizado a lo largo del resto de la descripción.

La resolución de LIRA es función del ancho de banda aplicado y es de aproximadamente de 1,5 m a 100 MHz. La resolución disminuye a medida que se reduce el ancho de banda.

1. **SP+** (un solo pico, positivo): un cambio ascendente en la impedancia. Esta situación se produce cuando existe un aumento estable de la impedancia del cable a una distancia mayor que la resolución real. Esto se muestra en la figura 11, y la figura 11 muestra la curva característica LIRA desde un segmento de un cable con mayor impedancia, y en que este segmento es más largo que la resolución de LIRA. Al inicio del segmento existe un cambio de impedancia (la impedancia aumenta (SP+)) dentro de la resolución de la curva característica LIRA. El aumento de la impedancia tiene como resultado una punta en la curva característica LIRA, dado que la curva característica LIRA detecta solamente cambios en la impedancia a lo largo del cable. Al final del segmento existe otro cambio de impedancia, en el que la impedancia desciende (SP-) y de nuevo tiene como resultado una punta en la curva característica LIRA. La figura 12 muestra una imagen de visualización de una curva característica LIRA para un aumento de impedancia (-5 pF/m, resolución = 1,5 m) tal como se muestra en la figura 11. El aumento de impedancia está representado por el primer pico en 50 m y el descenso de impedancia aparece a 60 m desde el inicio del cable.

2. **SP-** (un solo pico, negativo): un cambio descendente en la impedancia. Esta situación se produce cuando existe una disminución estable de la impedancia del cable a lo largo de una distancia mayor que la resolución real de LIRA. Las figuras 13 y 14 muestran un ejemplo de un segmento largo (con respecto al ancho de banda) de menor impedancia. Las dos puntas de la figura 13 representan el inicio y el final del segmento de baja impedancia. Al inicio del segmento existe un cambio de impedancia (la impedancia desciende (SP-)) dentro de la resolución de la curva característica LIRA. El descenso de la impedancia tiene como resultado una punta en la curva característica LIRA, dado que la curva característica LIRA detecta solamente cambios en la impedancia a lo largo del cable. Al final del segmento existe otro cambio de impedancia, en el que la impedancia aumenta (SP+) y de nuevo tiene como resultado una punta en la curva característica LIRA. Tal como se puede ver por las figuras, la curva característica LIRA de la figura 14 es idéntica a la curva característica LIRA de la figura 12. Tanto un aumento de la impedancia del cable como una disminución de la impedancia del cable en una distancia mayor que la resolución del ancho de banda real aplicado de la señal CH0 aplicada al cable, tienen como resultado la misma curva característica LIRA; es decir, una punta SP- seguida por una punta SP+.

3. **DP+**: un segmento corto de cable (más corto que la resolución real) con una impedancia mayor. Esto es lo que se denomina normalmente un "punto". En este caso, la impedancia del cable es igual antes y después del punto, pero es mayor en el interior del segmento corto de cable. Ver la figura 19 para un ejemplo de punto de alta impedancia y la figura 26 para la correspondiente curva característica LIRA. Tal como se puede ver por la figura 19, un punto de alta impedancia tiene como resultado solamente una punta en la curva característica LIRA.

4. **DP-**: un segmento corto de cable (más corto que la resolución real) con una impedancia menor. En este caso, la impedancia del cable es igual antes y después del punto, pero es menor en el interior del segmento corto de cable. Ver la figura 20 para un ejemplo de punto de alta impedancia y la figura 23 para la correspondiente curva característica LIRA. Tal como se puede ver por la figura 20, un punto de alta impedancia tiene como resultado solamente una punta en la curva característica LIRA.

Tal como se puede ver por las figuras 11, 13, 19 y 20, los diferentes cambios de impedancia descritos anteriormente tienen como resultado la misma punta en la curva característica LIRA. En resumen, existen cuatro tipos de evento que de este modo la curva característica LIRA normal no puede discriminar:

• **SP+**: cambio ascendente de la impedancia. Este tipo incluye asimismo la terminación final, cuando el cable está abierto en los extremos (o la carga acoplada tiene una impedancia mayor que la impedancia característica del cable).

5 • **SP-**: cambio descendente de la impedancia. Este tipo incluye asimismo la terminación final, cuando el cable está cortocircuitado en los extremos (o la carga acoplada tiene una impedancia menor que la impedancia característica del cable).

10 • **DP+**: punta de alta impedancia

• **DP-**: punta de baja impedancia

15 **Enfoque de la relación real-imaginaria (BTS, curva característica de terminación equilibrada) para detectar los cuatro posibles eventos**

Se puede utilizar un enfoque de relación real-imaginaria (BTS, curva característica de terminación equilibrada) para detectar los cuatro posibles eventos enumerados anteriormente (SP+, SP-, DP+, DP-). Tal como se deduce de la ecuación (8), la impedancia de la línea  $Z_{DUT}$  es una variable compleja. La forma de la curva que se deduce de la ecuación (8) se muestra en la figura 1 para la amplitud y la fase en función de la frecuencia.

La presente invención da a conocer análisis adicionales de las puntas identificadas en posiciones particulares en la transformada de Fourier de la fase de la impedancia, posiciones que se calculan mediante la ecuación (23) y se muestran, por ejemplo, en las figuras 3 y 4.

25 El enfoque BTS se basa en el cálculo de una componente real y una imaginaria de la transformada de Fourier del espectro de fase de la impedancia, en la posición del evento.

Los eventos de subida y bajada (SP+ y SP-) se caracterizan por un valor imaginario puro de la transformada en la posición del evento, tal como se describe en las figuras 15 a 18. Aunque la componente real es 0 ( $Re=0$ ), la componente imaginaria ( $Im = +90$ ) es positiva para un evento SP+ y negativa ( $Im = -90$ ) para un evento SP-.

Las puntas de alta y baja impedancia se caracterizan por una estrecha combinación de los dos eventos SP de signo opuesto; SP+ seguido por SP-, o SP- seguido por SP+. Esto tiene como resultado que las componentes imaginarias ( $+90 + -90$ ,  $-90 + +90$ ) se cancelan. El resultado de ello es un valor real puro de la transformada del espectro en la posición del evento, con una componente real positiva para DP+ (figura 25) y una componente real negativa para DP- (figura 22).

La transformada de Fourier del espectro de la fase de la impedancia para un evento DP- se muestra en la figura 21. El espectro en el punto es real puro y negativo. La transformada de Fourier del espectro de fase de la impedancia para un evento DP+ se muestra en la figura 24. El espectro en el punto es real puro y positivo.

Estos cálculos se pueden llevar a cabo automáticamente mediante el sistema LIRA, según la invención. Tal como se muestra en las imágenes de visualización de las figuras 12, 14, 23 y 26, las puntas de impedancia en las curvas características LIRA se presentan en una tabla en la imagen de visualización que identifica cada punta como una de SP+, SP-, DP+, DP-.

**Precisión de la posición para eventos SP y DP**

50 Sin embargo, existen algunas diferencias en el proceso de localización entre los dos eventos de saltos SP (SP+, SP-) y los dos eventos de punta DP (DP+, DP-).

La posición detectada de un evento SP+ (incremento) es la posición del cable en la que uno o varios cambios de parámetros eléctricos tienen como resultado un aumento en la impedancia del cable. Análogamente, la posición del evento SP- es la posición del cable en la que la impedancia local disminuye.

Un evento DP+ (DP-) es la superposición de un evento SP+ (SP-) seguido por un evento SP- (SP+) a una distancia menor que la resolución actual resultante del ancho de banda aplicado de la señal CH1 aplicada al cable. Por esta razón, la posición del evento detectado está en el centro del segmento corto en el que se produce el cambio.

60 **Severidad de la degradación local (algoritmo DNORM)**

La severidad de la degradación local en el aislamiento del cable está correlacionada con las alturas de las puntas en la curva característica LIRA. Sin embargo, la altura de la punta para el mismo daño al aislamiento, depende asimismo de la posición de esta degradación del cable (daño al aislamiento) a lo largo del cable. La altura de la punta en la curva característica LIRA disminuye con la distancia de la degradación del cable desde el inicio del cable

al que se aplica la señal CH0. Esto significa que cuando el defecto se desplaza hacia el extremo del cable, la altura de la punta disminuye. Asimismo, este efecto se compensó automáticamente en el análisis llevado a cabo por el sistema LIRA que se describe en la patente U.S.A. número 7966137B2 por medio de normalización del gráfico.

5 Dicha normalización es una buena característica para detectar fácilmente puntas significativas, pero no es fiable como compensación de la distancia cuando el defecto (degradación del aislamiento del cable) se desplaza hacia el extremo del cable. La presente invención da a conocer un algoritmo DNORM que puede ser expresado como sigue:

10 Cualquier punto local (cambio en la impedancia del cable) produce una imagen especular en el otro lado del pico terminal (ver la figura 27). Esto se debe a la reflexión de segundo orden de la sección dañada. La punta de segundo orden en el espectro de potencia es como un nuevo punto de la misma severidad a una distancia  $2L-SL$ , en que  $L$  es la longitud del cable y  $SL$  es la posición del punto en el cable.

15 Dado que la distancia entre los dos puntos (un punto local y su imagen especular) es conocida (después de la localización del punto), es posible dibujar y calcular una línea de tendencia (la línea recta entre los puntos en la figura 27) que representa cómo cambia el tamaño de la punta con la distancia, debido a la atenuación del cable. En DNORM la diferencia entre el valor de la línea de tendencia y la punta de terminación (delta de la punta) se normaliza a la posición de terminación (TP, termination position), independientemente de dónde esté situado el punto real. Esta diferencia (DNORM) representa una medida de la severidad de la degradación local para el punto particular.

### Extremo de terminación

25 La señal de banda ancha CH0 aplicada al cable se refleja en el extremo de terminación del cable. La señal procedente del extremo de terminación proporciona una punta en la curva característica del punto a una distancia desde el inicio del cable que es la longitud del cable. Cualesquiera cambios de impedancia que se producen en el extremo del cable están, por lo tanto, dentro de la sombra de esta punta/pico de terminación. La presente invención, utilizando el planteamiento de BTS y DNORM explicado anteriormente, proporciona la posibilidad de determinar si el extremo de terminación del segmento de cable es de buena o mala calidad. El extremo de terminación del cable proporciona un punto (DP+ o DP-). En la terminación del cable, la relación entre la diferencia delta  $dy$  entre los dos lados del pico de terminación y la altura del pico  $dz$ ;  $BTS=dy/dz * 100$  es una medida del estado del aislamiento de la terminación del cable.

35 La figura 28 muestra una imagen de visualización de una curva característica de terminación equilibrada (BTS) en un extremo del cable para un cable en condiciones de equilibrio (un cable correcto) en que  $BTS=0$ . La figura 29 muestra una imagen de visualización de una curva característica de terminación equilibrada (BTS) en un extremo del cable, para un cable con una terminación de capacidad elevada (baja impedancia), en que  $(BTS > 0)$ . La figura 30 muestra una imagen de visualización de una curva característica de terminación equilibrada (BTS) en un extremo de un cable, en el caso de un cable con una terminación de capacidad baja (impedancia elevada), en que  $BTS < 0$ .

40 Establecer el estado del extremo del cable es particularmente importante en entornos tales como, por ejemplo, la industria petrolera y gasista, el fondo de perforación en pozos petrolíferos, instalaciones submarinas, centrales nucleares, distribución de transmisión de energía y otros emplazamientos de difícil acceso.

45 Una vez descritas las realizaciones preferentes de la invención, resultará evidente para los expertos en la materia que se pueden utilizar otras realizaciones que incorporen los conceptos. Estos y otros ejemplos de la invención mostrados anteriormente están previstos solamente a modo de ejemplo, y el alcance real de la invención debe ser determinado a partir de las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para monitorizar el estado de un cable eléctrico, comprendiendo dicho procedimiento:

- 5 - aplicar una onda de señal de banda ancha a un primer extremo del cable eléctrico, en el que la onda de señal de banda ancha es modulada en fase y amplitud mediante, por lo menos, una impedancia del cable del cable eléctrico,
- obtener en el primer extremo del cable la onda de señal de banda ancha modulada en fase y amplitud transmitida y reflejada por el cable eléctrico,
- 10 - calcular una impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia  $f$  especificada por una amplitud y una fase, para la onda de señal de banda ancha obtenida reflejada,

- trasladar a un dominio de tiempo  $t'$  la impedancia compleja del cable calculada;
- 15 - calcular una frecuencia  $f'$  en el dominio de tiempo  $t'$ , en la que la frecuencia  $f'$  es la frecuencia fundamental de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $w'$  y amplitud  $A$  en el dominio de tiempo  $t'$  debida a la reflexión de onda de la onda de señal de banda ancha a una distancia  $d$  desde un extremo del cable, y en la que la frecuencia  $f'$  se calcula aplicando:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

en que  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v_r$ , es una velocidad de fase relativa estimada de una señal eléctrica en el cable;

- 25 - llevar a cabo un análisis espectral de potencia tanto en amplitud como en fase de la impedancia compleja del cable en el dominio de tiempo  $t'$  para encontrar y localizar cualquier degradación local del aislamiento del cable;
- identificar componentes de frecuencia  $f''_1, f''_2, \dots, f''_n$  en el espectro de potencia del dominio de tiempo  $t'$  debidas a reflexiones de onda de la onda de señal de banda ancha en posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, debiéndose las reflexiones de onda a discontinuidades en parámetros eléctricos del cable; y
- 30 calcular cada una de las posiciones  $x_i$  aplicando:

$$x_i = \frac{v_r v_0 f''_i}{2}$$

- 35 - establecer una relación entre una parte real y una parte imaginaria de una transformada de Fourier del espectro de impedancia de fase del espectro de potencia en un intervalo en torno a, por lo menos, una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, e

- 40 - identificar cambios de impedancia, por lo menos, en una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable a partir de dichas partes real e imaginaria.

2. Procedimiento, según la reivindicación 1, en el que la identificación de los cambios de impedancia incluye identificar, por lo menos, uno de un cambio ascendente de la impedancia, un cambio descendente de la impedancia, un punto de alta impedancia o un punto de baja impedancia.

3. Procedimiento, según la reivindicación 1 o 2, en el que se identifica un punto de alta impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es positiva.

4. Procedimiento, según la reivindicación 1 o 2, en el que se identifica un punto de baja impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es negativa.

5. Procedimiento, según la reivindicación 1 o 2, en el que se identifica un cambio ascendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es positiva.

6. Procedimiento, según la reivindicación 1 o 2, en el que se identifica un cambio descendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es negativa.

7. Procedimiento, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende además identificar un segmento de cable con una impedancia menor como un cambio descendente de la impedancia en el inicio del segmento de cable, seguido por un cambio ascendente de la impedancia en el final del segmento de cable.

8. Procedimiento, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende además identificar un segmento de cable con una impedancia mayor como un cambio ascendente de la impedancia en el inicio del segmento de cable seguido por un cambio descendente de la impedancia en el final del segmento de cable.

5 9. Procedimiento para monitorizar el estado de un cable eléctrico, comprendiendo dicho procedimiento:

- aplicar una onda de señal de banda ancha a un primer extremo del cable eléctrico, en el que la onda de señal de banda ancha es modulada en fase y amplitud mediante, por lo menos, una impedancia del cable del cable eléctrico,

10 - obtener en el primer extremo del cable la onda de señal de banda ancha modulada en fase y amplitud transmitida y reflejada por el cable eléctrico,

- estimar/calcular una impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia  $f$  especificada por una amplitud y una fase, para la onda de señal de banda ancha obtenida reflejada,

15 - trasladar a un dominio de tiempo  $t'$  la impedancia compleja del cable calculada;

- calcular una frecuencia  $f'$  en el dominio de tiempo  $t'$ , en que la frecuencia  $f'$  es la frecuencia fundamental de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $w'$  y amplitud  $A$  en el dominio de tiempo  $t'$  debida a una reflexión de onda de la onda de señal de banda ancha a una distancia  $d$  desde un extremo del cable, y en que la frecuencia  $f'$  es calculada aplicando:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

- en que  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v_r$ , es una velocidad de fase relativa estimada de una señal eléctrica en el cable;

25 - llevar a cabo un análisis espectral de potencia tanto en amplitud como en fase de la impedancia compleja del cable en el dominio de tiempo  $t'$  para encontrar y localizar cualquier degradación local del aislamiento del cable;

30 - identificar componentes de frecuencia  $f''_1, f''_2, \dots, f''_n$  en el espectro de potencia del dominio de tiempo  $t'$  debidas a reflexiones de onda de la onda de señal de banda ancha en posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, debiéndose las reflexiones de onda a discontinuidades en parámetros eléctricos del cable; y

calcular cada una de las posiciones  $x_i$  aplicando:

$$x_i = \frac{v_r v_0 f''_i}{2}$$

35 comprendiendo además establecer la severidad de la degradación local de un defecto identificado en el aislamiento del cable, por lo menos, en una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, mediante el análisis de una reflexión de segundo orden de la señal de banda ancha en dicha posición del defecto identificado.

40 10. Procedimiento, según la reivindicación 9, que comprende además establecer una diferencia entre la altura de un pico de reflexión de primer orden y la altura del pico de reflexión de segundo orden en el espectro de potencia y evaluar la atenuación del cable para normalizar la altura de cualquier pico a cualquier distancia de la terminación.

45 11. Procedimiento, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 1 a 10, que comprende además establecer una medida del estado del extremo del cable analizando un pico de terminación en el espectro de potencia, que comprende establecer una relación entre la diferencia  $dy$  entre los dos valles a cada lado del pico de terminación y la altura  $dz$  del pico de terminación.

50 12. Procedimiento, según la reivindicación 11, que comprende además:

estimar, utilizando un analizador, la velocidad de fase relativa estimada  $v_r$ , en el que la estimación de la velocidad de fase relativa estimada  $v_r$  incluye:

55 - evaluar, por lo menos, dos frecuencias de resonancia de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;

- identificar dos valores consecutivos de frecuencia de resonancia  $f_k$  y  $f_{k+1}$  respectivamente, de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;

60 - calcular un primer valor de una velocidad de fase relativa  $v_r$  del cable aplicando

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

en que L es la longitud del cable;

- 5 - calcular la frecuencia fundamental  $f'$  del cable, en el dominio de tiempo  $t'$  utilizando la primera velocidad de fase relativa  $v_r$  y aplicando

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0};$$

- 10 - calcular un segundo valor  $f''$  de la frecuencia fundamental  $f'$  hallando un valor de pico máximo en el dominio de tiempo  $t'$  en un intervalo que se puede seleccionar en torno a  $f'$ , y  
 - calcular la estimación de la velocidad de fase relativa  $v_r^{final}$  aplicando

$$v_r^{final} = \frac{2L}{v_0 f''}$$

- 15  
 13. Sistema para monitorizar el estado de un cable eléctrico, comprendiendo dicho sistema:  
 un analizador para calcular la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  como una función de la frecuencia  $f$  especificada mediante una amplitud y una fase;  
 un medio de generación para generar una onda de señal de banda ancha que tiene que ser modulada en fase y amplitud mediante la impedancia del cable, estando la onda de señal de banda ancha aplicada a un primer extremo del cable;  
 un módulo de obtención para obtener en el primer extremo del cable la onda de señal de banda ancha modulada en fase y amplitud por medio de la impedancia del cable;  
 un medio de traslación para trasladar la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$  a un dominio de tiempo  $t'$ ,  
 un analizador para calcular una frecuencia  $f'$  en el dominio de tiempo  $t'$ , en el que la frecuencia  $f'$  es la frecuencia fundamental de una función pseudo-periódica de frecuencia radial  $\omega'$  y amplitud A en el dominio de tiempo  $t'$  debida a la reflexión de onda de la onda de señal de banda ancha a una distancia d de un extremo del cable, y en que la frecuencia  $f'$  se calcula aplicando:

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{2d}{v_r v_0}$$

- en que  $v_0$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v_r$  es una velocidad de fase relativa estimada de una señal eléctrica en el cable;  
 en que dicho analizador lleva a cabo un análisis espectral de potencia tanto de amplitud como de fase de la impedancia compleja del cable en el dominio de tiempo  $t'$  para encontrar y localizar cualquier degradación local del aislamiento del cable,  
 en el que dicho analizador identifica componentes de frecuencias  $f''_1, f''_2, \dots, f''_n$  en el espectro de potencia del dominio de tiempo  $t'$  debidos a reflexiones de onda en las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, debiéndose las reflexiones de onda a discontinuidades en parámetros eléctricos del cable, y

- en el que dicho analizador calcula cada una de las posiciones  $x_i$  aplicando:

$$x_i = \frac{v_r v_0 f''_i}{2}$$

- en el que dicho analizador establece además una relación entre una parte real y una parte imaginaria de una transformada de Fourier de un espectro de impedancia de fase del espectro de potencia en un intervalo en torno a, por lo menos, una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, y  
 - la identificación de cambios de impedancia, por lo menos, en una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable a partir de dichas partes real e imaginaria.

14. Sistema, según la reivindicación 13, en el que la identificación cambios de impedancia incluye identificar, por lo menos, uno de un cambio ascendente de la impedancia, un cambio descendente de la impedancia, un punto de alta impedancia o un punto de baja impedancia.

5 15. Sistema, según la reivindicación 13 o 14, en el que se identifica un punto de alta impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es positiva.

10 16. Sistema, según la reivindicación 13 o 14, en el que se identifica un punto de baja impedancia cuando la parte imaginaria es cero y la parte real es negativa.

17. Sistema, según la reivindicación 13 o 14, en el que se identifica un cambio ascendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es positiva.

15 18. Sistema, según la reivindicación 13 o 14, en el que se identifica un cambio descendente de la impedancia cuando la parte real es cero y la parte imaginaria es negativa.

19. Sistema, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 13 a 18, que comprende además identificar un segmento de cable con una impedancia menor como un cambio descendente de la impedancia en el inicio del segmento de cable seguido por un cambio ascendente de la impedancia en el final del segmento de cable.

20. Sistema, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 13 a 18, que comprende además identificar un segmento de cable con una impedancia mayor como un cambio ascendente de la impedancia en el inicio del segmento de cable seguido por un cambio descendente de la impedancia en el final del segmento de cable.

25 21. Sistema, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 13 a 20, que comprende además establecer la severidad de la degradación local de un defecto identificado en el aislamiento del cable, por lo menos, en una de las posiciones  $x_1, x_2, \dots, x_n, x_1, x_2, \dots, x_n$  a lo largo del cable, mediante el análisis de una reflexión de segundo orden de la señal de banda ancha en dicha posición del defecto identificado.

30 22. Sistema, según la reivindicación 21, que comprende además establecer la diferencia entre la altura de un pico de reflexión de primer orden y la altura del pico de reflexión de segundo orden en el espectro de potencia, y normalizar la diferencia de altura a la altura de un pico de terminación en el espectro de potencia.

35 23. Sistema, según, por lo menos, una de las reivindicaciones 13 a 22, que comprende además establecer una medida del estado del extremo del cable analizando un pico de terminación en el espectro de potencia, que comprende establecer una relación entre la diferencia  $dy$  entre los dos valles a cada lado del pico de terminación y la altura  $dz$  del pico de terminación.

40 24. Sistema, según cualquiera de las reivindicaciones 13 a 23,

en el que dicho analizador puede funcionar para:

45 evaluar, por lo menos, dos frecuencias de resonancia de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;

identificar dos valores consecutivos de frecuencia de resonancia  $f_k$  y  $f_{k+1}$  respectivamente, de la impedancia compleja del cable  $Z_{DUT}$ ;

50 calcular un primer valor de una velocidad de fase relativa  $V_r$  del cable, aplicando

$$v_r = 2L(f_{k+1} - f_k) / v_0,$$

en que  $L$  es la longitud del cable;

55 calcular la frecuencia fundamental  $f'$  del cable utilizando la primera velocidad de fase relativa  $v_r$  y aplicando

$$f' = \frac{2L}{v_r v_0},$$

60 calcular un segundo valor  $f''$  de la frecuencia fundamental  $f'$  hallando un valor de pico máximo en el dominio de tiempo  $t'$  en un intervalo que se puede seleccionar en torno a  $f''$ , y

calcular la estimación de la velocidad de fase relativa  $v_r^{final}$  aplicando

$$v_r^{final} = \frac{2L}{v_0 f''}$$

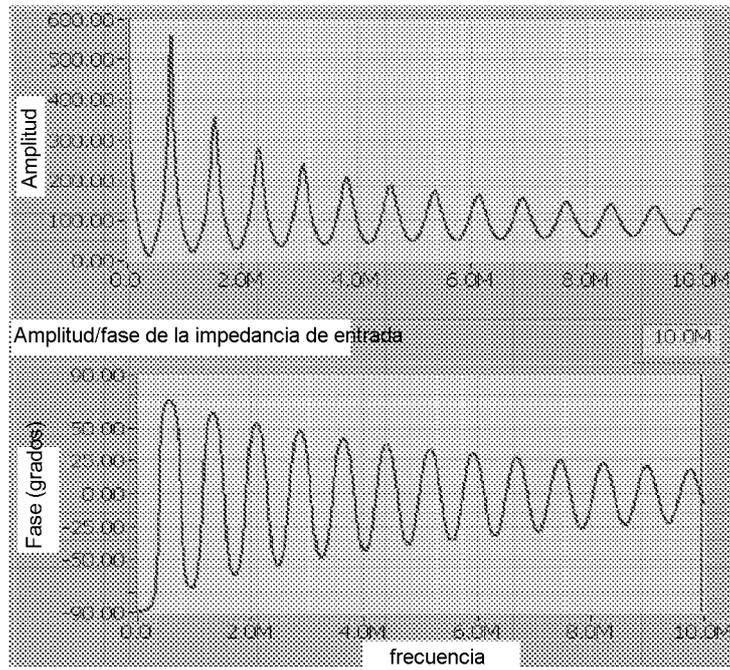


Figura 1

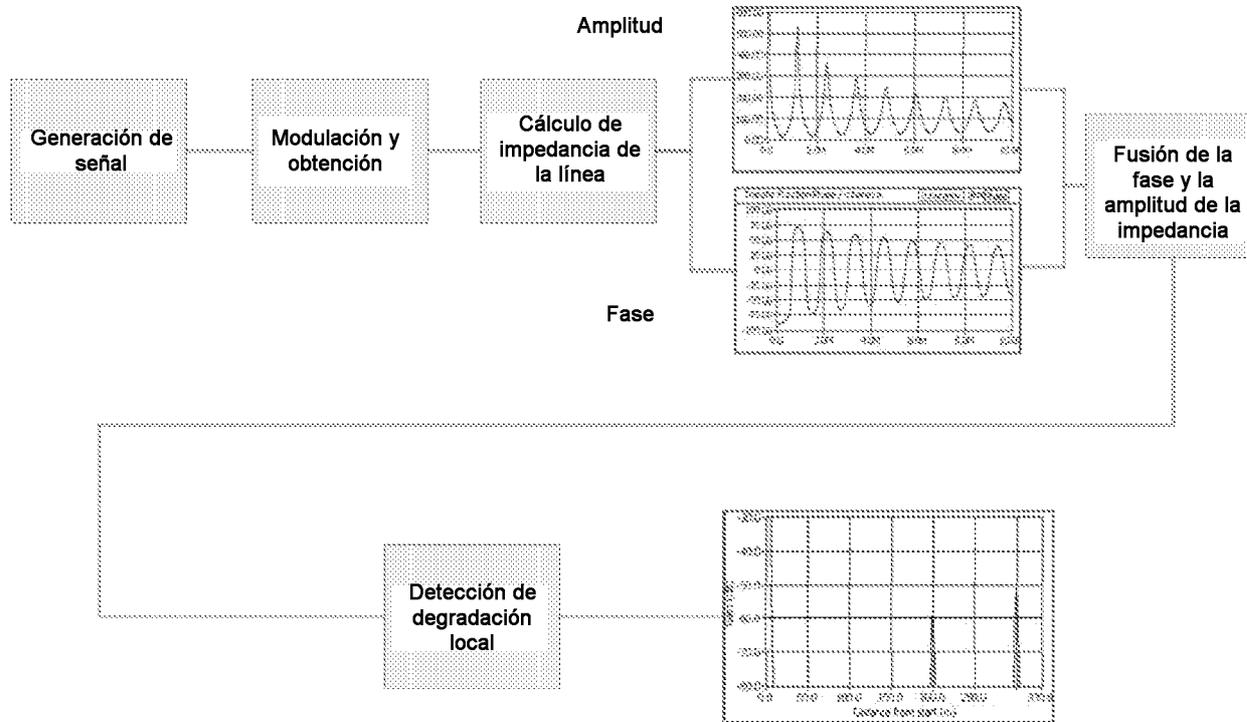
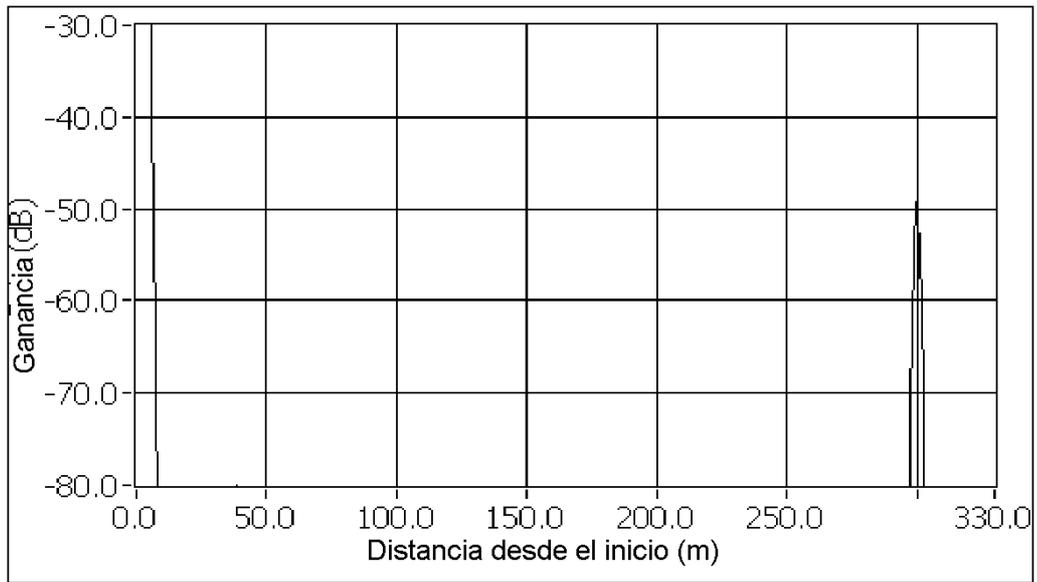
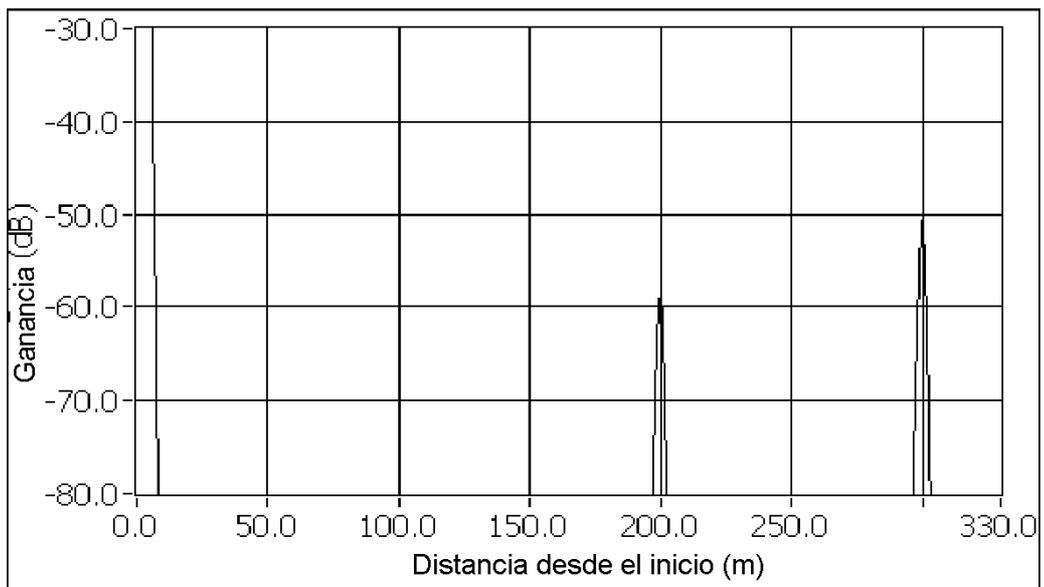


Figura 2 (técnica anterior)



**Figura 3 (técnica anterior)**



**Figura 4 (técnica anterior)**

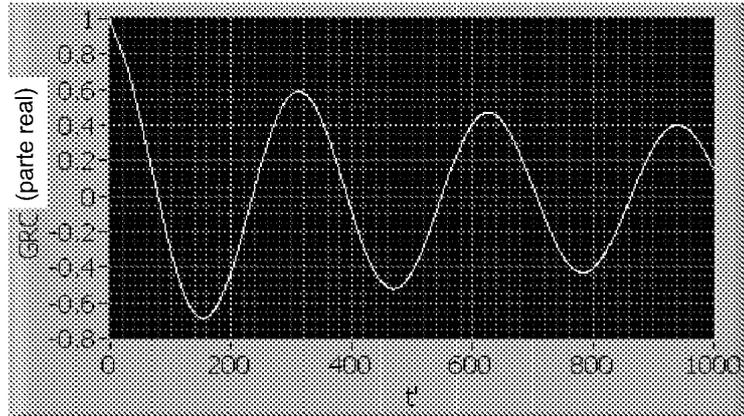


Figura 5

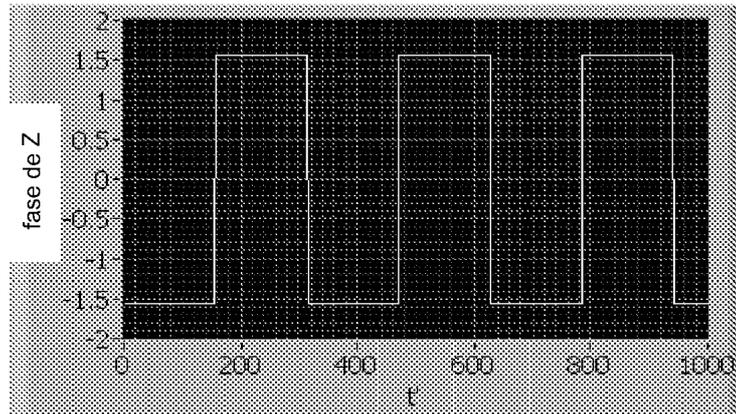


Figura 6

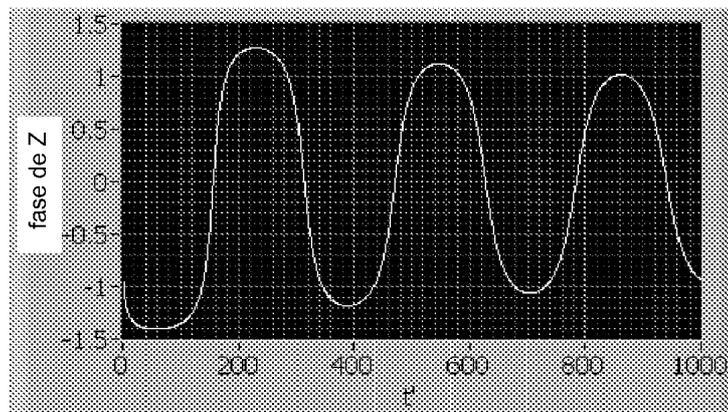


Figura 7

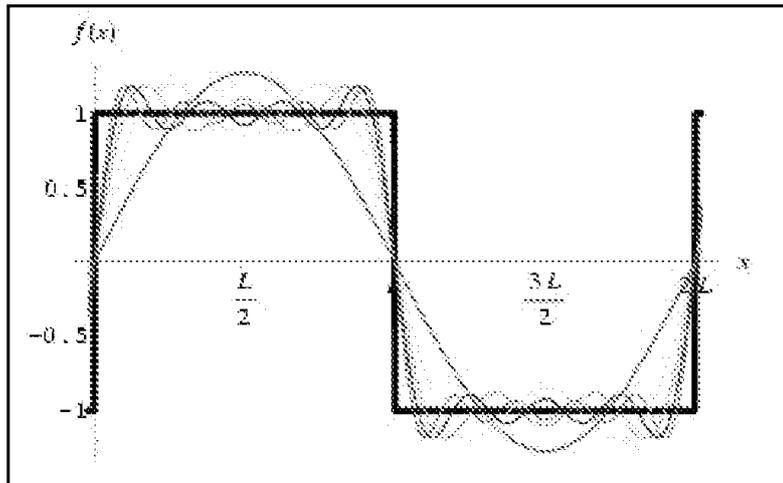


Figura 8

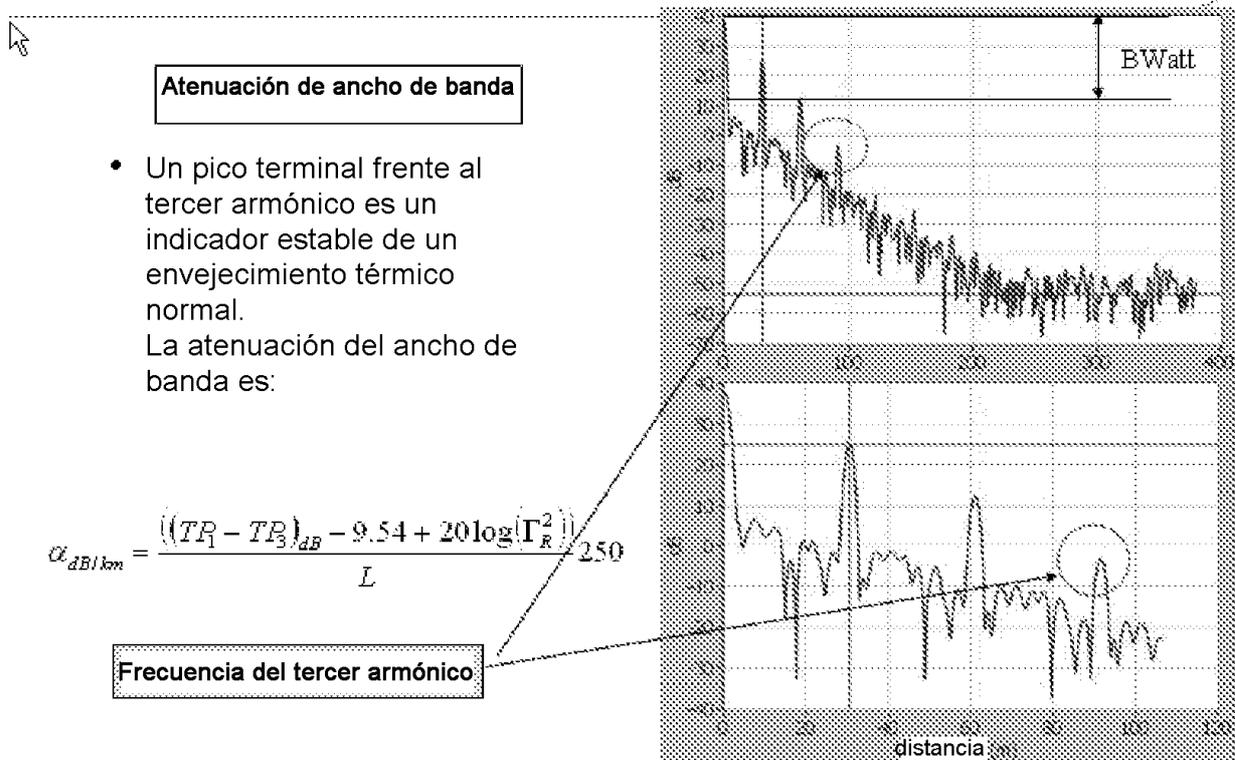


Figura 9

### Aislamiento de los efectos de C y L en los indicadores de envejecimiento de LIRA

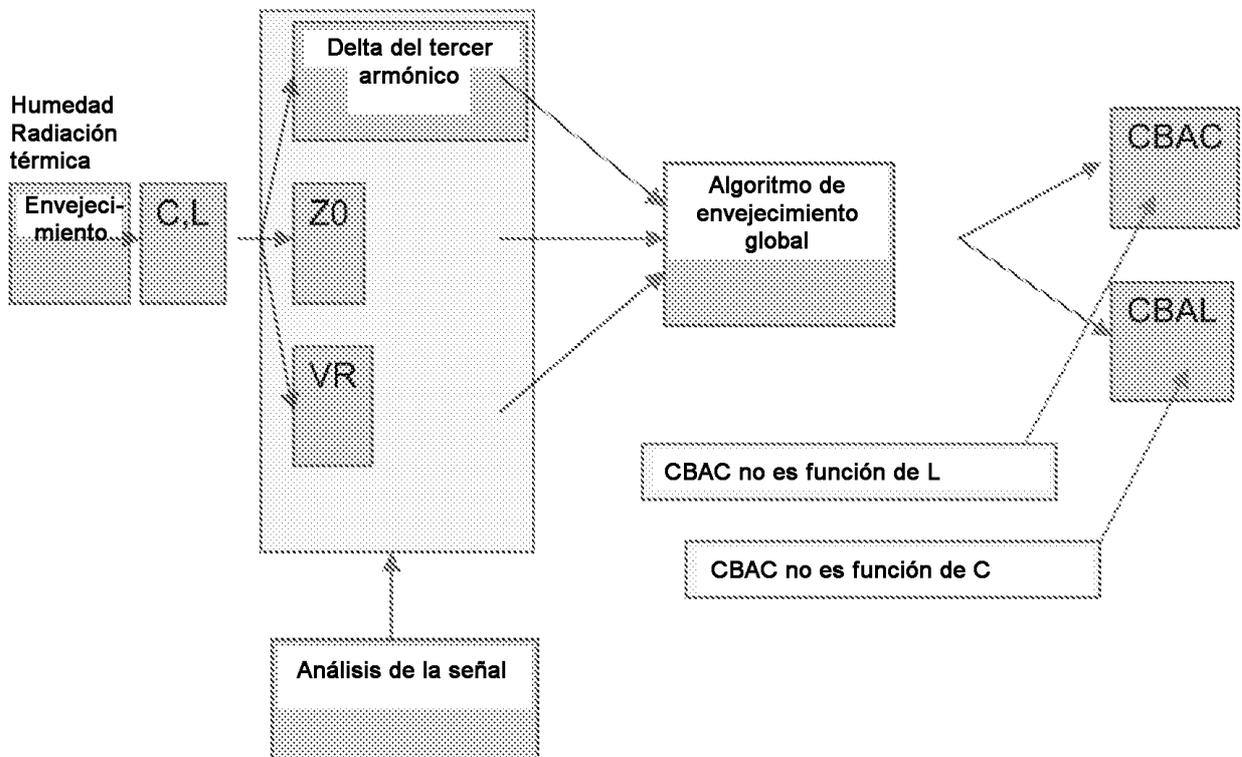


Figura 10

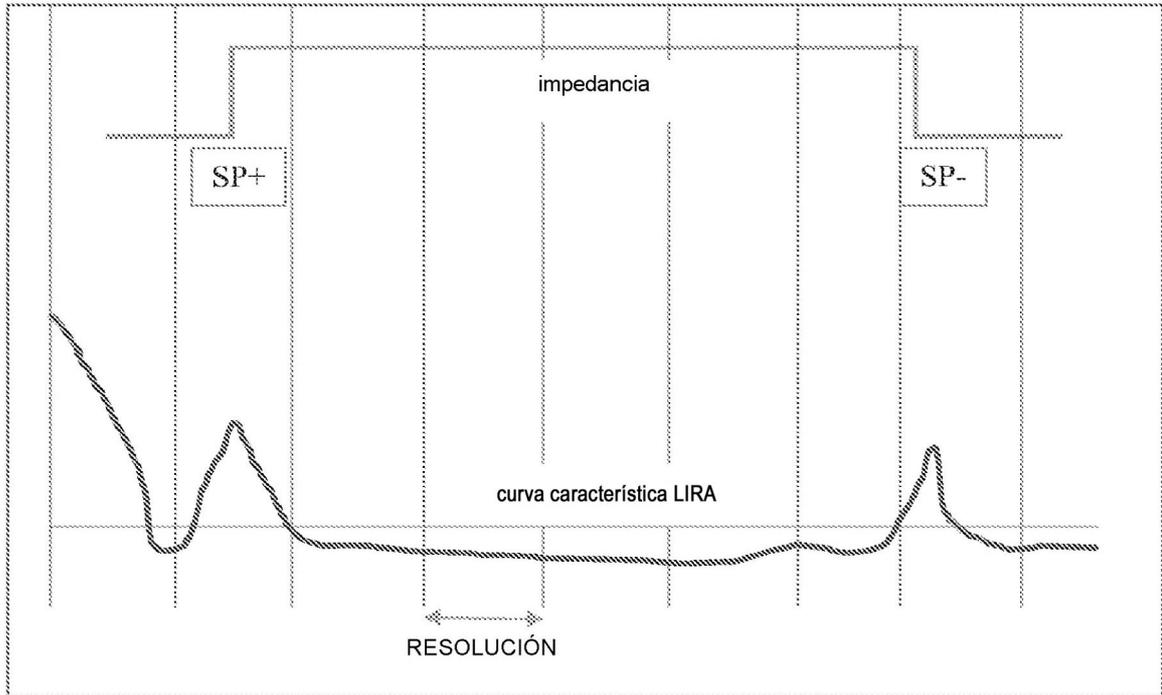


Figura 11 Segmento con mayor impedancia, segmento más largo que la resolución LIRA

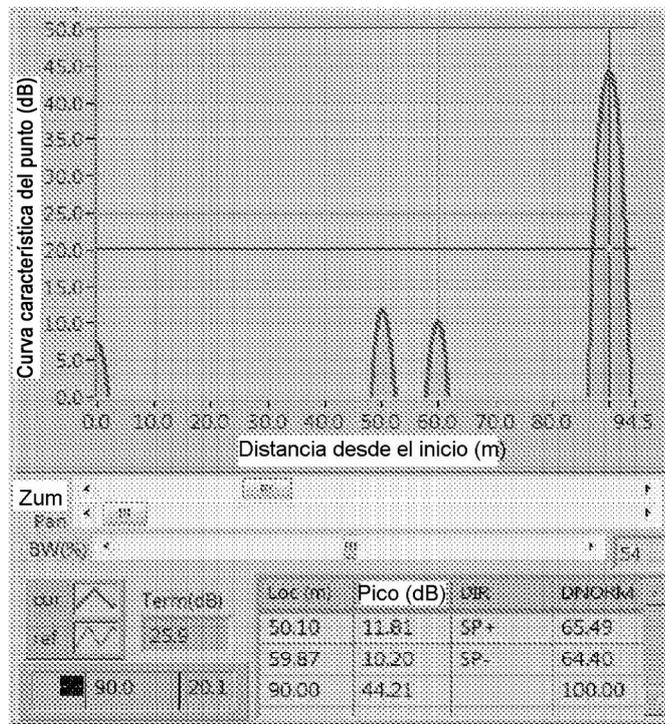


Figura 12 Curva característica LIRA para un aumento de la impedancia en 10 m (-5 pF/m), resolución = 1,5 m)

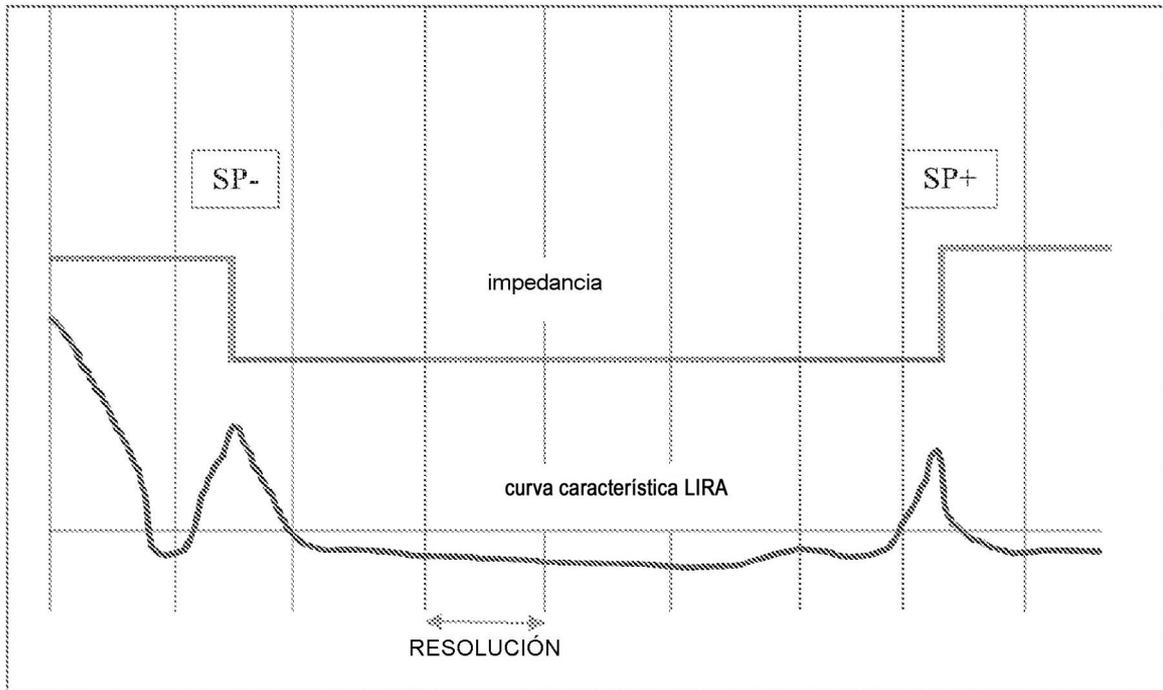


Figura 13 Segmento con menor impedancia, segmento más largo que la resolución LIRA

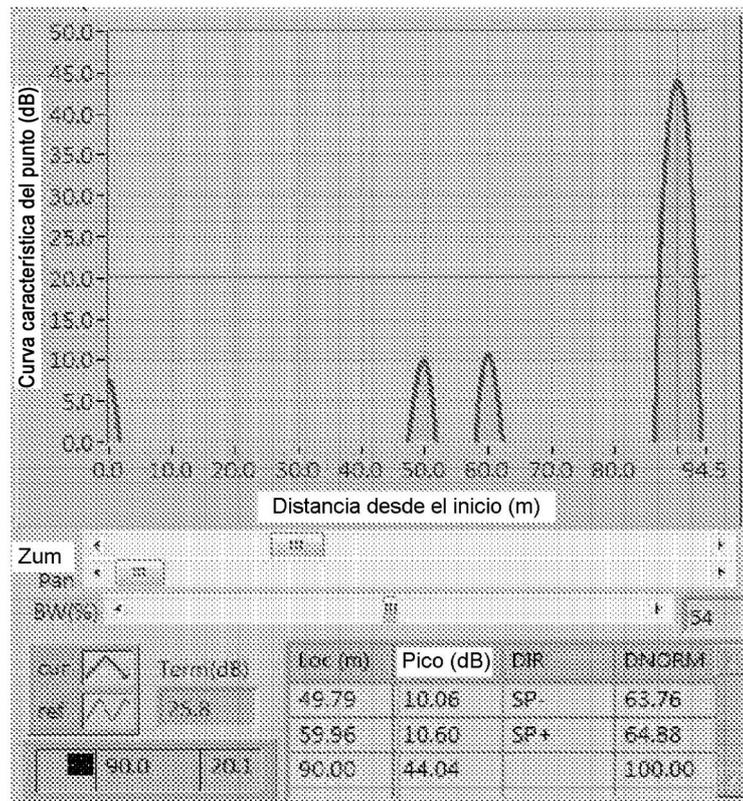


Figura 14 Curva característica LIRA para una disminución de la impedancia en 10 m (+5 pF/m, resolución = 1,5 m)

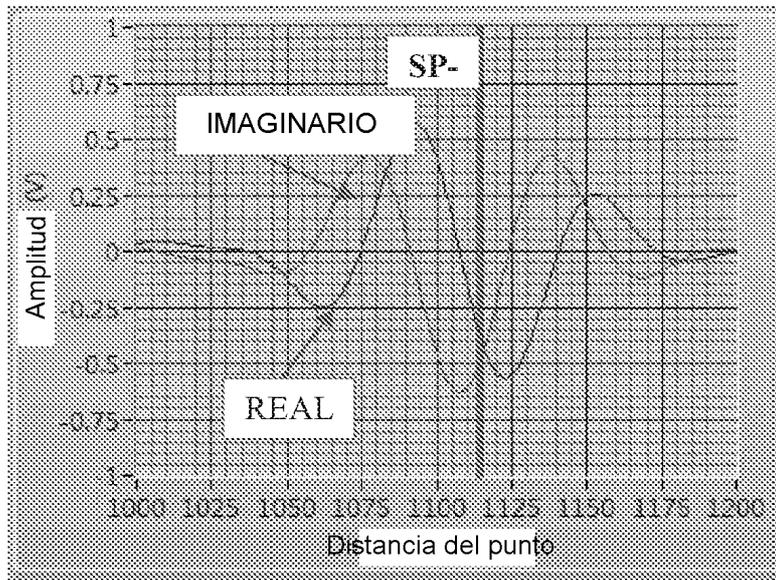


Figura 15 Un solo salto de impedancia, negativo (SP-). El espectro en la posición del salto es imaginario puro y negativo.

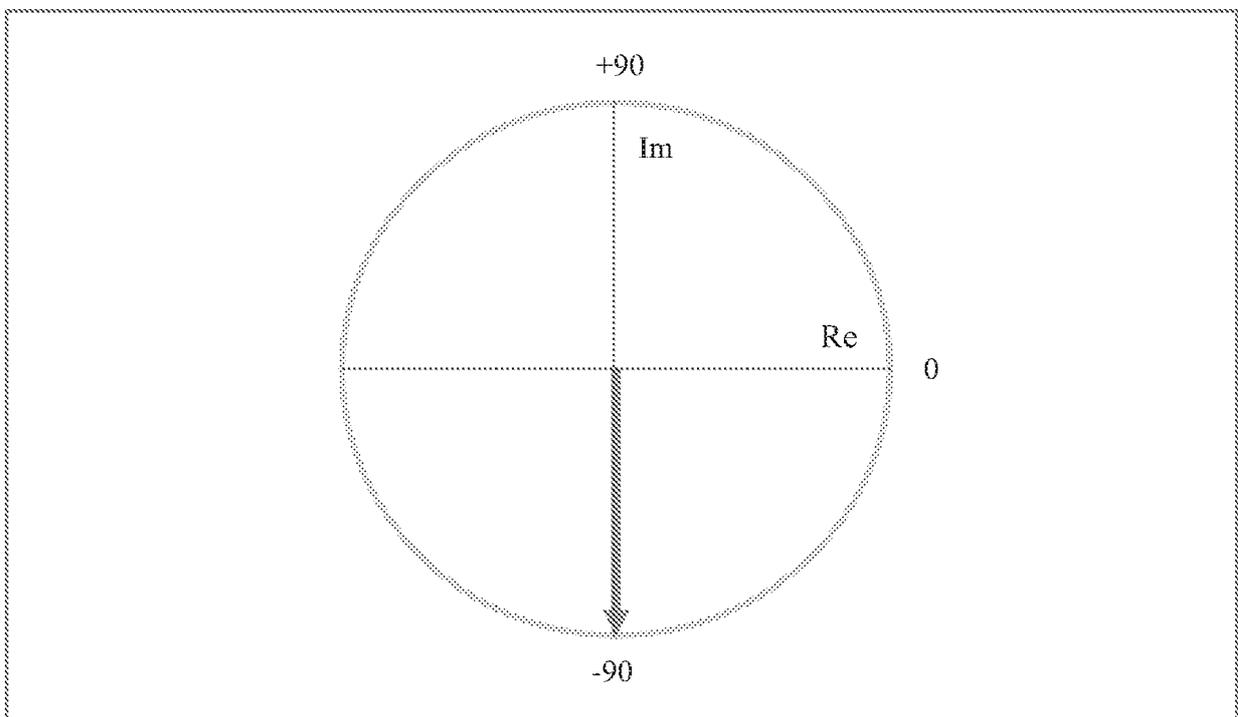


Figura 16 Valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto: imaginario puro y negativo para SP-

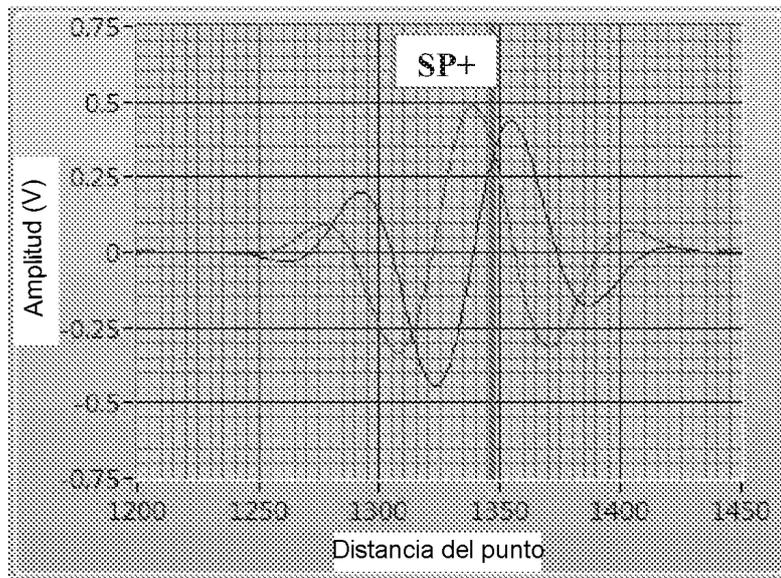


Figura 17 Un solo salto de impedancia, positivo (SP+). El espectro en la posición del salto es imaginario puro y positivo.

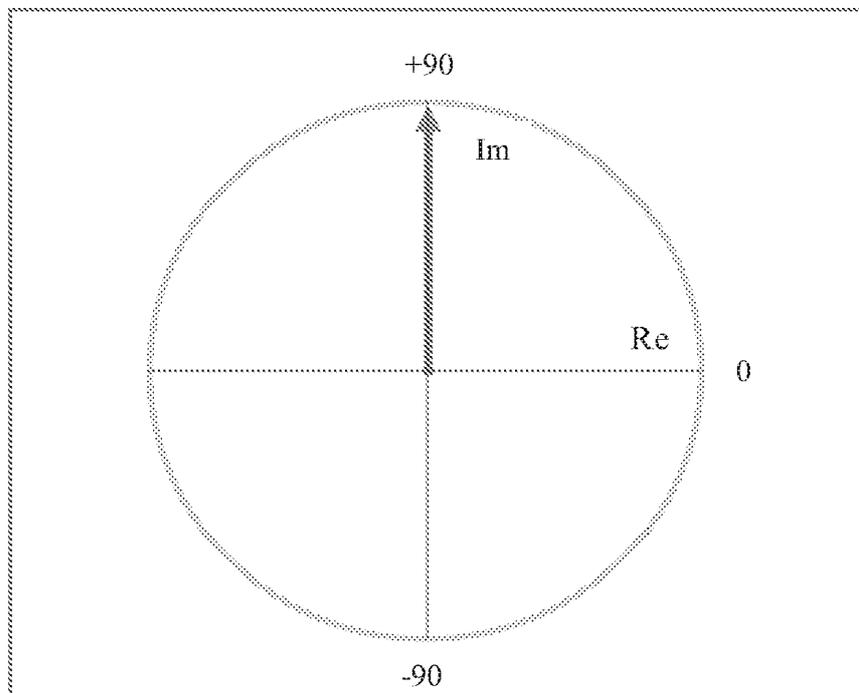


Figura 18 Valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto: imaginario puro y positivo para SP+

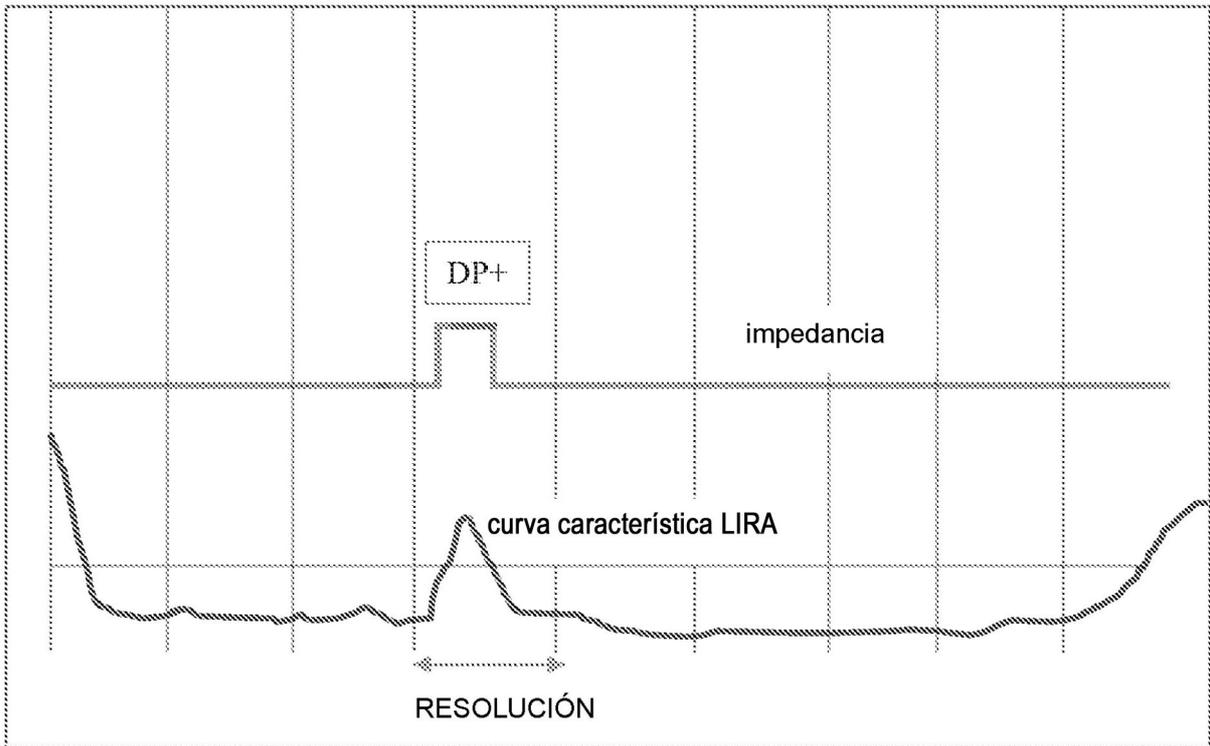


Figura 19 Segmento con mayor impedancia, segmento más corto que la resolución LIRA

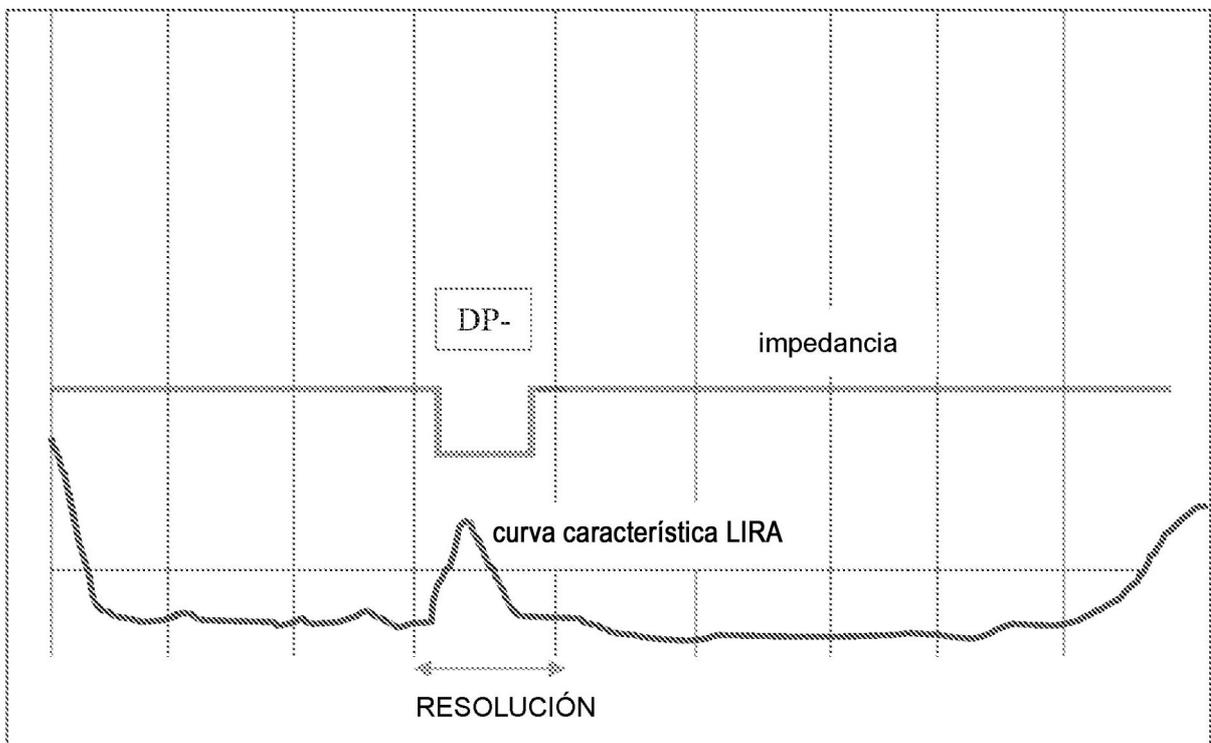


Figura 20 Segmento con menor impedancia, segmento más corto que la resolución LIRA

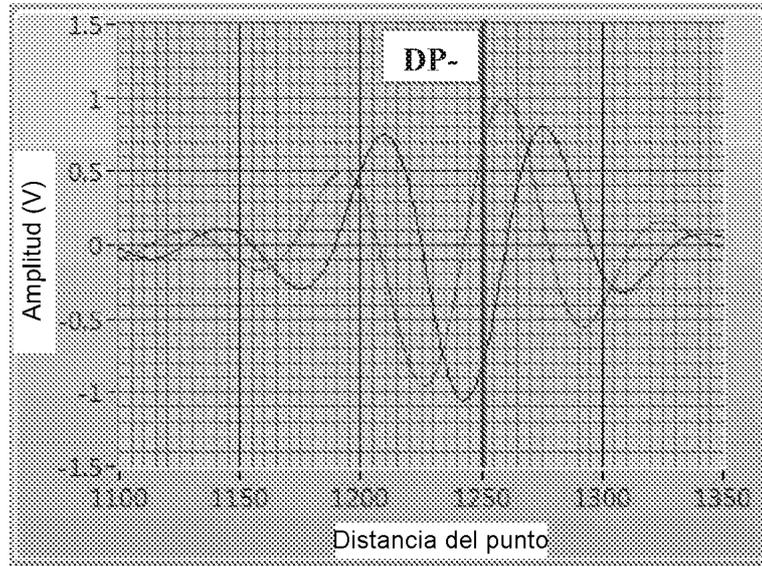


Figura 21 Punto de baja impedancia, más corto que la resolución (DP-). El espectro en el punto es real puro y negativo

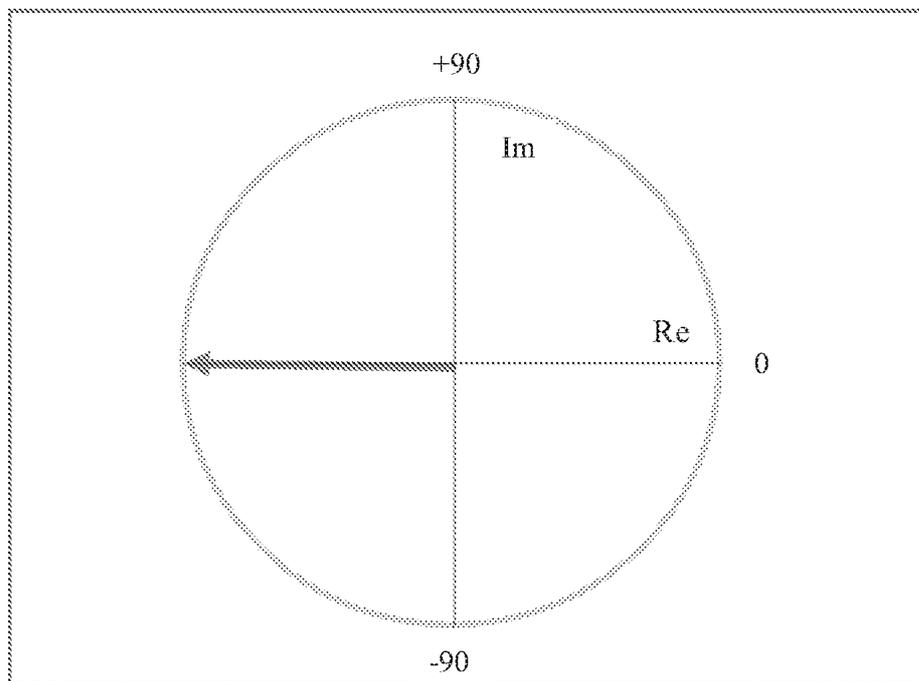


Figura 22 Valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto: real puro y negativo para DP-

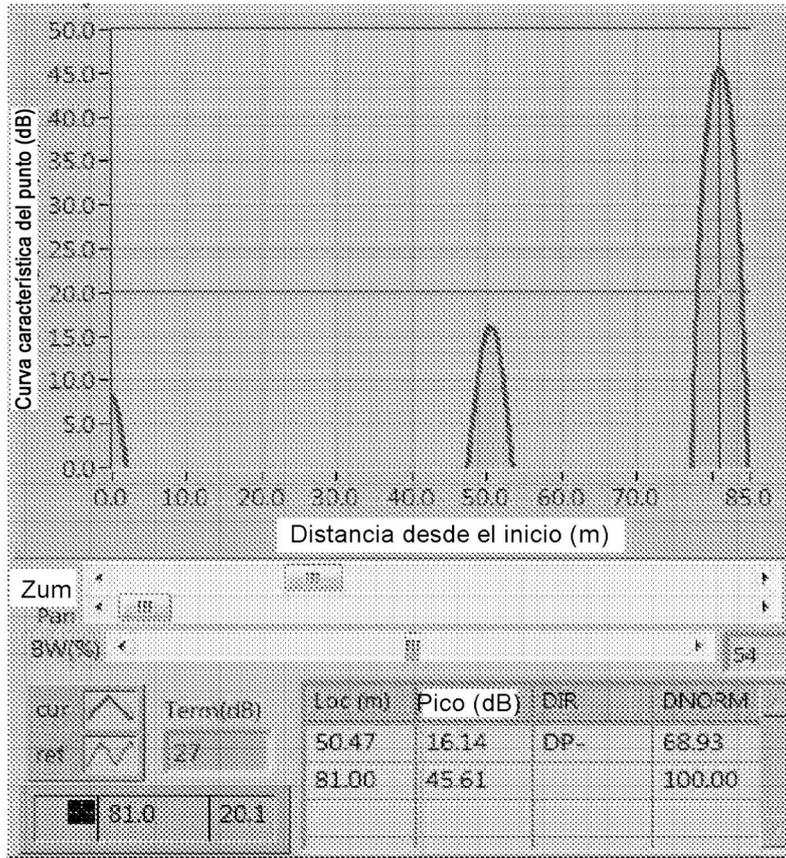


Figura 23 Curva característica LIRA para un punto DP- (+5 pF/m para 1 m, resolución = 1,5 m)

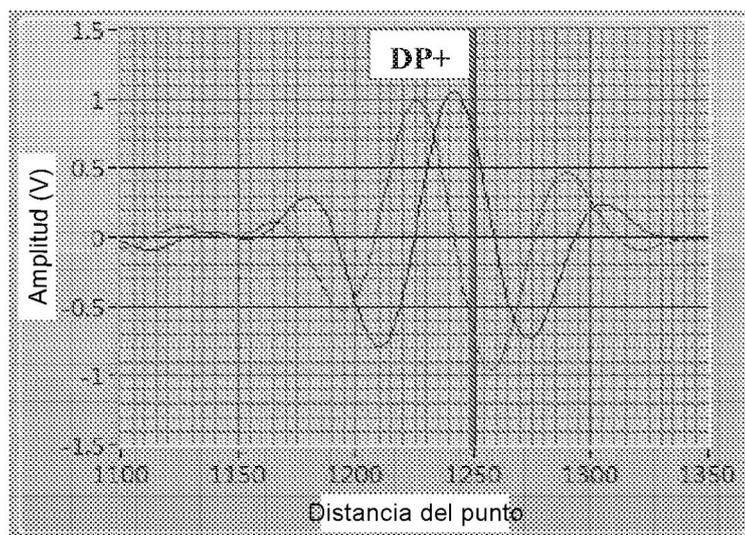


Figura 24 Punto de alta impedancia, más corto que la resolución (DP+). El espectro en el punto es real puro y positivo

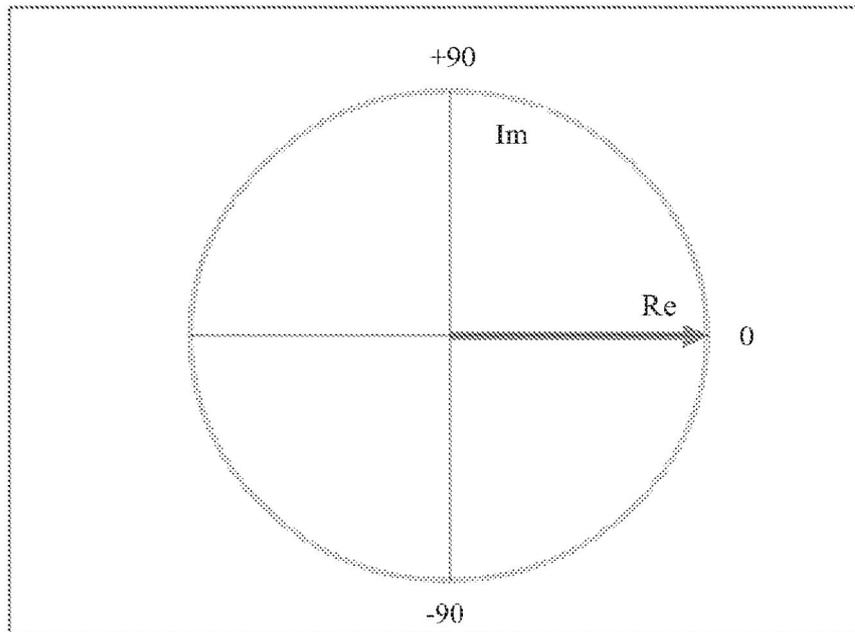


Figura 25 Valor complejo del espectro de impedancia de fase en la posición del salto: real puro y positivo para DP+

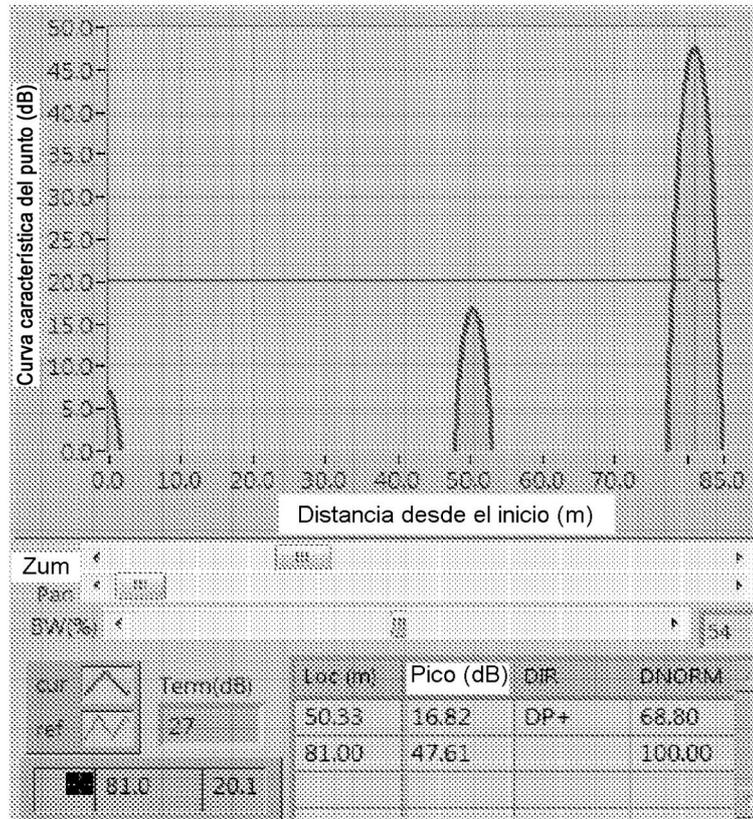


Figura 26 Curva característica LIRA para un punto DP+ (-5 pF/m para 1 m, resolución = 1,5 m)

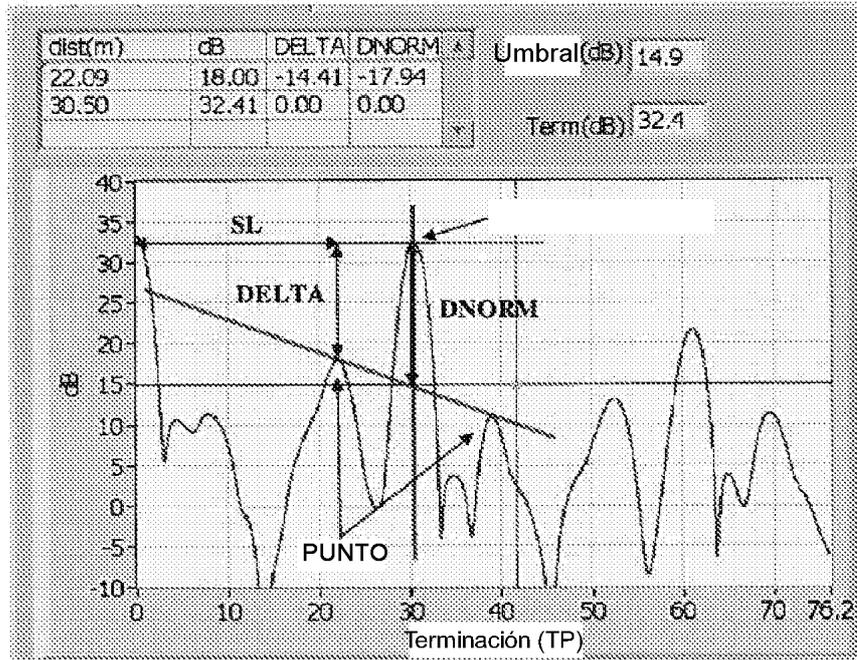


Figura 27

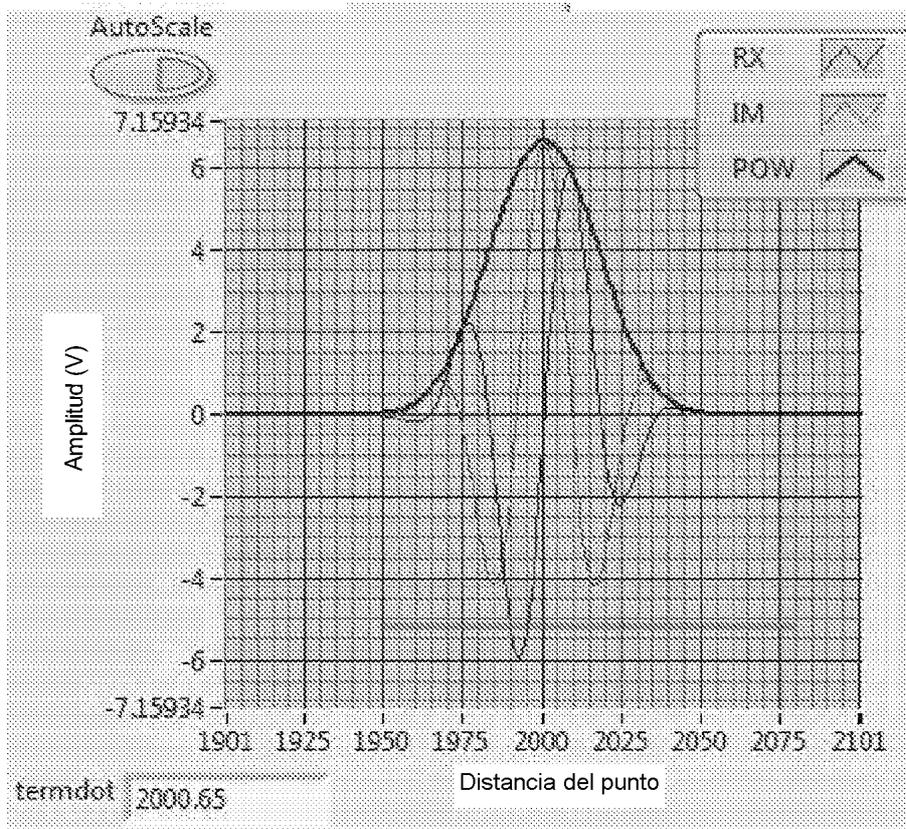


Figura 28 BTS en condiciones de equilibrio (cable correcto). BTS = 0

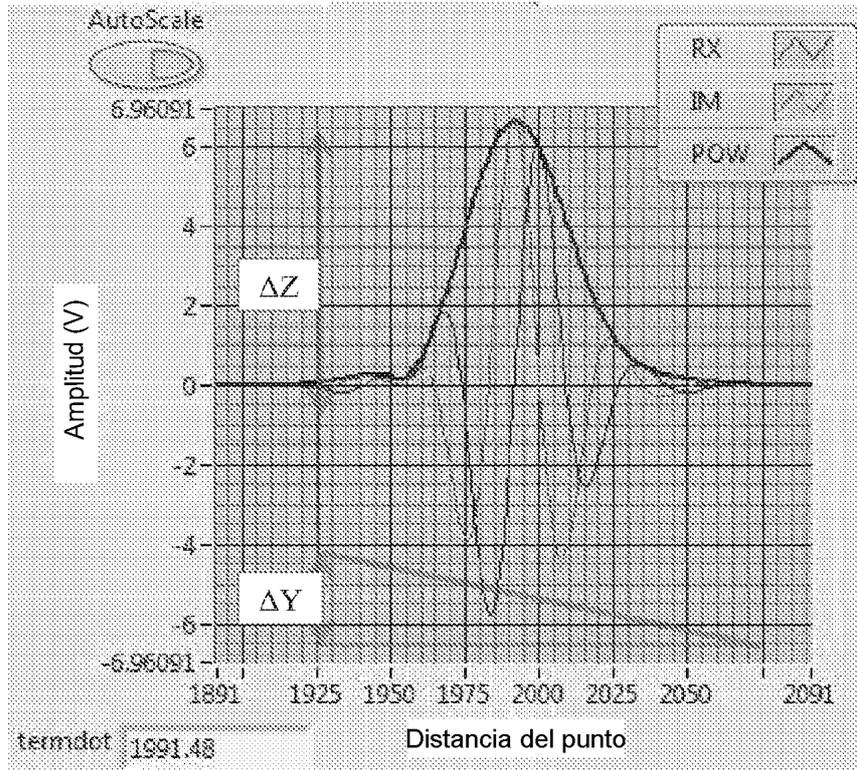


Figura 29 BTS con terminación de alta capacidad (baja impedancia). (BTS > 0)  
 $BTS = \Delta Y / \Delta Z * 100$

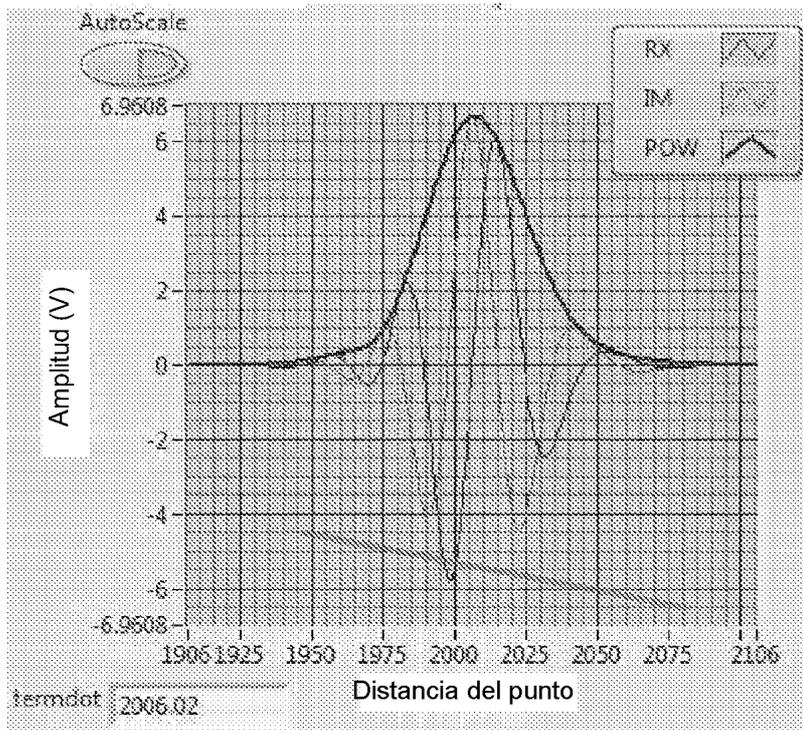


Figura 30 BTS con terminación de baja capacidad (alta impedancia). (BTS < 0)