

**INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO Y RESISTENCIA DE SISTEMAS
DE PUESTA A TIERRA DE FRECUENCIA VARIABLE CON COMPENSACIÓN CAPACITIVA
AUTOMÁTICA**

RESUMEN

La presente invención se relaciona con un instrumento de medición de resistividad del suelo y resistencia de sistemas de puesta a tierra (100) en instalaciones eléctricas el cual puede operar con altas y bajas frecuencias e incorpora un dispositivo eléctrico de compensación capacitiva (200) el cual permite anular de manera automática la reactancia inductiva de un sistema de inductancia variable. El dispositivo comprende un inductómetro (210) y un banco de condensadores (220), así como un controlador (110) encargado de determinar y seleccionar el valor de capacitancia adecuado para hacer la compensación, además de seleccionar entre el inductómetro (210) y el banco de condensadores (220), habilitando la operación del uno o el otro.

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO Y RESISTENCIA DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE FRECUENCIA VARIABLE CON COMPENSACIÓN CAPACITIVA AUTOMÁTICA

CAMPO DE LA INVENCION

[0001] La presente invención se relaciona con instrumentos de medición de resistividad del suelo y resistencia de sistemas de puesta a tierra, comúnmente conocidos como telurómetros. En particular se relaciona con telurómetros que pueden operar con altas y bajas frecuencias y con dispositivos eléctricos de compensación capacitiva que permiten anular de manera automática la reactancia inductiva de un sistema de inductancia variable.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

[0002] Dentro del estado de la técnica se conocen dispositivos de medición de resistividad del suelo y resistencia de puesta a tierra así como sistemas de compensación capacitiva.

[0003] Por ejemplo, la patente US 2014/0247063 divulga un método y aparato para realizar mediciones de resistividad de suelo y resistencia de puesta a tierra. El aparato comprende una unidad principal y una unidad remota las cuales se comunican a través de cables conectados a los electrodos. La unidad remota envía una señal de inducción a través de un cable que conecta la unidad principal con los electrodos. Esta señal de inducción indica que la medición debe ser iniciada. De manera similar, una señal de

inducción que indica una representación de la medida de resistencia es enviada de vuelta a la unidad principal luego de realizar la medición.

[0004] Así mismo, se conocen instrumentos comerciales como el Megabras TM-25R que incluyen un compensador automático de componente inductiva. Sin embargo, estos compensador es no incluyen un inductómetro para calcular la capacitancia adecuada, sino que ejecutan un proceso de sintonía que consiste en hacer un barrido completo de valores de capacitancia hasta obtener un valor suficientemente pequeño de la reactancia del circuito. Este proceso de sintonía es lento y costoso energéticamente, pues una corriente debe ser inyectada al circuito durante todo el proceso que puede durar hasta 40 segundos.

[0005] Por su parte, el telurómetro comercial Metrel MI 3290 permite hacer mediciones de resistencia de puesta a tierra y potencial de tierra de objetos energizados y no energizados. Las diferentes alternativas de medición incluyen seleccionar una frecuencia fija o realizar un barrido en frecuencia desde 55 Hz hasta 15 kHz, así como medidas de resistencia DC. Este telurómetro realiza mediciones de impedancia de impulso para simular el impacto de un rayo, pero no divulga un compensador o medidor de reactancia con el cual reducir el error asociado a la reactancia inductiva.

[0006] Por otro lado, es conocido en la técnica que todo circuito eléctrico que trabaja en alta frecuencia tiene asociada una reactancia inductiva que genera efectos parásitos significativos en el circuito. Estos efectos incluyen, entre otros, la disminución del factor de potencia y el aumento de la impedancia del sistema. Lo anterior ha llevado a la búsqueda de circuitos complementarios con los cuales se atenúen los efectos reactivos de las impedancias parásitas en alta frecuencia. Particularmente, los sistemas de instrumentación eléctrica se enfrentan a la inductancia parásita asociada a los cables que

conectan el instrumento con los electrodos, los cuales no tienen una geometría fija y cuya longitud es variable, factores que repercuten en una inductancia difícil de determinar analíticamente. En estos sistemas, la compensación de la componente inductiva es una etapa crucial para poder hacer mediciones en alta frecuencia con alta precisión y exactitud.

[0007] Por ejemplo, el documento de patente US 6,331,765 divulga un compensador de cantidades eléctricas tales como diferencia de potencial, corriente, fase o impedancia, el cual está diseñado para estar conectado en serie con una línea de transmisión. El compensador comprende un generador de corriente de compensación el cual alimenta un condensador en serie con la línea que desea ser compensada, de manera que la compensación se hace mediante la inyección de una corriente a la línea de transmisión.

[0008] Por su parte, el documento US 2,981,902 divulga un dispositivo de acople automático de impedancia conectado entre dos circuitos, dispositivo en el cual se mide la fase entre el voltaje y la corriente de entrada para determinar la impedancia de salida del primer circuito y, posteriormente, se cambia el valor de un juego de bobinas y condensadores conectados de tal manera que se hace un acople de impedancia para así lograr una máxima transferencia de potencia al segundo circuito.

[0009] Por lo tanto, el estado de la técnica deja insatisfecha la necesidad de un instrumento de medición de resistividad del suelo y resistencia de puesta a tierra que tenga la capacidad de operar con altas y bajas frecuencias y el cual permita hacer compensación automática de la componente inductiva de un sistema. Más aún, existe dentro del estado de la técnica la necesidad de que dicho instrumento permita hacer una compensación en tiempo real y a un bajo costo energético.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

[00010] La presente invención atiende las necesidades presentes en el estado de la técnica al proporcionar un dispositivo de compensación capacitiva (200) que comprende un inductómetro (210) y un banco variable de condensadores (220) cuyo valor se selecciona en función del valor medido por dicho inductómetro (210). El dispositivo comprende además un controlador (110) para calcular y fijar la capacitancia adecuada y un relé (230) que selecciona entre el inductómetro (210) y el banco de condensadores (220), habilitando la operación del uno o el otro. El compensador (200) puede además incluir una serie de interruptores (231) con los que se fija el valor adecuado de capacitancia para hacer la compensación.

[00011] El cálculo de la capacitancia usada para la compensación se hace con base en la ecuación de resonancia para un circuito LC, $C=1/(\omega^2L)$. Dado que la capacitancia del banco de condensadores (220) que selecciona el controlador (110) es tal que se logra la resonancia con el sistema a medir, la reactancia del conjunto (compensador (200) y sistema) es muy cercana a cero.

[00012] La presente invención se relaciona además con instrumentos para la medición de resistividad del suelo y resistencia de sistemas de puesta a tierra (100) conocidos como telurómetros. El telurómetro (100) según la presente invención incluye el dispositivo de compensación capacitivo (200) aquí divulgado, lo que le permite realizar un diagnóstico de la resistividad del suelo y calidad de puesta a tierra de un sistema eléctrico de manera rápida, exacta, precisa, confiable y con un bajo consumo energético. Además, la presente invención permite la variabilidad en la longitud de los cables (511, 512) que se utilizan para conectar el telurómetro (100) con los electrodos de medición (521, 522) sin que esto tenga una consecuencia negativa sobre la medición.

[00013] El telurómetro (100) de la presente invención se caracteriza además porque tiene la capacidad trabajar con bajas y altas frecuencias. El trabajar con altas frecuencias permite aislar la estructura de interés del resto de la red eléctrica, de manera que las mediciones se pueden realizar sin necesidad de efectuar desconexiones ni desenergizar la estructura bajo prueba. En este caso, se habilita el compensador capacitivo (200) proporcionado por la presente invención, con el fin de anular la alta reactancia inductiva asociada a los cables (511, 512) que conectan el telurómetro (100) con los electrodos de medida (521, 522). Por otro lado, el trabajar con bajas frecuencias permite diagnosticar sistemas de gran tamaño ya que al tener una longitud de onda larga, la señal recorre mayores distancias y logra llegar a mayores profundidades. En este caso, el compensador capacitivo (200) proporcionado por la presente invención se deshabilita.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[00014] La Figura 1 muestra un diagrama de bloques de una realización preferida del telurómetro (100) de la presente invención, el cual incluye el compensador capacitivo (200) aquí desarrollado y un único microcontrolador (110) comanda tanto el telurómetro (100) como el compensador capacitivo (200).

[00015] La Figura 2 muestra cómo el telurómetro (100) de la presente invención puede ser usado para tomar medidas sobre un sistema (Sistema 2) que está interconectado como otros sistemas (Sistemas 1 y 3) en una red de distribución.

[00016] La Figura 3 muestra el circuito equivalente del sistema mostrado en la Figura 2, en donde se ven los bloques generales del compensador capacitivo (200) de acuerdo con

la presente invención para la medición de un sistema (Sistema 2) interconectado eléctricamente con otros sistemas (Sistemas 1 y 3).

[00017] La Figura 4 muestra un diagrama esquemático de una modalidad preferida del circuito de compensación capacitiva (200) según la presente invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

[00018] La presente invención se relaciona con un instrumento para realizar mediciones de resistividad del suelo y resistencia de puesta a tierra en instalaciones eléctricas (100), comúnmente conocido como telurómetro. El telurómetro (100) de acuerdo con la presente invención incluye un compensador capacitivo (200) que aumenta la exactitud y precisión de la medida pues se atenúa de manera activa la impedancia asociada a los cables (511, 512) entre el instrumento y los electrodos (521, 522). La Figura 1 muestra un diagrama de bloques de una realización preferida de la presente invención.

[00019] Como se aprecia en la Figura 1, además del compensador capacitivo (200) el telurómetro (100) de la presente invención comprende una etapa de potencia (120), un voltímetro (310) y un amperímetro (320), una interfaz de ingreso de parámetros de operación (410), un dispositivo de visualización (420) y un dispositivo de almacenamiento de datos (430). El control y procesamiento de datos del telurómetro (100) puede o no ser ejecutado por el mismo controlador (110) que hace parte del compensador capacitivo (200). En una realización preferida, el controlador (110) del telurómetro (100) es un microcontrolador de 32 bits.

[00020] De otro lado, la etapa de potencia (120) del telurómetro (100) es la encargada de entregar la energía eléctrica con las características de tensión, corriente, frecuencia y

forma de onda que se requieren para la correcta operación del dispositivo. Esta etapa de potencia (120) comprende una fuente de alimentación (121), un elevador de voltaje (122), un inversor de frecuencia variable (123) y un convertidor DC/DC (124).

[00021] En una modalidad preferida de la presente invención, la fuente de alimentación (121) es una batería recargable. Esto brinda la ventaja adicional de hacer que el telurómetro (100) de la invención sea portable. La batería recargable incluida en el telurómetro (100) de la invención puede tener distintos valores nominales. En una realización preferida la batería recargable es una batería de iones de litio de 14,8 V_{DC} y 10 Ah.

[00022] Por su parte, el elevador de voltaje (122) incluido en el telurómetro (100) de la presente invención está conectado a la fuente de alimentación (121) y permite aumentar el voltaje de salida del instrumento aumentando así la corriente de prueba. Dicha corriente de prueba elevada mejora la relación señal a ruido tanto en el amperímetro (320) como en el voltímetro (310), aumentando así la inmunidad de la medición ante perturbaciones externas.

[00023] El elevador (122) permite obtener tensiones de hasta 1200 V_{DC}. En modalidades preferidas, el elevador de tensión (122) es un convertidor electrónico tipo Push-Pull, el cual entrega un nivel de tensión entre 600 V_{DC} y 1000 V_{DC}, de forma preferida 800 V_{DC}. Este posee un control PWM local y un control remoto ON/OFF que permite activar o desactivar el convertidor desde la unidad de control. En una modalidad preferida de la invención, el control del convertidor Push-Pull es comandado desde la unidad de control del telurómetro (100) la cual coincide con el controlador del compensador capacitivo (200).

[00024] De otro lado, el inversor (123) permite convertir la señal DC de alto voltaje que sale del elevador (122), en una señal AC de alto voltaje. En modalidades preferidas el inversor (123) es un convertidor electrónico tipo Full-Bridge y genera una señal de entre $600 V_{AC}$ y $1000 V_{AC}$, de forma preferida $800 V_{AC}$ con frecuencias menores a 10 kHz o mayores a 20 kHz, de manera preferida 2 kHz y 29.4 kHz. Las frecuencias a las que opera el inversor (123) son las frecuencias usadas para calcular la capacitancia del banco de condensadores (220) al momento de hacer la compensación capacitiva. Adicionalmente, el inversor (123) puede incluir una resistencia en serie con la salida para limitar la corriente en caso de corto circuito. Esta resistencia en serie también permite regular la corriente de salida del instrumento cuando las resistencias bajo prueba son menores a 100Ω . En una modalidad preferida, esta resistencia en serie es de $1 k\Omega$.

[00025] Así mismo, el convertidor DC/DC (124) recibe energía de la fuente de alimentación (121) y la entrega en niveles de tensión apropiados a cada componente eléctrico. En una modalidad preferida, el convertidor DC/DC (124) tiene varias salidas de $\pm 3.3 V_{DC}$, $\pm 5.0 V_{DC}$ y $\pm 12 V_{DC}$.

[00026] Adicionalmente, una realización del telurómetro (100) de acuerdo con la presente invención incluye una interfaz (410) que permite el ingreso de parámetros de operación por parte del operador así como la visualización de datos medidos y demás información relevante para el usuario. En una realización particular de la presente invención, el ingreso de los comandos se hace mediante un teclado que puede ser un teclado matricial, un teclado QWERTY, una pantalla táctil, pulsadores o perillas.

[00027] Por su parte, la visualización de datos e información medida por el telurómetro de la invención puede llevarse a cabo mediante medios de visualización (420). En particular, de forma preferida los medios de visualización (420) se seleccionan del grupo

que comprende: pantallas LCD de caracteres, pantallas LCD gráficas, pantallas LED, pantallas táctiles o dispositivos de 7, 8, 11 o 16 segmentos.

[00028] Una realización preferida de la presente invención el ingreso parámetros de operación y la visualización de datos se realizan en uno o más dispositivos externos los cuales se comunican con el telurómetro mediante un módulo de comunicaciones inalámbricas (440) incorporado en el mismo. De forma preferida el módulo de comunicaciones inalámbricas (440) se selecciona del grupo que comprende: módulos de Bluetooth, módulos WiFi y módulos Zigbee.

[00029] Otras modalidades preferidas de la presente invención consideran que el ingreso de parámetros de operación y/o la visualización de los datos se realizan a través de dispositivos tipo Tablet y Smartphones que se conectan al instrumento de la invención mediante el módulo de comunicaciones inalámbricas (440).

[00030] De otro lado, los datos registrados por el telurómetro son almacenados en un dispositivo de almacenamiento (430) interno o externo. Según realizaciones de la presente invención, el dispositivo de almacenamiento (430) puede ser una memoria extraíble, memoria flash, memoria SD, memoria EPROM, memoria EEPROM. Otras modalidades preferidas consideran que la capacidad de almacenamiento puede ser desde 16 MB hasta 512 GB.

[00031] La presente invención también considera que el almacenamiento de los datos en el dispositivo de almacenamiento (430) interno o externo es controlado por un software el cual codifica los datos en un formato que no es fácilmente editable. Este software puede o no estar incorporado en el microcontrolador (110) que hace parte del telurómetro.

[00032] Adicionalmente, de acuerdo con una realización preferida, los datos almacenados en el dispositivo de almacenamiento (430) son leídos por un software el cual presenta los datos en una tabla y/o en forma gráfica.

[00033] De acuerdo con la invención, el telurómetro (100) aquí revelado incorpora el circuito de compensación capacitiva (200) aquí desarrollado lo que le permite trabajar con una frecuencia de operación tanto baja como alta. A lo largo de la presente memoria descriptiva se usarán los términos frecuencias altas y bajas de acuerdo con el estándar IEEE Std 81-2012, según el cual algunas decenas de kilo Hertz se consideran alta frecuencia (IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) - IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System).

[00034] En una modalidad preferida, la frecuencia de operación del telurómetro (100) de la invención es 29.4 kHz. De manera ventajosa, el telurómetro (100) de la invención permite diagnosticar un sistema de manera individual sin necesidad de desconectar o desenergizar los circuitos y minimizando el efecto de las reactancias parásitas. Al usar frecuencias altas, las reactancias inductivas asociadas a los cables que conectan distintas estructuras tienden a aumentar, favoreciendo así el desacople entre la estructura bajo prueba y las demás estructuras interconectadas eléctricamente a ésta. El compensador capacitivo (200) de la presente invención se utiliza para atenuar el efecto de la alta frecuencia en los cables (511, 512) que conectan el telurómetro (100) con los electrodos (521, 522), pues éstos están en serie con el compensador (200), de manera que se compensa únicamente la inductancia asociada a este lazo.

[00035] Las Figuras 2 y 3 ilustran cómo al operar en alta frecuencia, las reactancias XL_1 – XL_4 son muy altas de manera que el sistema que desea evaluarse (identificado como Sistema 2 en las Figuras 2 y 3) se encuentra desacoplado del resto de las estructuras

interconectadas eléctricamente. El compensador (200) busca anular la reactancia XL_5 asociada al cable (511) del electrodo (521). La reactancia XL_6 no requiere compensación debido a que se encuentra en serie con un voltímetro (310) (ver Figura 3) el cual tiene una impedancia de entrada muy superior a la magnitud de XL_6 , por lo que su efecto es imperceptible.

[00036] En otra modalidad preferida, la frecuencia de operación del telurómetro (100) es 2 kHz. La medición con baja frecuencia permite diagnosticar sistemas de gran tamaño ya que al tener una longitud de onda larga, recorre mayores distancias y logra llegar a mayores profundidades. En realizaciones de la presente invención el telurómetro (100) trabaja en baja frecuencia, y el compensador capacitivo (200) se deshabilita mediante la activación de un interruptor (232) que se encuentra en paralelo con el banco de condensadores (220) (ver Figura 4).

[00037] En una modalidad preferida de la presente invención, el telurómetro (100) aquí revelado permite mediciones con alta y baja frecuencia sin requerir ningún instrumento adicional. De esta forma, el controlador (110) del compensador capacitivo (200) incluido en el telurómetro (100) de la invención está configurado para ajustar la frecuencia de operación del telurómetro (100). Particularmente, el controlador (110) puede cambiar la frecuencia de operación del inversor (123), así como la frecuencia de las señales involucradas en la elevación de voltaje.

[00038] La presente invención se relaciona además con el dispositivo eléctrico de compensación capacitiva (200) el cual anula de manera automática la reactancia inductiva de un sistema de inductancia variable. Como se muestra en la Figura 4, El compensador capacitivo (200) proporcionado por la invención comprende un inductómetro (210) y un

banco de condensadores (220) cuyo valor se selecciona en función del valor medido por dicho inductómetro (210).

[00039] El dispositivo comprende además un controlador (110) que, con base en la medida del inductómetro (210), calcula y fija la capacitancia apropiada para hacer la compensación. El controlador (110) también se encarga de cambiar el estado de un relé (230) que conmuta entre el banco de condensadores (220) y el inductómetro (210). En una modalidad preferida de la presente invención, el controlador (110) del compensador capacitivo (200) es el mismo controlador (110) del telurómetro (100).

[00040] De esta forma, el inductómetro (210) se conecta en serie con el lazo sobre el que se realiza la medida de resistencia o resistividad, mide la inductancia asociada a dicho lazo y posteriormente el controlador (110) procede a determinar la capacitancia requerida para hacer la compensación a la frecuencia de operación.

[00041] Cuando hace parte de un telurómetro (100), el compensador capacitivo (200) se conecta a la salida del inversor (123), de manera que la corriente de salida del inversor (123) es la misma corriente de entrada del banco de condensadores (220).

[00042] El dispositivo que es objeto de la invención tiene dos modos de operación: inductómetro y compensador. El primer modo se habilita al inicio de la operación cuando la posición del relé (230) es tal que el inductómetro (210) está en serie con el sistema que se desea compensar. En este punto se realiza la medida de inductancia de dicho sistema. Con base en la medida realizada, el controlador (110) calcula el valor de capacitancia necesario para hacer la compensación y fija el valor correspondiente de capacitancia. El segundo modo de operación se habilita una vez la capacitancia del banco de condensadores (220) es la deseada. En este punto, el relé (230) cambia su posición,

deshabilitando el inductómetro (210) y conectado el banco de condensadores (220) en serie con el sistema.

[00043] De acuerdo con una modalidad preferida de la presente invención, y como se muestra en la Figura 4, el banco de condensadores (220) consiste de un conjunto de condensadores dispuestos en paralelo, cada uno de los cuales tiene un interruptor (231) en serie para habilitar o deshabilitar el condensador correspondiente. El controlador (110) abre o cierra dichos interruptores (231) para así ajustar el valor de capacitancia del banco de condensadores (220). El banco de condensadores (220) también puede incluir un último interruptor (232) conectado en paralelo el cual actúa como baipás en caso de que se desee deshabilitar el banco de condensadores (220). En una realización, el banco de capacitores (220) permite 512 combinaciones de capacitancia desde 1 nF hasta 512 nF.

[00044] Como se indicó anteriormente, la Figura 4 muestra un esquemático de una modalidad preferida del circuito de compensación capacitiva (200) de la presente invención. Tal como se evidencia de dicha figura, los interruptores (231) se cierran para habilitar los respectivos condensadores. El relé (230) permite conmutar entre el banco de condensadores (220) y el inductómetro (210). El interruptor (232) se cierra cuando no se desea realizar una compensación capacitiva.

[00045] En una realización particular, el interruptor que se encuentra en paralelo con el banco de condensadores (220) (232) se cierra anulando el efecto del banco de condensadores (220) cuando la frecuencia de operación es menor a 9 kHz.

[00046] El inductómetro (210) está dispuesto de tal manera que, una vez habilitado por el relé (230), quede conectado en serie con el lazo cuya inductancia se desea determinar, como se indica en la Figura 3. En una modalidad preferida de la presente invención, el

inductómetro (210) está conformado por un oscilador LC en donde C' es un valor fijo y L es la variable a medir. La salida del oscilador se aplica a un amplificador de alta ganancia con el propósito de obtener una señal cuadrada de frecuencia $\omega = (LC')^{-1/2}$. La onda cuadrada se inyecta a un contador digital de pulsos que determina la frecuencia de la señal para así calcular el valor de L .

[00047] Con este valor medido de L se calcula la capacitancia necesaria para la compensación empleando la ecuación de resonancia para un circuito LC, $C = 1/(\omega^2 L)$.

[00048] Modalidades preferidas de la invención incluyen un inductómetro (210) capaz de medir inductancias entre 0.1 μH y 10 mH. Este rango es típico para cables (511, 512) de entre 1 y 100 metros de longitud, los cuales son comúnmente usados para conectar un instrumento a los electrodos (521, 522) cuando se realizan mediciones en instalaciones eléctricas. Sin embargo, aplicaciones particulares pueden usar cables (511, 512) de mayor longitud. Otras modalidades preferidas incluyen inductómetros (210) capaces de medir inductancias de hasta 100 mH.

EJEMPLOS

[00049] Se realizaron medidas experimentales que permiten comparar el desempeño del telurómetro según la presente invención con un telurómetro comercial. Las Tablas 1 a 3 muestran los datos experimentales de resistencia medida por distintos telurómetros y su comparación con el valor nominal del resistor medido, así como el tiempo que toma realizar la medida y el consumo de energía asociada a la misma.

[00050] En las Tablas 1 a 3 se utiliza la siguiente convención:

R 1% [Ω]: Valor nominal del resistor medido. Tolerancia del 1%.

R Medida [Ω]: Valor promedio de 5 mediciones consecutivas.

Error absoluto [Ω]: Diferencia entre el valor medido y el valor real.

%Error: Porcentaje de error del valor medido respecto del valor real. Se calcula de acuerdo con:

$$\%E = 100 * |V_m - V_r| / V_r$$

donde V_m es el valor medido y V_r es el valor nominal (real).

Tiempo [s]: Tiempo que transcurre desde que el instrumento recibe la instrucción de medir hasta que el resultado aparece en pantalla.

Energía [J]: Energía utilizada para realizar una medición.

Tabla 1. Telurómetro de acuerdo con la presente invención operando con frecuencia de 29,4 kHz.

R 1% [Ω]	R Medida [Ω]	Error [Ω]	%Error	Tiempo [s]	Energía [J]
0,1	0,1	0	0%	5,04	80,2
1	1,0	0	0%	4,93	81,1
6,8	6,7	0,1	1%	4,90	79,7
11	10,8	0,2	2%	4,97	80,1
19,1	18,8	0,3	2%	5,04	79,6
33	32,2	0,8	2%	5,04	80,1
65	62,9	2,1	3%	4,99	79,7
123	121	2	2%	5,03	80,7
330	333	3	1%	4,93	79,1
1130	1138	8	1%	4,95	79,5
4990	5061	71	1%	5,03	81,4
10000	10102	102	1%	4,99	79,9

Tabla 2. Telurómetro comercial operando en su única frecuencia de trabajo 25 kHz y con compensación reactiva.

R 1% [Ω]	R Medida [Ω]	Error [Ω]	%Error	Tiempo [s]	Energía [J]
0,1	0,1	0	0%	29,61	313
1	1,0	0	0%	29,46	312
6,8	6,8	0	0%	29,66	308
11	11,0	0	0%	30,08	306
19,1	19,0	0,1	1%	29,99	301
33	33,5	0,5	2%	30,25	292
65	67	2	3%	30,08	275
123	124	1	1%	30,25	248
300	299	1	0%	29,58	191
330	Fuera de Rango	-	-	29,99	184

Tabla 3. Telurómetro de acuerdo con la presente invención operando con frecuencia de 2 kHz.

R 1% [Ω]	R Medida [Ω]	Error [Ω]	%Error	Tiempo [s]	Energía [J]
0,1	0,1	0	0%	5,04	79,2
1	1,0	0	0%	5,00	79,4
6,8	6,8	0	0%	4,94	80,2
11	10,8	0,2	2%	4,92	81,1
19,1	19,1	0	0%	5,00	80,9
33	32,8	0,2	1%	4,99	80,6
65	63,3	1,7	3%	4,99	79,8
123	124	1	1%	5,02	79,3
330	332	2	1%	4,97	79,4
1130	1137	7	1%	5,04	80,5
4990	5051	61	1%	4,92	81,1
10000	10284	284	3%	4,96	79,8

[00051] Los valores de energía de las Tablas 1 a 3 fueron determinados empleando métodos de medición indirecta. Para determinar la energía del telurómetro (100) de la presente invención, se midió la diferencia de potencial a través del condensador de carga del convertidor elevador (122) Push-Pull y se calculó la energía almacenada allí usando la ecuación:

$$E = C \cdot V^2 / 2$$

donde E es la energía almacenada en el condensador, C es su capacitancia y V es la tensión entre los terminales del mismo.

[00052] Para determinar la energía del telurómetro comercial, se calculó la resistencia de salida de la fuente aplicando la Ley de Ohm luego de medir la tensión de salida en circuito abierto y la corriente a plena carga. Una vez se obtuvo el valor de la resistencia de salida, la potencia consumida durante la medición se calcula a partir de:

$$P = I^2 \cdot (R_s + R_p)$$

donde P es la potencia consumida, I es la corriente medida, R_s es la resistencia de salida medida y R_p es la resistencia de prueba cuyo valor se midió. Finalmente, la energía consumida (E) se obtiene multiplicando la potencia (P) calculada por el tiempo (t) que tomó la medición:

$$E = P \cdot t$$

[00053] La comparación de los valores consignados en las Tablas 1 y 2 muestra cómo el telurómetro (100) de acuerdo con la presente invención tiene una exactitud similar al del telurómetro comercial, requiriendo un consumo energético aproximadamente 4 veces menor. De igual manera, el telurómetro (100) de la presente invención realiza la medida casi 6 veces más rápido que el telurómetro comercial. Esto se debe principalmente al hecho de que el telurómetro (100) de acuerdo con la presente invención comprende el compensador capacitivo (200) automático, el cual, debido a que mide directamente la inductancia del sistema, no requiere hacer un barrido a través del banco de condensadores (220), lo cual tiene un alto costo energético y de tiempo.

[00054] Por otro lado, el telurómetro (100) de la presente invención tiene la ventaja de que puede también operar en bajas frecuencias, como se evidencia en la Tabla 3. En este modo de operación, los tiempos, energías y errores asociados a la medición son similares a los que se observan en alta frecuencia. Es evidente la ventaja operativa que la presente invención tiene con respecto a instrumentos similares.

SSR\SSR\ID-537907\WPC23548