

**ALGUNAS APLICACIONES DE MEDIDAS DE PERMITIVIDAD DIELECTRICA A  
ALTAS FRECUENCIAS USANDO SONDAS TIPO COAXIAL**

**OSWALDO RODRÍGUEZ RICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**ALGUNAS APLICACIONES DE MEDIDAS DE PERMITIVIDAD DIELECTRICA A  
ALTAS FRECUENCIAS USANDO SONDAS TIPO COAXIAL**

**OSWALDO RODRÍGUEZ RICO**

**Trabajo De Grado**

**Director:**

**Ernesto Aguilera Bermúdez**

**Doctor en ingeniería**

**Codirector:**

**Efrén Darío Acevedo Cárdenas**

**Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**BUCARAMANGA**

**2017**

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. CONCEPTOS Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	12
2.1 ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA Y PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA.....	12
2.2 MECANISMOS DE POLARIZACIÓN.....	14
2.2.1 Polarización dieléctrica dipolar.....	14
2.2.2 Polarización electrónica y atómica.....	17
2.2.3 Conductividad iónica.....	18
2.3 MÉTODO Y MATERIALES.....	19
2.3.1 Método de sonda coaxial con terminación abierta.....	20
2.3.2 Método de línea de transmisión.....	23
2.3.3 Método de cavidades resonantes.....	25
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA.....	27
3.1 MÉTODO DE MEDIDA: SONDA COAXIAL CON TERMINACIÓN EN CIRCUITO ABIERTO.....	27
3.2 SONDA COAXIAL DE BAJO COSTO.....	28
3.3 MODELO TEÓRICO.....	29
3.4 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA Y CALIBRACIÓN DEL PLANO DE REFERENCIA.....	34

3.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SONDA COAXIAL EN SUSTANCIAS CON PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJA CONOCIDA...	36
4. MEDICIÓN DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA EN ACEITES DE TRANSFORMADORES DE ALTA TENSION.....	39
4.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO CIRCUITAL DE SONDA COAXIAL.....	40
4.2 CÁLCULO DE $\epsilon'$ Y $\epsilon''$ .....	42
5. MEDICIÓN DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA A MUESTRAS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA DISUELTAS EN MEDIO ACUOSO.....	46
5.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO CIRCUITAL DE SONDA COAXIAL.....	48
5.2 CÁLCULO DE $\epsilon'$ Y $\epsilon''$ .....	49
5.2.1 Permitividad dieléctrica compleja de Ag-NPs esféricas variando su tamaño y manteniendo su concentración base de síntesis.....	50
5.2.2 Permitividad dieléctrica compleja de Ag-NPs variando la concentración de síntesis.....	54
5.2.3 Permitividad dieléctrica compleja de Ag-NPs de ~100nm con geometría triangular y tipo rod o cilíndrica.....	56
6. CONCLUSIONES .....	58

## RESUMEN

**TÍTULO:** Algunas aplicaciones de medidas de permitividad dieléctrica a altas frecuencias usando sondas tipo coaxial\*

**AUTOR:** Oswaldo Rodriguez Rico\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Permitividad dieléctrica, sonda coaxial, aceites parafínicos, nano-partículas de plata.

### **DESCRIPCIÓN:**

El desarrollo de la espectroscopia dieléctrica ofrece la posibilidad de cuantificar la permitividad dieléctrica, un parámetro que permite entender cómo interactúan los campos eléctricos con la materia. Cada material tiene una permitividad dieléctrica característica lo que abre un gran campo de estudio para identificar aplicaciones de tal parámetro.

Este trabajo presenta la descripción y desarrollo de una metodología de espectroscopia dieléctrica usando una sonda coaxial adaptada a partir de un conector SMA de bajo costo y un analizador vectorial de redes como sistema de medida, Esta metodología basada en el coeficiente de reflexión medido en la superficie de contacto de la sonda con la muestra bajo estudio que se relaciona con un modelo circuital de la sonda para calcular la permitividad de la muestra; así mismo se presenta la medida de la permitividad a dos sustancias de interés, tales sustancias son: muestras de aceites para transformadores de alta tensión clasificadas en tres tipos: nuevos, usados y aceites que pasaron por un proceso de recuperación para su nuevo uso, en un rango de frecuencias de 100 MHz a 3GHz, y nano-partículas de plata disueltas en agua en tres clasificaciones: variando su tamaño, variando su concentración y manteniendo su tamaño y nanopartículas de geometrías diferentes, en un rango de frecuencias de 1MHz a 100MHz .

Adicionalmente se presentan las medidas de permitividad de diferentes sustancias de referencia usadas para la calibración como agua, metanol, etanol y aceite de oliva.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Ernesto Aguilera Bermúdez. Codirector: Ing. Efrén Darío Acevedo Cárdenas

## ABSTRACT

**TITLE:** Some applications of dielectric permittivity at high frequencies using coaxial type probes\*

**AUTHOR:** Oswaldo Rodriguez Rico\*\*

**KEY WORDS:** Dielectric permittivity, coaxial probe, paraffinic oils, silver nano-particles.

### DESCRIPTION:

The development of dielectric spectroscopy offers the possibility of quantifying dielectric permittivity, a parameter that allows to understand how the electric fields interact with the matter. Each material has a characteristic dielectric permittivity which opens a large field of study to identify applications of such a parameter.

This work presents the description and development of a dielectric spectroscopy methodology using a coaxial probe adapted from a low cost sma connector and a network vector analyzer as a measurement system. this methodology based on the reflection coefficient measured at the surface of contact of the probe with the sample under study that is related to a circuit model of the probe to calculate the permittivity of the sample; in addition, the measurement of the permitivity to two substances of interest, such substances are: samples of oils for high voltage transformers classified into three types: new, used and oils that underwent a process of recovery for their new use, in a range of frequencies from 100 MHz to 3GHz, and nano-silver particles dissolved in water in three classifications: varying their size, varying their concentration and maintaining their size and nanoparticles of different geometries, in a frequency range of 1MHz to 100MHz.

In addition, the permittivity measurements of different reference substances used for calibration such as water, methanol, ethanol and olive oil are presented.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Ernesto Aguilera Bermúdez. Codirector: Ing. Efrén Darío Acevedo Cárdenas

## 1. INTRODUCCIÓN

Al estudio de las propiedades dieléctricas en función de la frecuencia en los materiales se le conoce como espectroscopia dieléctrica o de impedancia, el método mide las interacciones que ocurren en la materia cuando es sometida a radiación de campos externos. La caracterización de estos efectos usualmente es expresada como permitividad dieléctrica y ocurren generalmente en el rango de las microondas, por esta razón se hace importante su medida a altas frecuencias.

Uno de los métodos más utilizados para realizar la medición de las componentes real e imaginaria de la permitividad de las sustancias y materiales, y en el que está enfocado este trabajo de grado, se basa en el uso de sondas coaxiales usualmente con terminación abierta o terminada en circuito abierto que inyecta una señal variante en el tiempo aplicada por un analizador vectorial de redes, y este a su vez mide y registra los parámetros de transmisión de tal señal emitida, estos parámetros conocidos como parámetros S se procesan a través de un algoritmo que, en base a modelos matemáticos establecidos en la literatura, permite obtener las características de la permitividad dieléctrica compleja en función de la frecuencia. Dentro de las sustancias que requieren conocimientos de la permitividad dieléctrica para su estudio, determinados mediante sonda coaxial y que han encontrado un uso generalizado entre los investigadores incluyen pero no se limitan a: tejidos biológicos, alimentos, vegetación, suelo, aplicaciones médicas para la detección de tumores, evaluación de dosis de exposición a campos electromagnéticos de uso terapéutico, aplicaciones en métodos de reconstrucción 3D de tejidos biológico y estudios del comportamiento y propiedades de los

materiales de aislamiento, que varían sus características según las condiciones ambientales como la humedad, usados en los transformadores de tensión.<sup>123</sup>

El estudio y el uso de este método de medición radica su éxito en el conocimiento exhaustivo de la permitividad dieléctrica compleja, en la comprensión y selección del modelo matemático y del método de calibración de los planos de referencia de la sonda. Además, se hace uso importante de las herramientas de software de simulación en el seguimiento de los métodos de calibración, toma de medidas, previsualización y corroboración de resultados. Por lo anteriormente descrito en donde se enmarca la relevancia de la información que proporciona la medida y el área de aplicaciones en la que tiene cabida la permitividad compleja nos conlleva a postular una metodología de medida en la que podamos caracterizar sus ventajas, desventajas y fiabilidad con el fin de aplicarla en las investigaciones relacionadas que se llevan a cabo en los grupos de investigación de la Universidad Industrial de Santander.

Determinando una metodología precisa y repetible que sea válida en un conjunto de características definidas, el uso de esta técnica abre un campo de posibilidades de planes de estudio en las diversas áreas que aplican en los diferentes grupos de investigación al interior de la Universidad Industrial de Santander con el fin de fomentar el desarrollo de nuevos procedimientos y tecnologías en donde se requiera determinar las características de las sustancias o materiales basadas en la permitividad.

---

<sup>1</sup> BOBOWSKI, Jake S. and JOHNSON, T. Permittivity measurements of biological samples by an open-ended coaxial line. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 40, (2012), pp.159–183.

<sup>2</sup> ZAJÍČEK, Radim; VRBA, Jan, and NOVOTNÝ, Karel. Evaluation of a Reflection Method on an Open-Ended Coaxial Line and its Use in Dielectric Measurements. *Acta Polytechnica* Vol. 46 No. 5, (2006), pp. 50-54.

<sup>3</sup> GIRÁLDEZ CASTRO, Marta. Estudio De Los Espectros Dieléctricos Para El Control De Calidad De Alimentos. Valencia, junio 2010, 291 h. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.

En el presente libro se consignan los resultados y el análisis obtenidos de la investigación de la permitividad dieléctrica de dos sustancias de interés; por una parte, se encuentra la medida de la constante dieléctrica y la constante de pérdidas a muestras de aceites utilizados como aislantes en transformadores de alta tensión, estas muestras de aceites se dividen principalmente en tres categorías, la primera categoría son los aceites que han cumplido un ciclo de uso y se encuentran contaminados, la segunda categoría son los aceites usados que han pasado por un proceso de recuperación y que cumplen con los requisitos para ser puestos en uso nuevamente, y la tercera categoría son los aceites nuevos que no se han tenido ningún tipo de uso. Los resultados de las medidas a estos aceites dan cuenta que los valores de la permitividad dieléctrica compleja concuerdan con los reportados en la literatura obtenidos mediante otras técnicas, además que pueden ser utilizados como una herramienta adicional para la clasificación de los mismos.

La segunda sustancia de estudio son muestras de nanopartículas (NP) de plata disueltas en solución acuosa dispuestas en tres categorías: variando el tamaño de la nanopartículas y manteniendo su concentración estándar de preparación, manteniendo el tamaño de la NP y diluyendo su concentración estándar para obtener diferentes concentraciones, y nanopartículas con geometrías diferentes a la esférica. El estudio de la permitividad en este tipo de sustancias está dirigido al tratamiento de tumores cancerígenos, específicamente cáncer de cuello uterino; esto se hace introduciendo la sustancia con nanopartículas alrededor de la zona a tratar y posteriormente aplicando un campo eléctrico a una frecuencia no dañina para los tejidos que contribuirá al calentamiento de la NP y este calentamiento a su vez ocasionaría la muerte de las células malignas.

## 2. CONCEPTOS Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA Y PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA

La espectroscopia dieléctrica es una rama del electromagnetismo aplicado, encargada de implementar técnicas de medición que permiten cuantificar y caracterizar los diferentes procesos de almacenamiento y disipación de energía por los efectos de polarización eléctrica que tienen lugar cuando un material es expuesto a radiación electromagnética. En el dominio de la frecuencia, la polarización del material queda caracterizada por la permitividad dieléctrica relativa compleja del medio,

$$\varepsilon(\omega, T) = \varepsilon'(\omega, T) - j \varepsilon''(\omega, T) \quad (1)$$

que es función de la frecuencia  $\omega$  y de la temperatura  $T$ . La cantidad de energía electromagnética que es capaz de almacenar el material expuesto a la radiación es proporcional a la parte real  $\varepsilon'$ , y la cantidad de energía electromagnética disipada en calor es proporcional a la parte imaginaria  $\varepsilon''$ .<sup>4</sup>

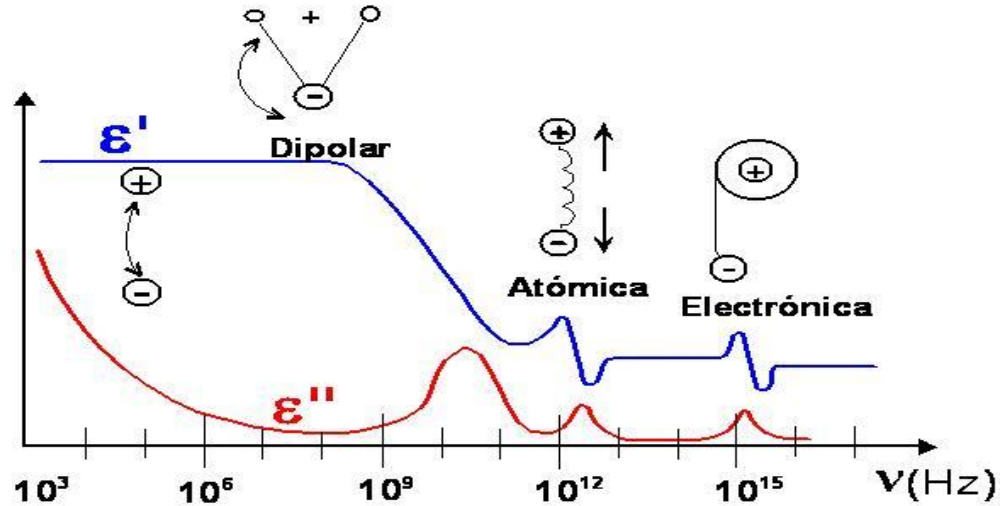
Un material puede tener varios mecanismos dieléctricos o efectos de polarización que contribuyen a su permitividad global, estos materiales dieléctricos tienen una disposición de portadores de carga eléctrica que pueden ser desplazados por un

---

<sup>4</sup> AGUILERA BERMUDEZ, Ernesto, y RODRIGUEZ RICO, Oswaldo. Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe. TECCIENCIA, Vol. 12 No. 21., 60-66, (2016)

campo eléctrico, debido a esto las cargas se polarizan para compensar el campo de manera que las cargas positivas y negativas se mueven en direcciones opuestas. A un nivel microscópico existen diferentes mecanismos que pueden contribuir al comportamiento dieléctrico, como lo muestra la Figura 1.

**Figura 1. Respuesta en frecuencia de los mecanismos dieléctricos**



Fuente: Agilent Technologies, "Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials," Notas de Aplicación, Junio. 2006.

Efectos como la orientación de dipolos o la conducción iónica interactúan fuertemente en las frecuencias de las microondas, un ejemplo de esto son las moléculas de agua que forman dipolos permanentes que giran o se mueven para seguir al campo eléctrico variable o alterno. Este tipo de mecanismos generan bastantes pérdidas, lo que explica por qué los alimentos se calientan en un horno microondas. Por otra parte, los mecanismos atómicos y electrónicos son en comparación débiles y generalmente constantes en la región de microondas.

Cada mecanismo dieléctrico tiene una frecuencia de corte característica, es así como en un material a medida que se aumenta la frecuencia del campo eléctrico

externo los mecanismos más lentos van decayendo y posteriormente dan paso a aquellos mecanismos más rápidos que en su conjunto determina el comportamiento de la permitividad del material. El pico en la constante de pérdidas corresponderá a cada frecuencia de corte o frecuencia crítica y la magnitud y la frecuencia crítica son únicas para cada mecanismo en diferentes materiales.<sup>5,6</sup>

## 2.2 MECANISMOS DE POLARIZACIÓN

Los dieléctricos polares como el agua presentan una dependencia de la frecuencia solo debido a la polarización orientacional (dipolos) en el rango de las microondas mientras que otras dependencias de mecanismos como la polarización iónica o electrónica permanecen constantes, sin embargo, en sustancias como las compuestas de nanopartículas metálicas disueltas en agua, la constante de pérdidas  $\epsilon''$  presenta una dependencia adicional de la frecuencia debido a la conductividad iónica a bajas frecuencias.<sup>5,6</sup>

**2.2.1 Polarización dieléctrica dipolar.** Cuando se forma una molécula, se puede causar un desequilibrio en la distribución de carga, producto del reordenamiento de los electrones, creando un momento dipolar permanente, si se aplica un campo eléctrico, el campo ejercerá un par sobre el dipolo y este rotará para alinearse con dicho campo eléctrico. La fricción que se produce por la orientación del dipolo contribuye a las pérdidas dieléctricas.

---

<sup>5</sup> GIRÁLDEZ CASTRO. Op cit, p 12-22

<sup>6</sup> Agilent Technologies. Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Notas de Aplicación, junio. 2006.

<sup>7</sup> *Ibíd.*, p 10

<sup>8</sup> UNIVERSIDAD DE BARCELONA. Laboratorio de física de materiales dieléctricos y ópticos [en línea]. [http://www.ub.edu/gilafa/web\\_dielec/002/002.html](http://www.ub.edu/gilafa/web_dielec/002/002.html)

La rotación del dipolo causa variaciones tanto en  $\epsilon'$  como en  $\epsilon''$  en la frecuencia de relajación, que normalmente se produce en la región de microondas.

El tiempo de relajación  $\tau$  es una medida de la movilidad de las moléculas que existe en un material, en otras palabras, es el tiempo necesario que tardan los dipolos para orientarse en el sentido del campo eléctrico. La frecuencia de relajación  $f_c$  está inversamente relacionada con el tiempo de relajación:

$$\tau = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f c} \quad (2)$$

a frecuencias por debajo de la de relajación el campo eléctrico es lo suficientemente lento para que los dipolos sean capaces de seguir sus variaciones, debido a que la polarización se puede desarrollar de forma plena las pérdidas  $\epsilon''$  son directamente proporcionales a la frecuencia (Figura 2), a medida que la frecuencia se incrementa,  $\epsilon''$  continúa creciendo mientras que  $\epsilon'$  comienza a decrecer debido al retardo de fase entre el campo eléctrico y la alineación de los dipolos. Por encima de la frecuencia de relajación tanto  $\epsilon'$  como  $\epsilon''$  caen, dado que el campo eléctrico es muy rápido para influenciar la rotación de los dipolos y la polarización desaparece.<sup>9</sup>

**Modelo de Debye.** Los materiales que presentan una sola constante de tiempo de relajación pueden ser modelados por la ecuación de Debye (Ecuación 3) que representa una respuesta característica de la permitividad en función de la frecuencia (Figura 2).  $\epsilon'$  es constante por encima y por debajo de la frecuencia de relajación con una transición que ocurre cerca de la misma.

---

<sup>9</sup> Agilent Technologies. Op cit, p 12

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (3)$$

$\varepsilon_{\infty}$  es la permitividad óptica a altas frecuencias de campo (para  $\omega\tau \gg 1$ ),  $\varepsilon_s$  es la permitividad estática (para  $\omega\tau \gg 1$ ).<sup>10</sup>

En la práctica, muy pocos dieléctricos siguen estrictamente el modelo de Debye, aunque presentan un comportamiento cualitativamente similar. En algunos dieléctricos la respuesta a campos eléctricos alternos se aproxima a la de Debye, en el sentido de que presentan picos simétricos en la curva de  $\varepsilon''(\omega)$ . El comportamiento de estos dieléctricos ha sido descrito por la función empírica propuesta por Cole-Cole<sup>11</sup>:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{(1-n)}} \quad (4)$$

con ( $0 \leq n < 1$ ), que incluye el modelo de Debye como caso particular para  $n = 0$ .

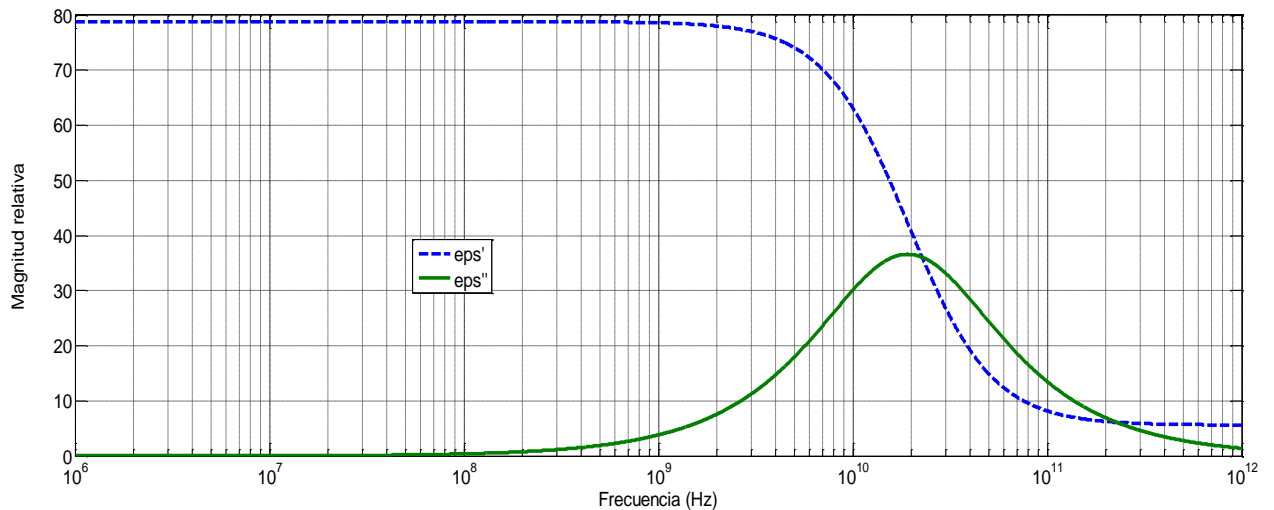
La Figura 2. Muestra los valores de  $\varepsilon_s'$  y  $\varepsilon_s''$  que representan  $\varepsilon'$  y  $\varepsilon''$  respectivamente según el modelo de Debye para el agua a una temperatura de 25 °C. El valor de  $\varepsilon_{\infty}$  es de 5.60,  $\varepsilon_s$  es igual a 78.8, y el valor de  $\tau$  es de 8.3 picosegundos.

---

<sup>10</sup> ZAJÍČEK. Op cit, p 50

<sup>11</sup> TORRES BETANCOR, Manuel E. Efectroscopía dieléctrica y otras propiedades físicas de tartrados simples: puros y dopados. Tenerife, 1999, 209 h. Tesis doctoral. Universidad de La Laguna.

**Figura 2. Parte real  $\epsilon_s'$  e imaginaria  $\epsilon_s''$  de la permitividad dieléctrica compleja del agua a 25° C.**



*Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe, TECCIENCIA, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.*

**2.2.2 Polarización electrónica y atómica.** La polarización electrónica ocurre en átomos neutros cuando un campo eléctrico desplaza el núcleo con respecto a los electrones que lo rodean. La polarización atómica ocurre cuando los iones positivos y negativos adyacentes "se estiran" bajo la acción de un campo eléctrico. Para muchos sólidos secos, estos son los mecanismos de polarización dominante en las frecuencias de microondas, aunque

la resonancia real ocurre a una frecuencia mucho más alta<sup>12</sup>. Los átomos pueden ser modelados como osciladores con un efecto de amortiguación similar a un sistema de masa resorte mecánico (Figura 1).

---

<sup>12</sup> Agilent Technologies. Op cit, p 11

La amplitud de las oscilaciones será pequeña para cualquier frecuencia que no sea la frecuencia de resonancia. Muy por debajo de la frecuencia de resonancia, los mecanismos electrónicos y atómicos contribuyen sólo una pequeña cantidad de la constante dieléctrica  $\epsilon'$  y son casi sin pérdidas. Por encima de la frecuencia de resonancia, la contribución de estos mecanismos desaparece.

**2.2.3 Conductividad iónica.** Debido a que en la práctica no es posible medir las contribuciones de  $\epsilon''$  y de  $\sigma$  de forma separada, las pérdidas de un material pueden expresarse realmente en función tanto de la pérdida dieléctrica ( $\epsilon_d''$ ) como de la conductividad ( $\sigma$ ).

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (5)$$

A bajas frecuencias, la conductividad global puede estar formada por muchos mecanismos de conducción diferentes, pero la conductividad iónica es la más frecuente en materiales húmedos.  $\epsilon''$  está predominada por la influencia de la conducción electrolítica causada por iones libres que existen en presencia de un disolvente (usualmente agua). La conductividad iónica sólo introduce pérdidas en un material. A bajas frecuencias el efecto de la conductividad iónica es inversamente proporcional a la frecuencia y aparece como una pendiente  $1 / f$  de la curva de  $\epsilon''$ .<sup>13,14</sup>

---

<sup>13</sup> BOBOWSKI. Op cit, p 164

<sup>14</sup> Agilent Technologies. Op cit, p 13

## 2.3 MÉTODO Y MATERIALES

En el rango de las radiofrecuencias existen diferentes métodos para la realización de la espectroscopía dieléctrica de un material, entre los más usados se encuentran la utilización de condensadores de placas paralelas, resonadores y guías de microondas, en los cuales se introduce el material a ser caracterizado<sup>15</sup>. Otra técnica muy utilizada, debido a su bajo costo y fácil implementación, es la utilización de una sonda de cable coaxial con terminación abierta.

En Seewattanapon<sup>16</sup> utilizan el método de sonda coaxial con terminación abierta para caracterizar permitividad del agua, algunos alcoholes y mantequilla, y en Zajiček<sup>17</sup> para caracterizar tejidos biológicos, incluido músculos y piel del brazo humano. En PiuZZi<sup>18</sup> utilizan un modelo circuital compuesto por dos condensadores en paralelo, asociado a los efectos electromagnéticos que suceden en la superficie de contacto entre la superficie del cable coaxial y la muestra bajo prueba. En Baker<sup>10</sup> (1994) utiliza un modelo de campos electromagnéticos para modelar este mismo efecto.

---

<sup>15</sup> Agilent Technologies. Op cit, p 17

<sup>16</sup> SEEWATTANAPON, Somporn and AKKARAEKTHALIN, Prayoot. A Broadband Complex Permittivity Probe Using Stepped Coaxial Line. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 3, pp. 312 -318, Aug. (2011).

<sup>17</sup> ZAJÍČEK. Op cit, p 1

<sup>18</sup> PIUZZI, Emanuele, *et al.* A Comparative Analysis Between Customized and Commercial System for Complex Permittivity Measurements on Liquids Samples at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, vol. 62, n5, pp. 1034-1045, May. (2013).

<sup>19</sup> BAKER, James, *et al.* Analysis of an Open-Ended Coaxial Probe with Lift-Off for Nondestructive Testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, vol. 43, n5, pp. 711-717, Oct. (1994).

En Dervos<sup>20</sup> caracterizan muestras de aceite usando un medidor de parámetros RLC de alto costo introduciendo la muestra en un condensador de placas cilíndricas coaxial. En Gómez y Anaya<sup>21</sup> presentan características de las técnicas de medida de las propiedades dieléctricas en los métodos de sonda abierta en un extremo, línea de transmisión, cavidades resonantes y en el espacio libre, en donde se puede extraer información acerca de las ventajas y desventajas que tienen cada una de las técnicas. Dentro de las ventajas que presenta la sonda abierta en el extremo incluyen la facilidad de preparación de la muestra y el pequeño tamaño que necesita ésta para la medición. además del poco tiempo que toma realizar las medidas y es particularmente útil para la caracterización de líquidos, por otro lado, dentro de las desventajas podríamos tener en cuenta que la muestra bajo prueba debe ser lo más homogénea posible ya que la onda electromagnética que se hace incidir podría no penetrar la totalidad de la misma, otra de las consideraciones a tener en cuenta es que a veces, el método se puede utilizar para caracterizar muestras semisólidas, pero no es muy útil para sólidos o partículas, en contraste el método de línea de transmisión es mucho más preciso que el del método de medición coaxial, pero tiene la restricción del ancho de banda de frecuencias para la toma de medidas.

**2.3.1 Método de sonda coaxial con terminación abierta.** El método de reflexión en el extremo de una línea coaxial para determinar la permitividad es un método bien conocido, este método se basa en el hecho de que el coeficiente de reflexión de cada uno de los conductos coaxiales es independiente de los parámetros dieléctricos del material al que se pone en contacto.

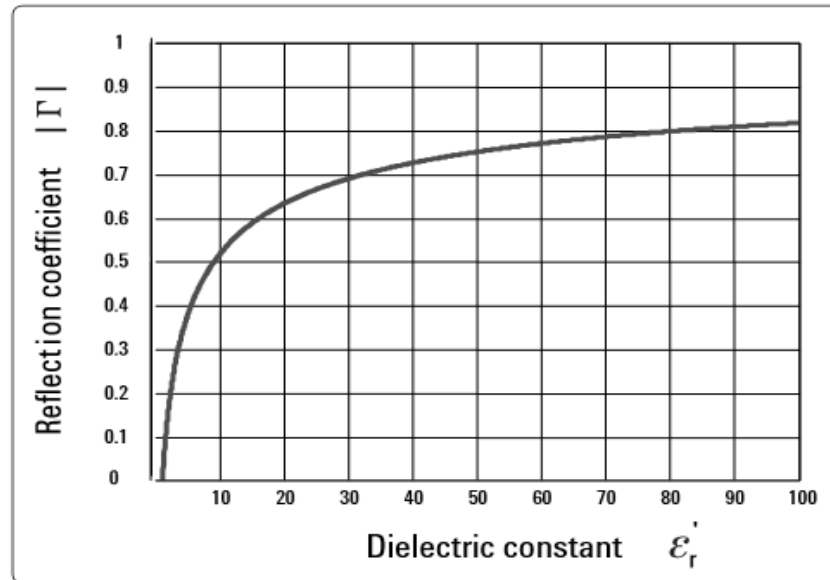
---

<sup>20</sup> DERVOS, Constantine T, *et al.* A Complex Permittivity Based Sensor for the Electrical Characterization of High Voltage Transformer Oils. *Sensors*, vol. 5, pp. 302 -316, May. 2005.

<sup>21</sup> GOMEZ RAMIREZ, Lina y ANAYA, Jorge. Determinación Experimental de la Permitividad Dieléctrica del Lodo de Perforación Base Agua a 2,4 GHz Enfocado a Aplicaciones SENSIT. Bucaramanga, 2013, 114 h. Trabajo de grado (ingeniero de petróleos, ingeniero electrónico) Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisico-Química-Mecánica.

La Figura 3 representa la relación entre la constante dieléctrica del material bajo prueba y el coeficiente de reflexión. Se considera la muestra infinitamente grande por ende no existe reflexión desde la parte posterior de la muestra.<sup>22</sup>

**Figura 3. Coeficiente de reflexión vs constante dieléctrica.**



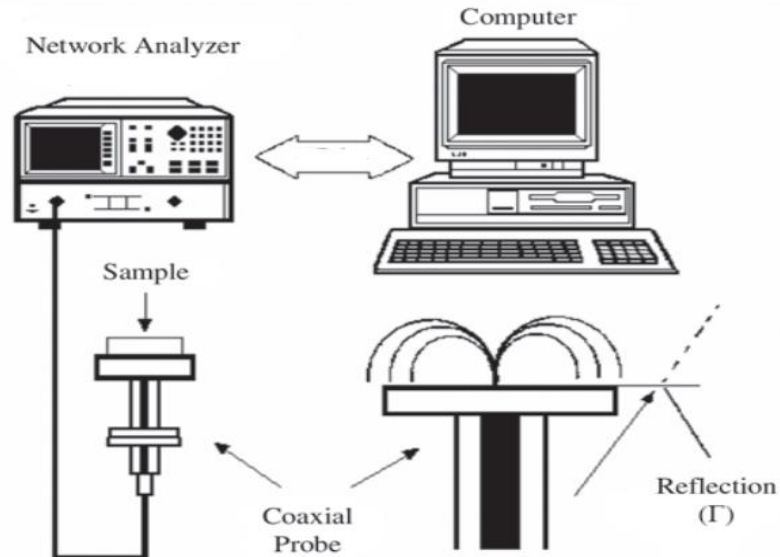
Fuente: Agilent Technologies, “Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials,” Notas de Aplicación, Junio. 2006.

Para calcular los parámetros dieléctricos a partir del coeficiente de reflexión, es necesario un modelo de circuito equivalente de la sonda coaxial abierta, a su vez para determinar los valores de los elementos del modelo de circuito equivalente se utiliza materiales con propiedades eléctricas conocidas.

<sup>22</sup> DE LOS SANTOS, Jose; GARSIA, Ducinei and EIRAS, Jose Antonio. Dielectric characterization of materials at microwave frequency range. Mater. Res. 6: pp. 97–101 (2003).

Uno de los más usados es el agua. El sistema de medición típico que mide el coeficiente de reflexión que utiliza el método de sonda coaxial consiste en un analizador de red o impedancia.

**Figura 4. diagrama del método de sonda coaxial con extremo abierto.**



*Fuente: J. de los Santos, D. Garsia, and J. A. "Eiras, Dielectric characterization of materials at microwave frequency range", Mater. 2003.*

Este método de medición de banda ancha es considerado no destructivo, no invasivo y ofrece posibilidades de medidas in vivo e in vitro.

Se deben cumplir algunas condiciones para evitar errores de medición en este método<sup>23</sup>:

<sup>23</sup> KOMAROV, Vyacheslav; WANG, Suhang and TANG, Juming. Permittivity And Measurement. Washington State Universit, Shankar anuradha / ArtNo. eme308 pp.1-20.

- La muestra debe ser homogénea
- Contacto directo entre la sonda y la muestra; la sonda puede sumergirse en una muestra líquida y la superficie rugosa de una muestra sólida debe ser inferior a  $0,5 \text{ mm}^2$ .
- Minimizar las perturbaciones causadas por la temperatura, o cualquier otro factor externo después de la calibración y durante la medición.

**2.3.2 Método de línea de transmisión.** El método de línea de transmisión hace parte de un grupo de métodos no resonantes de medición de permitividad dieléctrica compleja de diferentes materiales en un rango de microondas. Existen varias modificaciones a este método, incluyendo la técnica de espacio libre<sup>25</sup>, el método de red en circuito abierto y corto circuito. Usualmente se utilizan tres tipos de líneas de transmisión como celda de medición: guía de onda rectangular, línea coaxial y línea microstrip. La muestra analizada se coloca cerca del extremo cortocircuitado de la línea de transmisión. La permitividad dieléctrica de los medios con pérdidas también se pueden medir con éxito empleando una celda coaxial de dos puertos con una muestra colocada en el centro de la línea de transmisión (Figura 5), de manera que la onda TEM pueda propagarse desde el puerto de entrada al puerto de salida. Los cambios en la impedancia y las características de propagación (parámetros S) de la onda TEM que es medida por medio de un analizador de redes permiten determinar las propiedades dieléctricas del material con pérdidas<sup>26</sup>.

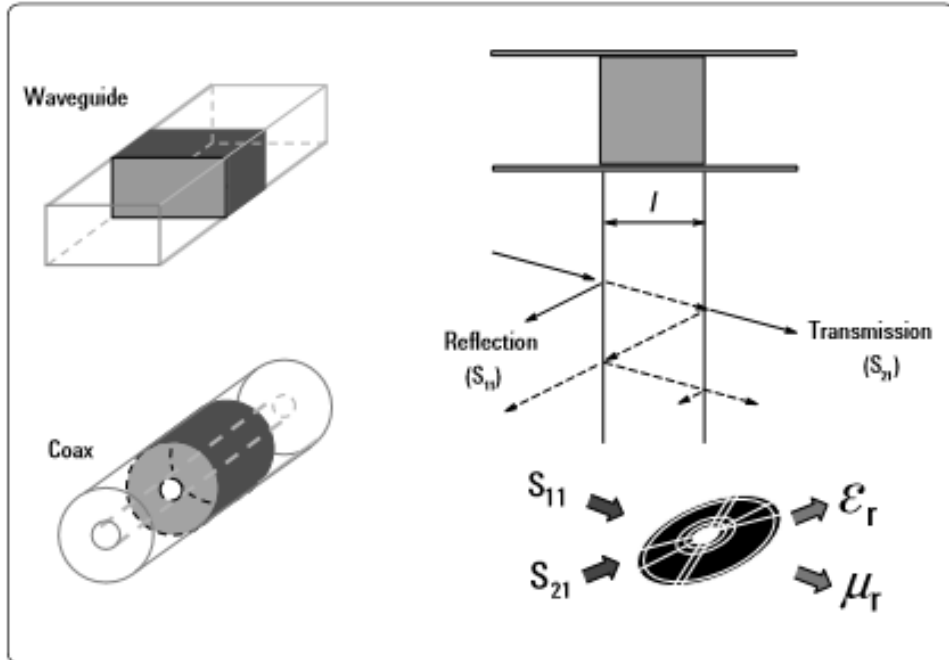
<sup>24</sup> ARAI, Masayuki; BINNER, Jon G. P and CROSS, Tom E. Estimating errors due to sample surface roughness in microwave complex permittivity measurements obtained using a coaxial probe. *Electron. Lett.* 31: pp.115–117 (1995)

<sup>25</sup> AWANG, Zaiki et al. A Free-Space Method For Complex Permittivity Measurement Of Bulk And Thin Film Dielectrics At Microwave Frequencies. Vol. 51, 307–328, (2013).

<sup>26</sup> KOMAROV. Op cit, p 10

En general el método de línea de transmisión es más costoso para el mismo rango de frecuencia que el de sonda coaxial abierta, y las mediciones son más difíciles de realizar y requieren mucho tiempo.

**Figura 5. Diagrama experimental del método de línea de transmisión.**



*Fuente: Agilent Technologies, "Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials," Notas de Aplicación, Junio. 2006.*

Este método descrito anteriormente cuenta con una buena precisión para materiales con altas pérdidas<sup>27,28,29</sup>, pero tiene requisitos estrictos en cuanto a la forma y los tamaños de la muestra. En particular, la forma de la muestra se necesita ajustar con

<sup>27</sup> Agilent Technologies. Op cit, p 20

<sup>28</sup> GOMEZ RAMIREZ. Op cit, 29

<sup>29</sup> KOMAROV. Op cit, p.12.

precisión a la sección transversal de la línea de transmisión. En algunos casos para aumentar la precisión se requiere medir varias muestras de varios tamaños. Incluso, a pesar de los inconvenientes, el método de línea de transmisión sigue siendo muy utilizado.

**2.3.3 Método de cavidades resonantes.** El método de cavidades resonantes también es muy usado para determinar la permitividad de materiales que presentan pérdidas. El método de resonancia más popular es el método de perturbación (PM), que compara ciertas características electromagnéticas del vacío y de la cavidad de resonancia que suele ser rectangular o cilíndrica parcialmente cargada. La Figura 6 muestra un diagrama de la configuración experimental de un sistema del método de perturbación. Si se quiere obtener una medida dieléctrica la muestra se coloca en un campo eléctrico máximo. A veces, los errores de medición se dan cuando hay espacios entre la muestra y las partes conductoras del resonador metálico<sup>30</sup>.

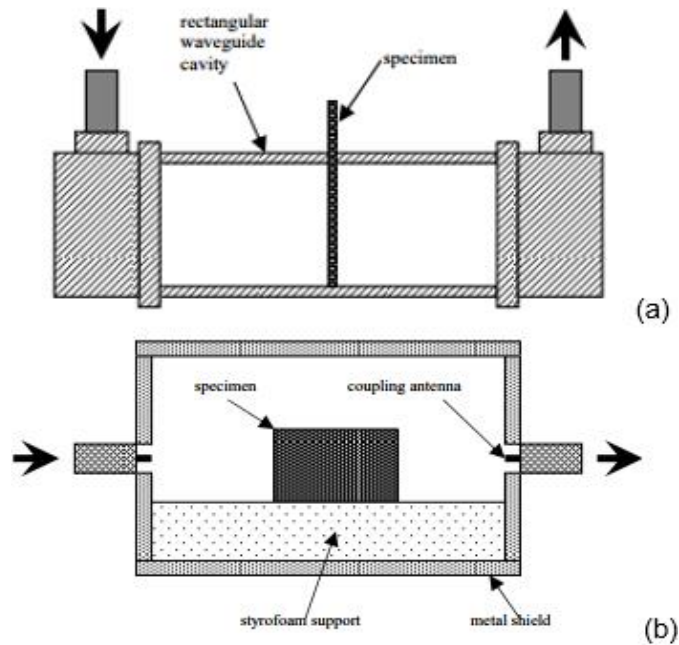
También hay algunas restricciones en el uso del PM de resonancia convencional para medir la tangente de pérdida dieléctrica de medios de baja pérdida. Si las pérdidas de conducción en las paredes de la cavidad son mayores que (o comparables a) las pérdidas dieléctricas de la muestra, el factor Q del resonador puede cambiar y no se obtendrá los valores correctos de  $\epsilon''$ . El PM es más preciso que los métodos de guía de ondas. Es especialmente adecuado para materiales y sustancias de pérdidas media y baja. Normalmente se utilizan muestras de pequeño tamaño con esta técnica, pero el método de perturbación proporciona mediciones de propiedades dieléctricas a sólo una frecuencia fija.

---

<sup>30</sup> SHEEN, Jyh. Microwave Measurements of Dielectric Properties Using a Closed Cylindrical Cavity Dielectric Resonator. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 14, October (2007)

Este método suele ser más costoso, ya que los sistemas de medida comerciales de Hewlett-Packard son más caros que el sistema de sonda coaxial de extremo abierto.

**Figura 6. (a) Diagrama de la técnica de cavidad de perturbación. (b) Configuración de medición del resonador dieléctrico de cavidad cilíndrica cerrada.**



Fuente: Jyh Sheen, "Microwave Measurements of Dielectric Properties Using a Closed Cylindrical Cavity Dielectric Resonator", 2007.

### **3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA**

En este capítulo se describe paso a paso el procedimiento para la obtención de la permitividad dieléctrica, que comprende de manera general los siguientes elementos:

- Uso del método de sonda coaxial con terminación abierta, como método para realizar la espectroscopia dieléctrica de las sustancias de interés.
- Fabricación y caracterización de la sonda coaxial.
- Selección del modelo teórico circuital de la sonda coaxial y determinación de los elementos circuitales por medio de sustancias de referencia con parámetros dieléctricos conocidos
- Caracterización y calibración del sistema de medida del coeficiente de reflexión (analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz).
- Exportación, importación y procesamiento de los datos desde el sistema de medida hacia el sistema de cómputo.

#### **3.1 MÉTODO DE MEDIDA: SONDA COAXIAL CON TERMINACIÓN EN CIRCUITO ABIERTO**

Como se explica en la sección anterior este método utiliza la medida del coeficiente de reflexión para caracterizar los parámetros dieléctricos de la muestra bajo prueba (MUT). La sonda se conecta a través de un cable coaxial al analizador vectorial de redes y se pone en contacto con la MUT. Algunos autores y fabricantes de este tipo de sondas afirman que la sonda se puede sumergir incluso hasta 5mm dentro de la

MUT y presentan dimensiones que debe tener la MUT, como se registra en<sup>31</sup>. Es importante verificar que el tamaño de la MUT sea lo suficientemente grande para que la onda que viaja a través de ella no penetre hasta el fondo del recipiente alterando los parámetros de transmisión y reflexión de la onda. Una forma de verificar esto es a través del VNA, un cambio brusco de impedancia que representaría el fondo de la MUT se evidencia en el cambio del coeficiente de reflexión que se muestra en la pantalla del VNA en ‘tiempo real’.

Los modelos teóricos circuitales de la sonda, relacionan la permitividad dieléctrica relativa compleja, con la impedancia del sistema sonda-MUT, a su vez la teoría de líneas de transmisión relaciona la impedancia con el coeficiente de reflexión en la interfaz sonda-MUT. Sin embargo, los valores de los elementos del circuito de la sonda son desconocidos, así que se mide una sustancia con las propiedades dieléctricas conocidas para determinar estos valores. Conociendo los parámetros de las ecuaciones se determina la parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa de la MUT.

### **3.2 SONDA COAXIAL DE BAJO COSTO**

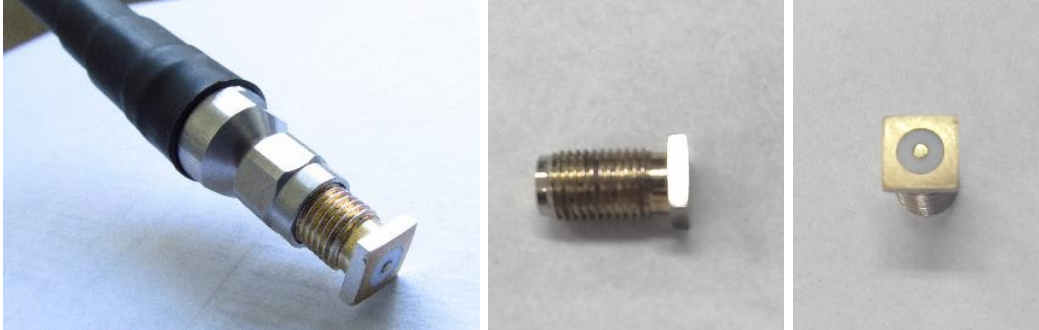
La sonda de medición está constituida por un conector coaxial tipo SMA al cual se le corta el conector interior y posteriormente se pule, de tal forma que quede una superficie plana lo más uniformemente posible. Esto es importante fundamentalmente cuando se requiere medir sustancias sólidas, porque así se

---

<sup>31</sup> Agilent Technologies. Technical Overview, Agilent 85071E Dielectric Probe Kit. Agilent literature number 5989-0222EN, June 14, 2012.

garantiza un mejor contacto entre las superficies, evitando zonas de aire en la interfaz que puedan perjudicar las mediciones. La Figura 7 muestra la sonda adaptada para las mediciones conectada al final del cable coaxial del VNA.

**Figura 7. Sonda SMA utilizada en las mediciones**



*Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe, TECCIENCIA, Vol. 12 No. 21., 2016.*

La sonda se fija a una estructura que la mantiene estática y se sumerge en la muestra garantizando un contacto pleno y la eliminación de las burbujas de aire que se pudieran formar. Después de realizado el proceso de medida la sonda debe limpiarse, antes de realizar una nueva inmersión. Según sea el tipo de MUT se sugiere usar acetona o basta con hacer un lavado de la sonda con agua.

### **3.3 MODELO TEÓRICO**

La teoría de líneas de transmisión relaciona la cantidad de energía electromagnética transmitida y reflejada que sucede en un cambio de medio con el valor de la impedancia o admitancia de estos de la siguiente manera:

$$S_{11} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

Donde  $Z_L$  es la impedancia del medio transmisor y  $Z_0$  es la impedancia del medio incidente.  $S_{11}$  es el coeficiente de reflexión que mide la relación entre la cantidad de energía reflejada respecto a la cantidad de energía incidente. La Ecuación 6 se puede convertir fácilmente en una relación entre el coeficiente de reflexión y la admitancia del medio transmisor,

$$Y = Y_0 \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (7)$$

Donde  $Y_0$  es la admitancia del medio incidente que generalmente es de 0.02 Siemens, ya que corresponde a la impedancia de un cable coaxial típico de 50 Ohms de impedancia característica. El valor de  $Y$  corresponde a la admitancia de la carga conectada a la línea de transmisión que incluye las características del medio transmisor.

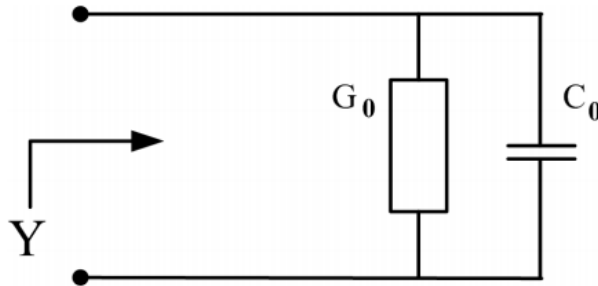
Dada la admitancia  $Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega)$  asociada a la terminación de la sonda coaxial, se asocia un modelo circuital adecuado para relacionar sus partes real e imaginaria con las partes real e imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$ . En la literatura se encuentran diferentes modelos basados en representaciones circuitales de la estructura física y la geometría del montaje y que tienen en cuenta los fenómenos de polarización y pérdidas, incluidas las pérdidas de radiación.<sup>32,33</sup> Los modelos varían según el grado de complejidad y exactitud además de las magnitudes físicas que se consideren.

<sup>32</sup> AGUILERA BEMUDEZ. Op cit, p 10

<sup>33</sup> SEEWATTANAPON. Op cit, p 315

A continuación, se muestran dos modelos circuitales de sonda coaxial con terminación abierta.

**Figura 8. Modelo de circuito equivalente de una sonda de medición.**



Fuente: R. Zajíček, J. Vrba, K. Novotný. *Evaluation of a Reflection Method on an Open-Ended Coaxial Line and its Use in Dielectric Measurements*, Acta Polytechnica Vol. 46 No. 5, 2006.

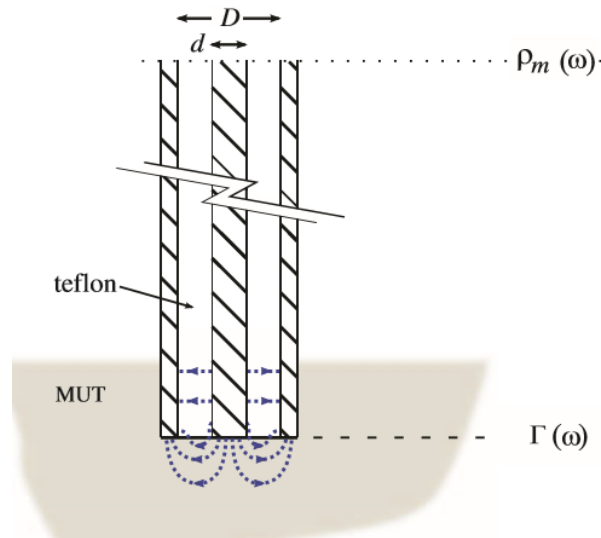
Al momento de propagar la señal por la sonda coaxial la señal reflejada ( $S_{11}$ ) puede ser medida y relacionada por la Ecuación 8:

$$Y = j\omega\epsilon C_0 + \sqrt{(\epsilon^5)G_0} \quad (8)$$

El modelo de circuito consiste en una conductancia paralela  $G_0$  y una susceptancia capacitiva  $C_0$ . La cantidad  $G_0$  es un coeficiente que representa la pérdida de radiación y  $C_0$  consta de dos partes que son el interior de la capacitancia de la sonda y el efecto de borde del campo como consecuencia del material de prueba, en otras palabras,  $C_0$  es la capacitancia entre el cable interno y externo de la estructura coaxial (Figura 9)<sup>34</sup>

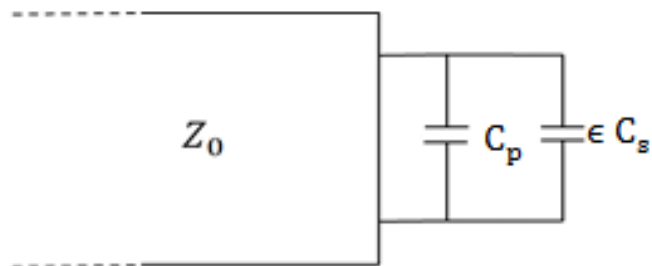
<sup>34</sup> ZAJÍČEK. Op cit, p 52

**Figura 9. Esquema de la geometría experimental que muestra el extremo abierto de la sonda coaxial sumergida en el MUT.**



Fuente: J. S. Bobowski and T. Johnson., “Permittivity measurements of biological samples by an open- ended coaxial line” Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 40, pp.159–183, 2012 (2012).

**Figura 10. Modelo circuital asociado a la terminal abierta del cable coaxial**



Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe, TECCIENCIA, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.

Este modelo presenta dos parámetros asociados a dos capacitancias en paralelo  $C_s$  y  $C_p$ . Estos tienen en cuenta efectos tales como la variación de la distribución del campo eléctrico en los bordes del coaxial y las pérdidas en el dieléctrico. Por debajo de la frecuencia de corte de la línea de transmisión coaxial, el modo electromagnético transversal (TEM) es el único modo de propagación. En este modo, el campo eléctrico es radial y el campo magnético rodea el conductor central en todas partes dentro de la sonda coaxial excepto cerca de la punta abierta donde se producen el efecto de borde debido al cambio brusco de impedancia (Figura 9). Este efecto se modela por lo general como dos condensadores paralelos  $C_p$  y  $C_s$ . Aquí,  $C_p$  es puramente reactiva y representa el efecto de borde que se produce dentro del dieléctrico de la sonda coaxial (sin pérdida asumida), mientras que  $C_s$  representa efecto de borde que se produce dentro de la muestra. En la Ecuación 9 se presenta la admitancia total de este circuito  $Y$ ,

$$Y = j (\omega C_p + \omega \epsilon C_s) \quad (9)$$

Aquí  $\epsilon$  representa la permitividad relativa dieléctrica compleja del medio  $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$ .

Relacionando la Ecuación 7 con cualquiera de las ecuaciones de los modelos circuitales (8, 9) se puede obtener el valor de  $\epsilon$  en términos de  $S_{11}$  y de los parámetros del circuito. Para conocer los parámetros del circuito se despejan de la ecuación y se mide el coeficiente de reflexión de una sustancia con permitividad dieléctrica relativa compleja ( $\epsilon$ ) conocida. A este proceso se le denomina calibración con sustancia de referencia. En la literatura científica se reportan los valores medidos por diferentes métodos de las constantes  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  dentro de un rango variado de frecuencias y temperaturas.<sup>35</sup>

<sup>35</sup> GREGORY, Andrew P. Table of Complex Permittivity of Dielectric Reference Liquids at frequencies Up to 5 GHz. ResearchGate, Technical Report, Jan. 2012.

Es aconsejable que estos parámetros sean obtenidos con sustancias de propiedades similares a las que posteriormente se desean medir. Entre las sustancias más usadas como referencia para determinar los valores de dichos parámetros están el agua destilada y algunos alcoholes con concentraciones conocidas.

### **3.4 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN, CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA Y CALIBRACIÓN DEL PLANO DE REFERENCIA**

Para medir el coeficiente de reflexión de la sustancia de interés se utilizó un analizador de redes vectoriales de Rohde&Schwarz ZVL que opera en un rango de frecuencia entre 9 kHz y 3 GHz. Este se conecta a un cable coaxial que en su parte final tiene conectada la sonda de medición. Un aspecto importante es la calibración del plano de referencia que se muestra como la línea punteada en la Figura 11. La calibración del plano de referencia se hace por medio del kit de calibración propio del VNA, compuesto por tres cargas diferentes: un corto, un circuito abierto y una carga adaptada al puerto de entrada del instrumento; Sin embargo, debido a que se adapta una sonda coaxial, se traslada el plano de referencia (segunda línea punteada de la Figura 11). Para la calibración de este nuevo plano existen diferentes métodos,<sup>36,37</sup> entre ellos el denominado “de-embedding” que se realiza a través de una ventana de dialogo que proporciona el VNA en donde se configura una red o modelo circuital al que se le introducen los parámetros definidos en esta. Con el fin de evitar, siempre que sea posible, el proceso de “de-embedding” que conllevaría acciones adicionales como simulaciones numéricas, es posible calibrar en este

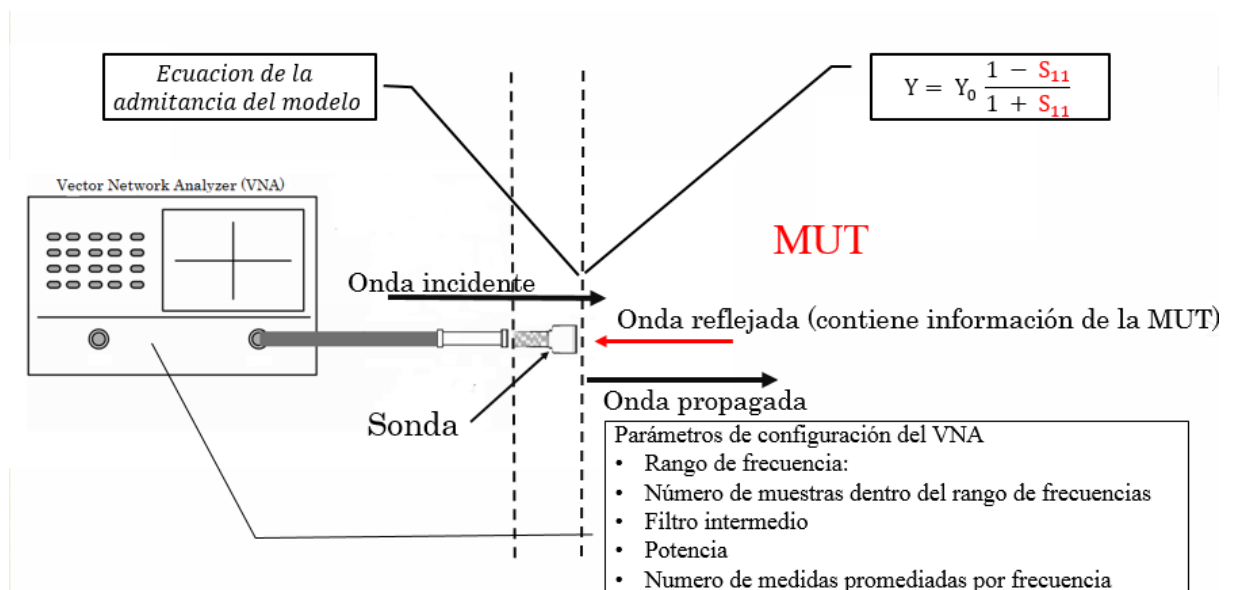
---

<sup>36</sup> SEEWATTANAPON. Op cit, p 317

<sup>37</sup> GOMEZ RAMIREZ. Op cit, 33

punto simulando el corto circuito con una lámina de papel aluminio, y el circuito abierto poniendo la sonda al espacio libre. La efectividad del método se confirma verificando que los resultados de la calibración se ajusten a los establecidos por el fabricante, típicamente la magnitud del coeficiente de reflexión con carga adaptada esta alrededor de -35 dB y para corto circuito y circuito abierto 0dB, en todo el rango de frecuencias de interés.

**Figura 11. Diagrama del método de medida.**



La medida del parámetro  $S_{11}$  es guardada y exportada en formato compatible con MatLab (gracias a que el VNA cuenta con esta función), que se usara para desarrollar el algoritmo que da solución a la ecuación y arroja como resultado los valores de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  en función de la frecuencia.

### **3.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SONDA COAXIAL EN SUSTANCIAS CON PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJA CONOCIDA.**

A continuación, se presentan los resultados de las medidas a tres sustancias aplicando la metodología desarrollada durante el presente capítulo (Figuras 12, 13 y 14). Se observa que las magnitudes de la permitividad de las sustancias coinciden con los modelos teóricos, estos resultados obtenidos permiten dar confianza en la metodología. Las sustancias medidas fueron agua destilada, metanol y etanol en concentración de 96%. Estas sustancias fueron proporcionadas por la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

Los valores configurados en el VNA para las medidas del coeficiente de reflexión de las sustancias fueron los siguientes:

#### **Parámetros de configuración del VNA**

- Rango de frecuencia: 300 KHz – 3 GHz
- Número de muestras dentro del rango de frecuencias: 2001
- Filtro intermedio: 1 kHz
- Potencia: 0 dBm
- Factor de promediado: 10

Todas las medidas del parámetro  $S_{11}$  fueron realizadas a una temperatura que se mantuvo en 26°C.

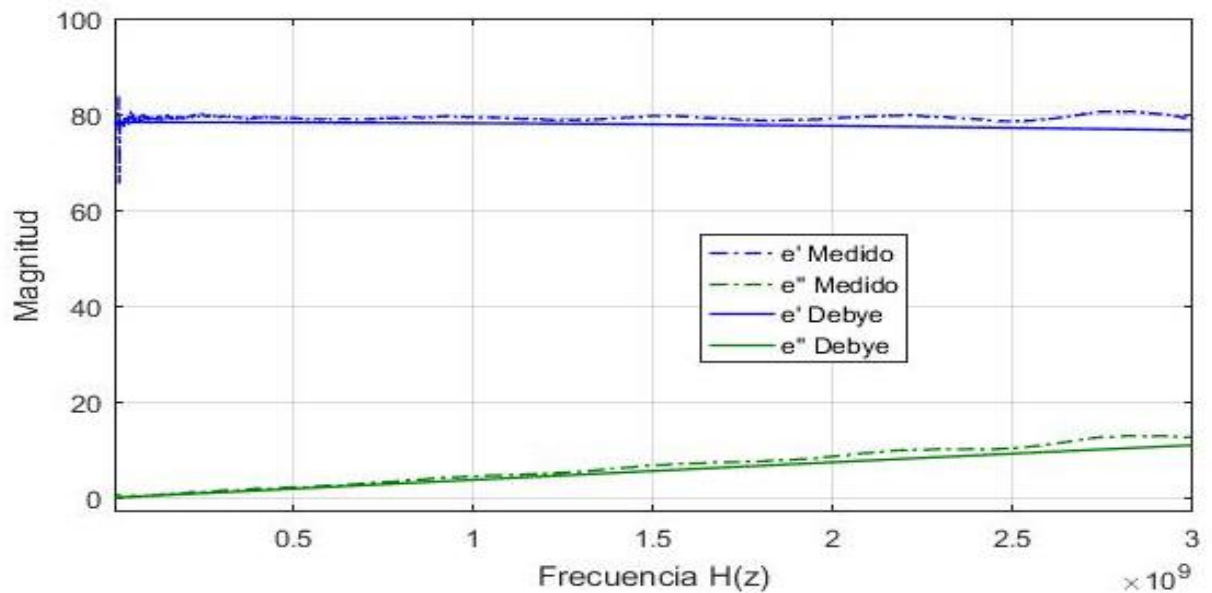
Partiendo del modelo circuital de la Figura 10 e igualando las partes reales e imaginarias de las ecuaciones 7 y 9 se obtiene un sistema de dos ecuaciones, 10 y 11, del cual se puede despejar  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  a partir de las mediciones del coeficiente de reflexión y de los valores de  $C_s$  y  $C_p$ .

$$\varepsilon' = \frac{-2|S_{11}|\sin(\theta)}{Z_0 w C_s (1 + 2|S_{11}|\cos(\theta) + |S_{11}|^2)} - \frac{C_p}{C_s} \quad (10)$$

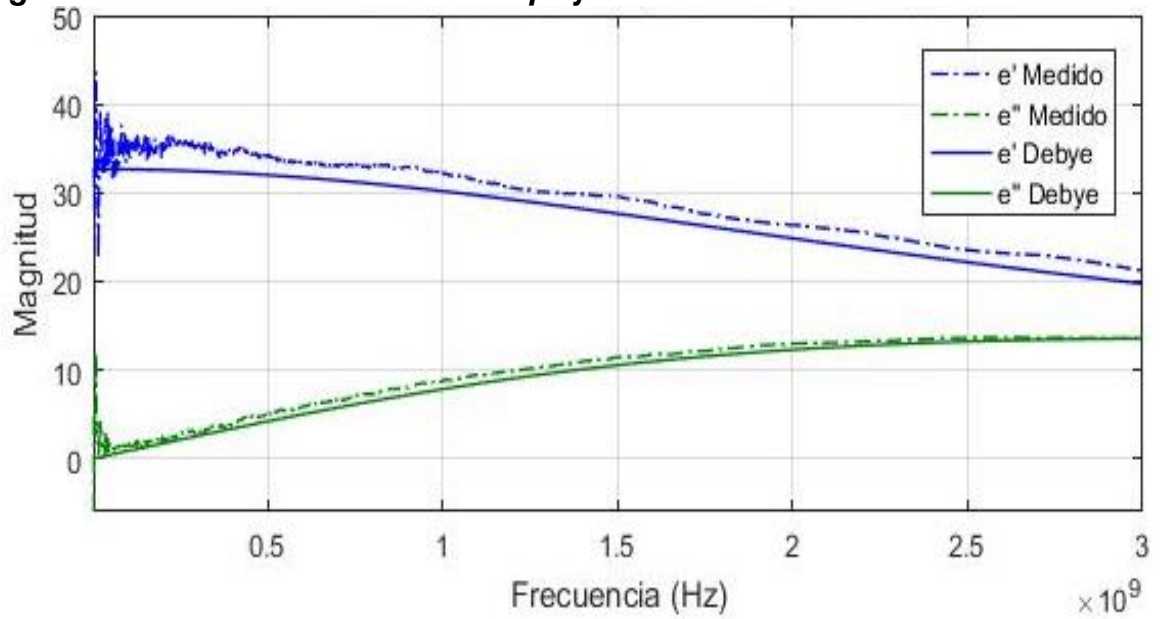
$$\varepsilon'' = \frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_0 w C_s (1 + 2|S_{11}|\cos(\theta) + |S_{11}|^2)} \quad (11)$$

Aquí  $|S_{11}|$  es la magnitud del coeficiente de reflexión y  $\theta$  su ángulo de fase. Los valores de  $C_s$  y  $C_p$  deben ser previamente obtenidos de las mismas ecuaciones mediante el proceso de calibración con una sustancia de permitividad dieléctrica compleja conocida en el rango de frecuencias de interés.

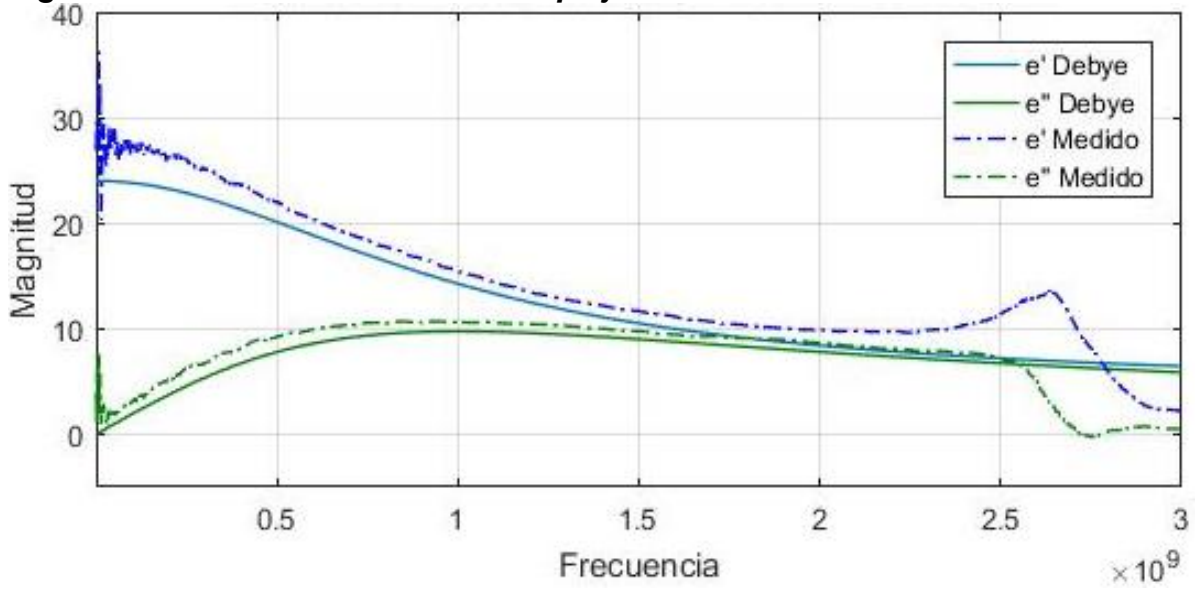
**Figura 12. Permitividad relativa compleja del agua**



**Figura 13. Permitividad relativa compleja del metanol al 96%**



**Figura 14. Permitividad relativa compleja del etanol al 96%**



#### 4. MEDICIÓN DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA EN ACEITES DE TRANSFORMADORES DE ALTA TENSION

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la medición de la permitividad dieléctrica de algunas muestras de aceite de transformadores de alta tensión en un rango de frecuencias comprendido entre 100 MHz a 3GHz haciendo uso de la sonda coaxial de bajo costo y la metodología presentada en el capítulo anterior.

La degradación de estos aceites con el tiempo de uso produce la aparición de diferentes sustancias como gases, agua y celulosa entre muchas otras. Existen diversos métodos de caracterización y medición de estas sustancias que se asocian a graves daños en los transformadores y a su mal funcionamiento, todo esto conlleva a altos costos de mantenimiento y reparación. Se tienen en cuenta tres tipos de muestras de aceite en general: nuevas, usadas y aquellas muestras usadas a las que se les ha realizado un proceso de filtración para su recuperación y nuevo uso. Las mediciones son realizadas utilizando la sonda adaptada a partir de un conector coaxial SMA con terminación abierta de bajo costo. Los valores obtenidos en el analizador de redes vectorial VNA del coeficiente de reflexión son convertidos en la parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja mediante el uso del modelo teórico de la Figura 10 de la terminal abierta del cable. Dervos y Paraskevas<sup>38</sup> muestran un trabajo similar al aquí presentado, pero se caracterizan las muestras de aceite de transformador usando un medidor de parámetros RLC de alto costo; además, el rango de frecuencias analizado por ellos va desde los 20 Hz hasta solo 1 MHz.

---

<sup>38</sup>DERVOS. Op cit, pp. 302 -316.

#### 4.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO CIRCUITAL DE SONDA COAXIAL

Como se mencionó anteriormente, es adecuado, cuando sea posible, tomar como sustancia de referencia una sustancia con características similares a la que se desea medir. Por tal motivo, para la medida de la permitividad dieléctrica de los aceites de transformadores de alta tensión se tomó un aceite de oliva con un grado de acidez del 0.3%, que es de fácil adquisición, y su modelo analítico de dispersión aparece reportado en VRBA<sup>39</sup> a una temperatura de 25°C. La Ecuación 12 especifica el modelo junto con los parámetros requeridos:

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \left(j \frac{f}{f_r}\right)^{1-\beta}} \quad (12)$$

En esta ecuación el valor de  $\epsilon_{\infty}$  se tomó como 2.39,  $\epsilon_s$  igual a 3.08, el valor de  $f_r$  de 315 MHz, y el valor de  $\beta$  de 0.33. Una vez medida la magnitud del coeficiente de reflexión  $|S_{11}|$  y su fase  $\theta$  se remplazan en las ecuaciones 10 y 11 junto con los valores de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  del modelo de Debye y se calculan los valores de  $C_p$  y  $C_s$  para cada frecuencia. La Figura 15 muestra los resultados obtenidos, se observan valores típicos del orden de décimas de picofaradios.

##### Parámetros de configuración del VNA

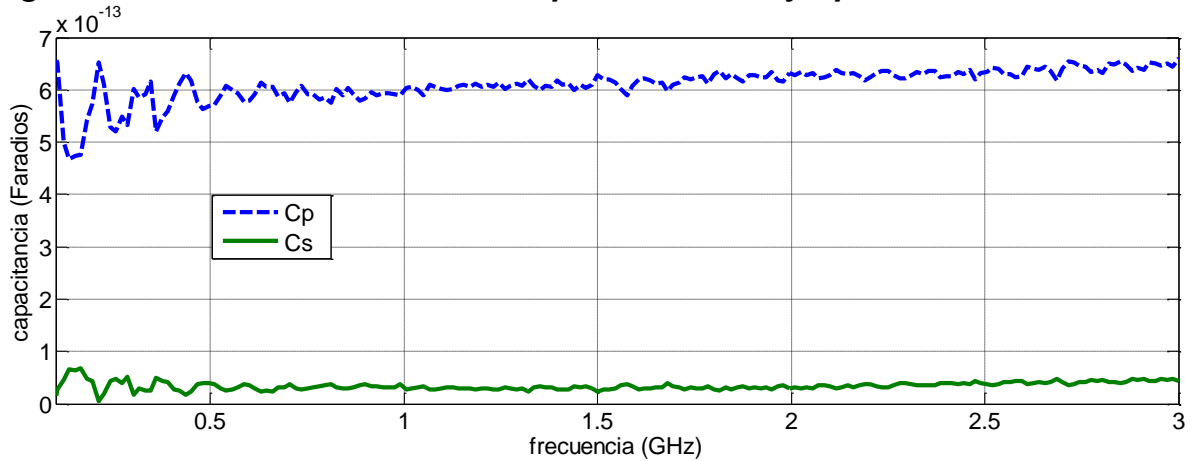
- Rango de frecuencia: 100 MHz – 3 GHz
- Número de muestras dentro del rango de frecuencias: 201

---

<sup>39</sup> VRBA, Jan and VRBA, David. Temperature and Frequency Dependent Empirical Models of Dielectric Properties of Sunflower and Olive Oil. Radioengineering, vol. 22, n4, pp. 1281 -1287, Dec. 2013

- Filtro intermedio: 1 kHz
- Potencia: 0 dBm
- Factor de promediado: 10

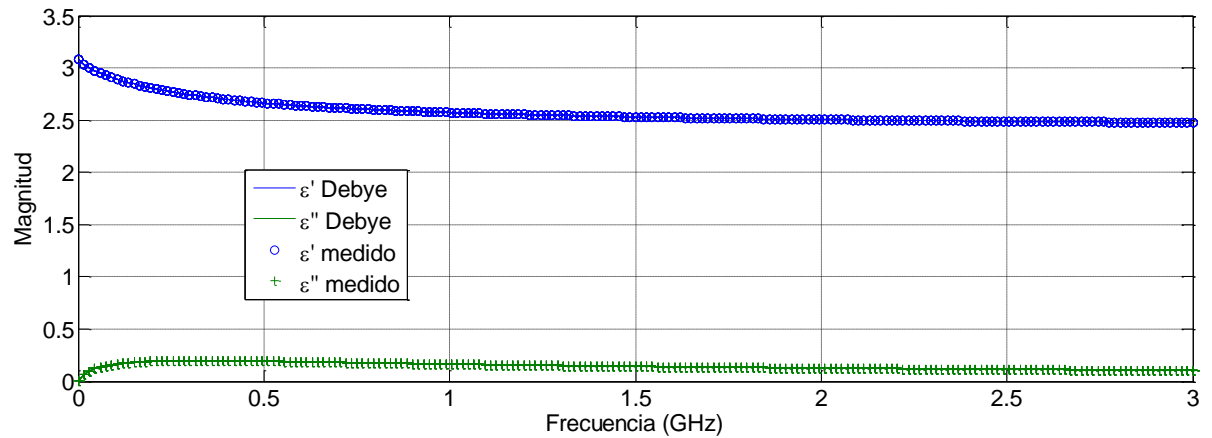
**Figura 15. Valores calculados de los parámetros Cs y Cp**



*Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., "Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe", TECCIENCIA, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.*

La validez del modelo circuital utilizado puede comprobarse utilizando los valores de Cp y Cs obtenidos para calcular la permitividad dieléctrica de la misma sustancia de referencia –aceite de oliva- utilizando nuevamente las ecuaciones 10 y 11 y comparando los resultados con los del modelo de Debye en el rango de frecuencias especificado. La Figura 16 muestra estos resultados en donde se aprecia una coincidencia notable.

**Figura 16. Permitividad dieléctrica teórica y medida de la sustancia de referencia.**



Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., “Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe”, *TECCIENCIA*, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.

#### 4.2 CÁLCULO DE $\epsilon'$ Y $\epsilon''$ .

Las muestras de aceites de transformador de alta tensión utilizados son del tipo parafínico, diferente a los aceites utilizados en décadas anteriores que ya fueron prohibidos por su alto contenido de sustancias tóxicas, incluidos *Polychlorinated Biphenyls* (PCBs). Estas muestras de aceite corresponden a las diferentes etapas de su recuperación, desde que se reciben, hasta que salen del proceso completo de filtración. También se incluye una muestra de aceite nuevo para su comparación.

La Figura 17 muestra la gama de aceites utilizados, los cuales quedan bien diferenciados por la tonalidad de su color: el más oscuro corresponde a un aceite completamente quemado y el más claro es el aceite nuevo. Numerando los aceites de izquierda a derecha, desde el más claro, muestra 01, hasta el más oscuro, muestra 05 se les asigna la siguiente clasificación:

- Muestra 01: aceite nuevo
- Muestra 02: aceite completamente filtrado
- Muestra 04: aceite en etapa intermedia de recuperación
- Muestra 05: aceite quemado recibido para recuperación

La muestra 03 corresponde a otro aceite recibido que corresponde a un transformador diferente, entregado para recuperarlo pero que no está quemado.

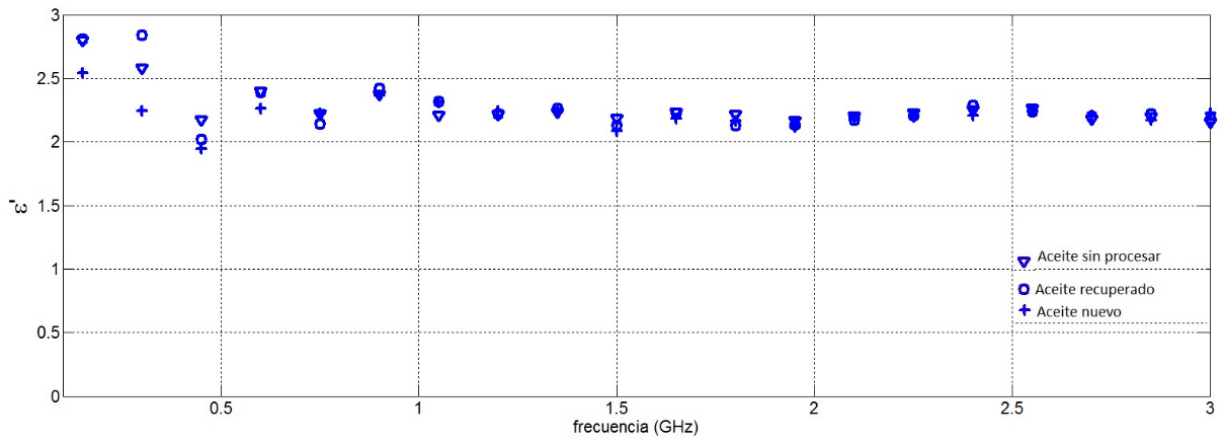
**Figura 17. Muestras de aceite utilizadas y clasificadas según su etapa de recuperación y color.**



*Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., "Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe", TECCIENCIA, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.*

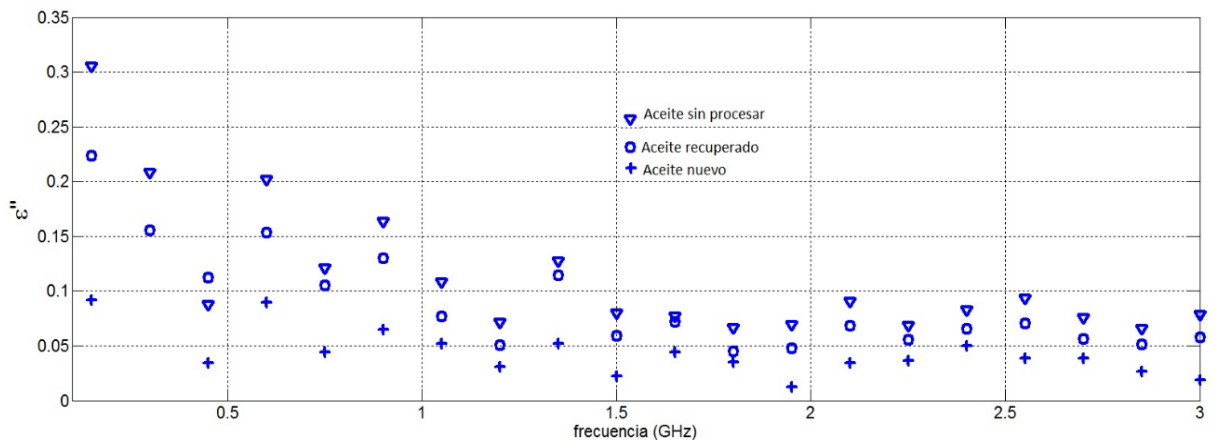
La Figura 18 muestra los resultados obtenidos de la constante dieléctrica de tres de las muestras de aceites: el aceite nuevo, el aceite recuperado y el aceite sin procesar quemado; y en la Figura 19 se muestra el valor de la constante de pérdidas correspondiente.

**Figura 18. Parte real de la permitividad dieléctrica compleja medida de tres aceites de transformador de alta tensión.**



Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe, *TECCIENCIA*, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.

**Figura 19. Parte imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja medida de tres aceites de transformador de alta tensión**



Fuente: Aguilera, H., Rodriguez, O. V., Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe, *TECCIENCIA*, Vol. 12 No. 21., 60-66, 2016.

Los resultados obtenidos permiten realizar una serie de observaciones:

- Los valores bajos de la constante dieléctrica, y aún más de la constante de pérdidas, son del mismo orden de magnitud que los reportados por Dervos.<sup>40</sup> Las pérdidas bajas concuerdan con lo que se espera de un aceite aislante para manejo de altas tensiones.
- Mientras que, en el rango de frecuencias tenido en cuenta, 100 MHz- 3GHz, la constante dieléctrica permanece casi constante, la constante de pérdidas disminuye. Esta disminución concuerda con un modelo de pérdidas proporcional a  $1/\omega$ , asociado a la disminución de la movilidad de las cargas iónicas a medida que la frecuencia se incrementa, mientras que la polarización no sufre grandes variaciones.
- El valor de la constante de pérdidas medido en los aceites concuerda con lo esperado. Las menores pérdidas se evidencian en el aceite nuevo, mientras que las mayores pérdidas se presentan en el aceite que no ha pasado por el proceso de filtrado o de recuperación. Es de notar que las cualidades del aceite nuevo son mejores que las del aceite recuperado. Las pérdidas en el aceite están relacionadas con la disminución del nivel de aislamiento del aceite.
- Al igual que otras técnicas, donde se clasifica el grado de aislamiento de los aceites de acuerdo al color, al valor del pH, la rigidez dieléctrica, etc.; los resultados evidencian que la medida de la constante de pérdidas puede ser utilizada como un factor extra de clasificación que puede relacionarse posteriormente con algunos factores de deterioro del aceite: creación de gases, aparición de agua, contaminación por celulosa etc.

---

<sup>40</sup> DERVOS. Op cit, pp. 302 -316.

## 5. MEDICIÓN DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA RELATIVA COMPLEJA A MUESTRAS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA DISUELTAS EN MEDIO ACUOSO

Este capítulo presenta las medidas de permitividad ( $\epsilon$ ) de nanopartículas de plata disueltas en medio acuoso, en este caso en agua milli-Q, este tipo de agua desionizada es similar al agua destilada a la que se le han extraído todo tipo de iones. Las sustancias fueron suministradas por la estudiante de maestría Ana María Pinilla bajo la dirección y apoyo del Pr. Fernando Martínez, adscritos a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Las mediciones se hacen en un rango de frecuencias de 1 MHz a 100 MHz con el objetivo de analizar su comportamiento dieléctrico, en especial su constante de pérdidas ( $\epsilon''$ ), ya que tiene propiedades físico-químicas notables que pueden tener varias aplicaciones médicas -liberación de calor cuando es sometido un campo de radiofrecuencia (RF)-. Las muestras analizadas se categorizaron en tres tipos, un grupo de 4 muestras con nanopartículas de tamaños distintos, otro grupo de tres muestras con nanopartículas del mismo tamaño, pero en concentraciones distintas, y un grupo de dos muestras con diferentes geometrías o formas.

Una de las aplicaciones que destaca en el uso de nanopartículas metálicas, como el oro, la plata o no metálicas como los nanotubos de carbono, es que pueden ser usadas para producir toxicidad térmica en células malignas.<sup>41</sup> Esto representa un enfoque no invasivo con el potencial para tratar muchos tipos de cánceres eficazmente con mínimos o ningún efecto tóxico a las células normales. Se ha demostrado que las nanopartículas con mayor destrucción térmica de los tumores

---

<sup>41</sup> GANNON, Christopher J. *et al.* Carbon Nanotube-enhanced Thermal Destruction of Cancer Cells in a Noninvasive Radiofrequency Field. American Cancer Society DOI <10.1002/cncr.23155> Published online 24 October 2007.

son las nano-capsulas (nanoshells) de oro calentadas mediante el uso de luz de infrarrojo cercano (NIR), o NP de óxido de hierro haciendo uso de fuertes campos magnéticos alternos para calentarlas<sup>42</sup>, sin embargo, estos métodos tienen desventajas que limitan su aplicación práctica en terapias. Por un lado, el calentamiento con NIR no invasiva de las nano-capsulas solo es eficaz en el tratamiento de cáncer superficial (unos pocos mm de profundidad), debido a la dispersión y atenuación que tiene esta radiación en los tejidos biológicos. Y en el caso de hipertermia (aumento de la temperatura en organismos) basada en el campo magnético, es eficaz en el tratamiento de cáncer en tejidos profundos, pero sufre de un efecto conocido como termalización limitada por las nanopartículas de óxido de hierro<sup>43</sup>. El calentamiento de RF de las nanopartículas dentro de las células cancerosas supera las limitaciones principales asociadas con otros métodos no invasivos de calentamiento de NPs, ya que la energía RF penetra bien en el cuerpo para calentar eficientemente las NPs dentro de los tumores de tejidos profundos. Para tal fin se utiliza un generador de señal de 13,56 MHz porque es una frecuencia de trabajo industrial, científica y médica asignada por la Comisión Federal de Comunicaciones; además, se ha demostrado previamente que esta frecuencia produce un calentamiento de los tejidos del organismo mínimo en relación con la tasa de absorción específica (SAR) de la radiación electromagnética en ensayos con mamíferos<sup>44</sup>.

---

<sup>42</sup> MORAN, Christine H. *et al.* Size-Dependent Joule Heating of Gold Nanoparticles Using Capacitively Coupled Radiofrequency Fields”, *Nano Res* (2009) 2: 400-4059

<sup>43</sup> KALAMBUR, Venkat. S.; LONGMIRE, Ellen. K. and BISCHOF, Jhon. Cellular level loading and heating of superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Langmuir* 2005, 23, 12329-12336

<sup>44</sup> GANNON. *Op cit*, p 2661

## 5.1 CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO CIRCUITAL DE SONDA COAXIAL

En la implementación de la metodología para la medida de la permitividad de esta aplicación se tomó el modelo circuital de la Figura 8, un modelo que desarrolla una ecuación de orden superior a la del modelo de la Figura 10 y que tiene en cuenta efectos de las pérdidas por radiación. Para la calibración con sustancia de referencia se usó agua milli-Q y modelo de Debye del agua (Figura 2) en el rango de frecuencias de interés.

Desarrollando la Ecuación 8, se expresa  $\epsilon$  en su forma polar de la siguiente manera:

$$Y = |\epsilon|^{\frac{5}{2}} G_0 \left( \cos \frac{5}{2} \theta + j \operatorname{sen} \frac{5}{2} \theta \right) + j \omega |\epsilon| C_0 (\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) \quad (13)$$

separando la Ecuación 13 en su parte real e imaginaria, e igualando a la parte real e imaginaria de la Ecuación 7 se obtiene un sistema de dos ecuaciones, que permite calcular en primera instancia los valores de  $G_0$  y  $C_0$  (Figura 20) usando la magnitud y fase de  $\epsilon$  tomada del modelo de Debye del agua, y posteriormente  $\epsilon$  de las sustancias de interés.

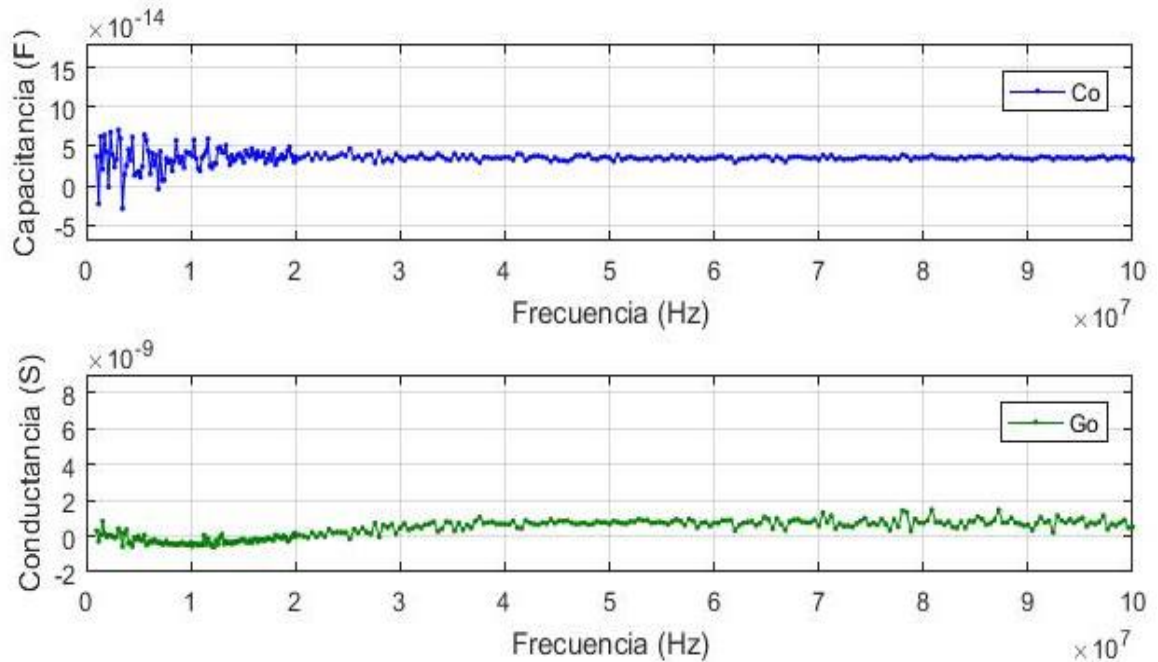
$$\begin{bmatrix} |\epsilon|^{\frac{5}{2}} G_0 \cos \frac{5}{2} \theta & -\omega |\epsilon| C_0 \operatorname{sen} \theta \\ |\epsilon|^{\frac{5}{2}} G_0 \operatorname{sen} \frac{5}{2} \theta & \omega |\epsilon| C_0 \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_0(1 + 2|S_{11}| \cos(\theta) + |S_{11}|^2)} \\ \frac{-2|S_{11}| \operatorname{sen}(\theta)}{Z_0(1 + 2|S_{11}| \cos(\theta) + |S_{11}|^2)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

### Parámetros de configuración del VNA

- Rango de frecuencia: [1 MHz – 20 MHz] u [20 MHz – 100MHz]
- Número de muestras dentro del rango de frecuencias: [101], [201]
- Filtro intermedio: 1 kHz
- Potencia: 0 dBm

- Factor de promediado: 10

**Figura 20. Valores calculados de los parámetros  $C_0$  y  $G_0$**



## 5.2 CÁLCULO DE $\epsilon'$ Y $\epsilon''$

Existen diferentes métodos para la síntesis de las nanopartículas de plata (Ag-NPs). Los procesos y formas de fabricación dan lugar a variación de composición y formas. Diferentes métodos de síntesis conllevan a tamaños variables, morfología, estabilidad y concentración. Las Ag-NPs utilizadas en este trabajo son preparadas a partir de precursores de sal de plata que se reducen en una reacción química. La plata, además de la aplicación en toxicidad térmica, ha sido utilizada como antimicrobiano durante años, para tratar infecciones, en estado sólido y para limpiar

heridas en soluciones de sales de plata (nitrato de plata)<sup>45</sup>.

Las Ag-NPs (disueltas en agua) medidas, se disponen en tres categorías con el objetivo de comparar su respuesta a la exposición de campo eléctrico.

1. Ag-NPs esféricas variando el tamaño y manteniendo la concentración de síntesis o base:
  - i) M11: 63 nm.
  - ii) M12: 53,49 nm.
  - iii) M13: 22,85 nm.
  - iv) M14: 6 nm.
2. Ag-NPs esféricas variando la concentración base y manteniendo su tamaño (~53 nm):
  - i) M12: concentración de base.
  - ii) M22: concentración diluida 1/2 a partir de la concentración base.
  - iii) M23: concentración diluida 1/10 a partir de la concentración base.
3. Ag-NPs con diferentes geometrías:
  - i) M31: Ag-NPs de ~100 nm triangular
  - ii) M32: Ag-NPs de ~100 nm tipo rod (cilíndrica).

**5.2.1 Permitividad dieléctrica compleja de Ag-NPs esféricas variando su tamaño y manteniendo su concentración base de síntesis.** Las Figuras 21 y 22 muestran en conjunto los resultados de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  respectivamente de forma diferenciada y la Figura 23 compara  $\epsilon''$  de las 4 muestras de Ag-PNs. Se hace especial énfasis en la parte imaginaria de la permitividad ya que el objeto de análisis de las muestras tiene mayor relevancia a partir de los resultados de la constante de pérdidas.

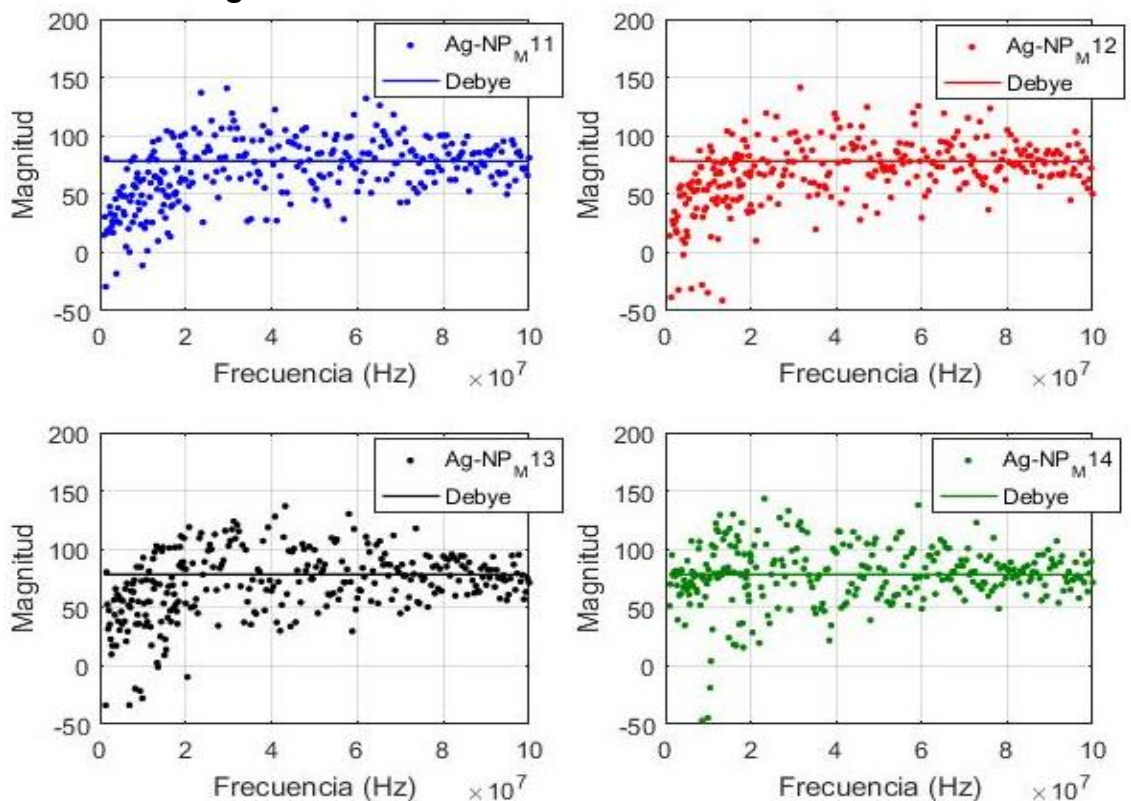
---

<sup>45</sup> CARDOSO, Patricia C. Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud. En: Rev. Hosp. Niños; 58(260):19-28 / 19, (2016)

A partir de los datos obtenidos se realizan las siguientes observaciones:

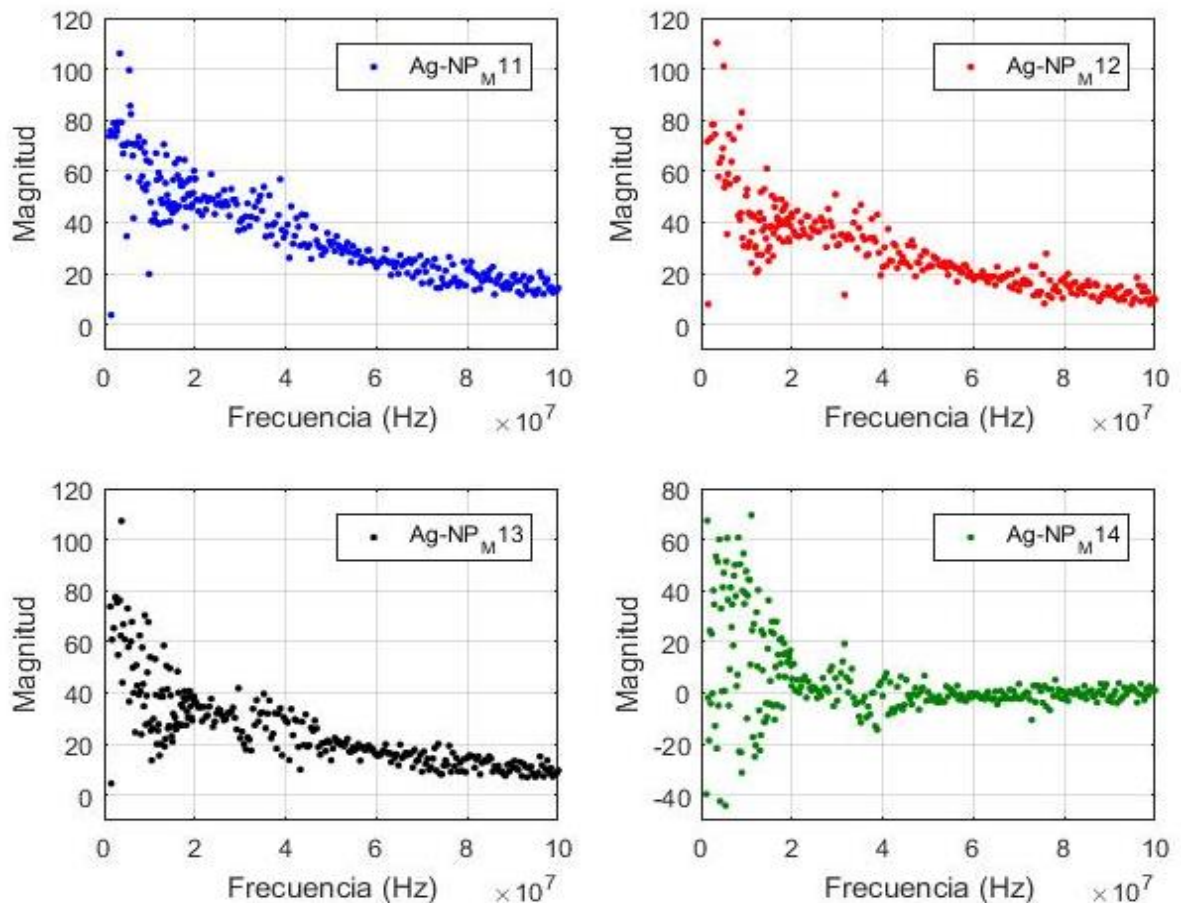
- La solución a la Ecuación 14 arroja resultados negativos a algunas frecuencias (principalmente a algunas frecuencias inferiores a los 10 MHz). En el caso de la Figura 22(d) el valor de  $\epsilon''$  de la muestra es muy cercano a cero y teniendo en cuenta que los valores de la sustancia de referencia también son cercanos a cero en estas frecuencias, pequeñas variaciones en la medida conllevan a que se presente este resultado. Estas soluciones de la ecuación donde el resultado es negativo no tienen sentido físico, pero se pueden asociar a un error de tipo sistemático cometido durante el proceso de medida y que podría ser corregido mediante un proceso de calibración. Sin embargo, se decidió mostrar los resultados tal y como se muestran en la Figura.

**Figura 21. Parte real de la permitividad dieléctrica compleja medida a cuatro muestras de Ag-NPs**



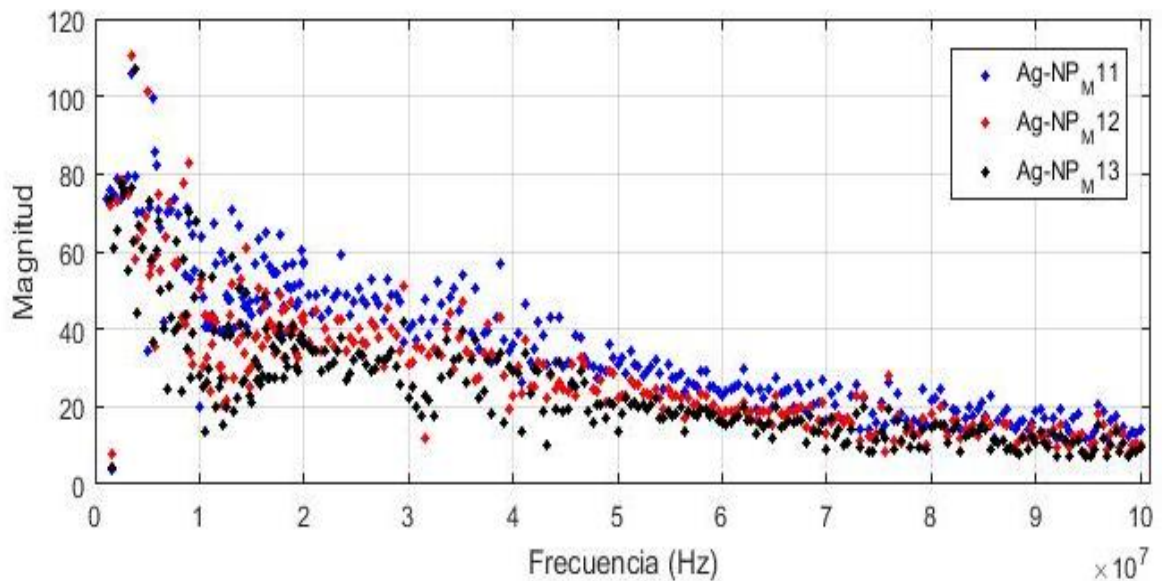
- Los valores de  $\epsilon'$  de las Ag-NPs (Figura 21) presentan una distribución de su magnitud alrededor del valor de la constante dieléctrica del agua según el modelo de Debye, sin embargo, la Figura 24 explicaría el efecto que tiene la presencia de las Ag-NPs en relación a la dispersión de la constante dieléctrica. Cabe mencionar que existe un límite de baja frecuencia donde la sonda coaxial presenta pérdidas óhmicas y dieléctricas, diferente a la suposición de línea de transmisión que transmite perfectamente de la sonda, pero no es posible relacionar esta premisa con la condición de dispersión a partir de los resultados presentados.

**Figura 22. Parte imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja medida a cuatro muestras de Ag-NPs**



- Se evidencia que las Ag-NPs de plata de ~63 nm (M11) presenta mayores pérdidas asociadas a la disipación de calor que M12 y esta a su vez mayores que M13 y M13 mayores que M14 (Figura 23), sin embargo, no se puede concluir que a mayor tamaño de la NP se produzcan mayores pérdidas por disipación, ya que las muestras de estudio no son equivalentes en su concentración debido a que las condiciones de síntesis que conllevan a la preparación de NPs de determinado diámetro son diferentes entre sí.
- Como se ha expresado anteriormente,  $\epsilon''$  disminuye con forme la frecuencia aumenta, siguiendo una curva característica de  $1/\omega$  asociada al mecanismo de pérdidas por conducción iónica como generalmente se presentan en la mayoría de modelos teóricos.

**Figura 23. Comparación de la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja medida a muestras de Ag-NPs**

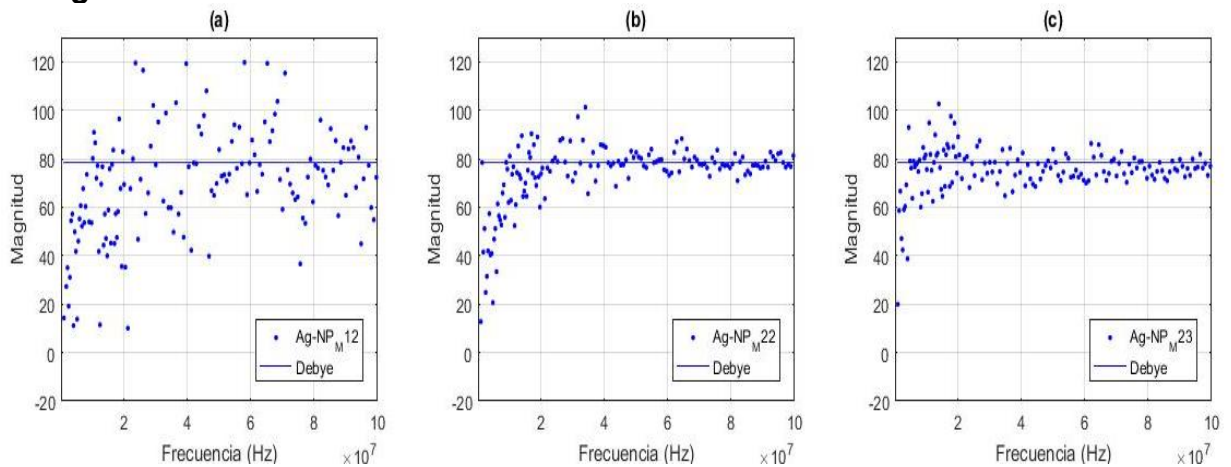


**5.2.2 Permitividad dieléctrica compleja de Ag-NPs variando la concentración de síntesis.** A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las medidas de permitividad dieléctrica relativa compleja a Ag-NPs, disueltas en agua, a tres concentraciones diferentes.

La Figura 24 muestra los valores de  $\epsilon'$  de Ag-NPs de  $\sim 53$  nm en tres diferentes concentraciones. En la Figura 24a la MUT está sin diluir, en la Figura 24b la MUT se encuentra diluida por un factor de  $\frac{1}{2}$  y en la Figura 24c la MUT se diluyó por un factor de  $\frac{1}{10}$ .

Estos resultados permiten evidenciar el efecto que tienen las Ag-NPs en el comportamiento de la constante dieléctrica de la MUT, es decir, en la capacidad de almacenar energía. A bajas frecuencias (menores a  $\sim 15$  MHz)  $\epsilon'$  disminuye notablemente en comparación con la constante dieléctrica que presenta el agua ( $\epsilon'_a$ ),  $\epsilon'$  comienza a crecer conforme aumenta la frecuencia y a partir de  $\sim 20$  MHz se mantiene oscilante alrededor de  $\epsilon'_a$ .

**Figura 24. Parte real de la permitividad dieléctrica compleja medida a muestras de Ag-NPs de  $\sim 53$  nm en tres diferentes concentraciones.**

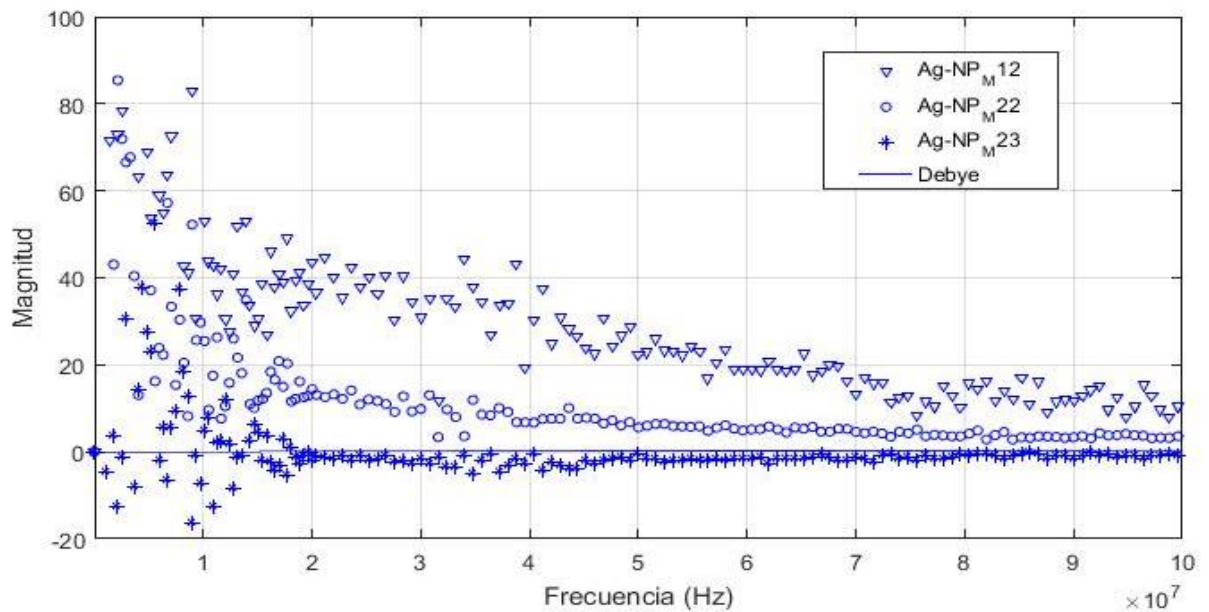


En la Figura 25 se observa que las pérdidas por disipación de energía ( $\epsilon''$ ) de la MUT aumentan a medida que aumenta la concentración de NPs en la solución. La

contribución a las pérdidas son en su mayoría producto de la presencia de las NPs metálicas. En base a esta observación se puede aproximar la Ecuación 5 a:

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (15)$$

**Figura 25. Parte imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja medida a muestras de Ag-NPs de ~53 nm en tres diferentes concentraciones.**



En Christine<sup>46</sup>, consideran que el aumento de la temperatura de en nanopartículas de oro cuando se someten a un campo eléctrico RF acoplados capacitivamente (13,56 MHz) es producto del calor liberado debido a la disipación resistiva y por ende este debería escalar con la ley de joule:  $P = I^2 R$  de tal forma que la velocidad

<sup>46</sup>MORAN. Op cit, p 403

de calentamiento inducida por radiofrecuencia  $\left(\frac{dT}{dt}\right)$  de las nanopartículas se pueden calcular a partir de:

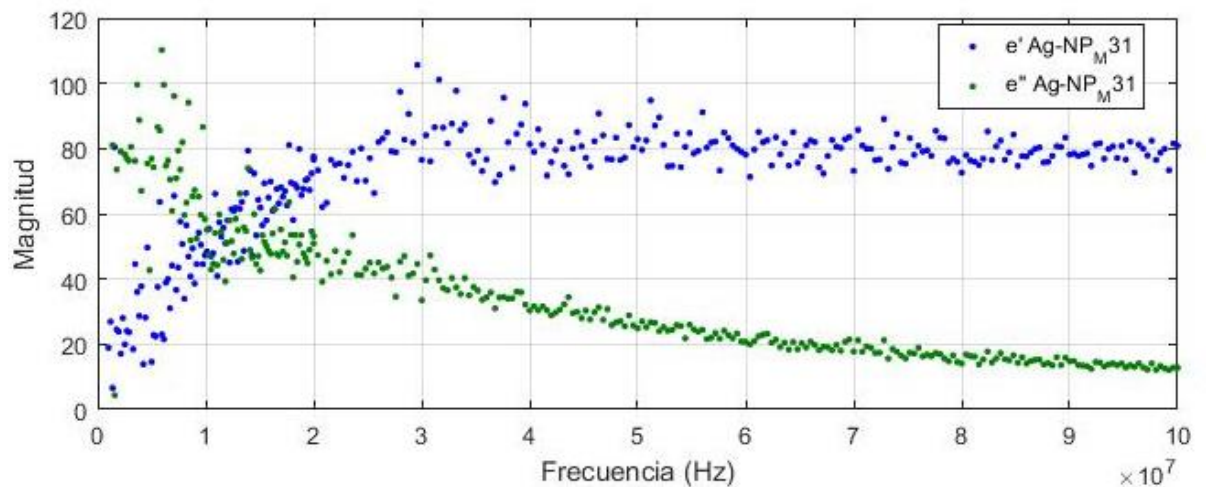
$$\frac{dT}{dt} = \left[ \frac{\sigma(\omega) \cdot a \cdot d \cdot |E|^2}{v \cdot c_w} \right] \cdot n \quad (16)$$

Donde  $|E|$  es la magnitud de campo eléctrico,  $a$  es el área de la sección transversal de la NP,  $d$  es su diámetro,  $v$  es el volumen de la suspensión,  $n$  es el número de nanopartículas y  $c_w$  es la capacidad calórica del agua.

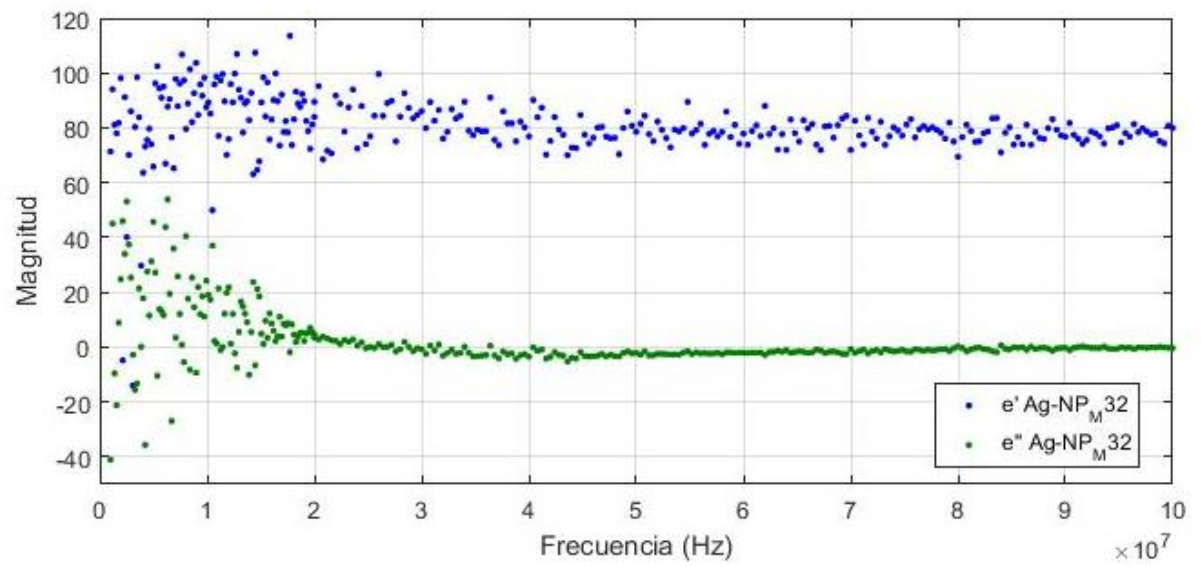
De esta manera, a partir del cálculo de la constante de pérdidas usando el método de sonda coaxial es posible determinar la velocidad de calentamiento de las Ag-NPs que de otro modo implicarían la utilización de equipo costoso como es el caso de las cámaras térmicas usualmente usadas para este propósito.

**5.2.3 Permitividad dieléctrica compleja de Ag-NPs de ~100nm con geometría triangular y tipo rod o cilíndrica.** Las medidas realizadas a las muestras de Ag-NPs triangulares y rod, se hicieron con el fin de observar el comportamiento de la permitividad dieléctrica compleja para otros tipos de forma. Los resultados se muestran en las Figuras 26 y 27.

**Figura 26. Parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja a Ag-NP triangulares**



**Figura 27. Parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja a Ag-NP tipo rod**



## 6. CONCLUSIONES

- En este trabajo se pone a prueba una metodología de medida de permitividad dieléctrica compleja en un rango de altas frecuencias, con sonda coaxial con terminación abierta, y usando un analizador vectorial de redes como sistema de medida, consiguiendo realizar la medida a dos sustancias de interés para grupos de investigación de la Universidad Industrial de Santander.
- Se logra comprobar a partir de los resultados la validez y efectividad del método de la medida en sustancias líquidas como agua, metanol, etanol y aceite de oliva en un amplio rango de frecuencias que comprende desde 300 kHz hasta 3 GHz.
- Utilizando esta técnica, se determinaron los valores de la permitividad dieléctrica compleja de algunas muestras de aceite para transformadores de alta tensión. Estos resultados concuerdan con los reportados por otros autores obtenidos con métodos e instrumentación diferentes.
- Utilizando esta técnica, se determinaron los valores de permitividad dieléctrica relativa compleja a muestras de nanopartículas de plata (Ag-NPs) disueltas en medio acuoso.
- Los resultados de permitividad de las muestras de Ag-NPs evidencia que las pérdidas por disipación de energía en frecuencias entre 1MHz y 100 MHz están relacionadas con la concentración de NPs.
- Calculando la constante de pérdidas se puede determinar la conductividad de Ag-NPs en función de la frecuencia y por consiguiente determinar la

variación de la temperatura respecto al tiempo cuando las Ag-NPs se someten a un campo eléctrico acoplado capacitivamente.

## BIBLIOGRAFIA

Agilent Technologies. Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. *Notas de Aplicación*, Junio. 2006.

Agilent Technologies. Technical Overview, Agilent 85071E Dielectric Probe Kit. Agilent literature number 5989-0222EN, June 14, 2012.

AGUILERA BERMUDEZ, Ernesto, y RODRIGUEZ RICO, Oswaldo. Measurement of Complex Dielectric Permittivity in Oils from High-Voltage Transformers Using a Coaxial Probe. *TECCIENCIA*, Vol. 12 No. 21., 60-66, (2016), DOI: <<http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2016.21.10>>

ARAI, Masayuki; BINNER, Jon G. P and CROSS, Tom E. Estimating errors due to sample surface roughness in microwave complex permittivity measurements obtained using a coaxial probe. *Electron. Lett.* 31: pp.115–117 (1995)

AWANG, Zaiki *et al.* A Free-Space Method For Complex Permittivity Measurement Of Bulk And Thin Film Dielectrics At Microwave Frequencies. Vol. 51, 307–328, (2013)

BAKER, James, *et al.* Analysis of an Open-Ended Coaxial Probe with Lift-Off for Nondestructive Testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, vol. 43, n5, pp. 711-717, Oct. (1994).

BOBOWSKI, Jake S. and JOHNSON, T. Permittivity measurements of biological samples by an open- ended coaxial line. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 40, (2012), pp.159–183.

CARDOSO, Patricia C. Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud. En: Rev. Hosp. Niños; 58(260):19-28 / 19, (2016).

DE LOS SANTOS, Jose; GARSIA, Ducinei and EIRAS, Jose Antonio. Dielectric characterization of materials at microwave frequency range. Mater. Res. 6: pp. 97–101 (2003).

DERVOS, Constantine T, *et al.* A Complex Permittivity Based Sensor for the Electrical Characterization of High Voltage Transformer Oils. Sensors, vol. 5, pp. 302 -316, May. 2005.

GANNON, Christopher J. *et al.* Carbon Nanotube-enhanced Thermal Destruction of Cancer Cells in a Noninvasive Radiofrequency Field. American Cancer Society DOI <10.1002/cncr.23155> Published online 24 October 2007.

GIRÁLDEZ CASTRO, Marta. Estudio De Los Espectros Dieléctricos Para El Control De Calidad De Alimentos. Valencia, junio 2010, 291 h. Tesis doctoral. Universidad de Valencia. Disponible en <<https://riunet.upv.es>>

GOMEZ RAMIREZ, Lina y ANAYA, Jorge. Determinación Experimental de la Permitividad Dieléctrica del Lodo de Perforación Base Agua a 2,4 GHz Enfocado a Aplicaciones SENSIT. Bucaramanga, 2013, 114 h. Trabajo de grado (ingeniero de petróleos, ingeniero electrónico) Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisico-Química-Mecánica.

GREGORY, Andrew P. Table of Complex Permittivity of Dielectric Reference Liquids at frequencies Up to 5 GHz. ResearchGate, Technical Report, Jan. 2012.

KALAMBUR, Venkat. S.; LONGMIRE, Ellen. K. and BISCHOF, Jhon. Cellular level loading and heating of superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Langmuir* 2005, 23, 12329-12336

KOMAROV, Vyacheslav; WANG, Suhang and TANG, Juming. Permittivity And Measurement. Washington State University, Shankar anuradha / ArtNo. eme308 pp.1-20.

MORAN, Christine H. *et al.* Size-Dependent Joule Heating of Gold Nanoparticles Using Capacitively Coupled Radiofrequency Fields”, *Nano Res* (2009) 2: 400-4059 DOI <10.1007/s12274-009-9048-1>.

PIUZZI, Emanuele, *et al.* A Comparative Analysis Between Customized and Commercial System for Complex Permittivity Measurements on Liquids Samples at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, vol. 62, n5, pp. 1034-1045, May. (2013).

SEEWATTANAPON, Somporn and AKKARAEKTHALIN, Prayoot. A Broadband Complex Permittivity Probe Using Stepped Coaxial Line. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 3, pp. 312-318, Aug. (2011).

SHEEN, Jyh. Microwave Measurements of Dielectric Properties Using a Closed Cylindrical Cavity Dielectric Resonator. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume: 14, October (2007), DOI: <10.1109/TDEI.2007.4339473>

TORRES BETANCOR, Manuel E. Efectroscopía dieléctrica y otras propiedades físicas de tartrados simples: puros y dopados. Tenerife, 1999, 209 h. Tesis doctoral. Universidad de La Laguna. Disponible en <ftp://tesis.bbtk.ull.es/ccppytec/cp117.pdf>

UNIVERSIDAD DE BARCELONA. Laboratorio de física de materiales dieléctricos y ópticos [en línea]. <[http://www.ub.edu/gilafa/web\\_dielec/002/002.html](http://www.ub.edu/gilafa/web_dielec/002/002.html)> [citado el 20 de julio de 2017]

VRBA, Jan and VRBA, David. Temperature and Frequency Dependent Empirical Models of Dielectric Properties of Sunflower and Olive Oil. *Radioengineering*, vol. 22, n4, pp. 1281 -1287, Dec. 2013.

ZAJÍČEK, Radim; VRBA, Jan, and NOVOTNÝ, Karel. Evaluation of a Reflection Method on an Open-Ended Coaxial Line and its Use in Dielectric Measurements. *Acta Polytechnica* Vol. 46 No. 5, (2006), pp. 50-54.