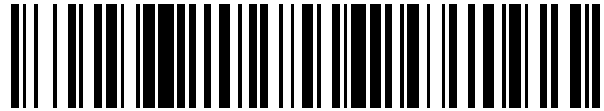


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 611 553**

21 Número de solicitud: 201630964

51 Int. Cl.:

G01R 27/06 (2006.01)

G01N 27/02 (2006.01)

G01N 22/00 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

14.07.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

09.05.2017

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

20.07.2017

Fecha de concesión:

02.01.2018

45 Fecha de publicación de la concesión:

09.01.2018

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
(100.0%)**

**Plaza Cronista Isidoro Valverde, s/n. Ed. "La
Milagrosa"**

30202 Cartagena (Murcia) ES

72 Inventor/es:

**HINOJOSA JIMENEZ, Juan;
MARTINEZ VIVIENTE, Félix Lorenzo y
MELCON ALVAREZ, Alejandro**

74 Agente/Representante:

TEMIÑO CENICEROS, Ignacio

54 Título: **SISTEMA PARA CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE MATERIALES**

ES 2 611 553 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 40.2.8 LP 11/1986.

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 611 553**

21 Número de solicitud: 201630964

57 Resúmen:

Sistema y método para caracterización electromagnética de materiales.

El sistema tiene: un primer sensor (S1) aplicado a un material desconocido (M); un equipo de medidas (EM); una primera guía de transmisión (G1) conectando el primer sensor (S1) con el equipo de medidas (EM); una primera transición (T1) para realizar una conexión entre el primer sensor (S1) y la primera guía de transmisión (G1); una segunda transición (T2) para realizar una conexión entre la primera guía de transmisión (G1) y el equipo de medidas (EM). El método incluye acondicionar el material desconocido (M). El acondicionamiento puede incluir: el material desconocido (M); el material desconocido (M) depositado sobre un material conocido (M_c); el material desconocido (M) depositado sobre un material conductor (M_{cond}); el material desconocido (M) depositado sobre dos capas que tienen un material conocido (M_c) y un material conductor (M_{cond}); un material conocido (M_c) depositado sobre dos capas que tienen el material desconocido (M) y un material conductor (M_{cond}).

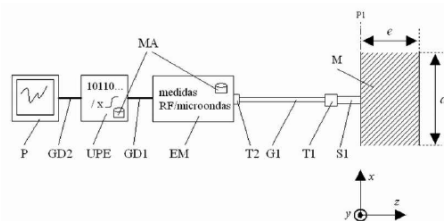


FIG. 1

ES 2 611 553 B2

DESCRIPCIÓN**SISTEMA Y MÉTODO PARA CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE MATERIALES****Campo de la invención**

5

La necesidad de elaborar materiales con características específicas para distintas aplicaciones en sectores de actividad tan diversos como la electrónica, las tecnologías de la información y las comunicaciones, la salud o la agroalimentación, ha permitido la creación de un importante campo dentro de la electrónica de altas frecuencias. La invención utiliza la interacción de ondas electromagnéticas con un material para medir los parámetros intrínsecos de éste en el rango de las radiofrecuencias (RF)/microondas, dado que las características de propagación de las ondas electromagnéticas en un material dependen de sus parámetros físico-químicos. Estas características de propagación se pueden relacionar con dos parámetros complejos intrínsecos del material sometido en la prueba de interacción: la permitividad ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) y la permeabilidad ($\mu = \mu' - j\mu''$). La medida de estos dos parámetros permite contribuir al conocimiento interno del material bajo prueba.

10

15

Estado de la técnica

20

25

30

35

suelen tener confinada una muestra del material a medir dentro del sensor y, por consiguiente, las medidas se caracterizan por ser destructivas. En la actualidad, los métodos de caracterización que realizan medidas no destructivas de materiales utilizan usualmente dos tipos de sensores en circuito abierto: coaxial o guía rectangular [M. A. Stuckly, and S. Stuchly, "Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-A review", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 29, pp. 176-183, September 1980 (Stuchly1980)], [V. Teodoridis, T. Sphicopoulos, and F. E. Gardiol, "The reflection from an open-ended rectangular waveguide terminated by a layered dielectric medium", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 33, pp. 359-366, May 1985 (Teodoridis1985)]. El principio de las medidas para ambos sensores consiste en aplicar el extremo en circuito abierto sobre el material a caracterizar. El sensor coaxial en circuito abierto, que está limitado a medidas de parámetros de materiales isotropos, mientras que el sensor en guía rectangular en circuito abierto permite además medidas de materiales anisotropos [C-W Chang, K-M Chen, and J. Qian, "Non-destructive measurements of complex tensor permittivity of anisotropic materials using a waveguide probe system", IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, vol. 44, pp. 1081-1090, July 1996 (Chang1996)]. Sin embargo, éste último requiere un mayor volumen de material (isótropo o anisótropo) y varios sensores de diferentes tamaños para cubrir un amplio rango de frecuencias.

Las primeras técnicas de caracterización electromagnética para extraer las propiedades intrínsecas de materiales en el rango de las radiofrecuencias (RF) y de las microondas se remontan a los años 50 [A. R. Von Hippel, Ed., "Dielectric Materials and Applications", New York (USA): Wiley, 1954. (VonHippel1954)]. Sin embargo, fue cuando los analizadores de redes, escalares en un primer tiempo y más tarde vectoriales, con mayores prestaciones y con precios asequibles, ganaron en popularidad frente a una instrumentación inadecuada, que se desarrollaron y aplicaron una gran cantidad de técnicas RF/microondas de caracterización electromagnética de materiales [Chen2004]. Estos desarrollos se realizaron debido al gran interés que suscitaron y siguen originando en distintos sectores de actividad tales como la electrónica, tecnologías de la información y las comunicaciones, la salud, la agroalimentación, etc., dado que estos métodos de caracterización en el rango de las microondas contribuyen a proporcionar información sobre las propiedades microscópicas y macroscópicas de una gran variedad de materiales sólidos, semisólidos (polvorientos, geles) y líquidos.

35

Las respuestas de un material a campos electromagnéticos externos se pueden determinar mediante dos parámetros complejos denominados permitividad ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) y permeabilidad ($\mu = \mu' - j\mu''$). La permitividad describe la interacción de un material con un campo eléctrico externo aplicado a éste, mientras que la permeabilidad describe la interacción de un material con un campo magnético externo.

Las técnicas de microondas para la caracterización electromagnética (permitividad, permeabilidad) de materiales en RF/microondas se pueden clasificar en dos categorías: métodos resonantes y métodos no resonantes [Chen2004]. De modo general, los métodos resonantes con respecto a los no resonantes tienen mayor precisión y son más adecuados para las medidas de materiales con bajas pérdidas. Los métodos no resonantes suelen utilizarse para obtener las propiedades electromagnéticas generales de un material en un amplio rango de frecuencias, mientras que los métodos resonantes solamente pueden extraer características electromagnéticas precisas de un material a una frecuencia fija o varias frecuencias discretas. Los sensores de la presente invención están basados en guías de transmisión en circuito abierto de tipo *microstrip*, *coplanar* y configuraciones alternativas, y están enmarcados en la categoría de métodos de caracterización electromagnética no resonantes. Por esta razón, se hace referencia a los antecedentes de esta categoría.

En la bibliografía, hay disponible una gran variedad de sensores utilizados en métodos de caracterización electromagnética no resonantes para cubrir un amplio rango de frecuencias. Los métodos de caracterización electromagnética no resonantes incluyen las técnicas de medidas en reflexión y en reflexión/transmisión. Con esta última técnica (reflexión/transmisión), según las propiedades del material a caracterizar y el sensor empleado, se pueden extraer de las medidas cuatro parámetros como son la permitividad compleja ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) y la permeabilidad compleja ($\mu = \mu' - j\mu''$) o dos componentes de permitividad compleja de un tensor [1], asumiendo que el material anisótropo a caracterizar no es magnético. Los principales sensores utilizados en técnicas de reflexión/transmisión están basados en medidas en espacio libre y en guía de transmisión con una configuración cuadripolo (dos puertos). Las medidas en espacio libre necesitan insertar entre dos antenas el material a caracterizar mediante un porta muestra [Ghodgaonkar1990]. Estas técnicas de caracterización son muy precisas. Sin embargo, a bajas frecuencias de microondas (<5 GHz), las técnicas de caracterización en espacio libre no suelen ser adecuadas cuando se dispone de una poca cantidad de material a caracterizar, dado que requiere un gran tamaño

del mismo. Por otro lado, los sensores en guía de transmisión necesitan una menor cantidad del material a caracterizar, dado que las dimensiones de sus estructuras son más reducidas. Los sensores en guía de transmisión se pueden clasificar en dos categorías: los que tienen una estructura cerrada y los que poseen una estructura semi-abierta. Según el sensor utilizado, el material a caracterizar (sólido, semisólido o líquido) será insertado dentro de una guía cerrada, colocado encima de una guía semi-abierta o utilizado como medio de propagación (únicamente para materiales sólidos y polvos compactados) en la fabricación de una guía semi-abierta. Los principales sensores en guía de transmisión cerrados son de tipo coaxial [A. M. Nicolson, and G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 19, pp. 377-382, November 1970 (Nicolson1970)], rectangular [W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies", Proceedings of the IEEE, vol. 62, pp. 33-66, January 1974 (Weir1974)], o *stripline* [W. Barry, "A broad-band, automated, *stripline* technique for simultaneously measurement of complex permittivity and permeability", IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, vol. 34, pp. 80-84, January 1986 (Barry1986)], mientras que las semi-abiertas son de tipo *microstrip* o *coplanar* [M.D. Janezic, and D.F. Williams, "Permittivity characterization from transmission line measurements", IEEE Microwave Symposium Digest, 8-13 June 1997, vol. 3, pp. 1343-1345, Denver (USA) (Janezic1997)], [S. S. Stuchly, and C. E. Bassey, "Microwave *coplanar* sensors for dielectric measurements", Measurement Science and Technology, vol. 9, pp. 1324-1329, August 1998 (Stuchly1998)], [J. Hinojosa, L. Faucon, P. Queffelec and F. Huret, "S-parameter broadband measurements of *microstrip* lines and extraction of the substrate intrinsic properties", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 30, pp. 65-69, July 2001 (Hinojosa2001a)], [J. Hinojosa, "S-parameter broadband measurements on-*coplanar* and fast extraction of the substrate intrinsic properties", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 11, pp. 80-82, February 2001 (Hinojosa2001b)] .

Una guía de transmisión puede soportar un número finito de modos de propagación a una frecuencia determinada. En el caso de una propagación multimodo, la energía electromagnética se reparte entre todos los modos lo que produce distorsión, dado que la constante y la velocidad de propagación de cada modo son distintas. Por ello, conviene trabajar en un intervalo de frecuencias cuya propagación sea monomodo (modo fundamental). Los diferentes modos de propagación son: transversales eléctricos (TE), transversales magnéticos (TM), transversales electromagnéticos (TEM) o híbridos. Los

modos TE y TM son muy dispersivos y suelen propagarse en guías de ondas de tipo rectangular. Para el modo TE no existe ninguna componente del campo eléctrico en la dirección de propagación, mientras que para el modo TM la componente del campo magnética es nula. El modo TEM se propaga en guías de transmisión con al menos dos conductores y rellenas uniformemente de un material dieléctrico como las guías de tipo coaxial y *stripline*. Para el modo TEM, no existe ninguna componente del campo eléctrico y magnético en la dirección de propagación y la guía permite la propagación de señales de RF/microondas sin bloquear corrientes de continua. Finalmente, el modo híbrido se propaga en guías de transmisión donde las componentes del campo eléctrico y magnético en la dirección de propagación no son nulas. Las guías de transmisión semi-abiertas como las guías de transmisión *microstrip* y *coplanar* presentan un modo de propagación híbrido, dado que tienen una transición abrupta aire-dieléctrico que impiden tener un modo de propagación TEM. Sin embargo, la distribución de sus campos eléctrico y magnético es muy similar a la del modo TEM y, por ello, el modo híbrido en estas guías se le denomina cuasi-TEM. Además, por estar construidas con dos o más conductores, las guías *microstrip* y *coplanar* permiten la propagación de señales de RF/microondas y de corrientes de continua.

Las medidas con sensores cerrados y semi-abiertos en guía de transmisión donde se inserta o se coloca un material sólido pueden ser imprecisas, debido a la presencia de algunos espacios indeseados (*gaps*) entre las paredes de los conductores de la guía de transmisión y el material insertado. Sin embargo, esto no ocurre con los sensores semi-abiertos cuyas guías de transmisión *microstrip* o *coplanar* están fabricadas en el mismo material que el material a caracterizar. Además, modificando la anchura de la guía de transmisión *microstrip* o *coplanar*, se puede ajustar su impedancia característica. De este modo, es posible optimizar su configuración con el fin de propagar el modo fundamental cuasi-TEM y realizar medidas precisas con el mismo sensor *microstrip* o *coplanar* en un amplio rango de frecuencias. El principal inconveniente de los sensores semi-abiertos *microstrip* y *coplanar* fabricados en el material a caracterizar con respecto a los demás sensores, es la dificultad de medir materiales con bajas pérdidas, debido a las pérdidas metálicas que producen estas guías de transmisión [Janezic1997]. Salvo para los materiales líquidos y semisólidos como los geles, todos estos sensores requieren un proceso de acondicionamiento del material (sólido) a caracterizar con el fin de insertarlo o colocarlo en la guía de transmisión cerrada o semi-abierta.

Los sensores en guía de transmisión cerrados o semi-abiertos utilizados en medidas de reflexión/transmisión son fáciles de adaptar para emplearlos en técnicas no resonantes basadas en medidas de reflexión [Stuchly1980], [J. Hinojosa, "Permittivity characterization from open-end *microstrip* line measurements", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 49, pp. 1371-1374, June 2007 (Hinojosa2007)]. Para ello, se necesita transformar la configuración cuadripolo (dos puertos) en una configuración dipolo (un puerto), dejando uno de los dos puertos de la guía de transmisión cerrada o semi-abierta con una de las tres terminaciones posibles: impedancia, circuito abierto o cortocircuito. Los métodos de reflexión con sensores en guía de transmisión con terminación en cortocircuito suelen tener el material a caracterizar cortocircuitado eléctricamente y se suelen utilizar para extraer la permeabilidad compleja de las medidas, dado que éstas no son sensibles a la permitividad. Por otro lado, los métodos de reflexión con sensores en guía de transmisión con terminaciones en circuito abierto o impedancia se suelen emplear para las medidas de la permitividad compleja, asumiendo que el material a caracterizar no es magnético.

Las técnicas anteriores con sensores en configuraciones dipolos y cuadripolos (coaxial, rectangular, *stripline*, *microstrip*, *coplanar*) tienen el inconveniente común de ser métodos destructivos y de no poder realizar medidas *in vivo*. Este inconveniente es debido a la necesidad de acondicionar el material a caracterizar al sensor en configuración dipolo o cuadripolo. En el caso de un material sólido se requiere procesos de mecanizado para poder insertarlo o colocarlo en el sensor, mientras que para los materiales semisólidos (polvo, gel) y líquidos se debe tomar una muestra para rellenar el sensor. Se puede paliar este inconveniente mediante métodos de reflexión no destructivos que facilitan medidas *in vivo* e *in situ* de una gran variedad de materiales sólidos, semisólidos y líquidos. De este modo, se acorta considerablemente el procedimiento para realizar las medidas, dado que se suprime el tiempo de mecanizado de los materiales sólidos y de la toma de muestras semisólidas y líquidas para introducirlas en el sensor. Estos métodos de reflexión no destructivos utilizan sensores en circuito abierto que pueden ser sumergibles en materiales semisólidos y líquidos y/o cuyo extremo en circuito abierto se puede aplicar a materiales sólidos. De esta manera, se consigue llevar a cabo procesos de medidas mucho más sencillos y rápidos. Los sensores en circuito abierto son principalmente de dos tipos: coaxial o guía rectangular [Stuchly1980], [Teodoridis1985]. El sensor coaxial en circuito abierto es el más popular. Permite realizar medidas de propiedades dieléctricas de una gran variedad de materiales sólidos, semisólidos y líquidos de manera más rápida y en un rango de frecuencias mucho más amplio que el sensor rectangular, dado que este último requiere varios tamaños de su

estructura (con los respectivos procesos de calibración del sistema de medidas) para cubrir un amplio espectro de frecuencias. Aunque el sensor coaxial en circuito abierto tiene una clara ventaja en cuanto al ancho de banda, el sensor en guía de ondas rectangular en circuito abierto permite la caracterización de materiales anisótropos [Chang1996].

5

Descripción de la invención

La presente invención, se centra en la caracterización electromagnética de materiales no magnéticos ($\mu = \mu' - j\mu'' = 1 - j0$). Además, se considera que los materiales a caracterizar son puramente dieléctricos y de dos tipos: isótropos o anisótropos. Las propiedades dieléctricas ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) de un material isótropo son idénticas en todas las direcciones de los ejes del sistema de coordenadas (x, y, z). Sin embargo, éste no es el caso para un material anisótropo. Para un material anisótropo, las propiedades dieléctricas ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) son diferentes según la orientación en el sistema de coordenadas (x, y, z) y se representan mediante un tensor o matriz. Un material dieléctrico anisótropo posee un tensor permitividad con una matriz diagonal en las coordenadas (x, y, z) de la siguiente forma:

10

15

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad [1]$$

20 donde $[D]$ y $[E]$ son, respectivamente, el tensor desplazamiento eléctrico y el tensor de campo eléctrico. ε_{xx} , ε_{yy} y ε_{zz} son las componentes principales de permitividad compleja.

Un material anisótropo se puede dividir en dos tipos: uniaxial o biaxial. Un material anisótropo biaxial posee las tres componentes de permitividad de la diagonal del tensor [1] distintas, mientras que un material anisótropo uniaxial se define por tener dos de las tres componentes de permitividad del tensor [1] iguales. En el caso de un material anisótropo uniaxial, el eje de la permitividad distinta se denomina eje óptico. A título de ejemplo, si suponemos que x es el eje óptico de un material anisótropo uniaxial, entonces las componentes principales de permitividad compleja del tensor [1] pueden escribirse de la

25

30

siguiente manera: $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{//} = \varepsilon'_{r//} - j\varepsilon''_{r//}$ y $\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\perp} = \varepsilon'_{r\perp} - j\varepsilon''_{r\perp}$ donde // y \perp definen, respectivamente, la componente paralela y la componente ortogonal al eje óptico.

La presente invención propone cubrir la necesidad de caracterizar materiales dieléctricos isótropos o anisótropos en un amplio rango de frecuencias RF/microondas mediante un sensor. Las componentes de permitividad compleja del material isótropo (ϵ) o anisótropo (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz}) se determinan a partir de simples medidas en reflexión con un sensor en
5 circuito abierto de tipo *microstrip*, *coplanar* o una configuración alternativa presentada en esta invención. Estos sensores presentan las mismas ventajas que el sensor coaxial en circuito abierto [Stuchly1980], dado que se pueden emplear en métodos de reflexión no destructivos, permitiendo medidas sencillas y rápidas *in vivo* e *in situ* de una gran variedad
10 de materiales (sólidos, semisólidos y líquidos). La principal diferencia entre el sensor coaxial y los sensores de la presente invención está en su configuración. El sensor coaxial presenta una configuración axial, mientras que los sensores propuestos tienen estructuras planares que las hacen adecuadas para caracterizar materiales anisótropos y cubrir un ancho de banda en frecuencia mayor. Aunque el sensor rectangular permite la caracterización de
15 materiales anisótropos [Chang1996], los sensores planteados en la presente invención no necesitan varios tamaños de estructura para cubrir un amplio rango de frecuencias. Además, dada la pequeña superficie de contacto que exhiben los sensores de la presente invención en su extremo, éstos requieren tan solo una pequeña cantidad de material a caracterizar, lo que les hacen interesantes cuando el material a caracterizar es escaso.

20

En este contexto, la presente invención propone nuevas técnicas de medidas no destructivas para caracterizar materiales isótropos y, además anisótropos, en un amplio rango de frecuencias de RF/microondas mediante un sensor en circuito abierto de tipo microtira (*microstrip*), *coplanar* o con una configuración alternativa. Estos sensores mejoran
25 los métodos de caracterización en circuitos abiertos basados en guías de tipo coaxial o rectangular. Las estructuras de la presente invención se pueden utilizar en métodos no resonantes y no destructivos y, por consiguiente, permiten realizar con ellas medidas *in vivo* e *in situ* de una gran variedad de materiales (sólidos, semisólidos y líquidos) isótropos o anisótropos en un amplio rango de frecuencias. Además, el uso de cualquier sensor de la
30 presente invención puede ser de gran interés cuando el material a caracterizar es escaso, dado que el extremo de cualquiera de estos sensores requiere una pequeña superficie de contacto.

En el caso más común de un material sólido isótropo, la técnica propuesta para conseguir la permitividad compleja ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) consiste en medir el coeficiente de reflexión complejo (S_{11}) del sensor (*microstrip*, *coplanar* o configuración alternativa) en contacto con la superficie del material a caracterizar mediante un analizador de redes vectoriales. El

5 coeficiente de reflexión complejo (S_{11}) describe la amplitud y la fase de la onda reflejada con respecto a la onda incidente. La permitividad compleja ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) se obtiene en función de las medidas del coeficiente de reflexión complejo (S_{11}) y de un método inverso, el cual está basado en un modelo que analiza el extremo del sensor (*microstrip*, *coplanar* o configuración alternativa) aplicado a un material. Dada la falta de modelo preciso en la

10 literatura de este tipo de discontinuidad con los sensores propuestos, se propone una técnica de modelado original y versátil basada en lógica borrosa (*fuzzy logic*) [J. W. Bandler, M. A. Ismail, J. E. Rayas-Sánchez, and Q. J. Zhang, "Neuromodeling of microwave circuits exploiting space-mapping technology", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, pp. 2417-2427, December 1999 (Bandler1999)], [E. B. Rahouyi, J.

15 Hinojosa, and J. Garrigós, "Neuro-fuzzy modelling techniques for microwave components", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 16, pp. 72-74, February 2006 (Hinojosa2006)]. La técnica combina de distintas formas modelos gruesos (pocos precisos) con la precisión de modelos finos (simulador electromagnético) mediante sistemas de inferencia neuro-borrosos [J. S. Jang, "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, pp. 665-685, 1993 (Jang1993)]. De este modo se consiguen modelos con las siguientes ventajas: alta precisión, amplio rango de parámetros de entrada y de frecuencia y eficiencia computacional. Además, dada su versatilidad, permite ser aplicada a los diferentes sensores

25 de la presente invención, a diversos estados y acondicionamientos del material a caracterizar y a efectos derivados de las medidas (radiación, errores en módulos y fases, etc.) que pudieran surgir.

Los sensores *microstrip*, *coplanar* y configuraciones alternativas propuestas son adecuados para caracterizar materiales anisótropos, debido a sus estructuras de tipo *planar*. Los

30 campos eléctricos y magnéticos en estos sensores son cuasi ortogonales y están confinados entre la tira conductora y la masa. De este modo, el campo electromagnético en estos sensores está definido en dos ejes de un sistema de tres coordenadas (x, y, z), lo que facilita la técnica de caracterización para extraer las permitividades complejas del tensor del material anisótropo. Las características de un material sólido anisótropo se obtienen girando

éste adecuadamente 90° y midiendo el coeficiente de reflexión complejo (S_{11}) del sensor en contacto con la superficie cuantas veces sean necesarias para extraer las propiedades de su tensor. Las permitividades complejas del tensor se determinan a partir del método de extracción anterior para materiales isótropos y una combinación lineal de los resultados obtenidos de las distintas medidas en reflexión. Para una técnica de caracterización no resonante, estos sensores presentan un gran potencial, dado que se pueden aplicar en un amplio rango de frecuencias, a una gran variedad de materiales isótropos o anisótropos en estados sólidos, semisólidos o líquidos.

Así, la invención consiste en una técnica no destructiva para medir las propiedades electromagnéticas de materiales dieléctricos isótropos o anisótropos, en un amplio rango de frecuencias RF/microondas, mediante un sensor en circuito abierto de tipo *microstrip*, *coplanar* o con una configuración alternativa. En el caso de un material sólido isótropo bajo prueba, la técnica experimental mide el coeficiente de reflexión complejo del sensor (*microstrip*, *coplanar* o configuración alternativa) en contacto con la superficie de éste en función de la frecuencia. La permitividad compleja de un material isótropo bajo prueba se extrae a partir de las medidas del coeficiente de reflexión en función de la frecuencia y de un modelo, relativo a la discontinuidad del sensor en contacto con el material bajo prueba. Para conseguir un modelo computacionalmente eficiente y preciso, se aplica una técnica original de modelado neuro-borrosa. Por otro lado, las estructuras de sensores *microstrip*, *coplanar* o configuración alternativa se caracterizan por tener campos eléctricos y magnéticos perpendiculares confinados entre la tira conductora y la masa, quedando éstos definidos en un plano de un sistema de tres coordenadas (x, y, z) y, por consiguiente, adecuadas para caracterizar materiales anisótropos. En el caso de un material anisótropo uniaxial bajo prueba, las dos componentes de permitividad compleja ($\epsilon_{//}$, ϵ_{\perp}) de la diagonal del tensor se extraen a partir de dos medidas en reflexión con el sensor, realizadas en el plano paralelo y el plano ortogonal del material. Del mismo modo, tres medidas en reflexión con el sensor son necesarias para obtener las tres componentes de permitividad compleja (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz}) de un material anisótropo biaxial bajo prueba, girando éste acorde con los tres ejes del sistemas de coordenadas (x, y, z). Las permitividades complejas del tensor (uniaxial, biaxial) se determinan a partir del método de extracción para materiales isótropos y una combinación lineal de los resultados obtenidos de las distintas medidas en reflexión. Estos sensores pueden ser de interés para realizar medidas *in situ* e *in vivo* en un amplio rango de frecuencias, puesto que se pueden aplicar no solamente a materiales sólidos, sino también

a materiales semisólidos y líquidos. Además, requieren poca cantidad de material, dado que la extremidad de estos sensores presenta una pequeña superficie de contacto.

El objetivo de la presente invención está basado en una técnica de medidas en reflexión para la caracterización electromagnética de materiales isótropos o anisótropos mediante un sensor de tipo *microstrip*, *coplanar* o una configuración alternativa. Las principales innovaciones de los sensores de la invención son las siguientes posibilidades y habilidades: extracción de la permitividad compleja de una gran variedad de materiales isótropos sólidos, semisólidos o líquidos; extracción de las componentes de permitividad compleja del tensor dieléctrico de una gran variedad de materiales anisótropos sólidos, semisólidos o líquidos; sumersión parcial o completa de los sensores en materiales semisólidos y también líquidos; utilización en métodos de reflexión no destructivos; realización de medidas *in situ* e *in vivo* y medidas en un amplio rango de frecuencias RF/microondas.

Una realización básica del sistema de la invención se define en la reivindicación 1. Una realización básica del método de la invención se define en la reivindicación 18. Las reivindicaciones dependientes definen características adicionales de la invención.

Descripción de las figuras

20

La figura 1 muestra el sistema de medidas en reflexión para la caracterización electromagnética de materiales isótropos o anisótropos con un sensor (S1) con terminación en circuito abierto (*microstrip*, *coplanar* o configuración alternativa).

25 Las figuras 2A-2E muestran representaciones en tres dimensiones de diferentes acondicionamientos de materiales sólidos con forma cúbica y propiedades desconocidas que se podrían utilizar bajo prueba.

- La Figura 2A muestra un material desconocido (M) a caracterizar con propiedades desconocidas.
- 30 - La figura 2B muestra un material desconocido (M) depositado sobre un material con propiedades conocidas, es decir, un material conocido (M_c).
- La figura 2C muestra un material desconocido (M) depositado sobre un material conductor (M_{cond}).
- La figura 2D muestra un material desconocido (M) depositado sobre dos capas que
- 35 comprenden un material conocido (M_c) y un material conductor (M_{cond}).

- La figura 2E muestra un material conocido (M_c) depositado sobre dos capas que comprenden un material desconocido (M) y un material conductor (M_{cond}).

La figura 3A muestra un sensor *microstrip* con una estructura en tres dimensiones.

5

La figura 3B muestra una vista transversal y detalle del campo electromagnético del modo fundamental cuasi-TEM. El medio de propagación de la estructura *microstrip* no es homogéneo, dado que los campos eléctrico y magnético se reparten en el sustrato de permitividad ϵ_r y en el aire.

10

La figura 4A muestra un sensor *coplanar* con una estructura en tres dimensiones.

La figura 4B muestra una vista transversal y detalle del campo electromagnético del modo fundamental cuasi-TEM. El medio de propagación de la estructura *coplanar* no es homogéneo, dado que los campos eléctrico y magnético se reparten en el sustrato de permitividad ϵ_r y en el aire.

15

Las figuras 5A, 5B muestran un método de modelado generalizado con entrada de conocimiento previa (ECP-MANFIS).

20

- La figura 5A muestra un entrenamiento del método ECP-MANFIS.
- La figura 5B muestra un modelo ECP-MANFIS resultante.

Las figuras 6A, 6B muestran un método de modelado generalizado clásico (C-MANFIS) utilizado para obtener el modelo grueso de las figuras 5A, 5B.

25

- La figura 6A muestra un entrenamiento del método C-MANFIS.
- La figura 6B muestra un modelo C-MANFIS resultante.

Las figuras 7A, 7B muestran un método de modelado generalizado con diferencias de salidas (DS-MANFIS) utilizado para sustraer los efectos secundarios derivados de las medidas en el modelo ECP-MANFIS.

30

- La figura 7A muestra un entrenamiento del método DS-MANFIS.
- La figura 7B muestra un modelo DS-MANFIS resultante.

Las figuras 8A, 8B muestran resultados en función de la frecuencia de la permitividad compleja obtenidos con el sensor *microstrip* y la técnica de extracción presentada en esta invención para el material (M) isótropo de la Tabla 2.

- La figura 8A muestra la permitividad real (ϵ_r').
- 5 - La figura 8B muestra el ángulo de pérdidas ($\text{tg}\delta$).

La figura 9A, 9B muestran resultados en función de la frecuencia de las permitividades complejas del tensor dieléctrico obtenidos con el sensor *microstrip* y la técnica de extracción presentada en esta invención para el material (M) anisótropo uniáxico de la Tabla 2.

- 10 - La figura 9A muestra permitividades reales: paralela ($\epsilon_{r//}'$) y ortogonal ($\epsilon_{r,\perp}'$).
- La figura 9B muestra ángulos de pérdidas: paralelo ($\text{tg}\delta_{//}$) y ortogonal ($\text{tg}\delta_{\perp}$).

La figura 10 muestra una vista transversal de una configuración alternativa al sensor *microstrip*.

15

La figura 11 muestra una vista transversal de una configuración alternativa al sensor *coplanar*.

La figura 12 muestra el sistema de medida en reflexión para la caracterización electromagnética de materiales isótropos o anisótropos con dos sensores (S1, S2) con terminaciones en circuitos abiertos y orientados a 90° según dos ejes del sistema de coordenadas (x, y, z).

La figura 13 muestra el sistema de medida en reflexión para la caracterización electromagnética de materiales isótropos o anisótropos con tres sensores (S1, S2, S3) con terminaciones en circuitos abiertos y orientados a 90° según los tres ejes del sistema de coordenadas (x, y, z).

Se indican a continuación las referencias numéricas de los elementos de la invención:

- 30 Coeficiente de reflexión complejo (S_{11} , $S_{11,1}$, $S_{11,2}$)
- Primer plano de referencia (P1)
- Segundo plano de referencia (P2)
- Equipo de medidas (EM)
- Primer sensor (S1)

- Segundo sensor (S2)
- Tercer sensor (S3)
- Primera guía de transmisión (G1)
- Segunda guía de transmisión (G2)
- 5 Tercera guía de transmisión (G3)
- Primera transición (T1)
- Segunda transición (T2)
- Tercera transición (T3)
- Cuarta transición (T4)
- 10 Quinta transición (T5)
- Sexta transición (T6)
- Séptima transición (T7)
- Primera guía de datos (GD1)
- Segunda guía de datos (GD2)
- 15 Pantalla (P)
- Unidad de procesamiento externa (UPE)
- Medios de almacenamiento (MA)
- Material desconocido (M)
- Material conocido (Mc)
- 20 Material conductor (M_{cond})
- Anchura (a) del material desconocido (M)
- Altura (b) del material desconocido (M)
- Espesor (e) del material desconocido (M)
- Espesor conocido (e_c) del material conocido (Mc)
- 25 Espesor conductor (e_{cond}) del material conductor (M_{cond})
- Vector de entrada (X, X_M, X_{ME})
- Entrada de conocimiento previa (ECP-MANFIS)
- Vectores de salida ($Y_{MF}, Y_{MG}, Y_{ECP-MANFIS}, Y_{C-MANFIS}, Y_{ME}, Y_{DS-MANFIS}$)
- Vector de salida del modelo fino (Y_{MF})
- 30 Vector de salida del modelo grueso (Y_{MG})
- Vector de salida del material estándar (Y_{ME})
- Vector de salida del material desconocido bajo prueba (Y)
- Modelo fino (MF)
- Modelo grueso (MG)
- 35 Permitividad real (ϵ_r')

- Ángulo de pérdidas ($\text{tg}\delta$)
- Permitividad real de la componente paralelo ($\varepsilon'_{r//}$)
- Permitividad real de la componente ortogonal ($\varepsilon'_{r\perp}$)
- Ángulos de pérdidas para la componente paralelo ($\text{tg}\delta_{//}$)
- 5 Ángulos de pérdidas para la componente ortogonal ($\text{tg}\delta_{\perp}$)
- Superficies del encapsulado ($S_{P1}, S_{P2}, S_{P3}, S_{P4}$)
- Espesores de las superficies del encapsulado ($t_{S1}, t_{S2}, t_{S3}, t_{S4}$)
- Primer sustrato (Su1)
- Segundo sustrato (Su2)
- 10 Anchura de primer sustrato (W_{Su1})
- Longitud de primer sustrato (L_{Su1})
- Espesor de primer sustrato (h_1)
- Anchura de segundo sustrato (W_{Su2})
- Espesor de segundo sustrato (h_2)
- 15 Primera cara (1) del primer sustrato (Su1)
- Segunda cara (2) del primer sustrato (Su1)
- Tercera cara (3) del segundo sustrato (Su2)
- Cuarta cara (4) del segundo sustrato (Su2)
- Tira conductora (TC)
- 20 Anchura de tira (W_{TC}),
- Longitud de tira (L_{TC})
- Espesor de tira (t_{TC})
- Plano conductor (PC)
- Anchura de plano conductor (W_{PC})
- 25 Longitud de plano conductor (L_{PC})
- Espesor de plano (t_{PC})
- Franjas conductoras (FC1, FC2)
- Anchuras de franja (D_1, D_2)
- Longitudes de franja (L_{D1}, L_{D2})
- 30 Espesores de franja (t_1, t_2)
- Distancias (R_1, R_2)

Descripción detallada de la invención

La figura 1 muestra esquemáticamente el sistema de medida en reflexión para la caracterización electromagnética de materiales con un primer sensor (S1) con terminación en circuito abierto. El primer sensor (S1) puede ser de tipo *microstrip*, *coplanar* o de una configuración alternativa. El primer sensor (S1) está conectado a un equipo de medidas (EM) RF/microondas (analyzer de redes vectoriales) mediante una primera guía de transmisión (G1) y dos transiciones (T1, T2). Una primera transición (T1) realiza la transición entre el primer sensor (S1) y una primera guía de transmisión (G1), mientras que una segunda transición (T2) efectúa la transición entre la primera guía de transmisión (G1) y el equipo de medidas (EM) RF/microondas. Según el tipo de material desconocido (M) a caracterizar, se aplicará el extremo del primer sensor (S1) en circuito abierto en la superficie de un material sólido, o se sumergirá parcialmente o completamente el primer sensor (S1) cuando se trate de un material semisólido o líquido. En el sistema de medida de la figura 1, se ha considerado un material desconocido (M) a caracterizar sólido, con una configuración como la de la figura 2A. En la figura 2A, el material desconocido (M) tiene forma ortoédrica: sus dimensiones en las coordenadas x-anchura, y-altura y z-espesor son, respectivamente, anchura (a), altura (b) y espesor (e) –la altura (b) no se muestra en la figura 1 debido a la representación en dos dimensiones de dicha figura. El equipo de medidas (EM) RF/microondas está conectado mediante una primera guía de datos (GD1) a una unidad de procesamiento externa (UPE) y la unidad de procesamiento externa (UPE) a una pantalla (P) de visualización mediante una segunda guía de datos (GD2). El equipo de medidas (EM) RF/microondas realiza las medidas en reflexión del primer sensor (S1) en función de la frecuencia y con respecto al primer plano de referencia (P1). Los datos de las medidas en reflexión del primer sensor (S1) se almacenan en el equipo de medidas (EM) RF/microondas y/o en la unidad de procesamiento externa (UPE). La permitividad compleja del material desconocido (M) se extrae del procesamiento de los datos de medidas en reflexión del primer sensor (S1) mediante la unidad de procesamiento externa (UPE); la unidad de procesamiento externa (UPE) también se puede utilizar para llevar a cabo el control y los procesos de calibración del sistema de medidas. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la pantalla (P).

Las figuras 2A-2E representan, en tres dimensiones, algunos acondicionamientos de un material desconocido (M) sólido que se podrían utilizar en la técnica de medidas en reflexión

del sistema de la figura 1 o en una configuración alternativa del sistema como las ilustradas en las figuras 12 y 13.

En la figura 2A, sólo se muestra el material desconocido (M) que tiene una forma ortoédrica.

5

En las figuras 2B y 2C, el material desconocido (M) que tiene un espesor (e) está depositado, respectivamente, en una capa que tiene un espesor conocido (e_c) de un material conocido (Mc) –se denomina material conocido (Mc) a aquel que tiene propiedades conocidas- y en una capa que tiene un espesor conductor (e_{cond}) de un material conductor (Mcond).

10

Las figuras 2D y 2E representan un acondicionamiento del material desconocido (M) en una configuración de tres capas:

En la figura 2D, el material desconocido (M) está depositado sobre dos capas de material: una capa que tiene un espesor conocido (e_c) de un material conocido (Mc) y otra capa que tiene un espesor conductor (e_{cond}) de un material conductor (Mcond).

15

En la figura 2E, el material conocido (Mc) de espesor conocido (e_c) está depositado sobre dos capas de material: una capa que tiene un espesor (e) de un material desconocido (M) y otra capa que tiene un espesor conductor (e_{cond}) de un material conductor (Mcond).

20

La figura 3A representa la estructura en tres dimensiones de un sensor *microstrip* de la invención. El sensor *microstrip* ilustrado en la figura 3A comprende:

- 25 - una tira conductora (TC) que tiene una anchura de tira (W_{TC}), una longitud de tira (L_{TC}) y un espesor de tira (t_{TC}); y
- un plano conductor (PC) que tiene una anchura de plano conductor (W_{PC}), una longitud de plano conductor (L_{PC}) y un espesor de plano conductor (t_{PC}).

La tira conductora (TC) y el plano conductor (PC) están separados por un primer sustrato (Su1) dieléctrico ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) que tiene una longitud de primer sustrato (L_{Su1}) y un espesor de primer sustrato (h_1).

30

La figura 3B muestra la vista transversal del sensor *microstrip* y detalle del campo electromagnético para el modo fundamental cuasi-TEM.

35

Las líneas de campo electromagnético en el plano transversal del sensor *microstrip* para el modo de propagación fundamental cuasi-TEM se reparten en el primer sustrato (Su1) y en el aire. Debido al efecto del primer sustrato (Su1) y de la estructura del sensor *microstrip*, el campo electromagnético está principalmente confinado entre la tira conductora (TC) y el plano conductor (PC). Por consiguiente, las líneas del campo eléctrico, representadas con línea continua, están principalmente orientadas en el eje vertical (0, y), mientras que las líneas de campo magnético, representadas en línea discontinua, perpendiculares a las líneas de campo eléctrico, están orientadas en el eje horizontal (0, x).

10

Las figuras 4A y 4B representan la estructura en tres dimensiones (figura 4A) y la distribución (figura 4B) del campo electromagnético (modo de propagación fundamental cuasi-TEM) en el plano transversal del sensor *coplanar* de la figura 4A. El sensor *coplanar* ilustrado en la figura 4A comprende:

- 15 - una tira conductora (TC) que tiene una anchura de tira (W_{TC}), una longitud de tira (L_{TC}) y un espesor de tira (t_{TC});
- dos franjas conductoras (FC1, FC2) que tienen anchuras de franja (D_1, D_2), longitudes de franja (L_{D1}, L_{D2}), espesores de franja (t_1, t_2), separadas de la tira conductora (TC) unas distancias (R_1, R_2).

20

La tira conductora (TC) y las dos franjas conductoras (FC1, FC2) están depositadas en un primer sustrato (Su1) dieléctrico ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) que tiene una longitud de primer sustrato (L_{Su1}) y un espesor de primer sustrato ($h1$).

Las líneas de campo electromagnético del modo de propagación fundamental cuasi-TEM se reparten en el primer sustrato (Su1) y en el aire como se ilustra en la figura 4B. Debido al efecto del sustrato y de la estructura del sensor *coplanar*, el campo electromagnético está principalmente confinado entre la tira conductora (TC) y las dos franjas conductoras (FC1, FC2). Por consiguiente, como se ilustra en la figura 4B, las líneas de campo eléctrico, representadas con línea continua, están principalmente orientadas en el eje horizontal (0, x), mientras que las líneas de campo magnético, representadas en línea discontinua, perpendiculares a las líneas de campo eléctrico, están orientadas en el eje vertical (0, y).

30

Las figuras 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B representan tres métodos de modelado neuro-borrosos utilizados en la técnica de extracción de la invención para conseguir la permitividad compleja

en función de la frecuencia de un material (M) desconocido bajo prueba. En el sistema de medidas de la figura 1, aparece una discontinuidad entre el primer sensor (S1) y el material desconocido (M) bajo prueba. Las figuras 5A, 5B, 6A, 6B se encargan de modelar teóricamente la discontinuidad entre el primer sensor (S1) y el material desconocido (M) a caracterizar, mientras que las figuras 7A, 7B tienen en cuenta efectos derivados de las medidas (radiación, errores en módulos y fases, etc.) que pudieran surgir y que no pueden ser considerados en el modelo teórico. En estos métodos, el modelo fino (MF) se obtiene mediante un simulador electromagnético y el modelo grueso (MG) se consigue mediante el método clásico (C-MANFIS) de las figuras 6A, 6B. MANFIS es una extensión de ANFIS (*Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*) [Jang1993] para producir múltiples salidas en el modelo. ANFIS es una red de propagación hacia delante de cinco capas que implementa reglas neuro-borrosas para producir una única respuesta de salida de tipo real en función de varias entradas. MANFIS se combina de distintas formas con modelos finos (figuras 6A, 6B), finos y gruesos (figuras 5A, 5B) y con medidas (figuras 7A, 7B). En las figuras 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B (X) , (X_{ME}) y (X_M) son vectores de entrada, mientras que (Y_{MF}) , (Y_{MG}) , (Y_{ME}) , (ΔY) e (Y) representan vectores de salida. El objetivo de cada método de modelado consiste en entrenar MANFIS de manera que su vector de salida se ajuste al vector de salida correspondiente: (Y_{MF}) para las figuras 5A y 6A, y (ΔY) para la figura 7A. Como resultado del proceso de entrenamiento, se consiguen los modelos resultantes de las figuras 5B, 6B y 7B.

Las figuras 5A, 5B representan, mediante diagramas de flujo, el método de modelado generalizado con Entrada de Conocimiento Previa (ECP-MANFIS) utilizado en esta invención, para obtener el modelo de la discontinuidad entre el primer sensor (S1) y el material desconocido (M) a caracterizar del sistema de medida en reflexión representado en la figura 1. (X) representa el vector de entrada y $(Y_{MF}, Y_{MG}, Y_{ECP-MANFIS})$ representan vectores de salida. En el método de las figuras 5A y 5B, el modelo fino (MF) se obtiene mediante un simulador electromagnético y el modelo grueso (MG) se consigue mediante el método clásico (C-MANFIS) de las figura 6A y 6B. La figura 5A representa el proceso de entrenamiento de MANFIS₂. El objetivo consiste en entrenar MANFIS₂ de manera que su vector de salida $(Y_{ECP-MANFIS})$ se ajuste al vector de salida del modelo fino (Y_{MF}) en función del vector de entrada (X) . Una vez entrenado, se consigue el modelo teórico resultante de la figura 5B, el cual se utiliza para extraer la permitividad compleja teórica en función de la frecuencia de un material desconocido (M) bajo prueba con el sistema representado en la figura 1.

Las figuras 6A, 6B representan, mediante diagramas de flujo, el método de modelado generalizado Clásico (C-MANFIS) utilizado en esta invención para obtener el modelo grueso de las figuras 5A, 5B. (X) representa el vector de entrada y (Y_{MF} , $Y_{C-MANFIS}$) representan
 5 vectores de salida. En el método de las figuras 6A y 6B, el modelo fino (MF) se obtiene mediante un simulador electromagnético. La figura 6A representa el proceso de entrenamiento de MANFIS₁. El objetivo consiste en entrenar MANFIS₁ de manera que su vector de salida ($Y_{C-MANFIS}$) se ajuste al vector de salida del modelo fino (Y_{MF}) en función del vector de entrada (X). Una vez entrenado, se consigue el modelo teórico resultante de la
 10 figura 6B, el cual se utiliza como modelo grueso en el método de modelado generalizado con entrada de conocimiento previa (ECP-MANFIS).

Las figuras 7A, 7B representan, mediante diagramas de flujo, el método de modelado generalizado con Diferencias de Salidas (DS-MANFIS) utilizado en esta invención para tener
 15 en cuenta los efectos derivados de las medidas experimentales tomadas con el sistema de medida en reflexión representado en la figura 1 (errores de reproductibilidad, errores de módulos y fases, etc.) que no pueden ser considerados en el modelo teórico de las figuras 5A, 5B. (X_{ME}) representa el vector de entrada y (Y_{ME} , $Y_{ECP-MANFIS}$, $Y_{DS-MANFIS}$) representan vectores de salida. En el método de las figuras 7A y 7B, se utilizan medidas de Materiales
 20 Estándares con propiedades conocidas. La figura 7A representa el proceso de entrenamiento de MANFIS₃. El objetivo consiste en entrenar MANFIS₃ de manera que su vector de salida ($Y_{DS-MANFIS}$) se ajuste al vector de salida correspondiente a la diferencia entre (Y_{ME}) y ($Y_{ECP-MANFIS}$) en función del vector de entrada (X_{ME}). Una vez entrenado, se consigue el modelo resultante de la figura 7B, el cual se utiliza para extraer la permitividad
 25 compleja experimental en función de la frecuencia de un material desconocido (M) bajo prueba en el sistema de la figura 1.

Las figuras 8A, 8B representan los resultados en función de la frecuencia de la permitividad compleja de un material desconocido (M) sólido isótropo bajo prueba. Estos resultados
 30 fueron obtenidos a partir de simulaciones electromagnéticas de un sensor *microstrip* y un material desconocido (M) isótropo bajo prueba. Las propiedades eléctricas del material desconocido (M) isótropo bajo prueba están incluidas en la Tabla 2. Los resultados fueron conseguidos a partir de la técnica de extracción de la figura 5B. La figura 8A muestra los resultados de la permitividad real (ϵ_r') del material desconocido (M) isótropo bajo prueba,
 35 mientras que la figura 8B representa los resultados del ángulo de pérdidas ($\text{tg}\delta$).

Las figuras 9A, 9B representan los resultados en función de la frecuencia de la permitividad compleja de un material desconocido (M) sólido anisótropo bajo prueba. Estos resultados fueron obtenidos a partir de simulaciones electromagnéticas de un sensor *microstrip* y un material desconocido (M) anisótropo bajo prueba. Las propiedades eléctricas del material desconocido (M) anisótropo bajo prueba están incluidas en la Tabla 2. Los resultados fueron conseguidos a partir de la técnica de extracción de la figura 5B. La figura 9A muestra los resultados de la permitividad real de la componente paralelo ($\varepsilon'_{r//}$, en línea continua) y la permitividad real de la componente ortogonal ($\varepsilon'_{r\perp}$, en línea discontinua) del material desconocido (M) anisótropo bajo prueba, mientras que la figura 9B representa los resultados de los ángulos de pérdidas para la componente paralelo ($\text{tg}\delta_{//}$ en línea continua) y la componente ortogonal ($\text{tg}\delta_{\perp}$ en línea discontinua).

La figura 10 muestra una vista transversal de una configuración alternativa al sensor *microstrip* ilustrado en la figura 3A.

La figura 11 muestra una vista transversal de una configuración alternativa al sensor *coplanar* ilustrado en la figura 4A.

Las configuraciones alternativas de las figuras 10 y 11 están encapsuladas mediante una estructura rectangular formada por cuatro superficies (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}) con espesores (t_{S1} , t_{S2} , t_{S3} , t_{S4}). Las estructuras encapsuladas mostradas en las figuras 10 y 11 están rellenas de dos sustratos (Su1, Su2) dieléctricos ($\varepsilon_{r1} = \varepsilon'_{r1} - j\varepsilon''_{r1}$) y ($\varepsilon_{r2} = \varepsilon'_{r2} - j\varepsilon''_{r2}$). Los sustratos (Su1) y/o (Su2) pueden ser de aire. Los sustratos (Su1, Su2) también pueden ser el mismo sustrato. Las superficies (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}) no son necesariamente todas conductoras. Otras realizaciones alternativas comprenden diferentes combinaciones de estructuras, eliminando una superficie o varias superficies (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}).

La figura 12 ilustra una configuración alternativa al sistema de medida en reflexión de la figura 1. Los equipos de medidas (EM) RF/microondas (analizadores de redes vectoriales) suelen disponer de dos puertos de salidas independientes. El equipo de medidas (EM) de la figura 12 dispone de dos puertos. Una tercera transición (T3) realiza la transición entre el segundo sensor (S2) y la segunda guía de transmisión (G2), mientras que una cuarta transición (T4) efectúa la transición entre la segunda guía de transmisión (G2) y el equipo de

medidas (EM) RF/microondas. De este modo, a partir del sistema de medidas de la figura 12 con dos sensores (S1, S2), por ejemplo *microstrip*, orientados a 90° según dos ejes del sistema de coordenadas (x, y, z), es posible realizar simultáneamente las dos medidas en reflexión de materiales desconocidos (M) anisótropos uniaxiales en un amplio rango de frecuencias RF/microondas. También se puede aplicar una combinación de diferentes sensores (S1, S2) (*microstrip*, *coplanar*, configuraciones alternativas) al sistema de medidas de la figura 12 para conseguir el mismo propósito.

La figura 13 ilustra una configuración alternativa a los sistemas de medida en reflexión de las figuras 1 y 12. Los equipos de medidas (EM) RF/microondas (analizadores de redes vectoriales) pueden disponer de más dos puertos de salidas independientes. El equipo (EM) de medidas de la figura 13 dispone de cuatro puertos. Una quinta transición (T5) realiza la transición entre el tercer sensor (S3) y la tercera guía de transmisión (G3), mientras que una sexta transición (T6) efectúa la transición entre la tercera guía de transmisión (G3) y el equipo de medidas (EM) RF/microondas. De este modo, a partir del sistema de medidas de la figura 13 con tres sensores (S1, S2, S3), por ejemplo *microstrip*, orientados a 90° según los tres ejes del sistema de coordenadas (x, y, z), es posible realizar simultáneamente las tres medidas en reflexión de materiales desconocidos (M) anisótropos con tres componentes de permitividad compleja (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz}) de la diagonal del tensor [1], en un amplio rango de frecuencias RF/microondas. También se puede aplicar una combinación de diferentes sensores (S1, S2, S3) (*microstrip*, *coplanar*, configuraciones alternativas) al sistema de medidas de la figura 13 para conseguir el mismo propósito.

La tabla 1 incluye las dimensiones y características del sensor *microstrip* de la figura 3A en circuito abierto utilizado para ilustrar el funcionamiento de la invención.

W_{TC} (mm)	W_{PC} (mm)	L_{TC} (mm)	L_{PC} (mm)
0.6	6	10	10
L_{SU1} (mm)	t_{TC} (mm)	t_{PC} (mm)	h_1 (mm)
10	0.0175	0.0175	0.635
ϵ_r	$tg \delta$		
9.8	0.001		

TABLA 1

La tabla 2 contiene las dimensiones y propiedades de dos materiales sólidos bajo prueba empleados para ilustrar el funcionamiento de esta invención: uno es un material isótropo y el otro un material anisótropo uniaxial. Las propiedades de estos materiales se consideraron constantes en función de la frecuencia durante las simulaciones.

a-anchura (mm)	b-altura (mm)	e-espesor (mm)
10	10	10
(M) isótropo	(M) anisótropo uniaxial	
$\epsilon_r' = 8.5$ y $\text{tg}\delta = 0.007$	$\epsilon_{r,\parallel}' = 9.5$, $\text{tg}\delta_{\parallel} = 0.0045$, $\epsilon_{r,\perp}' = 8.5$, $\text{tg}\delta_{\perp} = 0.0035$	

TABLA 2

La tabla 3 incluye los rangos de permitividad compleja y de frecuencias utilizados para conseguir los datos del modelo fino y de este modo entrenar (figuras 5A, 6A) y generar los modelos C-MANFIS (figura 6B) y ECP-MANFIS (figura 5B). En otras palabras, la tabla 3 recoge rangos de parámetros simulados mediante un simulador electromagnético y aplicado a un sensor *microstrip* para entrenar y generar los modelos ECP-MANFIS de las figuras 5A, 5B y C-MANFIS de las figuras 6A, 6B.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Paso
Permitividad real (ϵ_r')	1	12	1
Angulo de pérdidas ($\text{tg}\delta$)	0	0.01	0.002
Frecuencia en GHz (f)	0.01	10	0.1

TABLA 3

La tabla 4 recoge los errores relativos mínimos, medios y máximos, en el rango de frecuencia entre 0.01GHz y 10GHz, debidos al método de extracción propuesto en la invención para conseguir la permitividad real (ϵ_r') y el ángulo de pérdidas ($\text{tg}\delta$) del material desconocido (M) isótropo de la tabla 2 bajo prueba.

Parámetro	Error relativo (%)		
	Mínimo	Medio	Máximo
Permitividad real (ϵ_r')	0.2×10^{-3}	0.1	1.5
Angulo de pérdidas ($\text{tg} \delta$)	0.06	5.5	32.6

TABLA 4

5 La tabla 5 recoge los errores relativos mínimos, medios y máximos, en el rango de frecuencia entre 0.01 GHz y 10 GHz, que se dan en el método de extracción propuesto en la invención para conseguir las componentes del tensor permitividad del material desconocido (M) anisótropo uniaxial de la tabla 2 bajo prueba.

Parámetro	Error relativo (%)		
	Mínimo	Medio	Máximo
Permitividad real ortogonal ($\epsilon_{r\perp}'$)	2.8	3.2	4.2
Angulo de pérdidas ortogonal ($\text{tg} \delta_{\perp}$)	0.02	22.9	154
Permitividad real paralela ($\epsilon_{r\parallel}'$)	1.4	2.9	4.4
Angulo de pérdidas paralelo ($\text{tg} \delta_{\parallel}$)	0.42	49.5	294

10

TABLA 5

La figura 1 muestra esquemáticamente el sistema de medidas basado en medidas de reflexión para la caracterización electromagnética de materiales. El material desconocido (M) a caracterizar puede tener una forma cualquiera, aunque requiere una superficie de contacto suficientemente plana, ancha y alta para poder aplicarle la extremidad del primer sensor (S1). El equipo de medidas (EM) RF/microondas realiza las medidas en reflexión del primer sensor (S1) en un amplio rango de frecuencias de acuerdo con los datos introducidos en el equipo de medidas (EM) RF/microondas por el usuario. Con anterioridad a las medidas en reflexión del primer sensor (S1), se suele llevar a cabo un proceso de calibración del sistema de medidas con el fin de definir un primer plano de referencia (P1) de las medidas.

20

A la vista de lo comentado, la invención comprende una técnica de medidas en reflexión no destructiva, basada en el manejo como el ilustrado en la figura 1, de un sensor en circuito abierto en tecnología *microstrip* (figuras 3A, 3B), *coplanar* (figuras 4A, 4B) o configuración alternativa, para extraer las propiedades eléctricas de materiales (sólidos, semisólidos o líquidos) isótropos o anisótropos en un amplio rango de frecuencias RF/microondas.

Para obtener las propiedades eléctricas ($\epsilon_{rM} = \epsilon'_{rM} - j\epsilon''_{rM}$) de un material desconocido (M) bajo prueba con un sistema de medidas como el ilustrado en la figura 1, se puede aplicar una técnica original de extracción basada en el procesamiento de los datos del coeficiente de reflexión complejo (S_{11}), obtenidos en el primer plano de referencia (P1) entre el primer sensor (S1) y el material desconocido (M), junto con el análisis de esta discontinuidad mediante un modelo. Este modelo es difícil de conseguir, debido a la estructura semi-abierta de los sensores propuestos y de la discontinuidad entre el primer sensor (S1) y el material (M). En el primer plano de referencia (P1), entre el primer sensor (S1) y el material (M) a caracterizar, se produce una reflexión compleja debida a la contribución del modo fundamental cuasi-TEM que se propaga en el sensor (S1) y también a los efectos de orden superior (radiación, modos superiores, etc.). En la actualidad, no hay disponible ningún modelo eficiente y preciso de esta discontinuidad. Por ello, se propone generar dichos modelos mediante una técnica híbrida de modelado basada en lógica borrosa (*fuzzy logic*). Esta técnica requiere tres métodos de modelado, representados en las figuras 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B. Estos métodos son versátiles, dado que se pueden aplicar a cualquier sensor (S1, S2, S3) de la invención y a diferentes formas y estado de material desconocido (M) sólido, semisólido o líquido. La figura 2 representa algunos ejemplos de acondicionamiento de material desconocido (M) sólido que pueden ser utilizados en la técnica de caracterización ilustrada de la figura 1. El carácter híbrido de los métodos de las figuras 5A, 5B, 7A, 7B requiere menos datos de simulación para conseguir la misma precisión que un enfoque clásico (C-MANFIS, figuras 6A, 6B) y mejora la capacidad de generalización. Entre los dos métodos híbridos de modelado de las figuras 5A, 5B, 6A, 6B, el método ECP-MANFIS de la figura 5A, 5B es el más adecuado para conseguir el modelo teórico preciso de la discontinuidad entre el sensor (S1, S2, S3) y el material desconocido (M) a caracterizar, dado que en su sistema borroso (MANFIS₂) se introduce una entrada de conocimiento previa (ECP) proveniente del modelo grueso, lo que facilita el aprendizaje y su capacidad de generalización. El método híbrido de modelado con diferencias de salidas (DS-MANFIS) de las figuras 7A, 7B se justifica en la técnica de extracción de las

propiedades eléctricas de un material (M) bajo prueba del sistema de medidas de la figura 1, dado que se aplica para sustraer los efectos derivados de las medidas experimentales (errores de reproductibilidad, errores de módulos y fases, etc.) y que no pueden ser considerados en el modelo teórico.

5

En las figuras 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B, MANFIS es una extensión de ANFIS para producir múltiples salidas en el modelo. ANFIS es un sistema de inferencia que implementa reglas borrosas para producir una única respuesta de salida de tipo real en función de varias entradas [Jang1993]. MANFIS se combina de distintas formas con modelos finos (figuras 6A, 6B), finos y gruesos (figuras 5A, 5B) y también con medidas (figuras 7A, 7B). El modelo fino es preciso, mientras que el modelo grueso es de menor precisión. El modelo fino y el modelo grueso se obtienen, respectivamente, mediante un simulador electromagnético y el método clásico (C-MANFIS) de las figuras 6A, 6B. Las medidas (figuras 7A, 7B) están realizadas en materiales estándares con propiedades conocidas en función de la frecuencia. En estos métodos ilustrados en las figuras 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B, (X, X_{ME}, X_M) son vectores de entrada, mientras que $(Y_{MF}, Y_{MG}, Y_{ME}, Y)$ representan, respectivamente, los vectores de salida del modelo fino, del modelo grueso, del material estándar y de las medidas del material desconocido bajo prueba. Los vectores de entrada incluyen los datos de la frecuencia discreta, el módulo y la fase del coeficiente de reflexión complejo (S_{11}), obtenidos mediante simulaciones electromagnéticas (X), medidas de materiales estándares (X_{ME}) y medidas de materiales desconocidos (X_M) en el primer plano de referencia (P1) del sistema de medidas de la figura 1. Los vectores de salida contienen las permitividades complejas ($\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$) del material bajo prueba correspondiente al modelo fino (Y_{MF}), modelo grueso (Y_{MG}), material estándar (Y_{ME}) y del material desconocido bajo prueba (Y). En el caso del método de modelado clásico C-MANFIS (figuras 6A, 6B), MANFIS₁ se entrena en función de los vectores de entrada (X) y de salida (Y_{MF}). Para el método de modelado con entrada de conocimiento previa ECP-MANFIS (figuras 5A, 5B), se utiliza la salida del modelo grueso ($Y_{MG} = Y_{C-ANFIS}$) e (X) como vector de entrada y el vector de salida (Y_{MF}) para entrenar MANFIS₂. Finalmente, el método de modelado DS-MANFIS (figura 7A) realiza la diferencia entre el vector de salida (Y_{ME}), obtenido durante las medidas de diferentes materiales estándares, y el vector de salida del modelo ECP-MANFIS para entrenar MANFIS₃ en función del vector de entrada (X_{ME}).

El número (i) de ANFIS incluido en MANFIS₁, MANFIS₂ y MANFIS₃ es igual al número de parámetros del vector de salida. Dado que todos los métodos de modelado ilustrados en las

35

figuras 5A, 5B, 6A, 6B, 7A, 7B tienen la misma longitud de vector de salida, serán necesarios dos sistemas de inferencia ANFIS: uno para la permitividad real (ε_r') y el otro para la permitividad imaginaria (ε_r''). El objetivo de los métodos de modelado C-MANFIS y ECP-MANFIS, es encontrar las salidas ($Y_{MG} = Y_{C-MANFIS}$) e ($Y_{ECP-MANFIS}$) de MANFIS₁ y MANFIS₂ tan ajustadas como sea posible a la permitividad compleja (Y_{MF}) teórica del material (M) bajo prueba. De este modo, se consigue un modelo teórico ECP-ANFIS (figura 5B) preciso ($Y_{ECP-MANFIS} \cong Y_{MF}$) (figura 5A) y computacionalmente eficiente cuando se aplica en la entrada un vector (X). Por otro lado, el método DS-ANFIS consiste en conseguir una salida de MANFIS₃ ajustada a la diferencia entre los vectores de salida (Y_{ME}) y el modelo ECP-MANFIS ($Y_{ECP-MANFIS}$) (figura 7A). De este modo en el modelo resultante de la figura 7B, se pueden compensar los efectos derivados del proceso de medidas (errores de reproductibilidad, errores de módulos y fases, etc.) que no pueden ser tenidos en cuenta en el modelado teórico (figura 5B).

Para ilustrar el funcionamiento de los sensores propuestos en esta invención, se presentan algunos resultados extraídos de simulaciones electromagnéticas del sensor *microstrip* ilustrado en las figuras 3A, 3B, en circuito abierto, para dos tipos de materiales desconocidos (M) sólidos bajo prueba: isótropo y anisótropo uniaxial. Las dimensiones y las características del sensor *microstrip* en circuito abierto, así como de los materiales desconocidos (M) bajo prueba se recogen en las Tablas 1 y 2. El sensor *microstrip* ilustrado en las figuras 3A, 3B, con un primer substrato (Su1) de espesor (h_1) y propiedades constantes en función de la frecuencia ($\varepsilon_r' = 9.8$ y $\text{tg}\delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' = 0.001$), fue optimizado para obtener una impedancia característica $Z_c = 50 \Omega$. Las propiedades de los materiales (isótropo y anisótropo uniaxial) bajo prueba (Tabla 2) se consideraron constantes en función de la frecuencia en las simulaciones. Los datos del modelo fino para entrenar y generar los modelos C-MANFIS y ECP-MANFIS se obtuvieron mediante un simulador comercial basado en elementos finitos para los rangos de parámetros presentados en la Tabla 3. Las simulaciones electromagnéticas se realizaron en el rango de frecuencias entre 0.01GHz y 10GHz. Los modelos C-MANFIS y ECP-MANFIS se desarrollaron a partir de funciones de pertenencias de tipo gaussiana [Jang1993]. Para cada entrada de ANFIS, se aplicó un número (n_g) de funciones de pertenencia: 3 para el modelado C-MANFIS y 4 para el modelado ECP-MANFIS. El número de reglas borrosas (*fuzzy*) para cada ANFIS es igual a $c = (n_g)^{n_g}$. Finalmente, 3 iteraciones fueron necesarias para entrenar cada ANFIS.

Las propiedades eléctricas ($\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$) de un material (M) sólido isótropo desconocido bajo prueba se obtienen aplicándole en su superficie el extremo del primer sensor (S1) *microstrip* en circuito abierto y midiendo (simulando en este ejemplo ilustrativo) el parámetro de reflexión complejo (S_{11}) en función de la frecuencia, como en la figura 1. Los datos de frecuencia, el módulo y la fase del coeficiente de reflexión complejo (S_{11}) se introducen en un vector (X) y se aplica a la entrada del modelo ECP-ANFIS (figura 5B) que proporciona la permitividad compleja en función de la frecuencia del material (M) desconocido bajo prueba. La figura 8 representa los resultados obtenidos. Se puede observar que la permitividad compleja coincide con aquella definida inicialmente en las simulaciones electromagnéticas (Tabla 2: $\varepsilon_r' = 8.5$, $\text{tg}\delta = \varepsilon_r''/\varepsilon_r' = 0.007$). Las propiedades de este material no fueron utilizadas (Tabla 3) para entrenar y obtener el modelo ECP-ANFIS. La Tabla 4 recoge los errores relativos mínimos, medios y máximos en el rango de frecuencia entre 0.01GHz y 10GHz, debido al método de extracción propuesto para obtener la permitividad real (ε_r') y el ángulo de pérdidas ($\text{tg}\delta = \varepsilon_r''/\varepsilon_r'$) del material desconocido (M) isótropo (Tabla 2) bajo prueba. Como cabía esperar con este método no resonante de caracterización de materiales, los errores relativos para obtener la permitividad real (ε_r') son pequeños (error máximo < 1.5%). Sin embargo, éstos son mayores para extraer el ángulo de pérdidas ($\text{tg}\delta$).

Las propiedades eléctricas ($\varepsilon_{r\perp} = \varepsilon_{r\perp}' - j\varepsilon_{r\perp}''$ y $\varepsilon_{r\parallel} = \varepsilon_{r\parallel}' - j\varepsilon_{r\parallel}''$) del tensor dieléctrico de un material desconocido (M) sólido anisótropo uniaxial bajo prueba, se obtienen a partir de dos medidas del coeficiente de reflexión en función de la frecuencia mediante el sistema experimental de la figura 1. Para las dos medidas, se consideró lo siguiente:

- la configuración de la figura 2A para el material desconocido (M) anisótropo uniaxial;
- la configuración de la figura 3A para el sensor (S1) *microstrip*;
- que el material desconocido (M) anisótropo presenta un eje óptico en el eje (y).

De este modo, la primera medida del coeficiente de reflexión complejo ($S_{11,1}$) se obtiene en el plano (x, y) de material desconocido (M) anisótropo uniaxial bajo prueba. Para la segunda medida del coeficiente de reflexión complejo ($S_{11,2}$), donde el subíndice 2 indica la segunda medida, se gira 90° alrededor del eje (0, x) el material (M) anisótropo uniaxial de manera que la extremidad del sensor *microstrip* se aplique en la superficie del plano (x, z) de éste.

Otra alternativa al procedimiento anterior sería girar el primer sensor (S1) 90° en vez del material (M). Introduciendo los datos de frecuencia, el coeficiente de reflexión complejo de una primera medida (S_{11,1}) y el coeficiente de reflexión complejo de una segunda medida (S_{11,2}) en dos vectores (X₁) y (X₂) y aplicándolos a la entrada del modelo ECP-ANFIS (figura 5B), se obtienen dos permitividades complejas del material desconocido (M) anisótropo uniaxial en función de la frecuencia: $\varepsilon_{r1} = \varepsilon'_{r1} - j\varepsilon''_{r1}$ y $\varepsilon_{r2} = \varepsilon'_{r2} - j\varepsilon''_{r2}$. La primera permitividad compleja ($\varepsilon_{r1} = \varepsilon'_{r1} - j\varepsilon''_{r1}$) corresponde a las propiedades eléctricas ortogonales ($\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r\perp} = \varepsilon'_{r\perp} - j\varepsilon''_{r\perp}$) del tensor dieléctrico del material desconocido (M) sólido anisótropo uniaxial bajo prueba, dado que las medidas de la onda de reflexión se realizaron perpendicularmente al eje óptico (y) del material desconocido (M) bajo prueba. La segunda permitividad compleja ($\varepsilon_{r2} = \varepsilon'_{r2} - j\varepsilon''_{r2}$) resulta en una permitividad efectiva compleja ($\varepsilon_{r2} = \varepsilon_{ref} = \varepsilon'_{ref} - j\varepsilon''_{ref}$) como consecuencia de girar 90° alrededor del eje (0, x) el material desconocido (M) anisótropo. Si se desprecian las deformaciones de los campos debido al comportamiento anisótropo, esta permitividad efectiva compleja se puede definir de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_{r//} + \varepsilon_{r\perp}}{2} \quad [2]$$

De este modo, se puede calcular la permitividad paralela compleja a partir de las medidas de las permitividades efectivas y ortogonales complejas:

$$\varepsilon_{r//} = 2 \varepsilon_{ref} - \varepsilon_{r\perp} \quad [3]$$

Las figuras 9A y 9B representan los resultados obtenidos con el sensor (S1) *microstrip* para el material (M) anisótropo uniaxial de la tabla 2 bajo prueba mediante el procedimiento de la invención. Se puede observar que las propiedades eléctricas $\varepsilon_{r\perp} = \varepsilon'_{r\perp} - j\varepsilon''_{r\perp}$ y $\varepsilon_{r//} = \varepsilon'_{r//} - j\varepsilon''_{r//}$ del tensor dieléctrico coinciden con aquellas inicialmente definidas en las simulaciones electromagnéticas recogidas en la tabla 2: $\varepsilon'_{r//} = 9.5$, $\text{tg}\delta_{//} = 0.0045$, $\varepsilon'_{r\perp} = 8.5$, $\text{tg}\delta_{\perp} = 0.0035$. Las propiedades de este material (M) anisótropo no fueron utilizadas (Tabla 3) para entrenar y obtener el modelo ECP-MANFIS. La Tabla 5 recoge los errores relativos mínimos, medios y máximos en el rango de frecuencia entre 0.01GHz y 10GHz, debido al

método de extracción propuesto para obtener las componentes de permitividad compleja del tensor del material (M) anisótropo uniaxial de la tabla 2 bajo prueba. Del mismo modo que para la caracterización de un material (M) isotrópico, este método no resonante permite extraer las permitividades reales del tensor de un material (M) anisótropo de manera
 5 suficientemente precisa. Como se puede observar en la Tabla 5, los errores relativos para obtener las partes reales del tensor ($\varepsilon'_{r//}$, $\varepsilon'_{r\perp}$) del material (M) anisótropo uniaxial bajo prueba son relativamente pequeños (error máximo < 4.4%). Estos errores pueden ser aún menores, entrenando la técnica de extracción propuesta basada en lógica borrosa no solamente con materiales isotrópicos (Tabla 3), sino también con materiales anisótropos.

10

Las figuras 10 y 11 presentan configuraciones alternativas a los sensores de tipo *microstrip* ilustrado en la figura 3A y *coplanar* ilustrado en la figura 4A, respectivamente. Ambas configuraciones alternativas están encapsuladas mediante una estructura rectangular formada por cuatro superficies de encapsulado (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}) con espesores (t_{S1} , t_{S2} , t_{S3} ,
 15 t_{S4}) y están rellenas de dos sustratos ($Su1$, $Su2$) de dieléctricos ($\varepsilon_{r1} = \varepsilon'_{r1} - j\varepsilon''_{r1}$) y ($\varepsilon_{r2} = \varepsilon'_{r2} - j\varepsilon''_{r2}$). Las superficies (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}) no son necesariamente todas conductoras. Otras variantes a las figuras 10 y 11 serían considerar las diferentes combinaciones de estructuras, eliminando una superficie o varias superficies (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}).

20

Además de diferentes configuraciones alternativas de sensores, también puede haber diferentes configuraciones alternativas de sistemas de medida. Así, como alternativas al sistema de medidas de la figura 1, se representan dos sistemas de medidas alternativos en las figuras 12 y 13. Los equipos de medidas (EM) RF/microondas (analizadores de redes
 25 vectoriales) suelen disponer de dos a cuatro puertos de salidas independientes. De este modo, a partir del sistema de medidas de la figura 12 con dos sensores ($S1$, $S2$), por ejemplo *microstrip*, orientados a 90° según dos ejes del sistema de coordenadas (x , y , z), es posible realizar simultáneamente las dos medidas en reflexión de materiales desconocidos (M) anisótropos uniaxiales en un amplio rango de frecuencias RF/microondas y extraer las
 30 dos componentes de permitividad compleja ($\varepsilon_{r//}$, $\varepsilon_{r\perp}$) del tensor. En el caso de materiales desconocidos (M) anisótropos biaxiales con tres componentes de permitividad compleja (ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{zz}) en la diagonal del tensor, se puede utilizar el sistema de medidas simultáneas de tres coeficientes de reflexión de la figura 13 con tres sensores ($S1$, $S2$, $S3$), orientados a 90° según los tres ejes del sistema de coordenadas (x , y , z). Debido a la

configuración de los campos electromagnéticos de uno y otro sensor, también se puede aplicar una combinación *microstrip* (figura 3A) y *coplanar* (figura 4A) o una combinación de algunas configuraciones alternativas *microstrip* (figura 10) y *coplanar* (figura 11) a los dos sistemas de medidas de las figuras 12 y 13 para conseguir el mismo propósito.

5

Conforme se ha descrito, un primer aspecto de la invención se refiere a un sistema para caracterización electromagnética de materiales que comprende:

- 1a) un primer sensor (S1) aplicado a un material desconocido (M);
- 1b) un equipo de medidas (EM);
- 10 1c) una primera guía de transmisión (G1) conectando el primer sensor (S1) con el equipo de medidas (EM);
- 1d) una primera transición (T1) configurada para realizar una conexión entre el primer sensor (S1) y la primera guía de transmisión (G1);
- 1e) una segunda transición (T2) configurada para realizar una conexión entre la primera
- 15 guía de transmisión (G1) y el equipo de medidas (EM).

Conforme a otras características de la invención:

- 2. El equipo de medidas (EM) puede estar configurado para realizar medidas en reflexión del
- 20 primer sensor (S1) en función de la frecuencia y con respecto a un primer plano de referencia (P1).

3. El sistema puede comprender:

- 3a) una unidad de procesamiento externa (UPE) configurada para:
 - 25 3a1) extraer propiedades electromagnéticas del material desconocido (M) a partir de datos de medidas en reflexión del primer sensor (S1);
 - 3a2) controlar un funcionamiento del sistema;
 - 3a3) ejecutar procesos de calibración del sistema;
- 3b) una primera guía de datos (GD1) conectando el equipo de medidas (EM) con la unidad
- 30 de procesamiento externa (UPE);
- 3c) una pantalla (P) de visualización configurada para mostrar resultados de las propiedades electromagnéticas extraídas del material desconocido (M);
- 3d) una segunda guía de datos (GD2) conectando la unidad de procesamiento externa (UPE) con la pantalla (P) de visualización.

35

4. El sistema puede comprender: medios de almacenamiento (MA):

4a) configurados para recopilar datos de medidas provenientes del primer sensor (S1);

4b) situados en una ubicación seleccionada entre: el equipo de medidas (EM), la unidad de procesamiento externa (UPE) y ambos.

5

5. El primer sensor (S1) puede tener tiene una terminación en circuito abierto. El primer sensor (S1) puede ser de un tipo seleccionado entre *microstrip*, *coplanar* y una configuración alternativa.

10 6. El primer sensor (S1) puede comprender:

6a) un primer sustrato (Su1) que tiene:

6a1) una primera cara (1);

6a2) una segunda cara (2), opuesta a la primera cara (1);

6a3) un primer espesor (h_1) entre la primera cara (1) y la segunda cara (2);

15 6b) una tira conductora (TC) en la primera cara (1);

6c) un plano conductor (PC) en la segunda cara (2).

7a) El primer sustrato (Su1) puede tener una anchura de primer sustrato (W_{Su1}) y una longitud de primer sustrato (L_{Su1});

20 7b) la tira conductora (TC) puede tener una anchura de tira (W_{TC}) y una longitud de tira (L_{TC});

7c) el plano conductor (PC) puede tener una anchura de plano conductor (W_{PC}) y una longitud de plano conductor (L_{PC});

7d) la anchura de tira (W_{TC}) puede ser menor que la anchura de primer sustrato (W_{Su1}).

25 En la realización alternativa ilustrada en la figura 3A:

7e) la anchura de plano conductor (W_{PC}) puede coincidir con la anchura de primer sustrato (W_{Su1});

7f) la longitud de tira (L_{TC}) y longitud de plano conductor (L_{PC}) pueden coincidir con la longitud de primer sustrato (L_{Su1}).

30

8a) La tira conductora (TC) puede tener un espesor de tira (t_{TC});

8b) el plano conductor (PC) puede tener un espesor de plano conductor (t_{PC}).

Conforme a realizaciones alternativas:

8c) el espesor de tira (t_{TC}) puede coincidir con el espesor de plano conductor (t_{PC});

35 8d) el espesor de tira (t_{TC}) y el espesor de plano conductor (t_{PC}) pueden ser menores que el

primer espesor (h_1).

9. El primer sensor (S1) puede comprender:

9a) un primer sustrato (Su_1) que tiene:

5 9a1) una primera cara (1)

9a2) una segunda cara (2), opuesta a la primera cara (1);

9a3) un primer espesor (h_1) entre la primera cara (1) y la segunda cara (2);

9b) una tira conductora (TC) en la primera cara (1);

10 9c) dos franjas conductoras (FC1, FC2) en la primera cara (1), una a cada lado de la tira conductora (TC), separadas de la tira conductora (TC) unas distancias (R_1, R_2).

10a) El primer sustrato (Su_1) puede tener una anchura de primer sustrato (W_{Su_1}) y una longitud de primer sustrato (L_{Su_1});

15 10b) la tira conductora (TC) puede tener una anchura de tira (W_{TC}) y una longitud de tira (L_{TC});

10c) las dos franjas conductoras (FC1, FC2) pueden tener anchuras de franja (D_1, D_2) y longitudes de franja (L_{D_1}, L_{D_2}).

Conforme a realizaciones alternativas:

20 10d) una anchura formada por la anchura de tira (W_{TC}), más las anchuras de franja (D_1, D_2), más las distancias (R_1, R_2) puede ser menor que la anchura de primer sustrato (W_{Su_1});

10e) la longitud de tira (L_{TC}) y las longitudes de franja (L_{D_1}, L_{D_2}) pueden coincidir con la longitud de primer sustrato (L_{Su_1}).

10f) las anchuras de franja (D_1, D_2) pueden ser iguales;

25 10g) las distancias (R_1, R_2) pueden ser iguales.

11a) La tira conductora (TC) puede tener un espesor de tira (t_{TC});

11b) las franjas conductoras (FC1, FC2) pueden tener espesores de franja (t_1, t_2).

Conforme a realizaciones alternativas:

30 11c) el espesor de tira (t_{TC}) puede coincidir con los espesores de franja (t_1, t_2);

11d) el espesor de tira (t_{TC}) y los espesores de franja (t_1, t_2) pueden ser menores que el primer espesor (h_1).

12. El primer sensor (S1) puede comprender:

12a) un segundo sustrato (Su2):

12a1) apilado sobre el primer sustrato (Su1);

12b) un encapsulado (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}) configurado para envolver el primer sustrato (Su1) y el segundo sustrato (Su2).

5

13a) El segundo sustrato (Su2):

13a1) puede tener una anchura de segundo sustrato (W_{Su2}) coincidente con la anchura del primer sustrato (W_{Su1})

puede comprender:

10 13a2) una tercera cara (3);

13a3) una cuarta cara (4), opuesta a la tercera cara (3);

13a4) un espesor de segundo sustrato (h2) entre la tercera cara (3) y la cuarta cara (4);

13b) el encapsulado (S_{P1} , S_{P2} , S_{P3} , S_{P4}) tiene una sección transversal rectangular que tiene:

15 13b1) una altura suma del espesor del primer sustrato (h1) y del espesor de segundo sustrato (h2); y

13b2) una anchura interior coincidente con la anchura del primer sustrato (W_{Su1});

14. El sistema puede comprender:

20 14a) un segundo sensor (S2) aplicado a un material desconocido (M);

14b) una segunda guía de transmisión (G2) conectando el segundo sensor (S2) con el equipo de medidas (EM);

14c) una tercera transición (T3) configurada para realizar una conexión entre el segundo sensor (S2) y la segunda guía de transmisión (G2);

25 14d) una cuarta transición (T4) configurada para realizar una conexión entre la segunda guía de transmisión (G2) y el equipo de medidas (EM);

15a) El segundo sensor (S2) puede estar colocado a 90° respecto al primer sensor (S1);

15b) el primer sensor (S1) y el segundo sensor (S2) pueden estar:

30 15b1) orientados según dos ejes de un sistema de coordenadas (x, y, z), y

15b2) configurados para obtener medidas simultáneamente.

En la realización ilustrada en la figura 12, el primer sensor (S1) y el segundo sensor (S2) están en un primer plano de referencia (P1).

35 16. El sistema puede comprender:

- 16a) un tercer sensor (S3) aplicado a un material desconocido (M);
- 16b) una tercera guía de transmisión (G3) conectando el tercer sensor (S3) con el equipo de medidas (EM);
- 16c) una quinta transición (T5) configurada para realizar una conexión entre el tercer sensor (S3) y la tercera guía de transmisión (G3);
- 5 16d) una sexta transición (T6) configurada para realizar una conexión entre la tercera guía de transmisión (G3) y el equipo de medidas (EM);
- 17a) El segundo sensor (S2) puede estar colocado a 90° respecto al primer sensor (S1);
- 10 17b) el tercer sensor (S3) puede estar colocado a 90° respecto al primer sensor (S1) y a 90° respecto al segundo sensor (S2);
- 17c) el primer sensor (S1), el segundo sensor (S2) y el tercer sensor (S3) pueden estar:
- 17c1) orientados según tres ejes de un sistema de coordenadas (x, y, z), y
- 17c2) configurados para obtener medidas simultáneamente en reflexión.
- 15 En la realización ilustrada en la figura 13, el primer sensor (S1) y el segundo sensor (S2) están en un primer plano de referencia (P1) y el tercer sensor (S3) está en un segundo plano de referencia (P2).

Un segundo aspecto de la invención se refiere a un método para la caracterización electromagnética de materiales con el sistema de descrito anteriormente. El método comprende:

- 18a) acondicionar el material desconocido (M) conforme a una configuración seleccionada entre una que comprende:
- 18a1) el material desconocido (M);
- 25 18a2) el material desconocido (M) depositado sobre un material conocido (M_c);
- 18a3) el material desconocido (M) depositado sobre un material conductor (M_{cond});
- 18a4) el material desconocido (M) depositado sobre dos capas que comprenden un material conocido (M_c) y un material conductor (M_{cond});
- 18a5) un material conocido (M_c) depositado sobre dos capas que comprenden el
- 30 material desconocido (M) y un material conductor (M_{cond}).

Conforme a otras características, el método puede comprender:

- 35 19a) sumergir total o parcialmente el sensor (S1, S2, S3) en un material desconocido (M)

semisólido o líquido;

20a) realizar medidas en reflexión en un dominio seleccionado entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia;

21a) realizar las medidas en reflexión en función de la temperatura;

5 22a) realizar las medidas *in situ* o *in vivo*.

REIVINDICACIONES

1. Sistema para caracterización electromagnética de materiales, tanto isótropos como anisótropos, y de forma no-destructiva, que comprende:

- 5 – un primer sensor (S1) en circuito abierto, de un tipo seleccionado de entre microstrip, coplanar o configuración planar;
- un equipo de medidas (EM) configurado para realizar medidas en reflexión del primer sensor (S1) en función de la frecuencia y con respecto a un primer plano de referencia (P1);
- 10 – una unidad de procesamiento externa (UPE) configurada para:
 - extraer propiedades electromagnéticas de un material desconocido (M) a partir de datos de medidas del primer sensor (S1);
 - controlar un funcionamiento del sistema;
 - ejecutar procesos de calibración del sistema;
- 15 – una primera guía de datos (GD1) conectando el equipo de medidas (EM) con la unidad de procesamiento externa (UPE);
- una pantalla (P) de visualización configurada para mostrar resultados de las propiedades electromagnéticas extraídas del material desconocido (M);
- una segunda guía de datos (GD2) conectando la unidad de procesamiento externa
- 20 (UPE) con la pantalla (P) de visualización;
- y unos medios de almacenamiento (MA) configurados para recopilar datos de medidas provenientes del primer sensor (S1) y situados en una ubicación seleccionada entre: el equipo de medidas (EM), la unidad de procesamiento externa (UPE) y ambos;

25 **caracterizado por que:**

una de las extremidades del sensor (S1) contacta con la superficie del material desconocido (M) isótropo o anisótropo a caracterizar; y la otra se conecta a la unidad de medidas (EM) RF/microondas mediante una primera guía de transmisión (G1) y dos transiciones (T1, T2), en el que primera transición (T1) realiza la transición entre el primer sensor (S1) y una

30 primera guía de transmisión (G1), mientras que una segunda transición (T2) efectúa la transición entre la primera guía de transmisión (G1) y el equipo de medidas (EM).

2. Sistema para caracterización electromagnética de materiales según la reivindicación 1 **caracterizado por que** el primer sensor (S1) comprende:

- 35 – un primer sustrato (Su1) que tiene una primera cara (1), una segunda cara (2),

opuesta a la primera cara (1); un primer espesor (h_1) entre la primera cara (1) y la segunda cara (2), una anchura de primer sustrato (W_{Su1}) y una longitud de primer sustrato (L_{Su1});

- una tira conductora (TC) en la primera cara (1) que tiene una anchura de tira (W_{TC}), una longitud de tira (L_{TC}) y un espesor de tira (t_{TC});
- un plano conductor (PC) en la segunda cara (2) tiene una anchura de plano conductor (W_{PC}), una longitud de plano conductor (L_{PC}) y un espesor de plano conductor (t_{PC});
- y en el que la longitud de tira (L_{TC}) y la longitud de plano conductor (L_{PC}) son coincidentes con la longitud de primer sustrato (L_{Su1}) y la anchura de tira (W_{TC}) es menor que la anchura de primer sustrato (W_{Su1}).

3. Sistema para caracterización electromagnética de materiales según cualquiera de las reivindicaciones 1-2 **caracterizado por que** comprende:

- un segundo sensor (S2) aplicado al material desconocido (M);
- una segunda guía de transmisión (G2) conectando el segundo sensor (S2) con el equipo de medidas (EM);
- una tercera transición (T3) configurada para realizar una conexión entre el segundo sensor (S2) y la segunda guía de transmisión (G2);
- una cuarta transición (T4) configurada para realizar una conexión entre la segunda guía de transmisión (G2) y el equipo de medidas (EM); y
- donde el segundo sensor (S2) está colocado a 90° respecto al primer sensor (S1) y el primer sensor (S1) y el segundo sensor (S2) están orientados según dos ejes de un sistema de coordenadas (x, y, z), y configurados para obtener medidas simultáneamente, caracterizando materiales anisótropos uniaxiales con dos valores distintos de permitividad.

4. Sistema para caracterización electromagnética de materiales según la reivindicación 3 **caracterizado por que** comprende:

- un tercer sensor (S3) aplicado al material desconocido (M);
- una tercera guía de transmisión (G3) conectando el tercer sensor (S3) con el equipo de medidas (EM);
- una quinta transición (T5) configurada para realizar una conexión entre el tercer sensor (S3) y la tercera guía de transmisión (G3);
- una sexta transición (T6) configurada para realizar una conexión entre la tercera guía

de transmisión (G3) y el equipo de medidas (EM); y

- donde el segundo sensor (S2) está colocado a 90° respecto al primer sensor (S1); el tercer sensor (S3) está colocado a 90° respecto al primer sensor (S1) y a 90° respecto al segundo sensor (S2); y
- 5 - donde el primer sensor (S1), el segundo sensor (S2) y el tercer sensor (S3) están orientados según tres ejes de un sistema de coordenadas (x, y, z), y configurados para obtener medidas simultáneamente en reflexión, caracterizando materiales anisótropos biaxiales con tres valores distintos de permitividad.

10

15

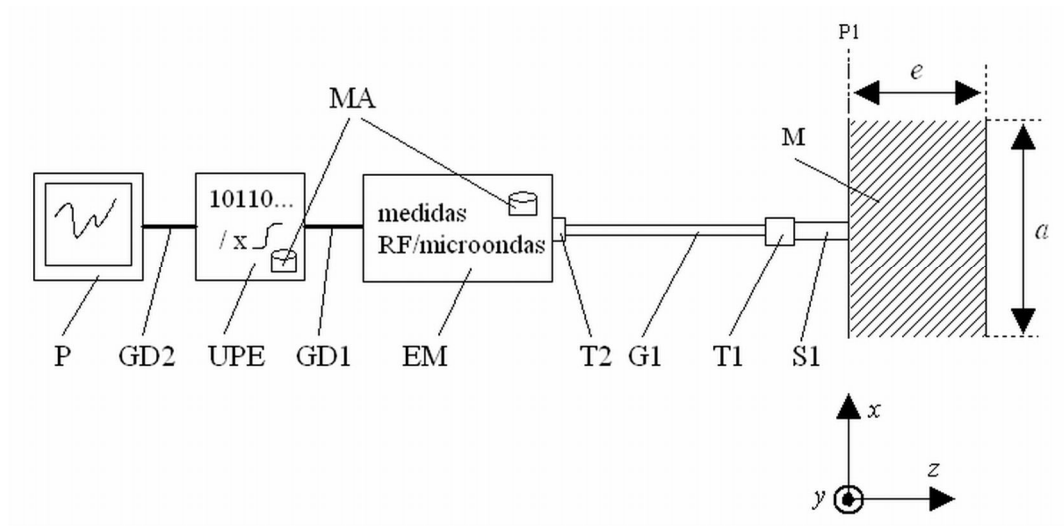


FIG. 1

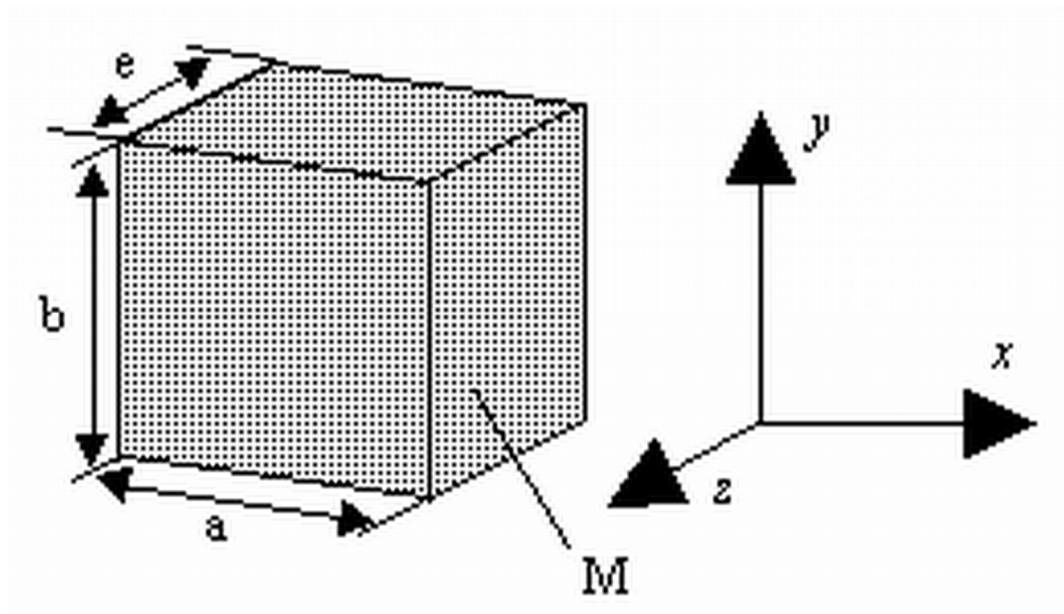


FIG. 2A

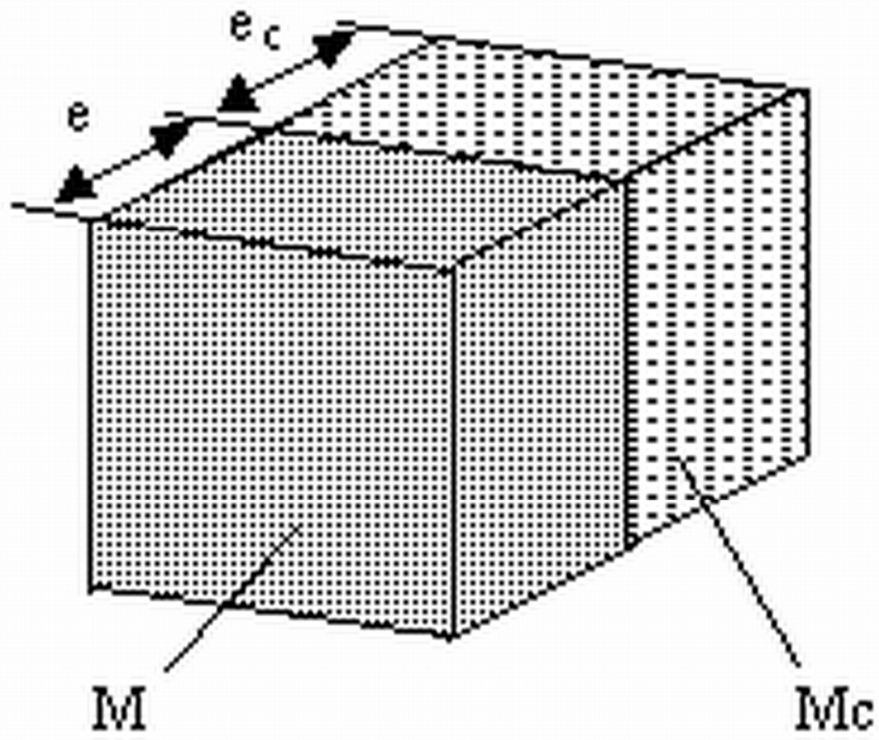


FIG. 2B

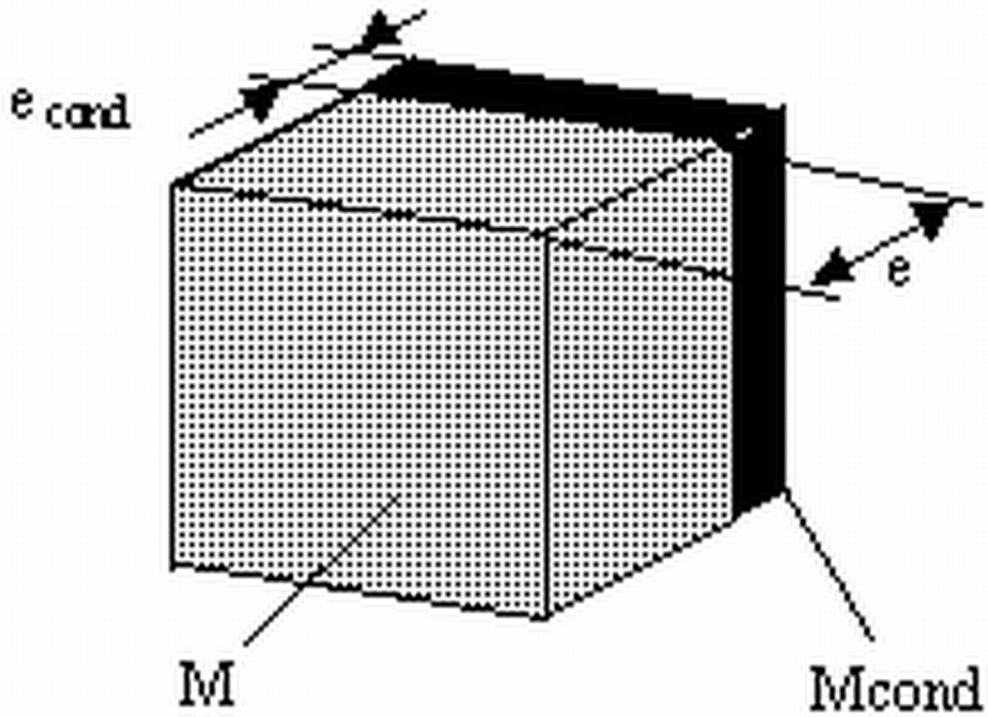


FIG. 2C

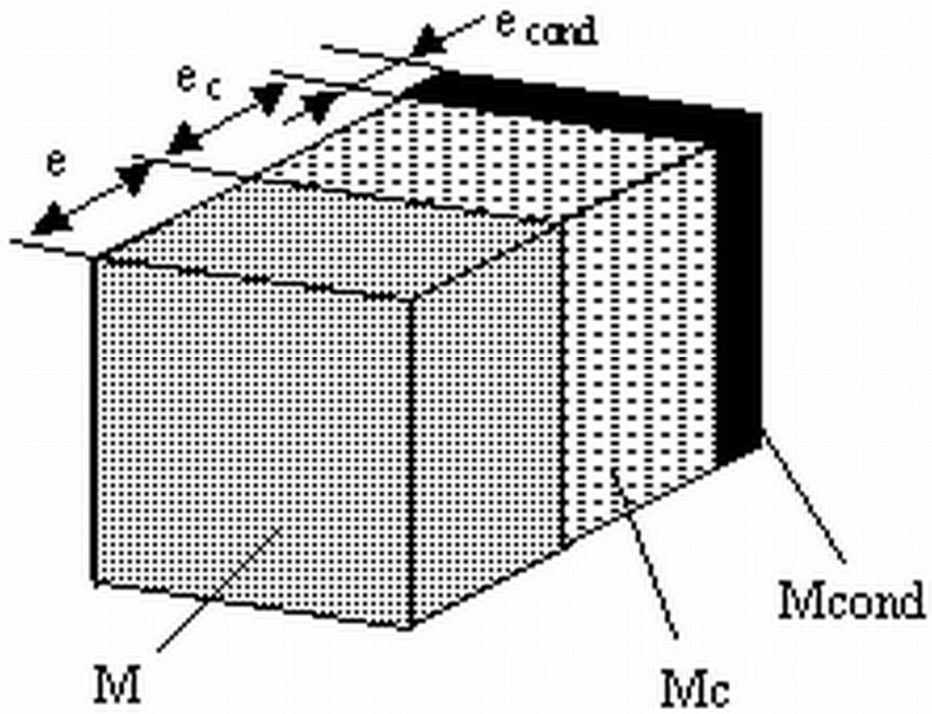


FIG. 2D

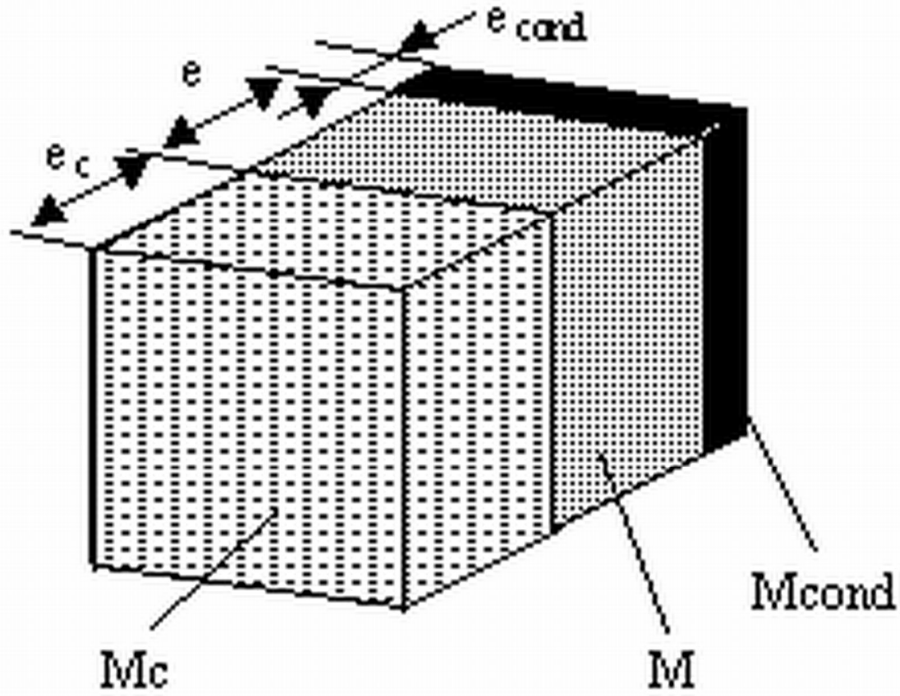


FIG. 2E

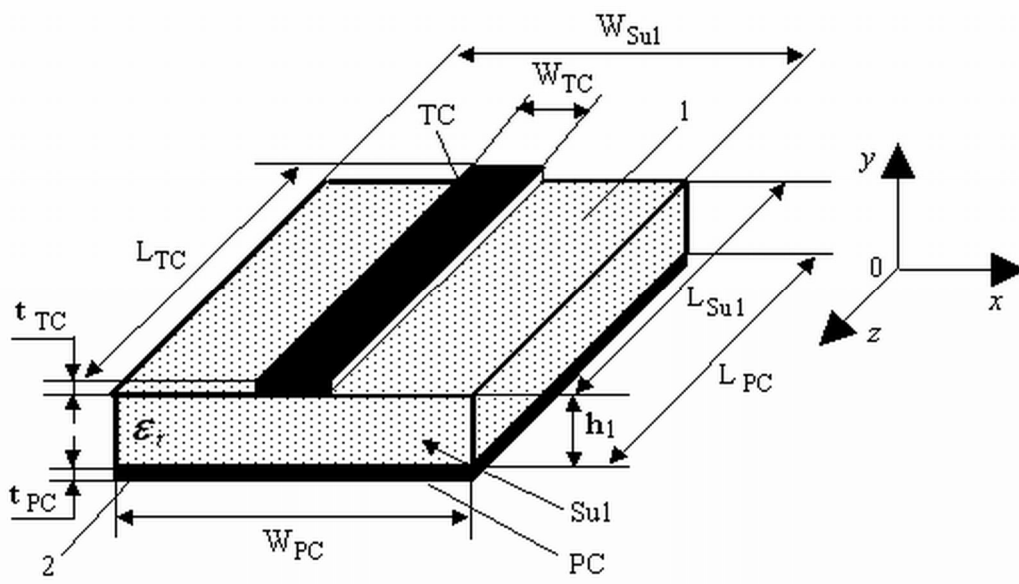


FIG. 3A

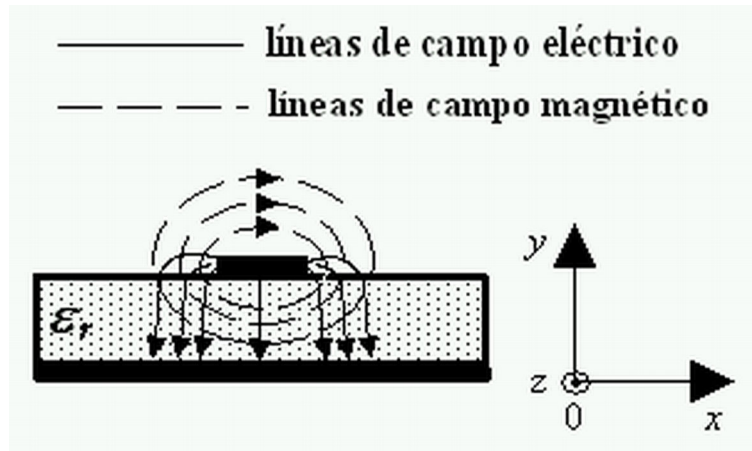


FIG. 3B

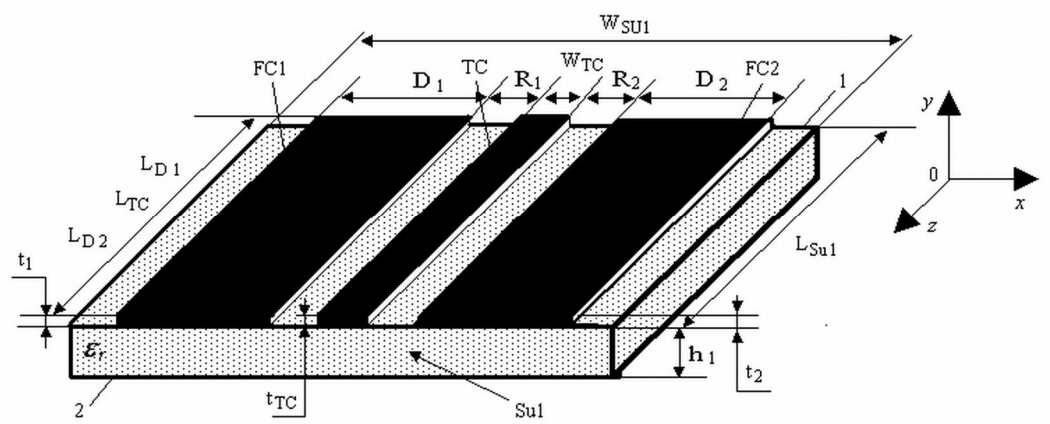
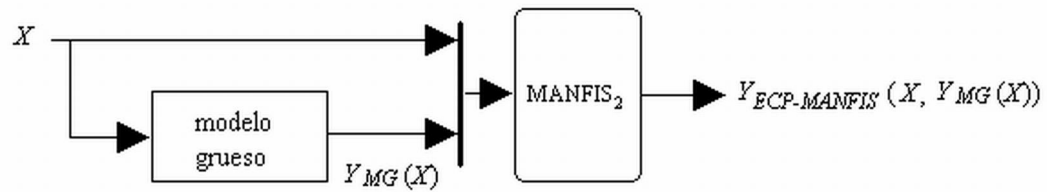
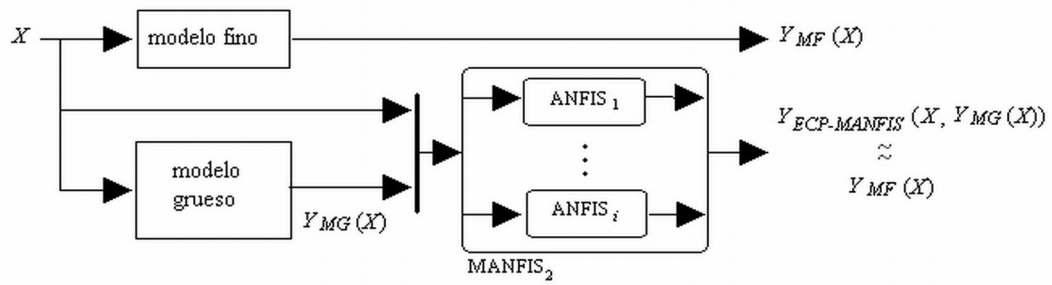
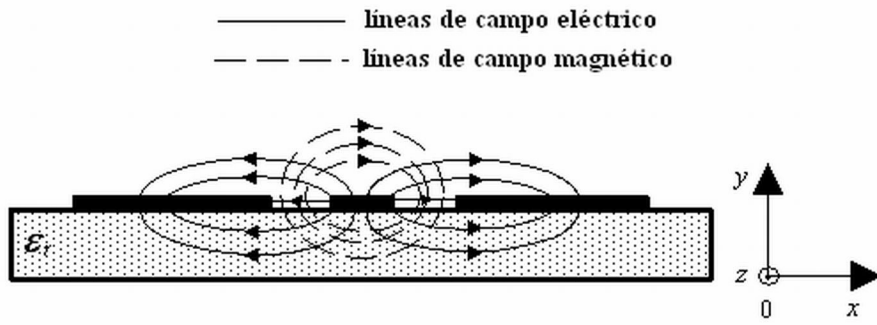


FIG. 4A



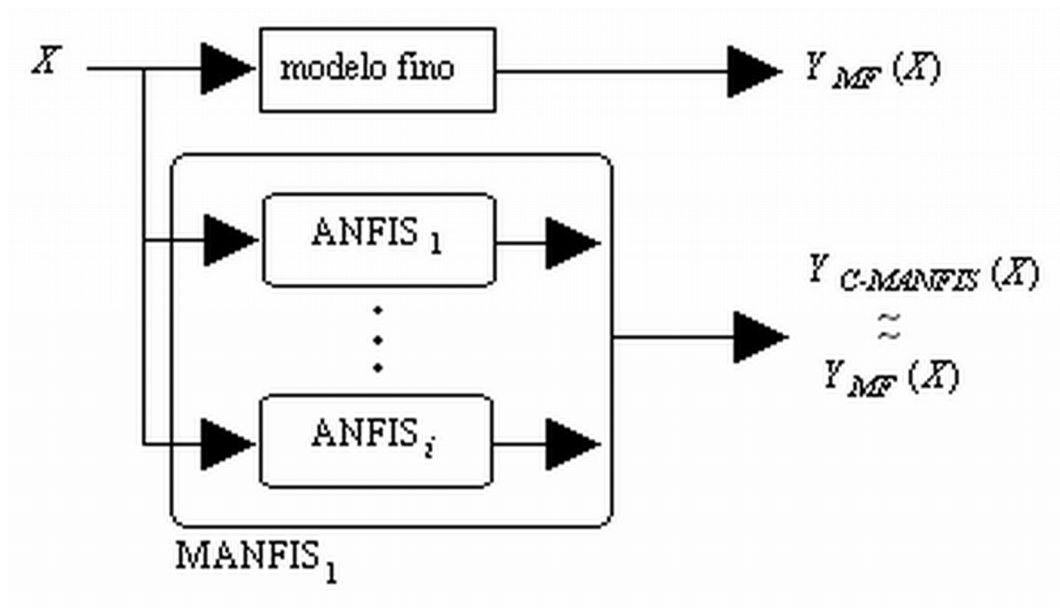


FIG. 6A

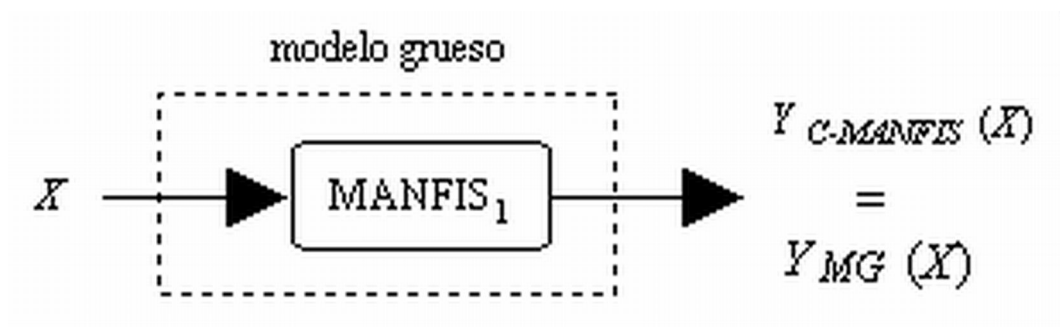


FIG. 6B

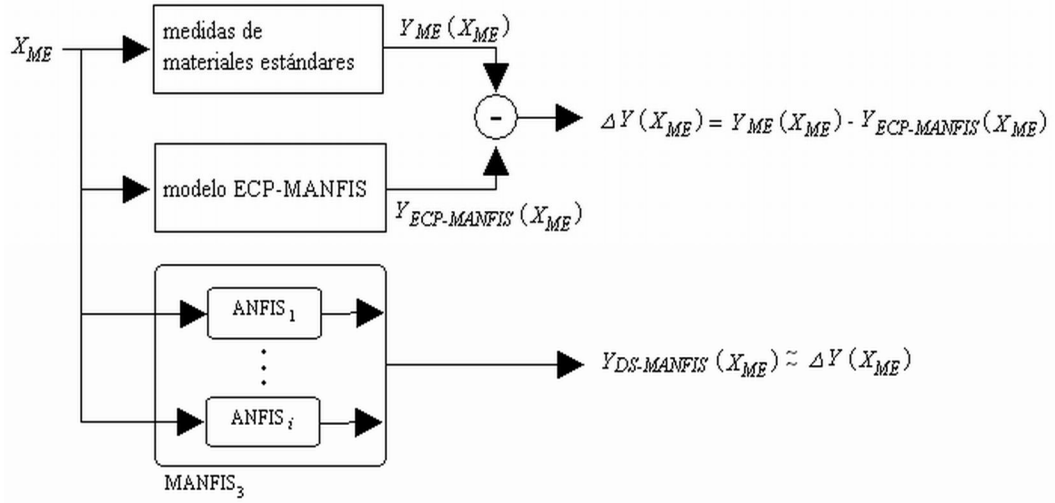


FIG. 7A

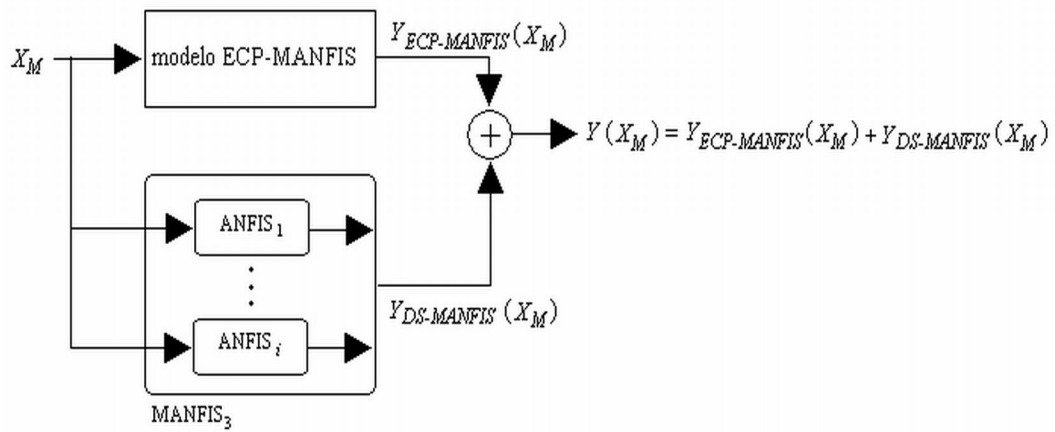


FIG. 7B

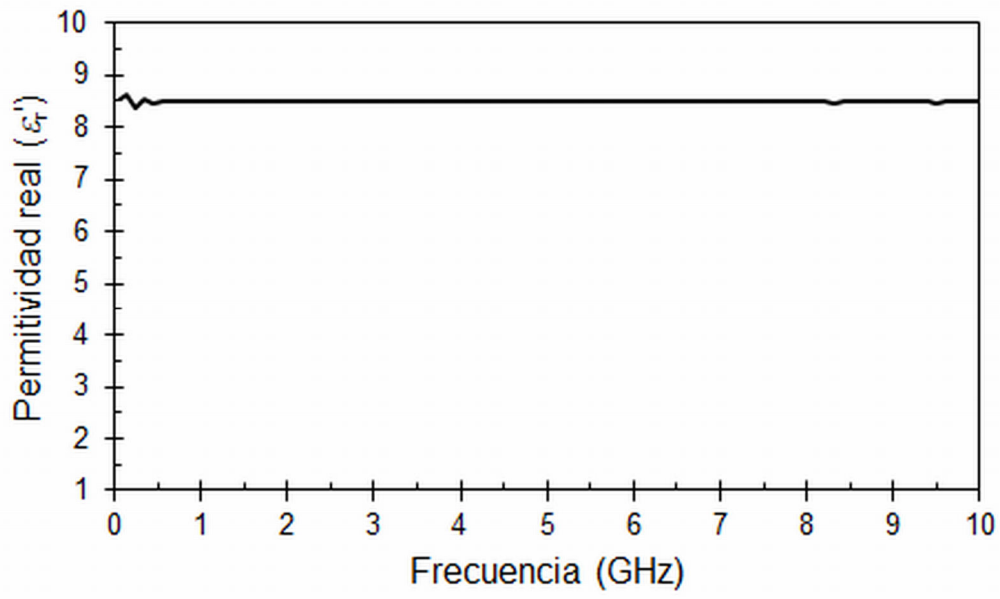


FIG. 8A

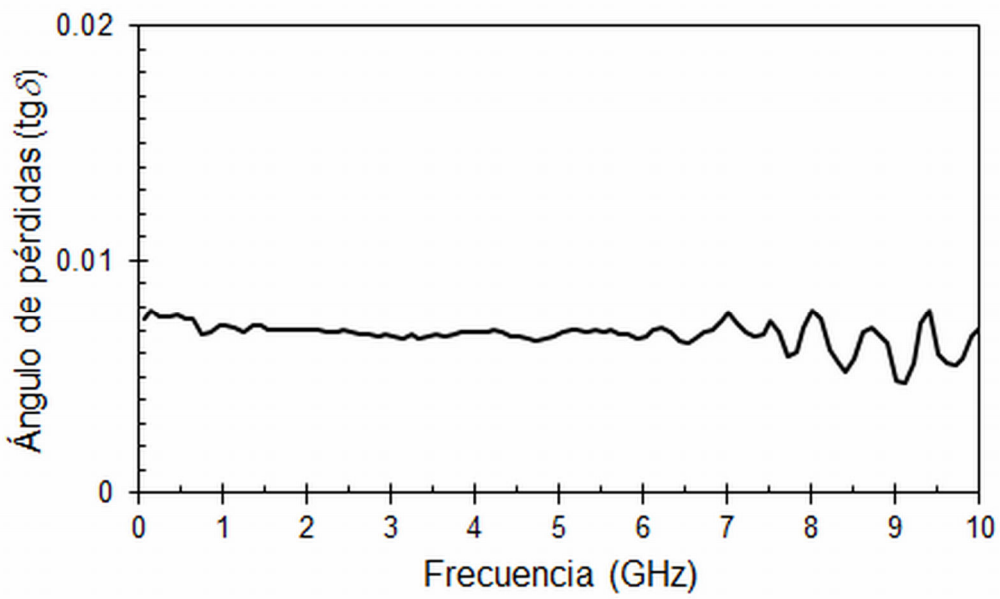


FIG. 8B

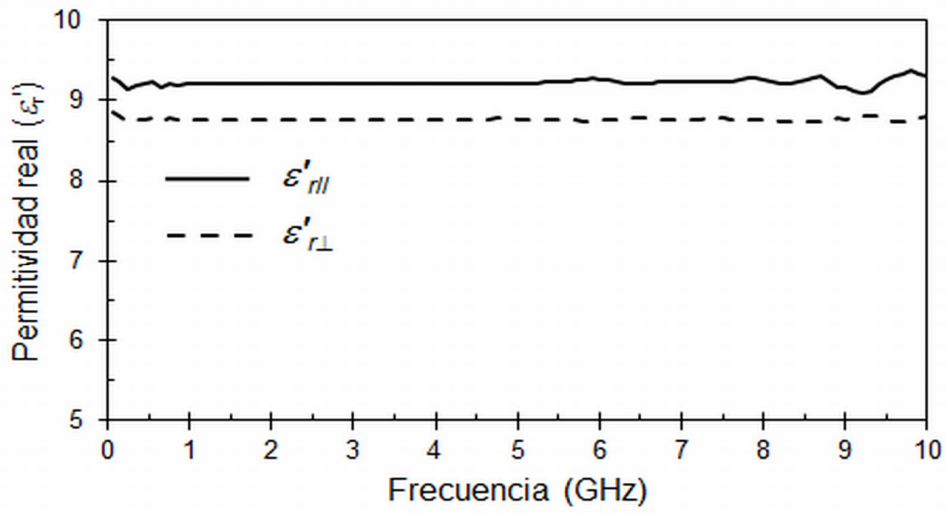


FIG. 9A

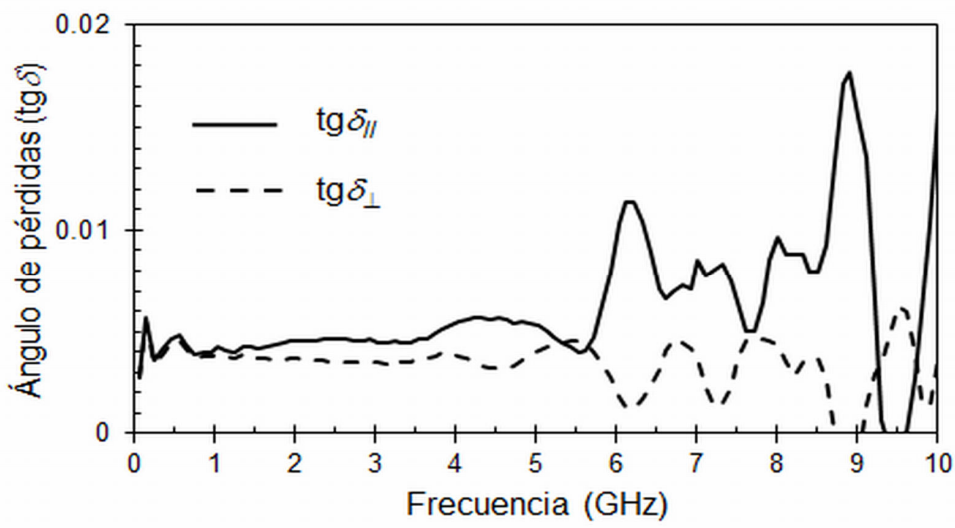


FIG. 9B

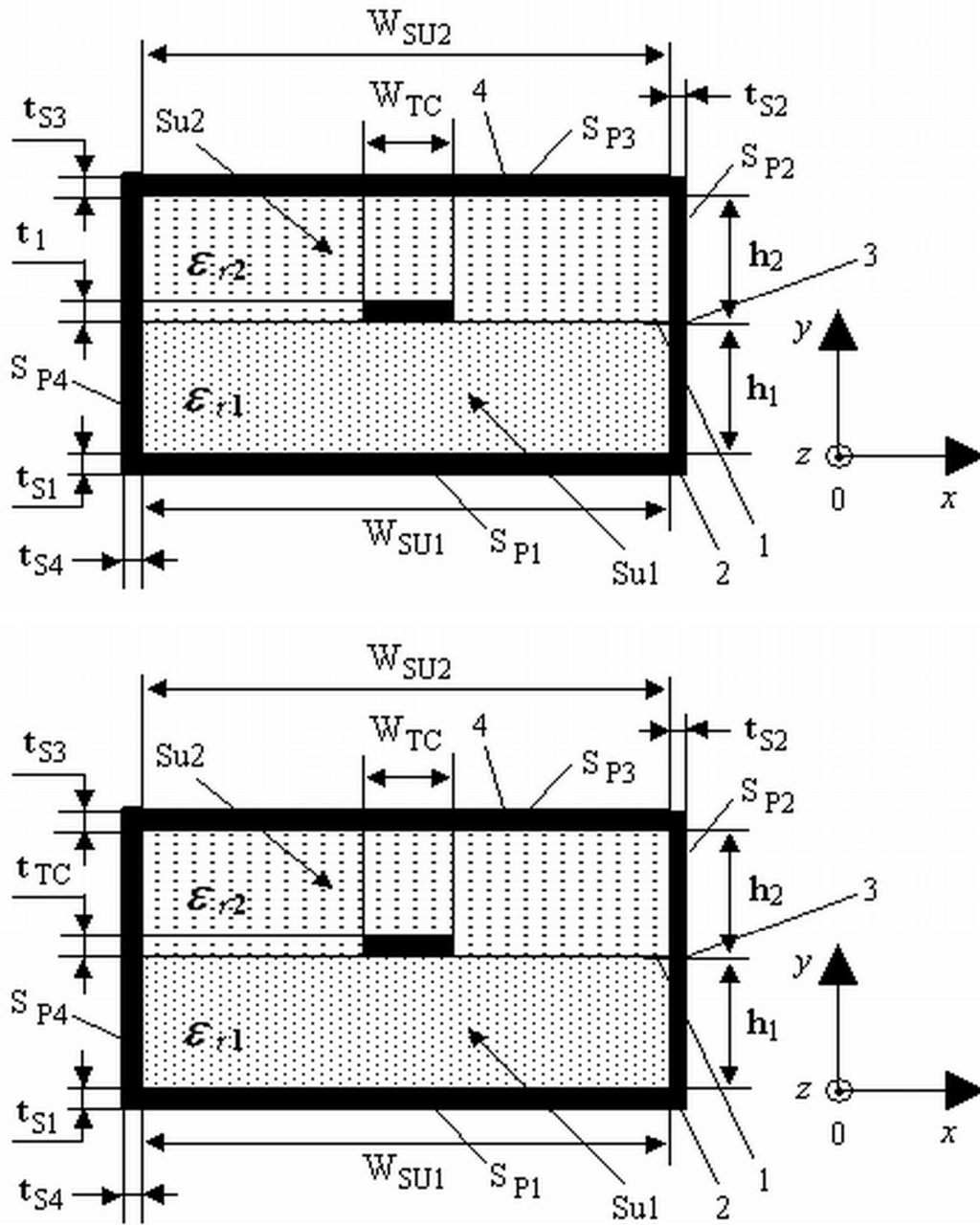


FIG. 10

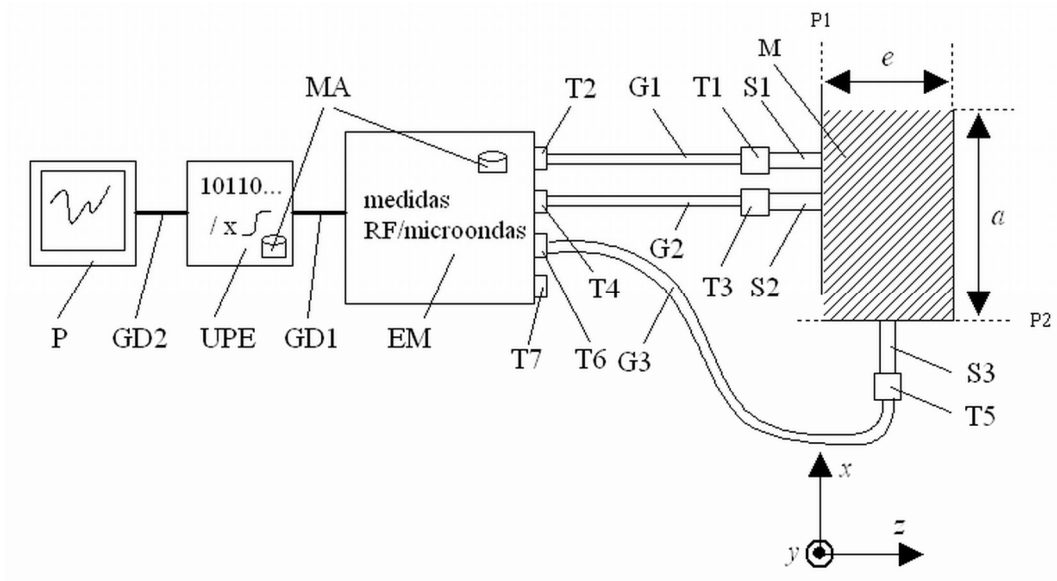


FIG. 13



21 N.º solicitud: 201630964

22 Fecha de presentación de la solicitud: 14.07.2016

32 Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

51 Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	56 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	HINOJOSA, J. DIELECTRIC PERMITTIVITY MEASURING TECHNIQUE OF FILM-SHAPED MATERIALS AT LOW MICROWAVE FREQUENCIES FROM OPEN-END COPLANAR WAVEGUIDE. 01/01/2008, Vol. 5, Páginas 57-70 [en línea][recuperado el 25/04/2017]. Recuperado de Internet <URL: http://www.jpier.org/pierc/pier.php?paper=08100101 >	1-13
A	YOUSEFI, L et al. CHARACTERIZATION OF METAMATERIALS USING A STRIP LINE FIXTURE. 01/05/2011, Vol. 59, Páginas 1245-1253 [en línea][recuperado el 25/04/2017]. Recuperado de Internet <URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/5704185/ >, <DOI: 10.1109/TAP.2011.2109360>	3
A	BORAH, S. et al. BROADBAND MEASUREMENT OF COMPLEX PERMITTIVITY OF COMPOSITE AT MICROWAVE FREQUENCIES USING SCALAR SCATTERING PARAMETERS. 01/01/2010, Vol. 13, Páginas 53-68 [en línea][recuperado el 25/04/2017]. Recuperado de Internet <URL: http://www.jpier.org/pierm/pier.php?paper=10051203 >, <DOI: 10.2528/PIERM10051203>	5-6
A	STUCHLY, M.A. et al. MEASUREMENT OF RADIO FREQUENCY PERMITTIVITY OF BIOLOGICAL TISSUES WITH AN OPEN-ENDED COAXIAL LINE: PART II - EXPERIMENTAL RESULTS. 01/01/1982, Vol. 30, Páginas 87-92 [en línea][recuperado el 25/04/2017]. Recuperado de Internet <URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/1131022/ >, <DOI: 10.1109/TMTT.1982.1131022>	11-13

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
26.04.2017

Examinador
Elena Patricia Pina Martínez

Página
1/6



②¹ N.º solicitud: 201630964

②² Fecha de presentación de la solicitud: 14.07.2016

③² Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤¹ Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ ⁶ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	HINOJOSA, J. S-PARAMETER BROADBAND MEASUREMENTS ON-COPLANAR AND FAST EXTRACTION OF THE SUBSTRATE INTRINSIC PROPERTIES. 01/08/2001, Vol. 11, Páginas 305-307 [en línea][recuperado el 25/04/2017]. Recuperado de Internet <URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/933779/ >, <DOI: doi: 10.1109/7260.933779>	1-13

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
26.04.2017

Examinador
Elena Patricia Pina Martínez

Página
2/6

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

G01R27/06 (2006.01)

G01N27/02 (2006.01)

G01N22/00 (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01R, G01N

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, XPAIP, XPESP, XPI3E, XPIEE, XPOACNPL, INSPEC, NPL

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 26.04.2017

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-13	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones	SI
	Reivindicaciones 1-13	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	HINOJOSA, J. Dielectric permittivity measuring technique of film-shaped materials at low microwave frequencies from open-end coplanar waveguide. Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 5, 57-70	01.01.2008
D02	YOUSEFI, L et al. Characterization of metamaterials using a strip line FIXTURE. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , Vol. 59, Nº 4, 1245-1253	01.05.2011
D03	BORAH, S. et al. Broadband measurement of complex permittivity of composite at microwave frequencies using scalar scattering parameters. Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 13, 53-68	01.01.2010
D04	STUCHLY, M.A. et al. Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: Part II- Experimental results. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 30, Nº 1, 87-92	01.01.1982

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se considera D01 el documento del estado de la técnica anterior más próximo al objeto de la solicitud. Este documento afecta a la actividad inventiva de todas las reivindicaciones, tal y como se explicará a continuación.

Reivindicación 1

En relación con el objeto de la reivindicación 1, el documento D01 describe un sistema de caracterización electromagnética de materiales que comprende los siguientes elementos (entre paréntesis se incluyen referencias a D01, ver fig.2):

- un sensor en circuito abierto aplicado a un material (*sample*)
- un equipo de medidas (VNA) configurado para realizar medidas en reflexión del sensor en función de la frecuencia y con respecto al plano de referencia (P1)
- una guía de transmisión que conecta el sensor con el equipo de medidas
- una transición configurada para realizar una conexión entre el sensor y la guía de transmisión

El dispositivo descrito en D01 difiere del reivindicado en una serie de elementos comunes, tales como el procesador externo y la pantalla y las diferentes conexiones entre elementos, cuya incorporación se considera evidente para un experto en la materia, pues forman parte de conocimiento general común en el sector de la técnica.

Por tanto, se considera que la reivindicación 1, a la vista del estado de la técnica anterior, no satisface el requisito de actividad inventiva, según establece el art. 8.1 de la Ley de Patentes 11/86.

Reivindicaciones 2-10

Las reivindicaciones dependientes 2-10 no comprenden características adicionales o alternativas que, en combinación con las características de las reivindicaciones de las que dependen, satisfagan el requisito de actividad inventiva frente al estado de la técnica anterior, tal y como se detalla a continuación.

La reivindicación 2 se refiere a un elemento común de implementación obvia como son los medios de almacenamiento de datos.

La reivindicación 3 se corresponde con una realización del sensor de tipo "*micro-strip*" o "*stripline*". Este tipo de estructuras es conocida en el sector de la técnica tal y como se menciona en el documento D01 (ver 1.Introducción) y como se ilustra, por ejemplo, en el documento D02 (fig. 2). Por tanto, se considera una alternativa equivalente para un experto en la materia.

En cuanto al sensor de configuración coplanar de la reivindicación 4 se trata de la realización descrita en D01 (fig. 1).

Las reivindicaciones 5 y 6 se refieren al encapsulado del sensor, lo que se considera asimismo una práctica conocida en el estado de la técnica (ver D03, fig. 1) y de implementación evidente para un experto en la materia.

Por último, el contenido de las reivindicaciones 7-10 es una generalización del sistema a dos y tres sensores, que no tiene un efecto técnico inesperado sino que se trataría de una mera yuxtaposición de sensores para la realización de medidas en dos o tres ejes coordenados, respectivamente, evidente para el experto en la materia.

Por todo lo anterior, se considera que las reivindicaciones dependientes no satisfacen el requisito de actividad inventiva establecido por el art. 8.1 Ley de Patentes 11/86.

Reivindicaciones 11-13

En cuanto al método de la reivindicación 11, el método descrito en D01 difiere de aquel en la etapa de sumergir el sensor en un material semisólido o líquido, lo que se relaciona directamente con la aplicación del método a este tipo de materiales.

Se considera que la implementación de dicha etapa sería evidente para un experto en la materia que quisiera caracterizar un material líquido o semisólido (ver como ejemplo el documento D04) ya que no implica una modificación sustancial del método.

La incorporación de las etapas de las reivindicaciones 12 y 13, referidas a las medidas con temperatura y las medidas "*in situ*" o "*in vivo*", se consideran asimismo obvias para un experto en la materia, y tampoco conllevan ninguna modificación sustancial del método.

Por tanto, se considera que la reivindicación 11, y sus dependientes 12-13, no satisfacen el requisito de actividad inventiva (art. 8.1 Ley de Patentes 11/86).

En conclusión, a la vista del estado de la técnica anterior, la solicitud no satisface los requisitos de patentabilidad que se establecen en el art. 4.1 de la Ley de Patentes 11/86.