

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA DEL
LODO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A 2,4 GHZ ENFOCADO A
APLICACIONES SENSIT.**

**LINA MARGARITA GOMEZ RAMIREZ
JORGE ARMANDO ANAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA DEL
LODO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A 2,4 GHZ ENFOCADO A
APLICACIONES SENSIT.**

LINA MARGARITA GOMEZ RAMIREZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

JORGE ARMANDO ANAYA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director:

PhD. ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ

Codirector:

Ing. Jaime Alberto Loza

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Yo soy la presciencia en mi camino.
Quiero agradecer desde lo más profundo de mi corazón a mis padres Virginia y Lazaro
y a mi hermano Gustavo por su amor y apoyo en todas las etapas de mi vida, por
enseñarme con su ejemplo diario que el camino correcto es el del esfuerzo, el trabajo duro,
la dedicación el amor y la honestidad.
A mis amigos por brindarme su apoyo, gracias a ellos la vida y el trabajo lejos de casa
fue más simple.

Lina Margarita Gomez

DEDICATORIA

*Agradezco a Dios, quien me acompaña todos los días y
Me llena de fortaleza y paciencia en cada
Paso que doy.*

*A mis padres, Martha Lucía, Jorge Anaya y a mi angelito
Ana Lucía Cárdenas quienes lo dieron todo
Por este sueño.*

*A mi familia por su fuerza, unión y acompañamiento en
Cada uno de mis logros.*

Jorge Armando Anaya Medina.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de grado es la unión de esfuerzos de muchas personas, es el trabajo en equipo y el reflejo de valores como el respeto y la tolerancia que traen un resultado que no es fácil y no sería posible sin esas personas que creyeron en nosotros y permitieron trabajar junto a ellos. Los autores del presente trabajo se permiten expresar sus agradecimientos a las siguientes personas:

El doctor **ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ**, director de este programa, quien nos guio, recomendó y sugirió lo mejor para la realización de este proyecto.

Nuestro codirector **JAIME ALBERTO LOZA** por ser el promotor del proyecto, por su valiosa colaboración, sugerencias y recomendaciones.

El ingeniero **GUSTAVO ADOLFO GOMEZ** quien nos brindó su apoyo incondicional y nos ayudó a superar los inconvenientes que se presentaron a lo largo del proyecto.

CESAR AGUSTO PINEDA, Ingeniero de Petróleos, Calificador del proyecto de grado, por sus correcciones y enseñanzas.

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**, por ofrecernos la oportunidad de ser ingenieros.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. CONCEPTOS BÁSICOS RELACIONADOS CON LAS PROPIEDADES DIELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES	23
1.1 ONDAS ELECTROMAGNETICAS	24
1.2 ONDAS ELECTROMAGNETICAS PLANAS	24
1.2.1 Ondas planas en medios con pérdidas	26
1.3 TÉCNICAS DE MEDIDA DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS	29
1.3.1 Métodos de sonda abierta en un extremo	29
1.3.2 Método de línea de transmisión	31
1.3.3 Método de cavidades resonantes	33
1.3.4 Métodos en el espacio libre	34
2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES EMPLEADOS PARA REALIZAR LA MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD DIELÉCTRICA COMPLEJA	39
2.1 DEFINICIÓN DE LA TÉCNICA DE MEDIDA	39
2.2 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE MEDIDA	41
2.3 SISTEMA DE MEDIDA	44
2.4 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	47
2.4.1 Calibración plano de referencia	48
2.4.2 Calibración plano de medida (De-embedding)	49
2.5 DETERMINACIÓN DE LA PERMITIVIDAD COMPLEJA	53
2.6 VALIDACIÓN DE LA MEDIDA	56
2.6.1 Medidas del coeficiente de reflexión de la sustancia conocida	56

2.6.2 Análisis estadístico de los resultados	64
2.6.3 Evaluación de la exactitud	68
2.7 PROTOCOLO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMITIVIDAD COMPLEJA DEL LODO DE PERFORACIÓN	70
2.7.1 Puesta en marcha del equipo	70
2.7.2 Configuración del equipo	70
2.7.3 Definición de las funciones para realizar las medidas	71
2.7.4 Calibración del instrumento de medida	75
2.7.5 Acondicionamiento de la muestra	79
2.7.6 Evaluación de datos	80
2.7.7 Repetición de las medidas	80
2.7.8 Apagar el instrumento	81
2.7.9 Determinación de la permitividad compleja	81
3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS, MEDICIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS	82
3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LODO DE PERFORACIÓN	82
3.1.1 Materiales	82
3.1.2 Instrumental requerido para la preparación y caracterización de las muestras	84
3.1.3 Procedimiento	87
3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS	89
4. CONCLUSIONES	105
5. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	108

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Método de sonda coaxial.	30
Figura 2. Método de línea de transmisión: caso línea coaxial y guía de onda.	32
Figura 3. Medición a partir de una cavidad resonante.	34
Figura 4. Configuraciones de medición en el espacio libre.	35
Figura 5. Configuraciones de medición en el espacio libre a altas temperaturas.	36
Figura 6. Esquema que representa la técnica de sonda coaxial abierta en un extremo Adjunta a un MUT (Material Under Test).	40
Figura 7. Conector SMA convencional (Sub-Miniature, versión A)	42
Figura 8. Proceso de construcción del prototipo	43
Figura 9. Sonda construida a partir de un conector tipo SMA (Diámetro interno/ externo del conector tipo SMA 1.2/4 mm).	44
Figura 10. Dimensiones de la configuración física del montaje para la medición (unidades de las dimensiones mm).	45
Figura 11. Configuración física del montaje para la medición.	46
Figura 12. Sistema de medición: Analizador de redes vectorial, sonda de medición y estándar de calibración para el analizador de redes.	47
Figura 13. Configuración montaje de medición que muestra el plano de referencia y el plano de medición de la sonda.	48
Figura 14. Plano de Referencia donde queda calibrado con el Kit de calibración estándar.	49
Figura 15. Kit de calibración estándar.	49
Figura 16. Sonda y convertidor con corte.	51
Figura 17. Menú para ingresar al dialogo De-embedding.	52
Figura 18. Dialogo De-embedding.	52

Figura 19. Circuito equivalente de la línea coaxial abierta en un extremo: admitancia de la sonda Y tienes dos componentes-capacitancia entre el conductor interno y el externo y la conductancia irradiada G.	53
Figura 20. Panel frontal del analizador de redes vectorial señalando tecla de encendido.	70
Figura 21. Panel frontal del analizador de redes vectorial señalando tecla MODE.	71
Figura 22. Panel frontal del analizador de redes vectorial señalando las teclas de funcion.	72
Figura 23. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion CENTER.	72
Figura 24. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion MEAS.	73
Figura 25. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion SWEEP.	74
Figura 26. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion FORMAT.	75
Figura 27. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion CAL- Start Cal.	76
Figura 28. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion CAL-One Port P1.	76
Figura 29. Pantalla de visualizacion mostrando la funcion CAL-FULL.	77
Figura 30. Dialogo del asistente de calibracion.	77
Figura 31. Ventana de dialogo del asistente de calibracion (Open, Short y Match).	78
Figura 32. Sonda coaxial abierta en un extremo adjunta a un material bajo prueba (Lodo de perforacion base agua).	79
Figura 33. Pantalla de visualizacion del analizador de redes (traza especificando el marcador y el valor de repuesta).	80
Figura 34. Instrumental requerido para la preparación y caracterización de las muestras de lodo.	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Literatura consultada en la investigación organizada en orden cronológico	36
Tabla 2. Permitividad compleja del agua destilada según el modelo de Debye, T=25°C.	57
Tabla 3. Coeficiente de reflexión medido del agua corriente en un intervalo de frecuencias de 1 GHz a 3 GHz.	58
Tabla 4. Coeficiente de reflexión del agua destilada medida en un intervalo de frecuencias de 1 GHz a 3 GHz.	59
Tabla 5. Parámetros dieléctricos medidos del agua destilada a 2,4 GHz	62
Tabla 6. Tabla comparativa entre los valores de la permitividad compleja a 2,4 GHz del agua destilada descrita por el modelo Debye y los valores medidos.	65
Tabla 7. Condiciones para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de la medida.	67
Tabla 8. Medida de errores relativos, parte real sonda SMA.	69
Tabla 9. Medida de errores relativos, parte imaginaria sonda SMA.	69
Tabla 10. Formulación de las muestras a utilizar con sus respectivas cantidades.	84
Tabla 11. Densidad y propiedades reológicas de las muestras.	88
Tabla 12. Composición de las muestras 1, 2 y 3	90
Tabla 13. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 1, 2 y 3.	90
Tabla 14. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 1.	91
Tabla 15. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 2.	91
Tabla 16. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 3.	92
Tabla 17. Análisis estadístico de la permitividad parte real de las muestras 1, 2 y 3	92

Tabla 18. Análisis estadístico de la permitividad parte imaginaria de las muestras 1, 2 y 3	92
Tabla 19. Composición de las muestras 1,4 y 5.	94
Tabla 20. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 1,4 y 5.	95
Tabla 21. Composición de las muestras 6, 7, 8 y 9.	96
Tabla 22. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 6, 7, 8 y 9.	97
Tabla 23. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 6.	97
Tabla 24. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 7.	98
Tabla 25. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 8.	98
Tabla 26. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 9.	98
Tabla 27. Análisis estadístico de la permitividad parte real de las muestras 6, 7,8 y 9.	99
Tabla 28. Análisis estadístico de la permitividad parte imag de las muestras 6, 7,8 y 9.	99
Tabla 29. Composición de las muestras 6, 10, 11 y 12.	101
Tabla 30. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 6, 10, 11 y 12.	101
Tabla 31. Composición de las muestras 6, 13 y 14.	103
Tabla 32. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 6, 13 y 14.	103

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Respuesta en magnitud de las medidas de 17/ 09/2013, datos experimentales. (Excel)	60
Gráfica 2. Relación frecuencia- Permitividad ϵ' del agua destilada medida comparada con el modelo de Debye (Excel)	61
Gráfica 3. Relación frecuencia-Permitividad ϵ'' del agua destilada medida comparada con el modelo de Debye. (Excel)	62
Gráfica 4. Relación frecuencia- Permitividad ϵ' del agua destilada medida a 2,4 GHz comparada con el modelo de Debye (Excel)	63
Gráfica 5. Relación frecuencia-Permitividad ϵ'' del agua destilada medida a 2,4 GHz comparada con el modelo de Debye. (Excel)	64
Gráfica 6. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 1,2 y 3 con la barita a 2,4 GHz.	93
Gráfica 7. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 1, 2 y 3 con la barita a 2,4 GHz.	94
Gráfica 8. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 1, 4 y 5 con polímeros a 2,4 GHz.	95
Gráfica 9. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 1, 4 y 5 con polímeros a 2,4 GHz.	96
Gráfica 10. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 6, 7, 8 y 9 con la sal (cloruro de sodio) a 2,4 GHz.	100
Gráfica 11. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 6, 7, 8 y 9 con la sal (cloruro de sodio) a 2,4 GHz.	100
Gráfica 12. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 6, 10, 11 y 12 con el carbonato de calcio a 2,4 GHz.	102

Gráfica 13. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 6, 10, 11 y 12 con el carbonato de calcio a 2,4 GHz.	102
Gráfica 14. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 6, 13 y 14 con las arcillas (recortes de perforación) a 2,4 GHz.	104
Gráfica 15. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 6, 13 y 14 con las arcillas (recortes de perforación) a 2,4 GHz.	104

RESUMEN

TÍTULO: Determinación experimental de la permitividad dieléctrica del lodo de perforación base agua a 2,4 GHz enfocado a aplicaciones sensit*

AUTORES: Lina Margarita Gómez Ramírez
Jorge Armando Anaya**

PALABRAS CLAVE: Permitividad dieléctrica, frecuencia, composición de la muestra, temperatura, fluidos de perforación.

CONTENIDO

Debido a que cada material tiene un conjunto único de características eléctricas y estas dependen de las propiedades dieléctricas de los mismos, es importante la medida de dichas propiedades debido a que estas proporcionan información valiosa de cómo se propagan los campos electromagnéticos por este medio.

En este trabajo podemos encontrar inicialmente una revisión bibliográfica de las técnicas más utilizadas para obtener experimentalmente las propiedades dieléctricas de los materiales, ya que es importante sentar un conocimiento sobre cuáles son los factores que involucra cada técnica, y así identificar con mayor claridad cuál es la más conveniente en cada situación.

A continuación, se presenta un protocolo para la medición de la permitividad dieléctrica compleja a partir de la implementación de un conector SMA (sub-miniatura versión A) para chasis como sensor para realizar la medición del coeficiente de reflexión del material bajo prueba, aquí se muestra detalladamente el montaje y la calibración del sistema de medida de las propiedades dieléctricas haciendo énfasis en el de-embedding debido a que este es un proceso fundamental para efectuar una medida correcta de la constante dieléctrica.

Finalmente se presentan los datos encontrados de la permitividad dieléctrica complejas de algunas muestras de lodo de perforación base agua a 2,4 GHz, estos lodos fueron preparados en el laboratorio teniendo en cuenta la variación de aditivos como bentonita, barita, arcillas (recortes de perforación), carbonatos de calcio y cloruro de sodio (sal) con el fin de identificar los factores que afectan la medida de la permitividad dieléctrica.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Electrónica y Petróleos. Director: PhD. Ernesto Aguilera Bermúdez. Co-director: Ing. Jaime Alberto Loza.

ABSTRACT

TITLE: Experimental determination of the dielectric permittivity of water-based drilling mud to 2.4 GHz focused on applications sensit

AUTHORS: Lina Margarita Gómez Ramírez**
Jorge Armando Anaya

KEYWORDS: Permittivity, frequency, sample composition, temperature, drilling fluids.

DESCRIPTION:

As each material has a unique set of electrical characteristics and these depend on the dielectric properties thereof, it is important to measure these properties because these provide valuable information about how the electromagnetic fields are propagated through this medium.

In this paper we initially find a literature review of the techniques used to obtain experimentally the dielectric properties of materials, as it is important to set a knowledge of the factors involved in each technique, and identify more clearly what the more convenient in every situation.

The following presents a protocol for measuring the dielectric permittivity from implementing a SMA (Sub-Miniature version A) to the chassis as sensor for measuring the reflection coefficient of the material under test, shown here detail the assembly and calibration of the measuring system of the dielectric properties with an emphasis on de-embedding because this is a fundamental process for making a correct measurement of the dielectric constant.

Finally displaying the data found on the dielectric permittivity of some samples of water-based drilling mud to 2.4 GHz, these muds were prepared in the laboratory in view of the variation of additives such as bentonite, barite, clays (drill cuttings) , calcium carbonate and sodium chloride in order to identify the factors affecting the measurement of the dielectric permittivity.

* Draft Grade

** Faculty of Physical-Chemical Engineering-Mechanical. School of Electronic Engineering and Petroleum Directed: PhD. Ernesto Aguilera Bermúdez. Co-Director: Jaime Alberto Loza.

INTRODUCCIÓN

La medición de las propiedades dieléctricas complejas de materiales a radio frecuencia han adquirido una creciente importancia, especialmente en los campos de la investigación, como la ciencia de los materiales, el diseño de circuitos de microondas, la investigación biológica, la respuesta dieléctrica de materiales geológicos etc. [1,2,3] . La constante dieléctrica y la tangente de pérdidas son parámetros fundamentales en el diseño de componentes de microondas basados en dieléctricos. Es necesario conocer el valor que tienen a las frecuencias y temperatura de trabajo para las que se diseña el componente. Una de las propiedades eléctricas más importantes es la permitividad compleja del material, que describe como se propagan las ondas electromagnéticas a través de él, la reflexión de las ondas desde la superficie del material y la atenuación de la energía al atravesarlo [4].

La respuesta de toda materia a un campo electromagnético viene descrita por las ecuaciones de Maxwell y las propiedades del objeto. Según éstas, dicha respuesta depende de los parámetros eléctricos pasivos de la materia: la conductividad eléctrica σ , la permitividad eléctrica ϵ , y la permeabilidad magnética μ . Estos parámetros constitutivos de la materia proporcionan, por un lado, su capacidad para permitir el movimiento de los portadores de carga y, por otro, una medida de su polarizabilidad.

Las propiedades dieléctricas de los materiales con y sin pérdidas influyen en la distribución del campo electromagnético. Para una mejor comprensión de los procesos físicos asociados con la radiofrecuencia y varios dispositivos de microondas, es necesario conocer las propiedades dieléctricas de los medios que interactúan con las ondas electromagnéticas. Para las telecomunicaciones y

dispositivos de radar, las variaciones de la permitividad dieléctrica compleja sobre un amplio rango de frecuencias son importantes [5].

Esta idea ya se ha venido desarrollando específicamente en el estudio de las respuestas dieléctricas de los materiales geológicos ya que estos pueden proporcionar información útil acerca de las propiedades en el yacimiento. Por ejemplo, es bien sabido que las propiedades dieléctricas se ven afectadas por la presencia de agua, y la medición de la respuesta dieléctrica de los suelos se usa comúnmente como un medio para determinar el contenido de agua [6,7].

Además de esta sensibilidad al contenido de agua, también se ha demostrado que el tamaño de la superficie sólida humedecida tiene un efecto significativo sobre la respuesta dieléctrica de los materiales geológicos [8]. Estas observaciones plantean la posibilidad de que las mediciones dieléctricas se puedan utilizar para detectar las variaciones en la inter-fase sólido-agua, tales como un cambio en la humectabilidad del sólido o la absorción de especies químicas. Esta idea está apoyada por estudios previos que han demostrado que la respuesta dieléctrica cambia significativamente cuando las propiedades de la superficie de areniscas son alterados por diversos tratamientos químicos [9]. Ahora bien todos estos adelantos van encaminados a identificar las propiedades de los yacimientos petroleros por medio de la medición de sus propiedades dieléctricas, pero existen muy pocos estudios enfocados a garantizar la estabilidad de los pozos petroleros.

Es por esto que nace la idea de medir experimentalmente la permitividad al lodo de perforación ya que con este valor podremos saber cómo se comportan las ondas electromagnéticas en este medio en miras a desarrollar una nueva tecnología para garantizar la estabilidad de los pozos petroleros por medio de la interconexión de sensores inalámbricos.

Muchos métodos han sido desarrollados para medir estas propiedades complejas, tales como métodos en el dominio del tiempo o dominio de la frecuencia con uno o dos puertos, etc. [10]. Cada método está limitado a frecuencias específicas, según su propia restricción de los materiales y las aplicaciones. Con el avance de las nuevas tecnologías, los métodos pueden ser empleados con un programa de software que mide la reflexión compleja y los coeficientes de transmisión con un analizador de red vectorial convirtiendo los datos de las propiedades complejas en parámetros dieléctricos.

Esta investigación presenta las medidas, de la constante dieléctrica del lodo de perforación base agua con diferentes cantidades de aditivos como cloruro de sodio, carbonato de calcio polímeros, recortes de perforación, barita y bentonita a una frecuencia de 2.4 GHz, a partir de una prototipo de sonda coaxial abierta en un extremo construida con un conector SMA comercial para chasis; esta medida se efectúa con este prototipo como una alternativa económica para realizar la medición.

En el primer capítulo se hace una revisión de las distintas técnicas de medida utilizadas para la caracterización experimental de materiales dieléctricos, seleccionando la técnica de sonda coaxial con terminación abierta, para la cual se presentará la teoría básica sobre la que apoya, en el segundo capítulo se explicará el diseño y construcción de los elementos (Sonda dieléctrica, muestra) y sistema de medida utilizados, en el tercer capítulo se analizarán los resultados de las medidas y se terminará exponiendo las conclusiones obtenidas.

1. CONCEPTOS BÁSICOS RELACIONADOS CON LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS MATERIALES

Las propiedades dieléctricas son variables fundamentales que permiten determinar el comportamiento electromagnético de un material, por tal motivo es importante analizar la interacción entre el material y las ondas. Cuando las ondas electromagnéticas se propagan a través del material se pueden determinar parámetros de propagación, como impedancia de la onda en el material η y velocidad de la onda en el material v a través de las siguientes ecuaciones.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

Donde μ es la permeabilidad y ϵ es la permitividad del material, Es importante aclarar que esta investigación se enfoca en la permitividad dieléctrica, la cual está compuesta por una parte real y una parte imaginaria como se observa en la ecuación (3).

$$\epsilon = (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (3)$$

La permitividad dieléctrica representa la capacidad de polarización de un material ante la aplicación de un campo eléctrico, es decir que tan fácil o no se polariza la muestra, la determinación de esta variable se realiza a través de la fabricación de un prototipo conocido como sonda coaxial, utilizando el método de líneas de transmisión como base principal para la medición [11].

1.1 ONDAS ELECTROMAGNETICAS

Las ondas electromagnéticas están definidas como un tipo radiación en forma de onda y están conformadas por un campo eléctrico y un campo magnético los cuales oscilan perpendicularmente entre sí, teniendo como característica la posibilidad de viajar en el vacío. Estas ondas tienen aplicaciones importantes en las comunicaciones como son las ondas de radio, una cualidad importante es que estas se pueden propagar a través de cualquier material dieléctrico, en el caso de esta investigación la propagación es a través del lodo de perforación, cabe aclarar que en medios con pérdidas la propagación no es tan eficiente ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material, que disipan con rapidez la energía de las ondas [12].

Es de vital importancia tener en cuenta que los campos oscilan en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Por la teoría de Maxwell cuando hay cambio de campo se genera otro, este proceso es repetitivo lo cual genera la onda electromagnética viajera. [13].

1.2 ONDAS ELECTROMAGNETICAS PLANAS

Está comprobado que a proporciones mayores de distancia de una fuente finita que irradia ondas electromagnéticas, una mínima parte del frente de onda es casi un plano, por lo cual es de vital importancia para la investigación tener en cuenta el comportamiento de las ondas planas uniformes. La onda plana uniforme es una solución característica de las ecuaciones de Maxwell. Teniendo E , igual dirección, magnitud y fase en los planos infinitos perpendiculares al sentido o dirección de propagación.

Siendo estrictos se puede concluir que en la práctica no existe la onda plana, ya que para obtenerlas se necesita una fuente de excitación infinita, sin embargo cuando se está alejando de la fuente o generador, el frente de onda se da casi esférico y una porción muy mínima de dicha esfera será casi plana.

Para obtener una mejor descripción del comportamiento de onda se puede recurrir a la ecuación vectorial homogénea de helmholtz para E en medios simples no conductores a través de la ecuación 4.

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (4)$$

Es k el número de onda y se expresa como:

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{\omega}{u_p} \quad (5)$$

Un aspecto a tener en cuenta del comportamiento de las ondas en la investigación es el efecto Doppler en el cual la frecuencia de onda detectada por el receptor tiende a ser diferente de la que emite la fuente lo cual puede afectar considerablemente los resultados de la investigación.

La polarización de una onda electromagnética plana da la pauta del comportamiento cambiante del vector de intensidad del E en determinado lugar del espacio, se establece que una onda esta polarizada linealmente en el sentido de x , cuando el vector de E de la onda permanece en el sentido de x ($E = a_x E_x$), una característica importante es que no es necesario realizar una descripción de campo magnético, debido a que la dirección del H esta enlazado con el E .

1.2.1 Ondas planas en medios con pérdidas En casos en que el medio es conductor, se genera un flujo de corriente por la presencia de un campo eléctrico, por lo cual es necesario expresar la ecuación de la siguiente forma:

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\varepsilon)E = j\omega\left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)E = j\omega\varepsilon_c E \quad (6)$$

con

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} (F/m) \quad (7)$$

Cuando se le aplica un campo eléctrico externo ha determinado material, esto genera un movimiento de cargas ligadas, las cuales producen una densidad de volumen de polarización. El cual cambia con la misma frecuencia que el \mathbf{E} aplicado. Al realizarse un incremento en la frecuencia, tiende a evitarse que el desplazamiento de partículas se quede en fase con las variaciones del campo debido a la inercia de las partículas cargadas. Estas generan determinado mecanismo de amortiguamiento de vibraciones las cuales ocasionan pérdidas en la potencia debido al trabajo requerido para sobrepasar las fuerzas de amortiguamiento.

Cuando la polarización se encuentra fuera de fase, se caracteriza por una susceptibilidad eléctrica complejo y por ende una permitividad compleja la cual se representa como:

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - j\varepsilon'' (F/m) \quad (3)$$

ε' y ε'' son funciones de la frecuencia, además se puede encontrar una conductividad equivalente:

$$\sigma = \omega \varepsilon'' (S/m) \quad (8)$$

La tangente de pérdida es la que describe la medida de la pérdida de potencia en el medio la cual se puede calcular a través de:

$$\tan \delta_c = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \cong \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \quad (9)$$

Donde δ_c es conocido como ángulo de pérdidas.

Un dieléctrico que presenta pérdidas mínimas se puede comportar como un buen aislante pero imperfecto, con una conductividad diferente de 0. La constante de propagación de un dieléctrico con pérdidas se puede expresar como:

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left[1 - j\frac{\varepsilon''}{2\varepsilon'} + \frac{1}{8}\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right] \quad (10)$$

Y de esta manera se puede obtener la constante de atenuación:

$$\alpha = \Re\{\gamma\} \cong \frac{\omega\varepsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} (Np/m) \quad (11)$$

Junto con la constante de fase:

$$\beta = \Im\{\gamma\} \cong \omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left[1 + \frac{1}{8}\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right] (rad/m) \quad (12)$$

La impedancia intrínseca de un dieléctrico con pérdidas es la razón de \mathbf{E}_x y \mathbf{H}_y de una onda plana uniforme, ya que la intensidad de un campo eléctrico y la

intensidad de un campo magnético en un dieléctrico que presenta pérdidas no están en fase temporal y se describe como:

$$n_c = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \left(1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^{-1/2} \cong \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \left(1 + j \frac{\varepsilon''}{2\varepsilon'}\right) (\Omega) \quad (13)$$

Un aspecto importante a tener en cuenta es el comportamiento de los materiales buenos conductores, los cuales se pueden describir a través de la ecuación 14 y 15:

$$\gamma \cong j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}} = (\sqrt{j}\sqrt{\omega\mu\sigma} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\omega\mu\sigma} \quad (14)$$

o

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong (1+j) \cong (1+j)\sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (15)$$

En un buen conductor

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f\mu\sigma} \quad (16)$$

Donde α y β aumentan con \sqrt{f} y $\sqrt{\sigma}$.

La profundidad de penetración de un conductor es la distancia a la cual la amplitud de una onda plana viajera se minimiza a un factor de e^{-1} , y se describe a través de:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} (m) \quad (17)$$

Para encontrar mayor información de ondas electromagnéticas planas dirigirse a la referencia [14]

1.3 TÉCNICAS DE MEDIDA DE LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS

Un parámetro importante asociado con la propagación electromagnética es la permitividad compleja del medio por el que viaja. La permitividad del medio afecta en cómo se refleja, atenúa y transmite una señal entre una fuente y el receptor. Por ejemplo, la permitividad del agua de mar es importante para el radar marino y las comunicaciones submarinas. Por supuesto, las señales de microondas interactúan de forma diferente con diferentes materiales, tales como agua, agua salada, materiales geológicos, productos alimenticios, etc. En general, este es un problema para los ingenieros de microondas en el diseño de equipos y nuevas tecnologías, debido a la gran influencia que esta propiedad provoca en el comportamiento que tiene cada material bajo la acción de un campo electromagnético.

A raíz de esto es que nace la necesidad de implementar métodos de medida de la permitividad compleja, para de esta manera saber cómo se comportaran los materiales de interés en el diseño cuando se les apliquen un campo electromagnético.

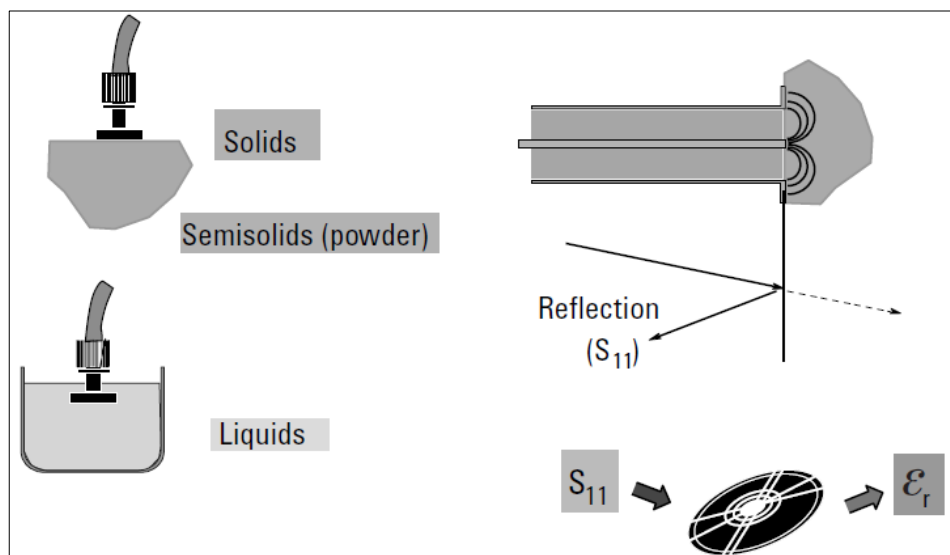
Las técnicas más utilizadas para la medición de permitividad compleja son métodos de sonda abierta en un extremo, métodos de líneas de transmisión, métodos de cavidades resonantes y métodos en el espacio libre que utilizan guías de ondas de bocina. Cada una de estas técnicas de medición pueden ser diseñadas para ser operadas en un rango específico de frecuencias de microondas. Estos métodos han sido reportados en la literatura para el uso de la medición de la permitividad de diferentes tipos de materiales.

1.3.1 Métodos de sonda abierta en un extremo Existe un gran número de autores en la literatura que han descrito sondas coaxiales abiertas en un extremo como un sensor que se puede utilizar para medir las propiedades dieléctricas de

los materiales en el rango de frecuencias de microondas [15-20]. Realizar mediciones con una sonda abierta en un extremo se considera un método de medida no destructivo y con la facilidad de proporcionar información de banda ancha [16]. En su forma más sencilla, la sonda abierta en un extremo consta de un corto circuito en uno de los extremos de la línea coaxial. La sonda está conectada a un analizador de redes vectorial a través de un cable coaxial para determinar el coeficiente de reflexión. El material bajo prueba se coloca en el extremo de la sonda y la permitividad de la muestra bajo prueba se determina a partir del coeficiente de reflexión y la admitancia de la sonda [21]. La admitancia de la sonda y la permitividad de la muestra se calculan mediante el uso de un circuito equivalente y el método de caracterización por medio de una sustancia conocida [22, 23].

En la figura 1 podemos observar el principio de funcionamiento de este método, evidenciando claramente el parámetro de reflexión resultante cuando se pone la sonda en contacto con el material bajo prueba.

Figura 1. Método de sonda coaxial.



Fuente: Agilent, "Basics of measuring the dielectric properties of materials", *Agilent Application Note*.

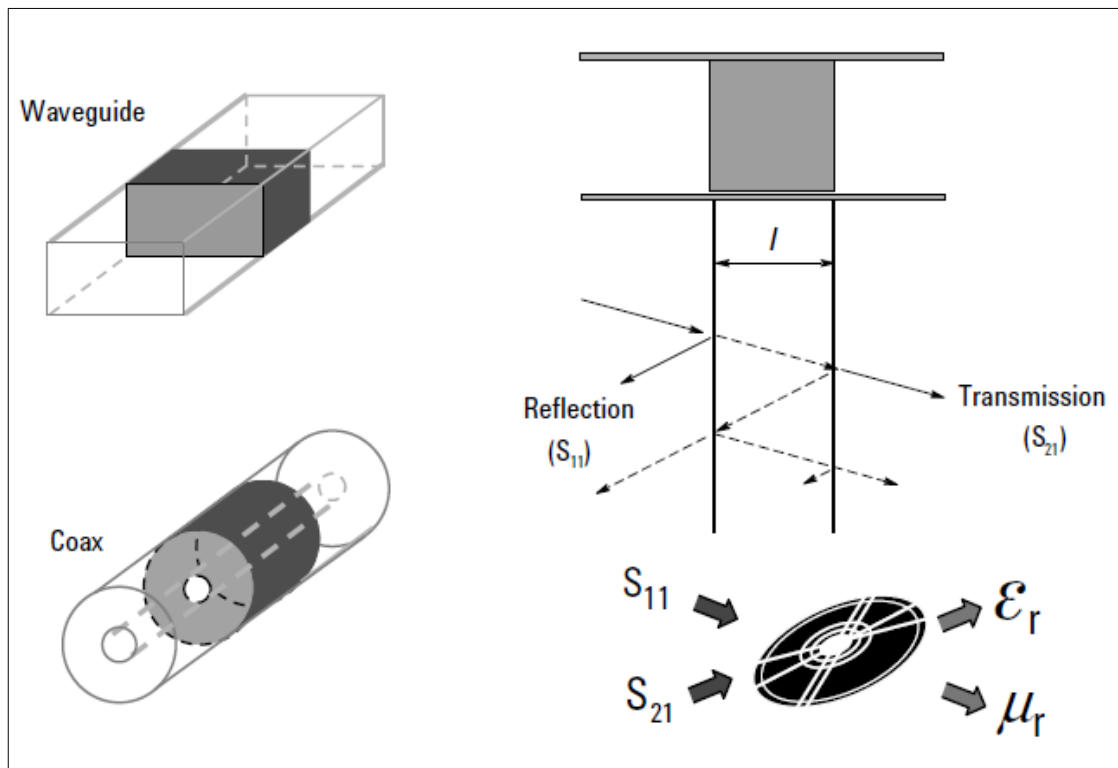
La sonda coaxial abierta en un extremo tiene diferentes ventajas que incluyen la facilidad de preparación de la muestra y el pequeño tamaño que necesita tener ésta para la medición. Una consideración importante es la selección del material de calibración y su posterior encuentro con el material a ser caracterizado. Por ejemplo, el agua destilada se utiliza a menudo como el material de calibración para la medición de materiales con constantes dieléctricas elevadas.

El método de sonda coaxial es una técnica que puede proporcionar mediciones muy rápidas. Es particularmente útil para la caracterización de líquidos donde la sonda se puede insertar fácilmente en la muestra. Algo muy importante para tener en cuenta cuando se realizan medidas a materiales líquidos con este método es asegurarse de que no queden burbujas de aire en la interfaz entre la superficie de la sonda coaxial y el líquido bajo prueba. También algo que se debe tener en cuenta cuando se utiliza esta técnica, es que la muestra bajo prueba sea homogénea debido a que este método sólo mide la permitividad específica del líquido puesto que el campo electromagnético se propaga sólo una fracción de una longitud de onda en el líquido. Este método es adecuado para medir principalmente materiales líquidos, a veces, el método se puede utilizar para caracterizar muestras semisólidas, pero no es tan útil para sólidos o partículas.

1.3.2 Método de línea de transmisión El método de línea de transmisión es un procedimiento que se utiliza con frecuencia para determinar la permitividad compleja de materiales líquidos, sólidos y polvos. La medida con este método se restringe principalmente por el rango de frecuencia y el modo dominante. Para hacer uso esta técnica, la muestra debe ser insertada en el porta muestra de la guía de onda de la línea de transmisión, también llamada como guía de ondas de celda [24]. El soporte de la muestra puede presentarse en forma de sección transversal rectangular o coaxial (Figura 2).

Cuando la señal se envía a la muestra, parte de ella se refleja al contacto con la muestra y el resto es absorbido por la muestra o pasa a través de ella. La señal enviada se mide mediante un analizador de red vectorial en forma de parámetros de dispersión (parámetros-S). Utilizando estos parámetros como datos de entrada de un algoritmo iterativo se extrae finalmente la permitividad compleja de la muestra [25, 26, 27]. Antes de la medición, el analizador de redes y la guía de ondas se deben calibrar, los errores se corrigen por medio de un proceso de calibración completa de dos puertos

Figura 2. Método de línea de transmisión: caso línea coaxial y guía de onda.



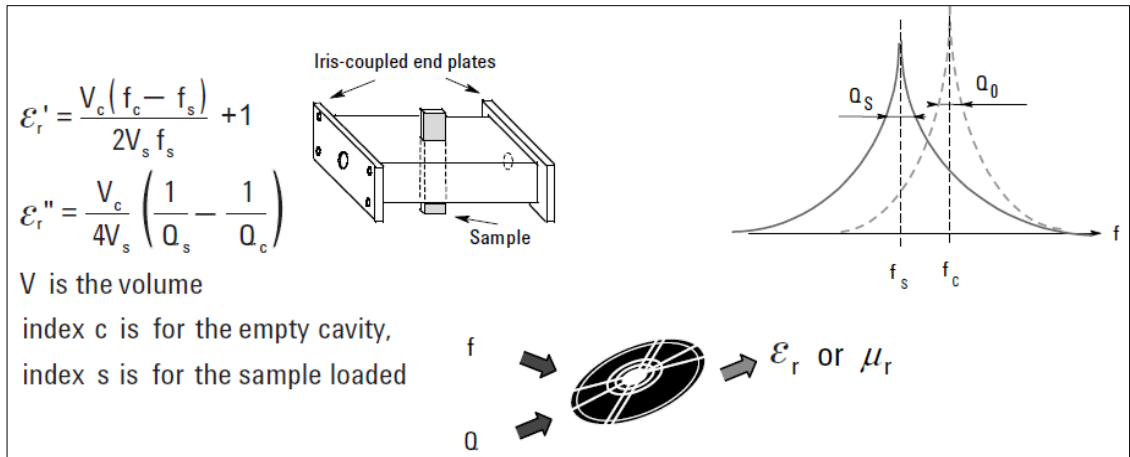
Fuente: Agilent, "Basics of measuring the dielectric properties of materials", *Agilent Application Note*.

A diferencia de la técnica de sonda coaxial, la orientación de la guía de onda de celda con respecto a la preparación de la muestra es distinta debido a que con este método el acondicionamiento de esta puede tardar algún tiempo debido a que

la muestra se debe mecanizar para ser introducida en la celda de la guía de onda. Por otra parte, cuando se realizan medidas a materiales líquidos es muy importante no para capturar aire entre la superficie del líquido y la celda. También en los materiales particulados (polvos) se puede dar lugar a irregularidades en el proceso de medición [28]. Sin embargo, el método de guía de ondas de celda es mucho más preciso que el del método de medición coaxial, pero tiene la restricción del ancho de banda de frecuencia para la toma de medidas. Si lo que se necesita es obtener información de banda ancha utilizando este método, es preciso el uso de varios tamaños de guía de ondas y una considerable preparación de muestras.

1.3.3 Método de cavidades resonantes Los métodos anteriormente descritos se llevan a cabo en un rango de frecuencias relativamente altos y están basados en modelos precisos para determinar la permitividad compleja. Ahora por otro lado, una cavidad resonante podría ser cargada con muestras con pequeñas y utilizar materiales con pérdidas relativamente bajas. La frecuencia de resonancia y el factor de calidad Q de la cavidad serán perturbadas por la permitividad compleja de la muestra. Para obtener una medición dieléctrica la muestra debe ser colocada en un campo eléctrico máximo y para una medición magnética, en un campo magnético máximo. Las cavidades resonantes pueden ser construidas a partir de una guía de onda coaxial, circular o rectangular dependiendo de la aplicación. A medida que la cavidad es más sensible a las variaciones hace que la preparación de la muestra sea también más rigurosa. Esta técnica se recomienda para medir la permitividad compleja de materiales con baja pérdida [29]. En la figura 3 se observa el método guía de ondas rectangular de diafragma con placas acopladas en el extremo, operando en un modo TE_{10n} .

Figura 3. Medición a partir de una cavidad resonante.



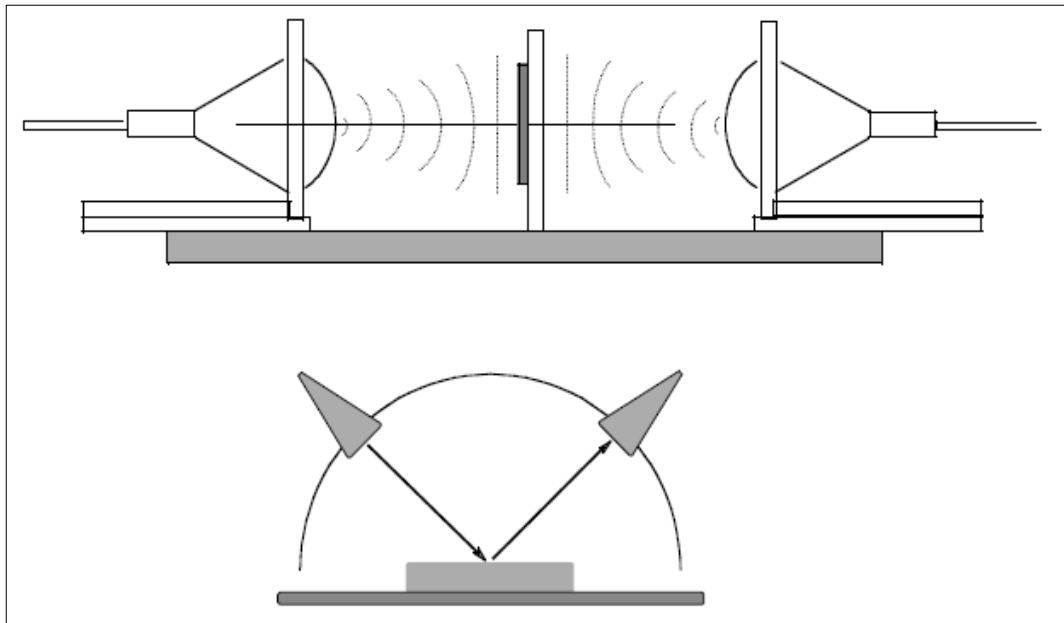
Fuente: Agilent, “Basics of measuring the dielectric properties of materials”, *Agilent Application Note*.

La permitividad compleja de la muestra puede determinarse a partir de la diferencia en la frecuencia de resonancia y el factor de calidad Q de la cavidad cuando está vacía y cuando está cargada [30, 31, 32]. La técnica de cavidad resonante no es adecuada para medidas en línea, debido a que la muestra tiene que ser preparada y cuidadosamente cargada en la estructura de resonador. Es muy útil cuando se trata de detectar cambios muy pequeños en la muestra, tales como el nivel de humedad en muestras muy deshidratadas.

1.3.4 Métodos en el espacio libre Las técnicas en el espacio libre son métodos de medida no destructivos debido a que la muestra no tiene contacto con el dispositivo de medida, otra ventaja de este método es que la muestra no requiere de ningún tipo de preparación o mecanizado de adaptación para la media. Como resultado de esto es un método conveniente para realizar medidas a altas temperaturas y en materiales dieléctricos no homogéneos (Figura 5) [33]. La muestra puede ser colocada entre la guía de onda de bocina transmisora y receptora (Figura 4), después son medidos los cambios en la atenuación y fase de las señales transmitidas.

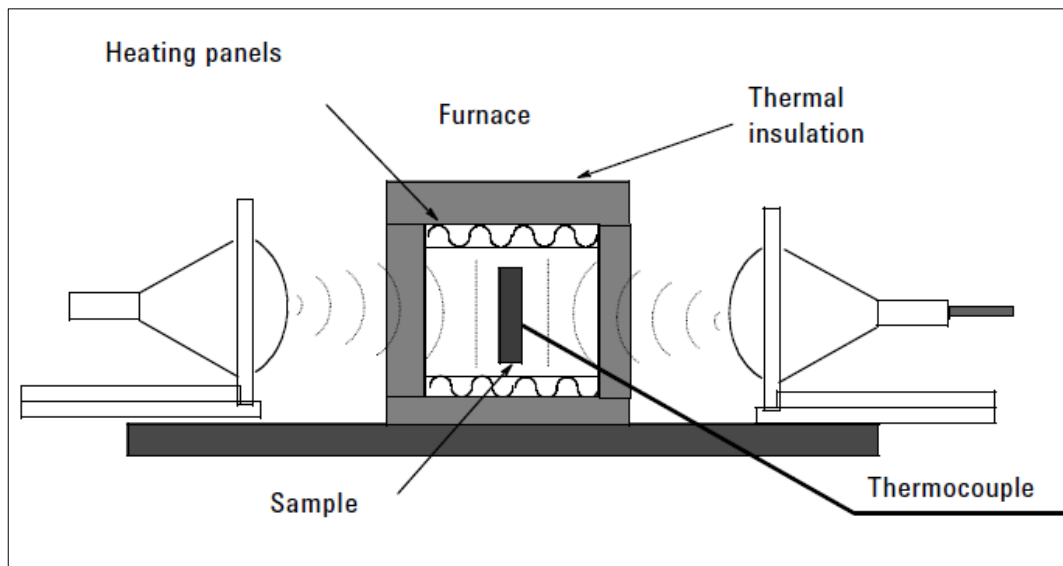
La permitividad compleja de la muestra se puede derivar a partir del valor de los coeficientes de transmisión y reflexión. En esta medida, el error se produce debido a los desfases, reflexiones múltiples, difracción en los bordes de la muestra y la interferencia parasitaria del entorno. La exactitud de la medición depende de la elección del elemento radiante, el diseño del soporte de la muestra, espesor de la muestra y la posición de la muestra en el medio de los dos elementos radiantes [33].

Figura 4. Configuraciones de medición en el espacio libre.



Fuente: Agilent, "Basics of measuring the dielectric properties of materials", *Agilent Application Note*.

Figura 5. Configuraciones de medición en el espacio libre a altas temperaturas.



Fuente: Agilent, "Basics of measuring the dielectric properties of materials", *Agilent Application Note*.

A continuación en la tabla 1 se encuentran algunos de los artículos y literatura consultada en la investigación para realizar la descripción de las técnicas más utilizadas para realizar la medición de la permitividad dieléctrica compleja.

Tabla 1. Literatura consultada en la investigación organizada en orden cronológico

Autor	Aplicación	Técnica Usada	Año
BIRNBAUM [31]	Medición de la constante dieléctrica en materiales sólidos y líquidos.	Método de cavidades resonantes	1949
TISCHER [26]	Medición de propiedades	Método de línea de transmisión.	1960
STUCHLY [34]	Medidas en tejidos	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1982
MUSIL [27]	Medidas no destructivas	Método de línea de transmisión.	1986

Autor	Aplicación	Técnica Usada	Año
MARSLAND [20]	Mediciones en materiales dieléctricos con pérdidas	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1987
DEVENDRA [16]	calibración	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1990
G. P. Otto [17]	Calibración	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1991
KRASZEWSKI [29]	Observaciones de la perturbación	Método de cavidades resonantes	1992
NELSON [30]	Medición de la perturbación de la cavidad	Método de cavidades resonantes	1994
TRABELSI [33]	Medición en cereales	Método en el espacio libre	1995
GANCHEV [18]	Calibración	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1995
BLACKHAM [23]	Mejora de la técnica de medida	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1997
BRINGHURST [19]	Análisis de medidas a altas frecuencias	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1997
SAIBARA [36]	Propiedades dieléctricas de hígado de rata en vivo	Sonda coaxial abierta en un extremo.	1998
THOMPSON [25]	Medidas en materiales líquidos y granulares	Método de línea de transmisión.	2001
H. S. CHUA [28]	Medición contenido de humedad en granos de trigo	Método de línea de transmisión.	2004
ABBAS [21]	Mediciones en frutos de palma de aceite	Sonda coaxial abierta en un extremo.	2005
GREGORY [15]	Enfoque experimental	Sonda coaxial	2007

Autor	Aplicación	Técnica Usada	Año
		abierta en un extremo.	
FILALI [35]	Diseño y calibración de una sonda para medias en concreto	Sonda coaxial abierta en un extremo.	2008
GALLEGO [32]	Medición a temperaturas criogénicas y ambiente	Método de cavidades resonantes	2010
NELSON [24]	Aplicaciones agrícolas	Sonda coaxial abierta en un extremo.	2010
SEEWATTANAPON [22]	Propuesta línea coaxial escalonada	Sonda coaxial abierta en un extremo.	2011

Fuente: Los Autores

2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES EMPLEADOS PARA REALIZAR LA MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA COMPLEJA

En este capítulo se presenta detalladamente como se realiza en la investigación los procedimientos experimentales para realizar la medida de la permitividad dieléctrica, en un principio se realiza la medida en el agua destilada para realizar la validación de la medida con el prototipo de sonda construido y posteriormente se expone el protocolo para la determinación experimental de la permitividad dieléctrica del lodo de perforación base agua, con diferentes cantidades y tipos de aditivos como barita, bentonita, cloruro de sodio (sal), carbonatos de calcio, polímeros y recortes de perforación (arcillas), también se describe los principios utilizados en esta técnica, las dimensiones del conector que se modifica y la calibración que se lleva a cabo.

2.1 DEFINICIÓN DE LA TÉCNICA DE MEDIDA

Para determinar la técnica de medición se evalúan las condiciones de trabajo establecidas al inicio del proyecto, en este caso es necesario lograr mediciones rápidas a altas frecuencias y en muestras líquidas. Se realiza una revisión bibliográfica y se encuentra que un procedimiento bastante común para medir la permitividad dieléctrica compleja de los materiales es el método de reflexión.

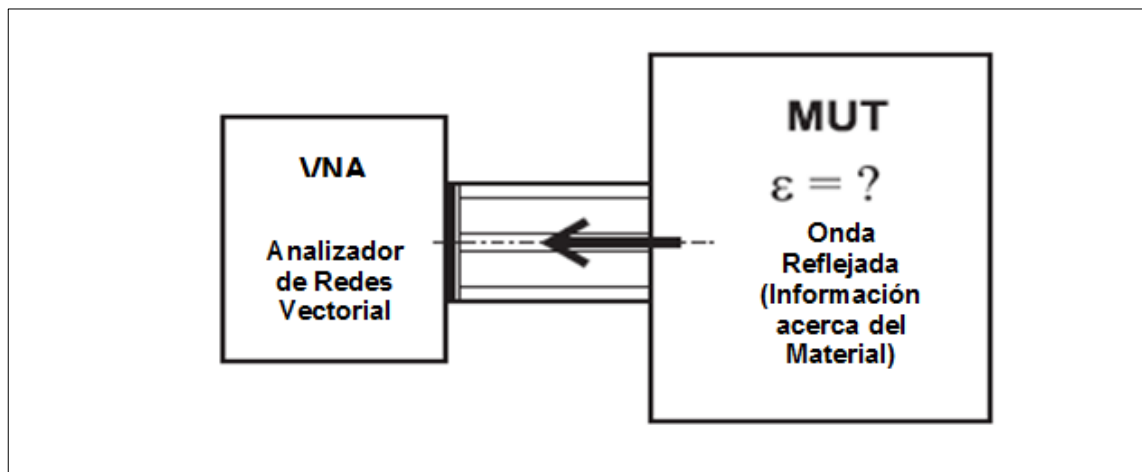
Empleando este método, se han sugerido líneas de transmisión coaxiales, dando como resultado éstas propuestas valores muy precisos de la permitividad compleja. La permitividad compleja se calcula a partir del coeficiente de reflexión

medido en el plano de apertura de la sonda coaxial abierta en un extremo [34, 35, 36].

El principio del método de reflexión consiste en medir el coeficiente de reflexión en la interfase entre dos materiales, en la muestra bajo prueba y en la línea coaxial abierta en un extremo. El coeficiente de reflexión de una línea coaxial abierta en un extremo depende de los parámetros dieléctricos del material bajo medida.

La figura 6 muestra el esquema que representa la técnica de sonda coaxial abierta en un extremo adjunta a un material bajo prueba [37]. La sonda funciona como un transductor, convierte los cambios en la permitividad de un material bajo prueba en cambios en el coeficiente de reflexión en la entrada de la sonda. Para obtener la permitividad compleja en base al coeficiente de reflexión medido por medio de la sonda, es conveniente el uso de un circuito equivalente de una línea coaxial abierta en un extremo.

Figura 6. Esquema que representa la técnica de sonda coaxial abierta en un extremo Adjunta a un MUT (Material Under Test).



Fuente: ZAJÍCEK Radim, VRBA Jan, *Broadband Complex Permittivity Determination for Biomedical Applications* 2010. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/advanced-microwave-circuits-and-systems/broadband-complex-permittivity-determination-for-biomedical-applications>.

Para llevar a cabo una correcta medida es necesario tener en cuenta dos factores importantes, el primero es tener perfecto contacto entre la muestra y la línea de transmisión coaxial abierta en un extremo y el otro es que el espesor de la muestra bajo prueba debe ser al menos dos veces la profundidad de penetración equivalente de la onda electromagnética d . Se tiene en cuenta esta profundidad para garantizar que las ondas reflejadas desde la interfaz del material bajo prueba al ambiente sean atenuadas aprox. -35 dB, con esto se asegura que el coeficiente de reflexión medido no se afecte [38].

$$d = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2}{\mu\epsilon_0\epsilon_r \tan\delta}} \quad (18)$$

La ecuación (18) indica la relación existente entre la profundidad de penetración equivalente d con los parámetros dieléctricos ϵ_r , la $\tan\delta$ y también de la frecuencia f . Los valores típicos de d para el agua destilada a diferentes frecuencias son resumidas en [39].

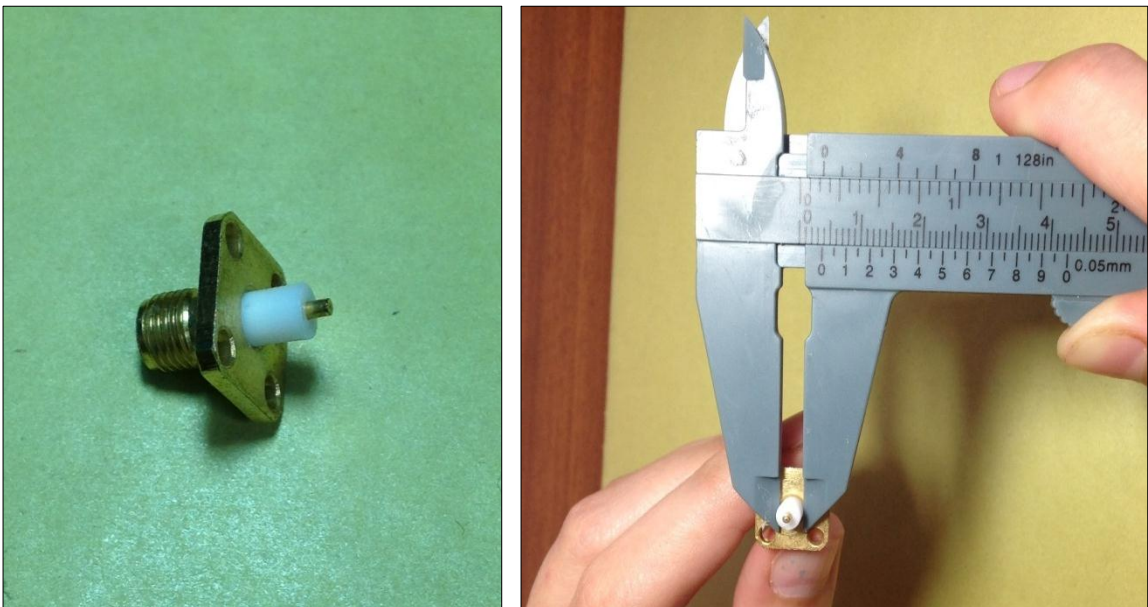
2.2 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE MEDIDA

La propuesta de adaptar un conector SMA convencional como sensor de medida, surge de realizar una revisión bibliográfica de artículos y trabajos de grado donde se utilizan sondas coaxiales como método de medida. En la mayoría de los artículos referentes al tema se propone la adaptación de diferentes conectores convencionales como sensor de línea coaxial [39, 40, 41]. A partir de la información consultada se elige que tipo de conector funciona de manera efectiva a altas frecuencias como condición más importante a la hora de medir el coeficiente de reflexión en esta investigación.

Para realizar la construcción del prototipo de sonda coaxial se modificó un conector SMA (Sub-Miniature, versión A, Figura 7) estándar al cual se le eliminó la parte para la conexión a un panel, este proceso se realizó de forma práctica utilizando una superficie abrasiva bastante rústica en un principio para desgastar el dieléctrico y el conductor interno saliente y después una superficie de grano fino para pulir los bordes y garantizar un perfecto contacto con la muestra (Figura 8), más adelante se muestra el proceso de calibración del analizador de redes con el hardware de medida para de esta manera eliminar los posibles desperfectos que se generan al pulir la superficie del conector.

El conector es una pieza económica y comercialmente accesible lo cual permite fácil disponibilidad, este tipo de conector tiene una impedancia de 50Ω , ofreciendo un excelente desempeño eléctrico en el proceso de adaptación de impedancias.

Figura 7. Conector SMA convencional (Sub-Miniature, versión A)



Fuente: Los Autores.

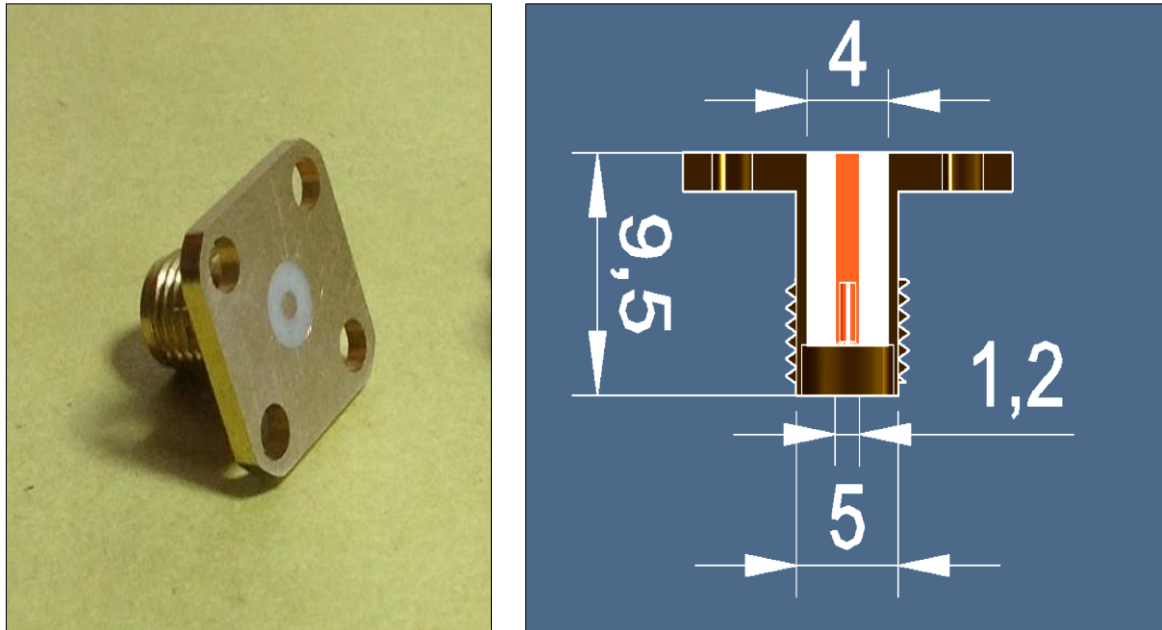
Figura 8. Proceso de construcción del prototipo



Fuente: Los Autores

Después de haberle eliminado las partes para la conexión a un panel el sensor queda listo para realizar la medida del coeficiente de reflexión (Figura 9).

Figura 9. Sonda construida a partir de un conector tipo SMA (Diámetro interno/ externo del conector tipo SMA 1.2/4 mm).

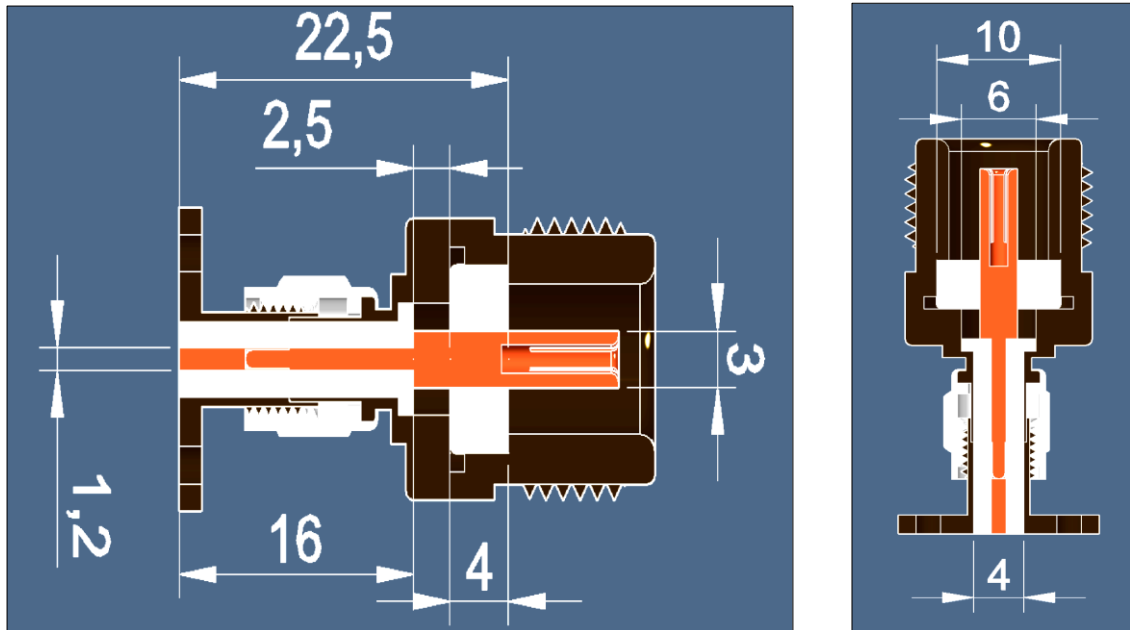


Fuente: Los Autores.

2.3 SISTEMA DE MEDIDA

Un sistema de medición típico que utiliza el método de reflexión en una línea coaxial abierta consiste en el analizador de redes, la sonda coaxial y un software, para el caso de este trabajo se utilizan los mismos componentes pero adicionándole a estos un convertidor de conexión tipo SMA a tipo N (Figura 10 y 11), esto se hace con el fin de realizar la conexión del sensor al cable coaxial tipo N estándar que maneja el analizador de redes vectorial.

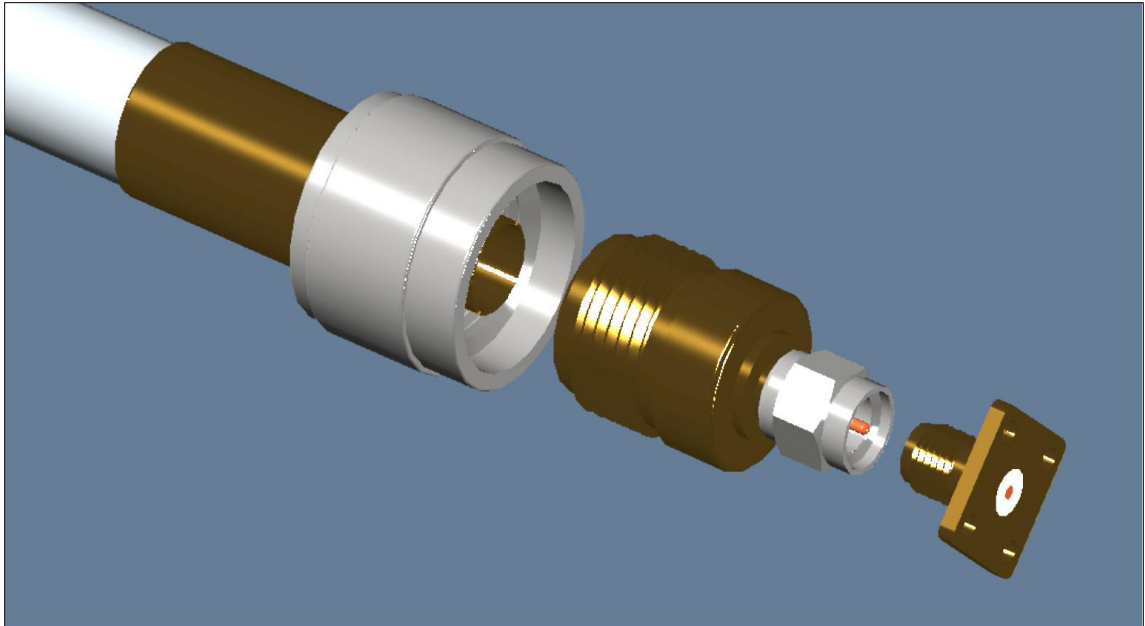
Figura 10. Dimensiones de la configuración física del montaje para la medición (unidades de las dimensiones mm).



Fuente: Los Autores.

En la figura 11 se muestra claramente las conexiones entre el conector SMA modificado que funciona como sonda coaxial abierta en un extremo y el convertidor de conexión que se introduce en la medida para realizar el acople entre el cable coaxial estándar del analizador de redes y el dispositivo de prueba utilizado para realizar las medidas.

Figura 11. Configuración física del montaje para la medición.



Fuente: Los Autores.

En la figura 12 se puede observar el sistema de medida utilizando para realizar las medidas del coeficiente de reflexión en el lodo de perforación base agua. Las medidas se llevan a cabo con la ayuda de un analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL el cual maneja un rango de frecuencias de 9 KHz-6 GHz. El equipo permite la conexión en dos puertos, pero como se mencionó anteriormente la técnica de sonda coaxial hace necesaria solamente la conexión a uno solo. Para mantener la sonda coaxial fija se elabora un soporte, de esta manera se tiene contacto fijo con la muestra bajo prueba, todo esto con el fin de evitar errores en la medida.

Figura 12. Sistema de medición: Analizador de redes vectorial, sonda de medición y estándar de calibración para el analizador de redes.



Fuente: Los Autores.

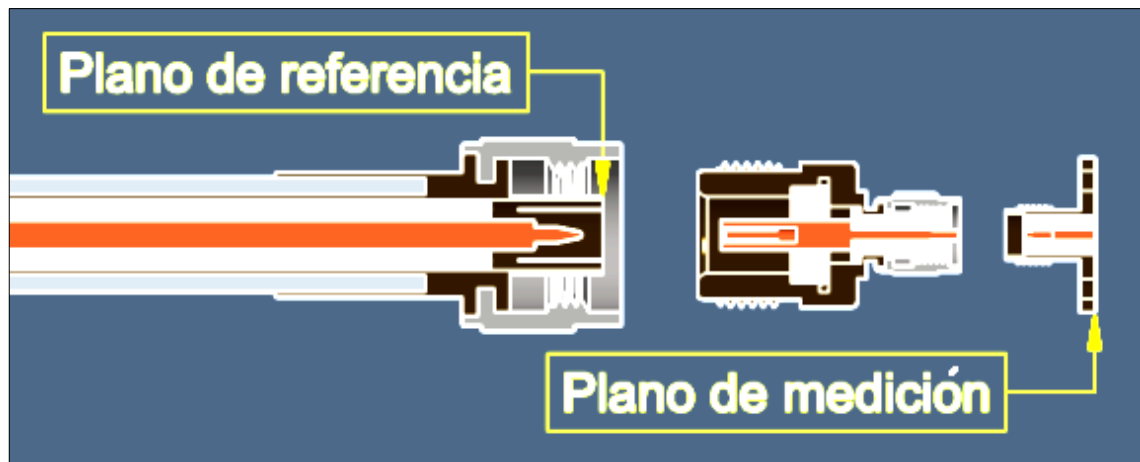
2.4 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La calibración del analizador de redes vectorial es un proceso muy importante que se debe llevar a cabo debido a que todos los elementos involucrados en la medida como cables, conectores, redes de separación, etc. introducen efectos en las señales transmitidas que se interpretan como errores en la medida. Para descartar los factores de error es fundamental determinar las características de dichos errores y de esa manera poder retirarlos de las medidas consecutivas. Para caracterizar materiales por medio del método de reflexión, se emplea únicamente un puerto del analizador de redes vectorial, lo que esto implica es que el equipo debe ser calibrado únicamente en el puerto que se conecte al dispositivo de medida. Realizar esta calibración es mucho más sencillo debido a que solo se tienen en cuenta los errores que se producen en reflexión. En específico, realizando el proceso de calibración en un solo puerto se pueden corregir los

errores de directividad, adaptación de la fuente y respuesta en frecuencia [42, 43, 44].

La calibración del analizador de redes vectorial en esta investigación se lleva a cabo en dos partes, una en el extremo del cable coaxial por medio de un kit estándar de calibración y la otra en la apertura de la sonda coaxial abierta en un extremo por medio de un método de calibración llamado de-embedding (Figura 13).

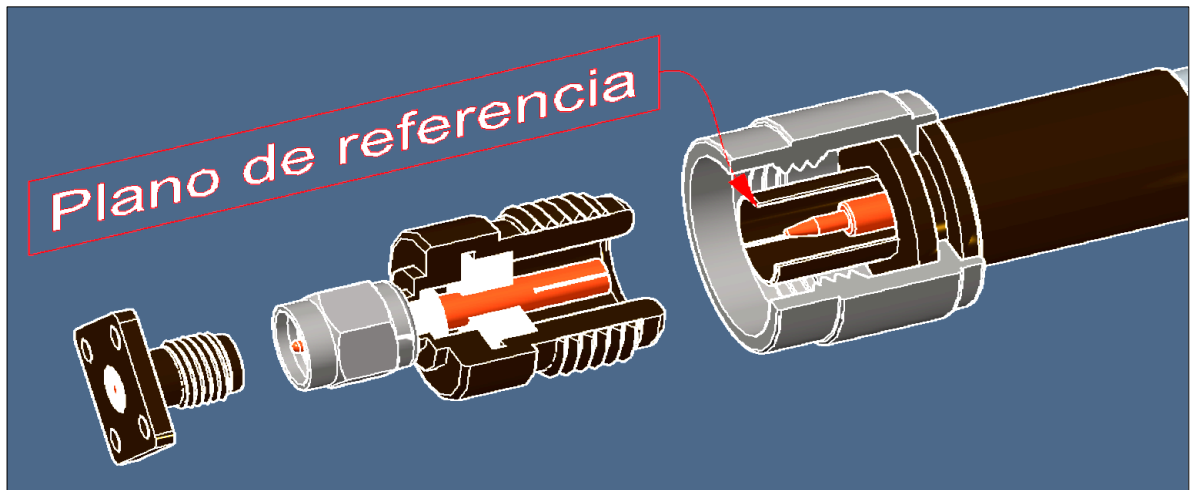
Figura 13. Configuración montaje de medición que muestra el plano de referencia y el plano de medición de la sonda.



Fuente: Los Autores.

2.4.1 Calibración plano de referencia La primera parte de la calibración del analizador de redes se realiza hasta el plano de referencia (Figura 14), se lleva a cabo con un kit de calibración estándar R&S ZV-Z121 para conector tipo N (macho) cuyas reflexiones producidas son conocidas (cortocircuito, circuito abierto y carga de adaptada de 50Ω) (Figura 15). Este tipo de procedimiento se hace de forma práctica gracias a la ayuda de un asistente de calibración propio del analizador el cual indica la metodología a seguir para realizar la corrección.

Figura 14. Plano de Referencia donde queda calibrado con el Kit de calibración estándar.



Fuente: Los Autores.

Figura 15. Kit de calibración estándar.



Fuente: Los Autores.

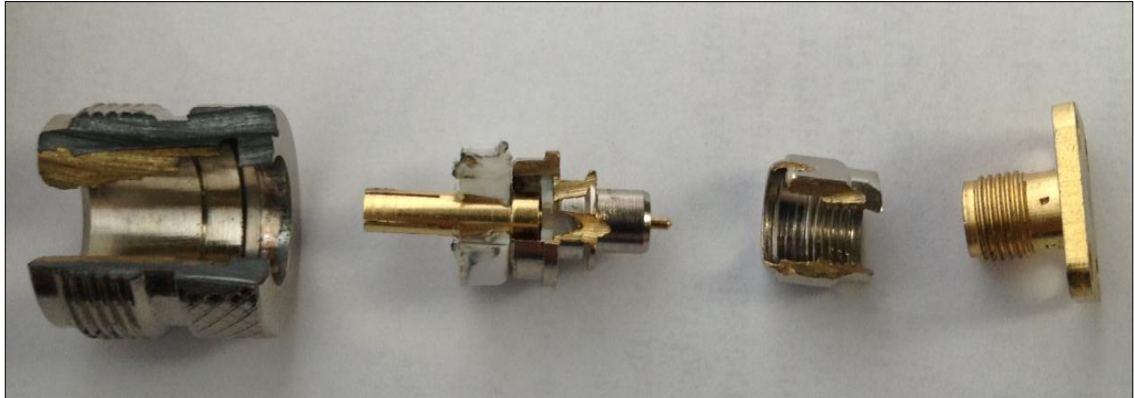
2.4.2 Calibración plano de medida (De-embedding) Después de realizar la calibración por medio del kit se realiza el procedimiento de-embedding, por medio de este se define una variación longitudinal y una pérdida para los puertos de prueba, este tipo de desplazamiento complementa el sistema de corrección de

errores, para compensar la pérdida de una línea de transmisión entre el plano de referencia calibrado y el material bajo prueba.

El de-embedding en este caso es un procedimiento que presta el analizador en la cual se definen redes virtuales para posteriormente ser retiradas del circuito de medición con el fin de obtener las características del material bajo prueba (MUT). Para ser removidos numéricamente, la red real debe ser descrita por un conjunto de parámetros-S o por un circuito equivalente de elementos de parámetros concentrados. El de-embedding del dispositivo extiende efectivamente el plano de referencia hacia el plano de medición, lo que permite una evaluación realista del material bajo prueba sin la red que distorsiona.

Para realizar el de-embedding en el analizador de redes primero se debe crear una red de transformación con las características propias del montaje, para hacer esto se utiliza un simulador, el cual permite calcular la distribución de los campos electromagnéticos dentro de unas estructuras definidas por el usuario. Con esta herramienta podemos definir la estructura como una asociación de objetos en 3D, cada uno compuesto por un material diferente. El modelado de la estructura se lleva a cabo contemplando todas las dimensiones de la red de transformación utilizada como son diámetros internos y externos de los conductores y dieléctricos de la red. Todas las dimensiones del sensor utilizado en la investigación están anteriormente descritas en las figuras 9 y 10. Para llegar a caracterizar correctamente la sonda y el convertidor se realiza un corte a un montaje de medición idéntico (Figura 16).

Figura 16. Sonda y convertidor con corte.

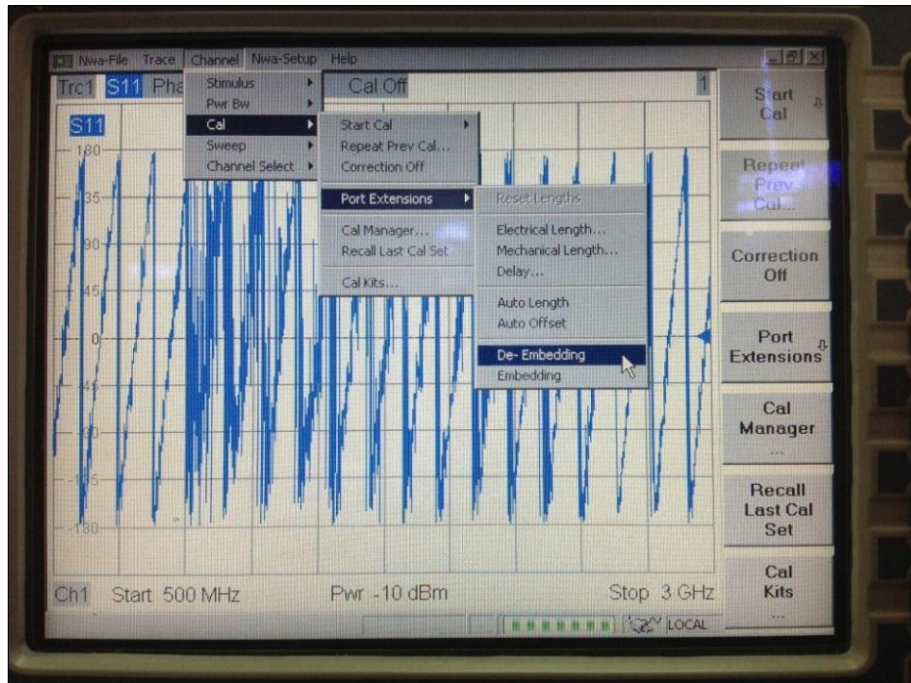


Fuente: Los Autores.

Una vez hecho el diseño, el siguiente paso es la creación de un dominio de cálculo para el campo electromagnético, definiciones de las condiciones de contorno y asignación del material que lo compone. Después de asignar todas las condiciones se ven los resultados tanto en reflexión como en transmisión de la red construida realizando las respectivas excitaciones. Con el paso anterior se define la red de transformación por un conjunto de parámetros-S almacenados en un archivo Touchstone (*.s2p). Es necesario exportar el archivo del simulador y guárdalo en el analizador de redes para continuar con el proceso de extensión de puerto. Para la importación del archivo al analizador de redes se ingresa al submenú de-embedding (Figura 17), una vez abierto el cuadro de dialogo se define el puerto de trabajo y se selecciona la opción: *Read data from file* (Figura 18).

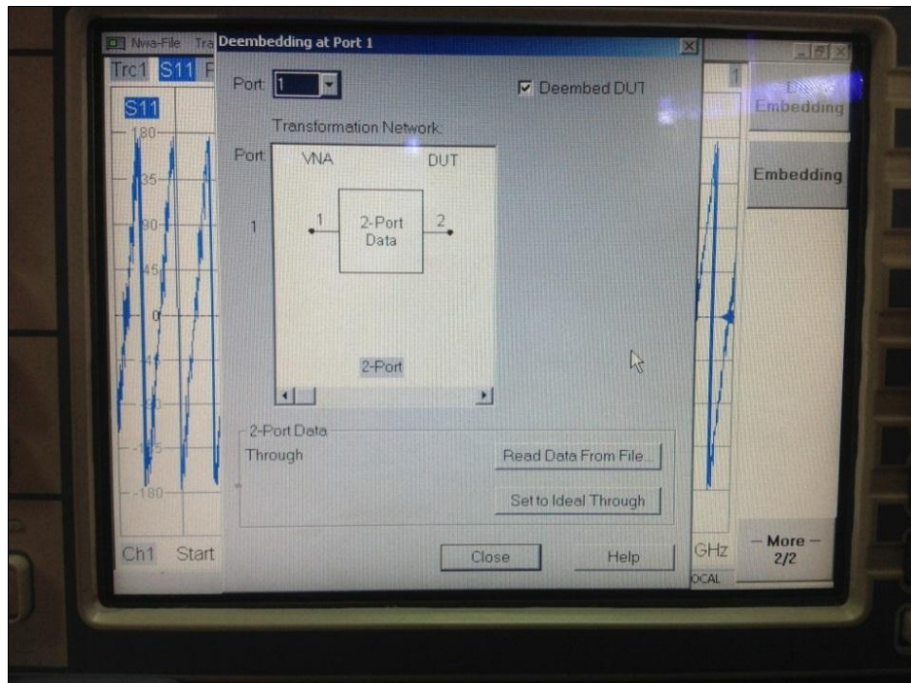
Una vez realizadas estas correcciones, ya tenemos calibrado hasta el plano de medida. Lo siguiente es realizar la validación de las medidas por medio de una sustancia perfectamente caracterizada para así poder comparar los resultados obtenidos con los esperados.

Figura 17. Menú para ingresar al dialogo De-embedding.



Fuente: Los Autores.

Figura 18. Dialogo De-embedding.



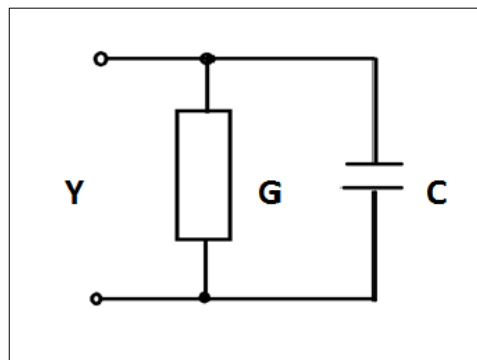
Fuente: Los Autores

2.5 DETERMINACIÓN DE LA PERMITIVIDAD COMPLEJA

La determinación de la permitividad compleja se realiza de manera indirecta debido a que el parámetro medido por medio de la sonda es el coeficiente de reflexión del material bajo prueba, es por esto que se hace necesario el análisis de la estructura de la sonda para así poder calcular el valor de la permitividad compleja.

En el momento que el material bajo prueba se pone en contacto con la apertura de la sonda coaxial, ésta puede ser descrita por medio de un circuito equivalente (Figura 19), el cual consiste de una capacitancia entre el conductor interno y el externo de la estructura coaxial y la conductancia irradiada la cual representa las perdidas por propagación [45]. Esta capacitancia y conductancia son dependientes de la frecuencia de medida, de la permitividad compleja del material y también de las dimensiones (diámetro interno y externo) de la sonda.

Figura 19. Circuito equivalente de la línea coaxial abierta en un extremo: admitancia de la sonda Y tiene dos componentes-capacitancia entre el conductor interno y el externo y la conductancia irradiada G .



Fuente: Los Autores.

Para el cálculo de los componentes, un modelo de radiación ha sido presentado en [39]. La admitancia de entrada de la línea de transmisión coaxial como una antena en un dieléctrico con pérdidas está a continuación:

$$Y = \sqrt{\varepsilon_c^5} G_0 + j\omega\varepsilon_c C_0 \quad (19)$$

donde, Y es la admitancia de medida de la sonda, C_0 y G_0 son constantes dadas por el circuito equivalente de la sonda en el espacio libre (Figura 19). La admitancia Y está relacionada con el coeficiente de reflexión medido S_{11} .

$$Y = Y_0 \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (20)$$

Donde $Y_0 = 1/(50\Omega) = 0.02S$ es la admitancia característica de la sonda.

El procedimiento que se utiliza en este trabajo para solucionar la ecuación compleja (19) es reemplazar $\varepsilon_c = R^* e^{j\theta}$ en la ecuación, quedando de esta manera:

$$Y = j\omega(R^* e^{j\theta})C_0 + (R^* e^{j\theta})^{5/2} G_0 \quad (21)$$

donde R es la magnitud y θ la fase de la permitividad compleja, realizando las operaciones matemáticas de la ecuación (21) da como resultado:

$$Y = j\omega R C_0 \{ \cos\theta + j\text{sen}\theta \} + R^{5/2} G_0 \{ \cos(5\theta/2) + j\text{sen}(5\theta/2) \} \quad (22)$$

después de esto se divide la ecuación (22) en parte real e imaginaria para obtener de este modo un conjunto de dos ecuaciones no lineales reales para las incógnitas que se deseen determinar, a continuación se muestra las dos ecuaciones no lineales:

Parte real:

$$Y = R^{5/2}G_0 \cos(5\theta/2) - \omega RC_0 \sin\theta \quad (23)$$

Parte imaginaria:

$$Y = \omega RC_0 \cos\theta + R^{5/2}G_0 \sin(5\theta/2) \quad (24)$$

Ya teniendo resuelta la ecuación compleja (19) podemos empezar a determinar las constantes del circuito por medio de una sustancia perfectamente caracterizada. En el cálculo, los parámetros de la admitancia compleja son calculados a partir del coeficiente de reflexión medido en el plano de apertura de la sonda coaxial cuando es conectada al material de referencia, como es usual el agua corriente es utilizada como material de referencia. La permitividad compleja del agua destilada ϵ_c , es corregida por el modelo de Debye [46]. A partir de la admitancia compleja calculada por el coeficiente de reflexión medido del agua corriente (ecuación 20) y la permitividad compleja descrita por el modelo Debye se encuentra las constantes del circuito, se realiza el despeje en las ecuaciones (23) y (24) para cada frecuencia.

Ya teniendo las constantes del circuito para cada frecuencia se procede a calcular la permitividad del lodo de perforación, se utilizan las mismas ecuaciones pero despejando en este caso la permitividad compleja, puesto que las ecuaciones son de orden cinco en términos de la permitividad compleja, se debe tener mucho

cuidado en elegir una solución físicamente correcta, en esta investigación se realiza un código en *Matlab* para resolver estas operaciones.

2.6 VALIDACIÓN DE LA MEDIDA

Para comprobar que las medidas que se realizan con el dispositivo prototipo son correctas es necesario antes realizar una validación de la medida, convencionalmente se hacen comparando las medidas experimentales realizadas con las ideales reportadas, pero debido a que no existen valores reportados del lodo de perforación base agua es necesario realizar la validación de la medida por medio de la comparación del agua destilada.

A continuación se presenta la validación de la medida por medio del agua destilada, lo que se realiza es una comparación entre los valores de la permitividad compleja del agua destilada descrita por el modelo de Debye y los valores calculados de la permitividad compleja del agua destilada a partir del coeficiente de reflexión medido con el dispositivo.

2.6.1 Medidas del coeficiente de reflexión de la sustancia conocida

Recordemos que lo que vamos a medir es el coeficiente de reflexión, S_{11} ($P_{1,REFLEJADA} / P_{1,INCIDENTE}$) con una sonda coaxial abierta en un extremo. Para realizar la validación de la medida primero se deben hallar las constantes del circuito equivalente, para llevar a cabo estos cálculos se mide el coeficiente de reflexión del agua corriente a la frecuencia de interés y se computa el valor de la admitancia, posteriormente con la permitividad compleja conocida y la admitancia calculada se encuentran las constantes del circuito a cada frecuencia. Entonces teniendo las constantes del circuito podemos empezar con la validación de la medida del dispositivo expuesto.

El modelo que se utilizó para la evaluación de la precisión y exactitud de la medición fue el de Debye de agua destilada (ecuación 25) este fue reconocido en 1926 y describe la permitividad compleja del agua destilada como una función de la frecuencia

$$\varepsilon_c = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (25)$$

Donde ε_∞ es permitividad óptica a altas frecuencias de campo, ε_s es la permitividad estática a bajas frecuencias y τ es el tiempo de relajación eléctrica (una medida de las moléculas y los dipolos de movilidad). Los valores de estos parámetros para el agua destilada son $\varepsilon_s = 80,21$, $\varepsilon_\infty = 5,60$, $\tau(ps) = 9,36$. La tabla 2 muestra los valores de la permitividad compleja del agua destilada descritos por el modelo de Debye a una frecuencia en particular.

Tabla 2. Permitividad compleja del agua destilada según el modelo de Debye, T=25°C.

Frecuencia (GHz)	ε'	ε''
1	79,95	4,373
1,1	79,9	4,807
1,2	79,84	5,239
1,3	79,78	5,671
1,4	79,71	6,102
1,5	79,63	6,531
1,6	79,56	6,959
1,7	79,47	7,386
1,8	79,38	7,811
1,9	79,29	8,234
2	79,19	8,656
2,1	79,09	9,076
2,2	78,98	9,494

Frecuencia (GHz)	ε'	ε''
2,3	78,87	9,911
2,4	78,69	10,53
2,5	78,63	10,74
2,6	78,51	11,15
2,7	78,38	11,56
2,8	78,24	11,96
2,9	78,1	12,37
3	77,96	12,77

Fuente: Los Autores.

En la tabla 3 se encuentra el coeficiente de reflexión del agua corriente medida a diferentes frecuencias, se encuentran valores reportados del coeficiente de reflexión en parte real e imaginaria y también en dB Mag, Posteriormente en la gráfica 1 se presentan estos resultados representados con la curva de color azul.

Tabla 3. Coeficiente de reflexión medido del agua corriente en un intervalo de frecuencias de 1 GHz a 3 GHz.

Frecuencia (GHz)	S_{11} Parte real (mU)	S_{11} Parte Img. (U)	Mag.	dB Mag.
1	123,87	0,915	0,923	-0,692
1,1	375,77	0,823	0,904	-0,869
1,2	583,91	0,647	0,871	-1,194
1,3	806,79	0,354	0,881	-1,100
1,4	839,43	0,143	0,851	-1,396
1,5	825,45	-0,218	0,853	-1,373
1,6	734,65	-0,435	0,853	-1,373
1,7	556,41	-0,628	0,839	-1,524
1,8	419,39	-0,74	0,850	-1,405
1,9	218,64	-0,824	0,852	-1,385
2	6,392	-0,855	0,855	-1,360
2,1	-143,28	-0,838	0,850	-1,409
2,2	-292,72	-0,798	0,849	-1,411
2,3	-418,92	-0,750	0,859	-1,319

Frecuencia (GHz)	S_{11} Parte real (mU)	S_{11} Parte Img. (U)	Mag.	dB Mag.
2,4	-577,79	-0,634	0,857	-1,332
2,6	-638,86	-0,542	0,837	-1,537
2,7	-655,35	-0,535	0,845	-1,452
2,8	-681,97	-0,494	0,842	-1,492
2,9	-691,02	-0,477	0,839	-1,517
3	-577,79	-0,448	0,731	-2,720

Fuente: Los Autores.

En la tabla 4 se encuentra el coeficiente de reflexión del agua destilada medida a diferentes frecuencias, se encuentran valores reportados del coeficiente de reflexión en parte real e imaginaria y también en dB Mag, Posteriormente en la gráfica 1 se presentan estos resultados representados con la curva de color rojo.

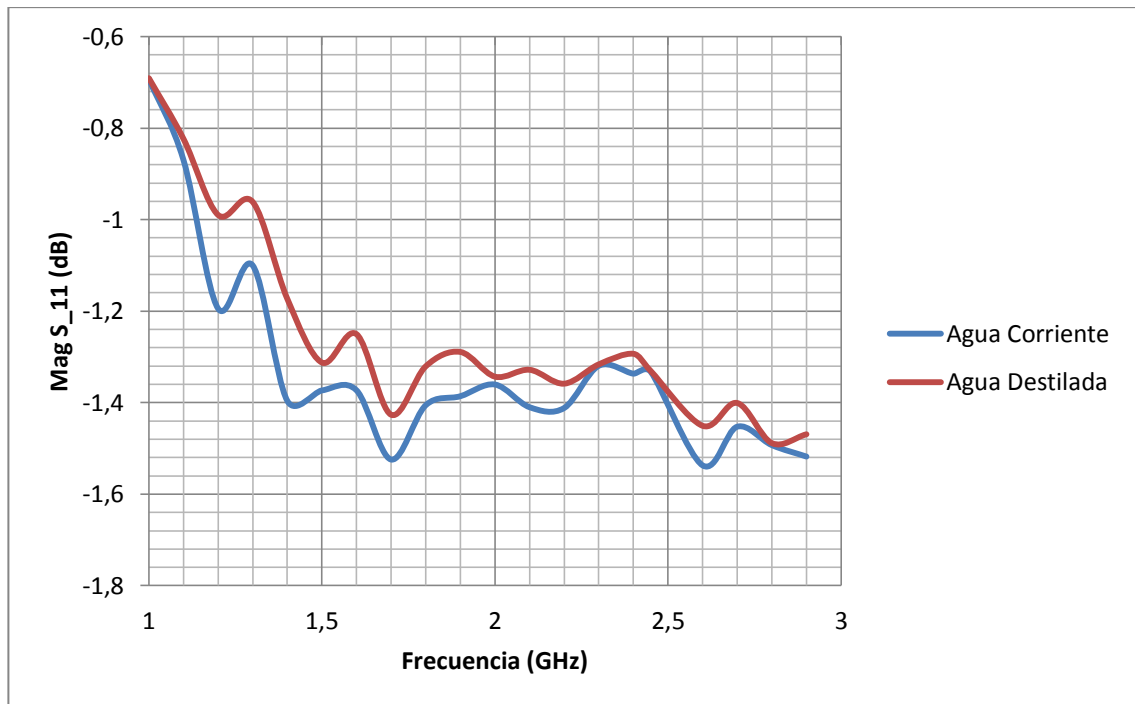
Tabla 4. Coeficiente de reflexión del agua destilada medida en un intervalo de frecuencias de 1 GHz a 3 GHz.

Frecuencia (GHz)	S_{11} Parte real (mU)	S_{11} Parte Img. (U)	Mag.	dB Mag.
1	139,1	0,913	0,923	-0,690
1,1	369,76	0,831	0,909	-0,823
1,2	577,75	0,68	0,892	-0,989
1,3	803,87	0,394	0,895	-0,961
1,4	866,71	0,110	0,873	-1,173
1,5	841,56	-0,176	0,859	-1,312
1,6	730,48	-0,465	0,865	-1,250
1,7	575,03	-0,624	0,848	-1,426
1,8	439,48	-0,738	0,858	-1,320
1,9	253,33	-0,824	0,862	-1,289
2	35,126	-0,856	0,856	-1,343
2,1	-144,18	-0,846	0,858	-1,328
2,2	-296,96	-0,802	0,855	-1,358
2,3	-410,49	-0,755	0,859	-1,316

Frecuencia (GHz)	S_{11} Parte real (mU)	S_{11} Parte Img. (U)	Mag.	dB Mag.
2,4	-585,62	-0,627	0,857	-1,330
2,6	-641,35	-0,552	0,846	-1,450
2,7	-650,31	-0,549	0,851	-1,400
2,8	-673,64	-0,506	0,842	-1,488
2,9	-688,38	-0,489	0,844	-1,469
3	-693,33	-0,454	0,828	-1,631

Fuente: Los Autores.

Gráfica 1. Respuesta en magnitud de las medidas de 17/ 09/2013, datos experimentales. (Excel)

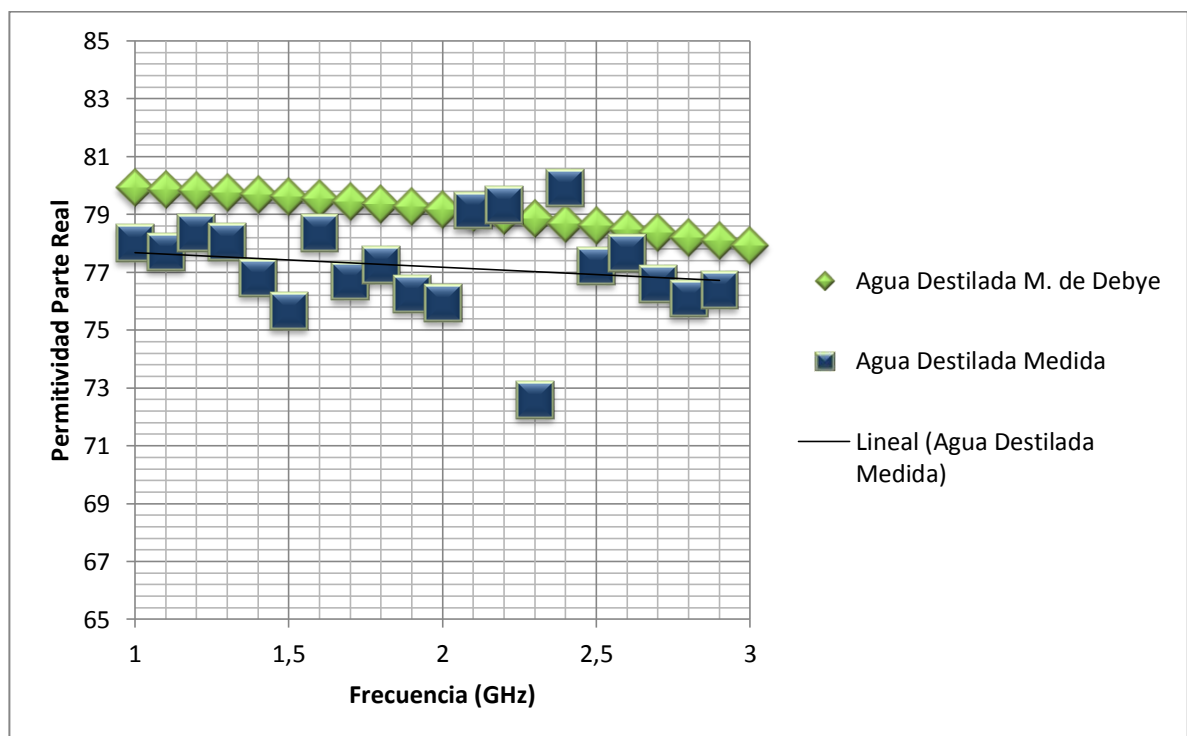


Fuente: Los Autores.

Una vez se hallan las constantes del circuito equivalente a partir del coeficiente de reflexión medido del agua corriente, continua la validación de la medida realizando la comparación entre el valor esperando descrito por el modelo de Debye y el medido a partir del dispositivo expuesto en este trabajo.

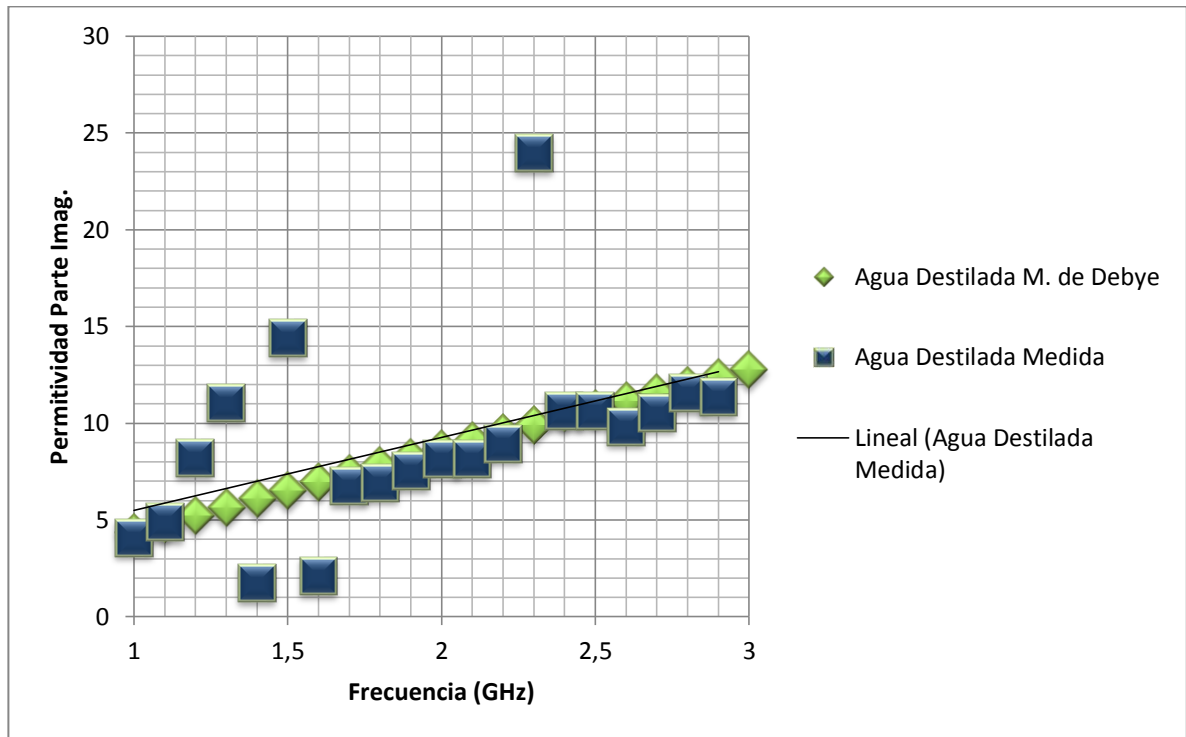
Para hallar la permitividad compleja medida del agua destilada, se toman los datos del coeficiente de reflexión medido a cada frecuencia, se calcula la admitancia compleja y finalmente se calcula la permitividad compleja del agua destilada medida con el sensor desarrollado en la investigación. A continuación en la gráfica 2 y 3 se presenta la comparación de dichos resultados.

Gráfica 2. Relación frecuencia- Permitividad ϵ' del agua destilada medida comparada con el modelo de Debye (Excel)



Fuente: Los Autores.

Gráfica 3. Relación frecuencia-Permitividad ϵ'' del agua destilada medida comparada con el modelo de Debye. (Excel)



Fuente: Los Autores.

Para realizar un estudio más profundo de la precisión de las medidas tomadas por el prototipo de sonda coaxial fabricada, se desarrolla un seguimiento detallado de los resultados obtenidos de la permitividad compleja en el valor específico de interés (2,4 GHz). Los datos reportados a la frecuencia de interés se adquieren con una diferencia de tiempo de 5 a 10 minutos mientras se calibra de nuevo el equipo y se cambia la muestra a un recipiente diferente.

Tabla 5. Parámetros dieléctricos medidos del agua destilada a 2,4 GHz

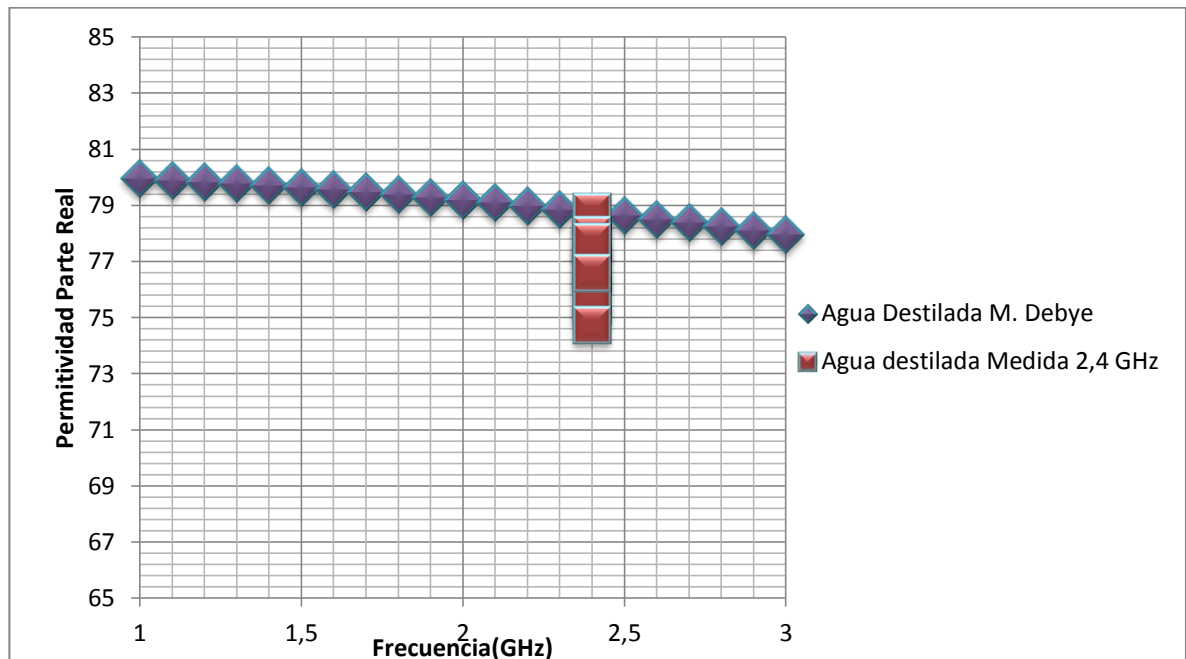
Re [Y_{11}]	Im [Y_{11}]	Re [E_c]	Im [E_c]	C_0	G_0
0,0088	0,0433	77,78	10,14	3,7E-14	5,863E-08
0,0090	0,0438	78,75	10,31	3,7E-14	5,863E-08
0,0087	0,0434	77,92	9,94	3,7E-14	5,863E-08
0,0085	0,0420	75,42	10,00	3,7E-14	5,863E-08

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0080	0,0423	75,79	9,03	3,7E-14	5,863E-08
0,0087	0,04281	76,91	10,18	3,7E-14	5,863E-08
0,0082	0,04186	76,65	9,78	3,7E-14	5,863E-08
0,0084	0,04331	77,69	9,54	3,7E-14	5,863E-08
0,0077	0,04173	74,72	8,858	3,7E-14	5,863E-08
0,0083	0,04269	76,59	9,556	3,7E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

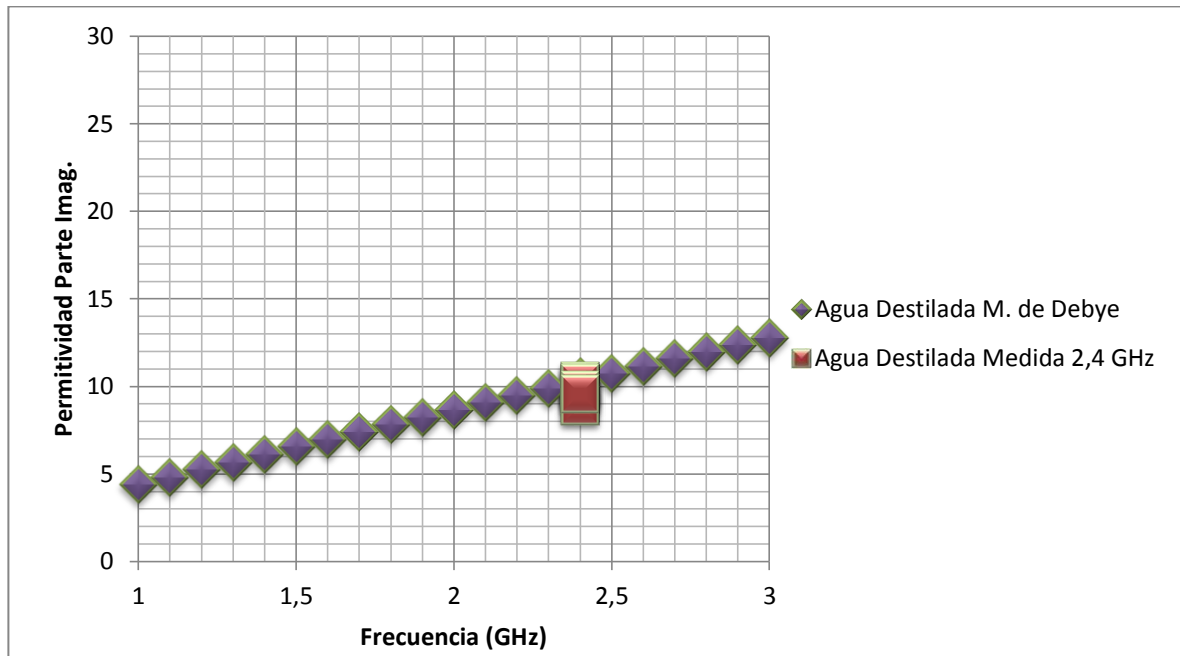
En las gráficas 4 y 5 se encuentra los resultados de la permitividad compleja del agua destilada medida a 2,4 GHz comparados a los valores del agua destilada descrita por el modelo de Debye, en estas graficas podemos observar que los valores medidos por la sonda a esta frecuencia son muy cercanos a los valores ideales del modelo.

Gráfica 4. Relación frecuencia- Permitividad ϵ' del agua destilada medida a 2,4 GHz comparada con el modelo de Debye (Excel)



Fuente: Los Autores.

Gráfica 5. Relación frecuencia-Permitividad ϵ'' del agua destilada medida a 2,4 GHz comparada con el modelo de Debye. (Excel)



Fuente: Los Autores.

2.6.2 Análisis estadístico de los resultados Para complementar la validación de los resultados obtenidos de la permitividad compleja del agua destilada calculada a partir del coeficiente de reflexión medido con el prototipo de sonda coaxial, se realiza un estudio estadístico de los resultados obtenidos con el fin de observar la incertidumbre de las medidas realizadas. El estudio estadístico se realiza a once resultados de la permitividad compleja calculada, se computa la moda, mediana, media aritmética, media geométrica y la repetibilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 6. Tabla comparativa entre los valores de la permitividad compleja a 2,4 GHz del agua destilada descrita por el modelo Debye y los valores medidos.

n	Frecuencia (GHz)	MODELO IDEAL DEBYE		AGUA D. MEDIDA	
		ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
1	2,4	78,69	10,53	79,9063	10,6516
2	2,4	78,69	10,53	77,7845	10,1463
3	2,4	78,69	10,53	78,7518	10,3185
4	2,4	78,69	10,53	77,9258	9,9416
5	2,4	78,69	10,53	75,4232	10,0057
6	2,4	78,69	10,53	75,7986	9,0317
7	2,4	78,69	10,53	76,9186	10,1863
8	2,4	78,69	10,53	76,6544	9,7873
9	2,4	78,69	10,53	77,6981	9,5483
10	2,4	78,69	10,53	74,7293	8,8584
11	2,4	78,69	10,53	76,5936	9,5563

Fuente: Los Autores.

➤ **Moda (Mo)**

➤ ϵ' : No se repite ningún valor.

➤ ϵ'' : No se repite ningún valor

➤ **Mediana (Me)**

➤ ϵ'

$$\bullet \quad Me = \frac{n+1}{2} \quad \therefore \quad Me = \frac{11+1}{2} \quad \therefore \quad Me = 6 \quad \therefore \quad \mathbf{Me = 76,9186}$$

➤ ϵ''

$$\bullet \quad Me = \frac{n+1}{2} \quad \therefore \quad Me = \frac{11+1}{2} \quad \therefore \quad Me = 6 \quad \therefore \quad \mathbf{Me = 9,9416}$$

➤ **Media Aritmética (Promedio)**

➤ ε'

$$\bullet X = \frac{\sum X_i}{n} \quad \therefore X = \frac{848,1842}{11} \quad \therefore X = 77,1077$$

➤ ε''

$$\bullet X = \frac{\sum X_i}{n} \quad \therefore X = \frac{848,1842}{11} \quad \therefore X = 9,8211$$

➤ **Varianza**

➤ ε'

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1}$$

$$\bullet X = \frac{\sum X_i}{n} \quad \therefore X = \frac{848,1842}{11} \quad \therefore X = 77,1077$$

$$\bullet \sum (X_i - X)^2 = 22,7248$$

$$\bullet \sigma^2 = \frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1} \quad \therefore \sigma^2 = \frac{22,7248}{11 - 1} \quad \therefore \sigma^2 = 2,2725$$

➤ ε''

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1}$$

$$\bullet X = \frac{\sum X_i}{n} \quad \therefore X = \frac{848,1842}{11} \quad \therefore X = 9,8211$$

$$\bullet \sum (X_i - X)^2 = 2,9205$$

$$\bullet \sigma^2 = \frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1} \quad \therefore \sigma^2 = \frac{2,9205}{11 - 1} \quad \therefore \sigma^2 = 0,2905$$

Tabla 7. Condiciones para evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de la medida.

	Condición de repetibilidad	Condición de precisión intermedia	Condición de reproducibilidad
LABORATORIO	Mismo	Mismo	Diferente
OPERADOR	Mismo	Diferente	Diferente
EQUIPO	Mismo	Mismo ^a	Diferente
TIEMPO DE PRUEBA	Corto ^b	Múltiples días	No se especifica
^a Depende del STM, por lo general no excede 1 día			
^b Esta situación puede ser con instrumentos diferentes que cumplan con el mismo requerimiento de diseño			

Fuente: Los Autores.

Condiciones de repetibilidad (r): El procedimiento de medida se lleva a cabo once veces a lo largo de un corto periodo de tiempo (5 a 10 minutos), las medidas se hacen con el mismo equipo, en el mismo laboratorio, con los mismos observadores. Lo que se quiere evaluar realizando estos cálculos es estudiar la desviación estándar de cada resultado con respecto al valor promedio calculado.

➤ ε'

$$r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X_i - X)^2}$$

- $X = \frac{\sum X_i}{n} \quad \therefore X = \frac{848,1842}{11} \quad \therefore X = 77,1077$

- $\sum (X_i - X)^2 = 22,7248$

$$r = \sqrt{\frac{1}{11-1} (22,7248)} \quad r = \sqrt{2,2725} \quad r = 1,5075$$

➤ ε''

$$r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X_i - X)^2}$$

- $X = \frac{\sum X_i}{n} \quad \therefore X = \frac{848,1842}{11} \quad \therefore X = 9,8211$

- $\sum (X_i - X)^2 = 2,9205$

$$r = \sqrt{\frac{1}{11-1} (2,9205)} \quad r = \sqrt{0,2920} \quad r = 0,5404$$

Condiciones de reproducibilidad (R): Para el caso de nuestras condiciones de medida la reproducibilidad no aplica debido a que para que exista condiciones de reproducibilidad es necesario realizar las pruebas con el mismo método aplicado a idénticos objetos de prueba por diferentes operadores en diferentes laboratorios con diferentes equipos. Además, un laboratorio diferente implica necesariamente un operador diferente, equipos diferentes, ubicación diferente y una supervisión diferente.

2.6.3 Evaluación de la exactitud La evaluación de la exactitud de la medición se pone a prueba a través de una comparación con un patrón de referencia conocido, la comparación se considera como la determinación del error del dispositivo. El patrón de referencia es el modelo de Debye de agua destilada.

Si el modelo de Debye del agua destilada es tomado como referencia, la medición relativa del error δ_m puede ser definido:

$$\delta_m = \frac{|\varepsilon_{rm} - \varepsilon_{rDm}|}{\varepsilon_{rDm}} * 100 \quad (27)$$

Donde ε_{rm} es la parte real de la permitividad relativa del agua destilada calculada a partir del coeficiente de reflexión medido usando el circuito equivalente de la sonda, ε_{rDm} es la parte real de la permitividad compleja relativa determinada por el modelo de Debye (ecuación 26).

Tabla 8. Medida de errores relativos, parte real sonda SMA.

FRECUANCIA (GHz)	ε_{rm}	ε_{rDm}	δ_m
2,4	77,094288	78,69	2%

Fuente: Los Autores.

Tabla 9. Medida de errores relativos, parte imaginaria sonda SMA.

FRECUANCIA (GHz)	ε_{rm}	ε_{rDm}	δ_m
2,4	9,8073386	10,53	6%

Fuente: Los Autores.

Comparando con el patrón de referencia utilizado (modelo de Debye del agua destilada) se puede apreciar que existe un porcentaje de error bajo entre los resultados medidos y los resultados esperados (tabla 8 y 9) esto se infieren debido al bajo porcentaje de error resultante en el valor de la permitividad compleja a la frecuencia de interés en la investigación.

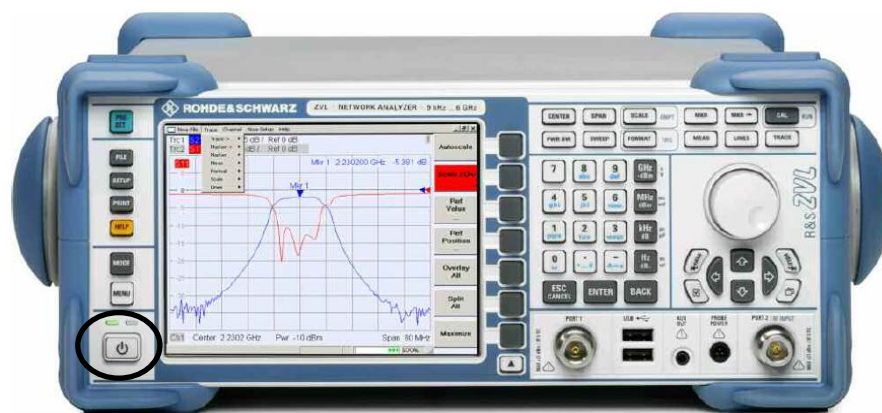
Después de la validación de la medida por medio de una sustancia conocida se procede a medir la permitividad compleja en las muestras de lodo de perforación base agua a 2,4 GHz, en el siguiente capítulo se presentan las cantidades de cada muestra y los resultados de la medida de la permitividad compleja.

2.7 PROTOCOLO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMITIVIDAD COMPLEJA DEL LODO DE PERFORACIÓN

En este parágrafo se expone el protocolo planteado en la investigación para determinar la permitividad compleja del lodo de perforación base agua.

2.7.1 Puesta en marcha del equipo Para poner en marcha el analizador de redes vectorial es necesario primero sacarlo de la funda protectora, después realizar la conexión del instrumento a la fuente CA y encender el equipo pulsando el interruptor CA y situarlo en la posición I (encendido) (parte posterior del equipo), Tras encender el analizador, este arranca y está listo para ser operado, la tecla de encendido/apagado (Figura 20) está situada en la esquina inferior izquierda del panel frontal.

Figura 20. Panel frontal del analizador de redes vectorial señalando tecla de encendido.

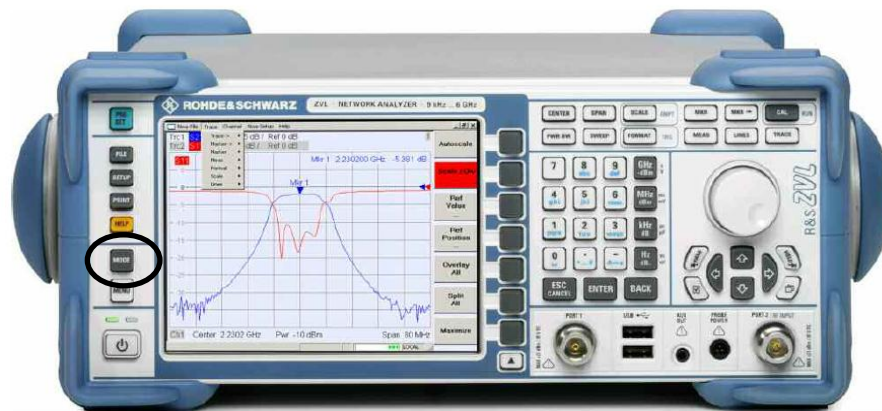


Fuente: Guía Rápida, R&S ZVL Analizador de Redes Vectoriales.

2.7.2 Configuración del equipo En las teclas del panel frontal que están a la izquierda de la pantalla de visualización, se encuentra la tecla **MODE** (Figura 21) que activa la opción de modo de medida de analizador de redes o el modo

anizador de espectros. Presionando esta tecla se abre una ventana de dialogo, pulse la opción en modo anizador de redes.

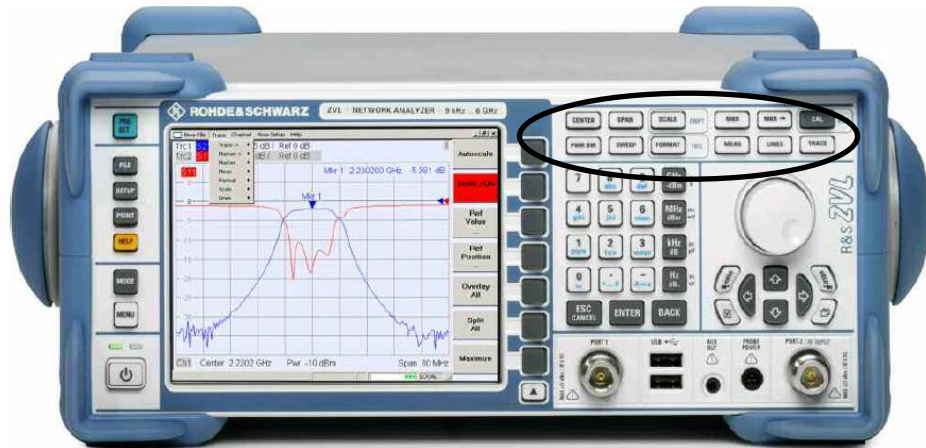
Figura 21. Panel frontal del analizador de redes vectorial señalando tecla *MODE*.



Fuente: Guía Rápida, R&S ZVL Analizador de Redes Vectoriales.

2.7.3 Definición de las funciones para realizar las medidas Las teclas que se encuentran en la parte superior derecha del panel frontal (Figura 22) proporcionan acceso directo a los ajustes de medidas más importantes, cada tecla abre un menú desplegable o activa una orden del menú. Para el caso de nuestras medidas no se hace uso de todas las teclas de funciones, a continuación se muestran las teclas de función involucradas en la medida.

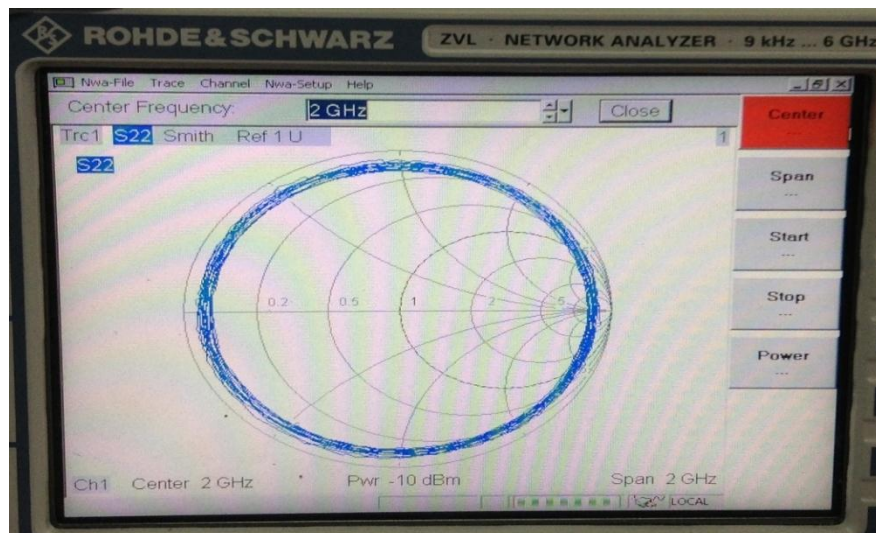
Figura 22. Panel frontal del analizador de redes vectorial señalando las teclas de función.



Fuente: Guía Rápida, R&S ZVL Analizador de Redes Vectoriales.

Pulse la tecla de función **CENTER** o **SPAN** para introducir el valor inicial y final de su rango de frecuencia, utilice las teclas de datos del panel frontal (Figura 23) (ejemplo: start 1 GHz, stop 3 GHz) y concluya la entrada con 'G/n'.

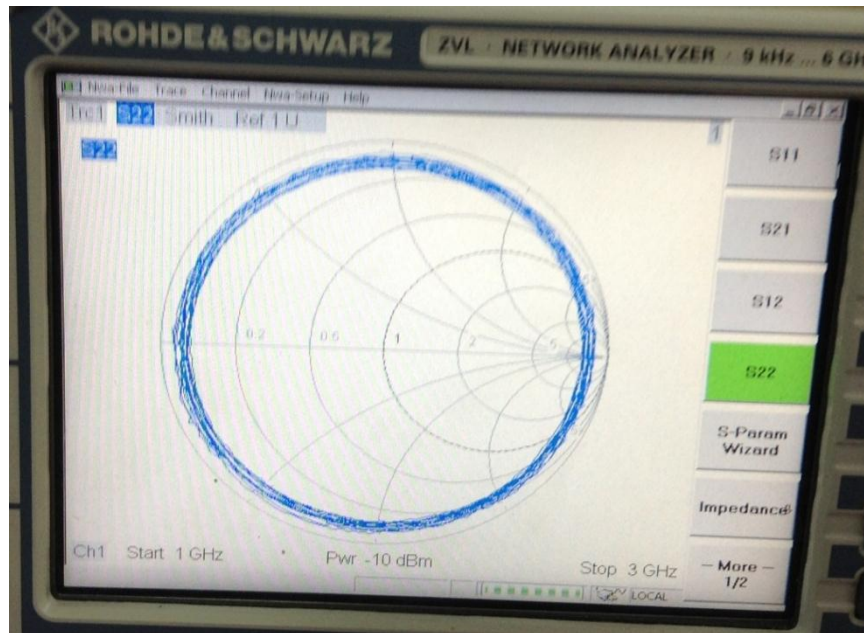
Figura 23. Pantalla de visualización mostrando la función **CENTER**.



Fuente: Los Autores.

El siguiente paso es pulsar la tecla de definición **MEAS** y seleccione el siguiente coeficiente de reflexión S_{11} como parámetro de medida (Figura 24).

Figura 24. Pantalla de visualización mostrando la función MEAS.

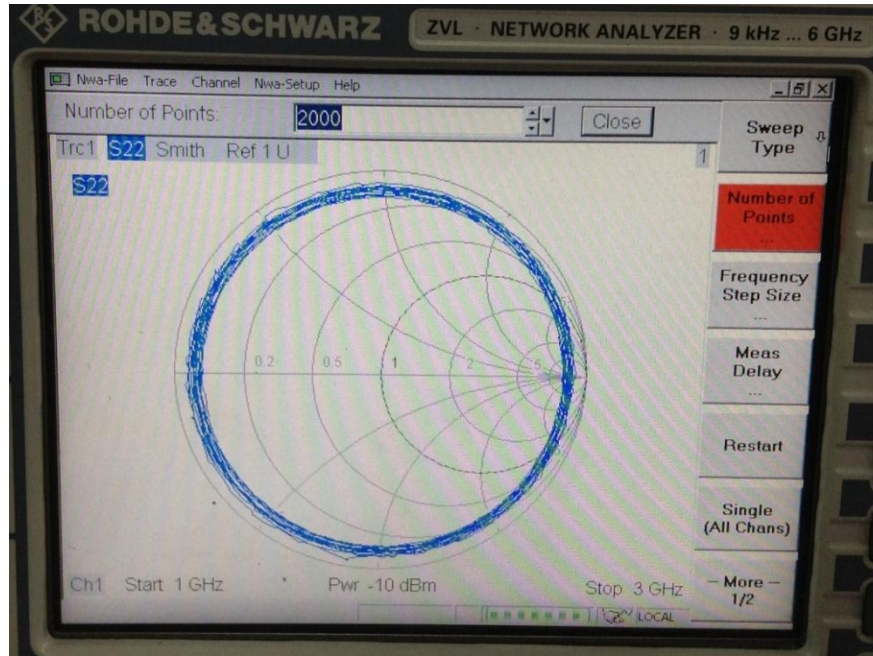


Fuente: Los Autores.

Luego con la tecla de función **SCALE** se define como se presentara la traza con la que se trabajara, aquí se selecciona el menú de contexto **AUTOSCALE** para que el equipo ajuste las divisiones de la escala y los valores de referencia, de tal forma que toda la traza se ajuste al área del diagrama.

Para definir el número de puntos de la medida pulsamos la tecla **SWEEP** aquí aparece la opción para definir el número de puntos con el que se quiere ver la traza (Figura 25), en esta opción se definen 2000 puntos.

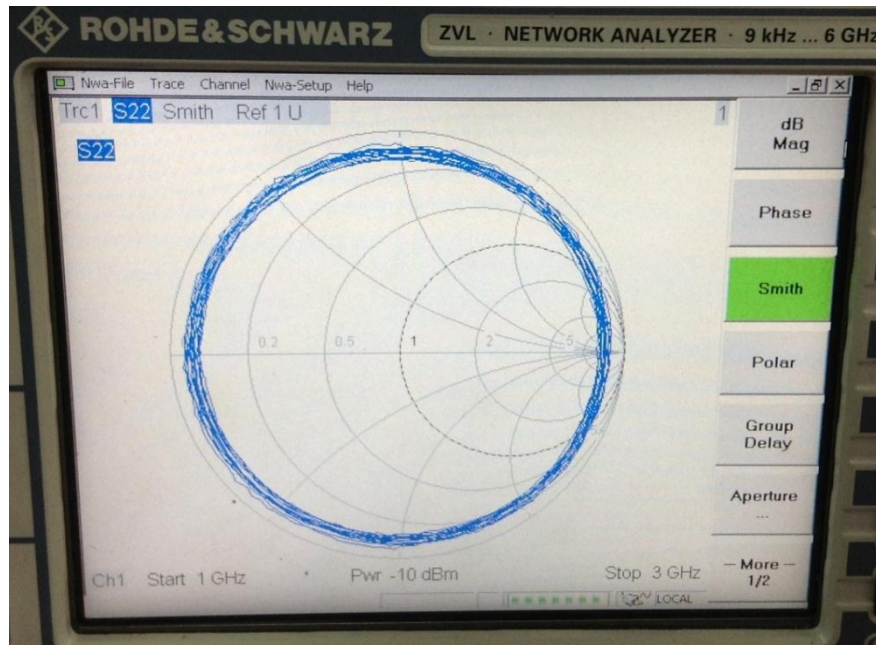
Figura 25. Pantalla de visualización mostrando la función **SWEEP**.



Fuente: Los Autores.

Si se quiere visualizar los datos en diferentes formatos esto se define con la tecla de definición **FORMAT** (Figura 26). Esta tecla despliega el menú donde se encuentra los diferentes formatos de visualización de la traza, el formato que se elige es '**dB Mag.**'.

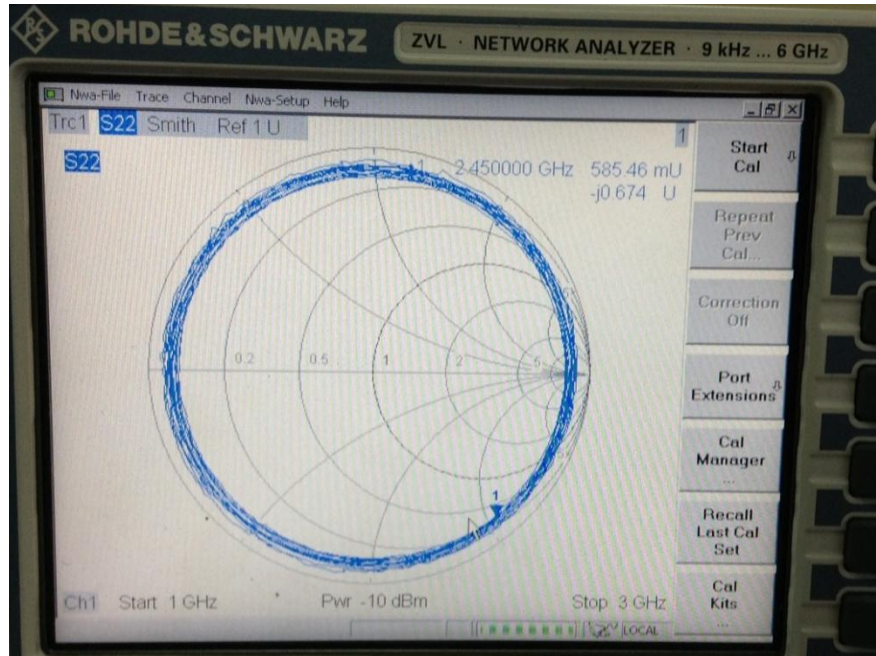
Figura 26. Pantalla de visualización mostrando la función **FORMAT**.



Fuente: Los Autores.

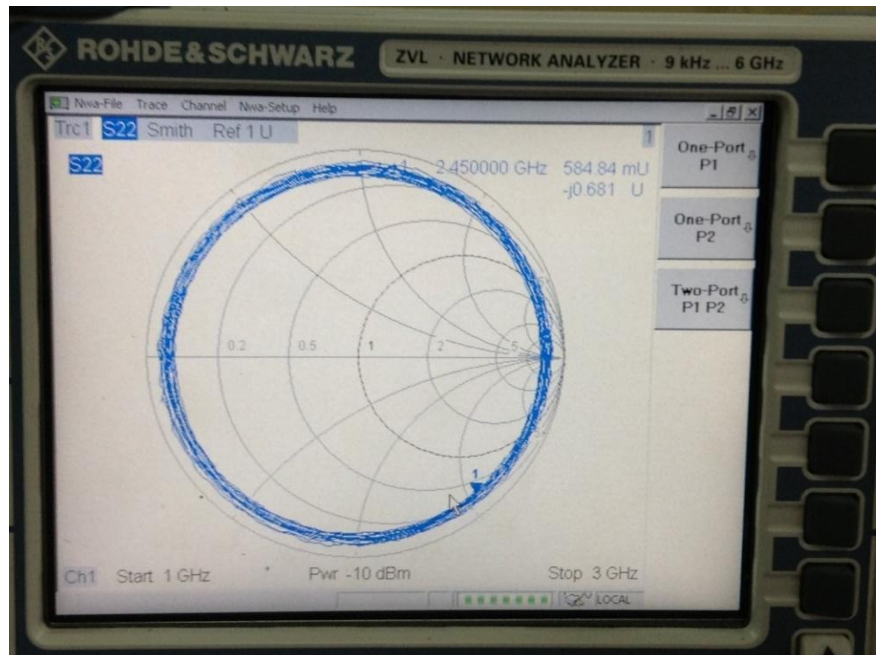
2.7.4 Calibración del instrumento de medida El analizador cuenta con métodos sofisticados de calibración para todos los tipos de medida. Debido a la configuración del hardware del sistema de medida es necesario realizar la calibración en dos etapas, la primera calibración se hizo con un tipo de calibración llamada completa de un puerto la cual consta de tres estándares (abierto, corto y carga adaptada) que se utilizan para determinar los tres términos de error de reflexión. Gracias al asistente de calibración con el que cuenta el analizador, este proceso se hace de manera directa y guiada por medio de menús. Para iniciar con la primera calibración debemos pulsar la tecla **CAL** para abrir el menú de calibración, active **Start Cal** (Figura 27) -**One Port P1** (Figura 28)- **FULL** (Figura 29)- para abrir el asistente de calibración para el tipo de calibración seleccionado. En la primera ventana del dialogo del asistente, seleccione el kit de calibración (ZV-Z121) y el conector del puerto de ensayo ($N\ 50\ \Omega$ (f), correspondiente al estándar de calibración masculino) y haga clic en 'Next' (Figura 30).

Figura 27. Pantalla de visualización mostrando la función *CAL- Start Cal.*



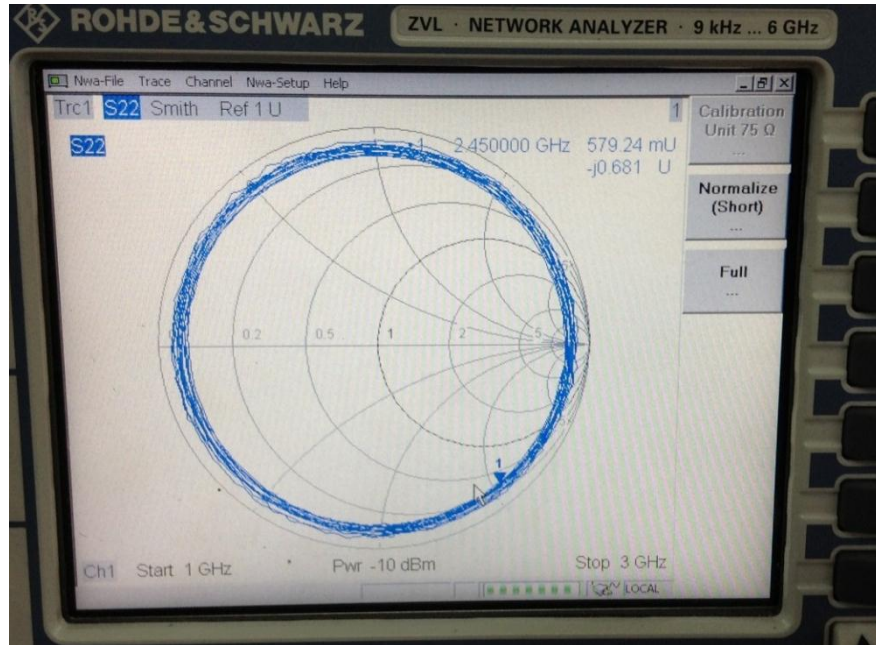
Fuente: Los Autores.

Figura 28. Pantalla de visualización mostrando la función *CAL-One Port P1.*



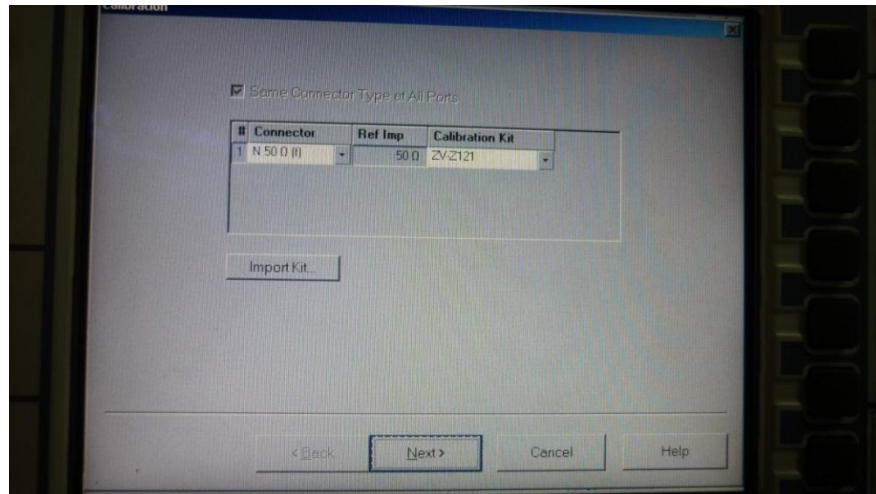
Fuente: Los Autores.

Figura 29. Pantalla de visualización mostrando la función **CAL-FULL**.



Fuente: Los Autores.

Figura 30. Dialogo del asistente de calibracion.

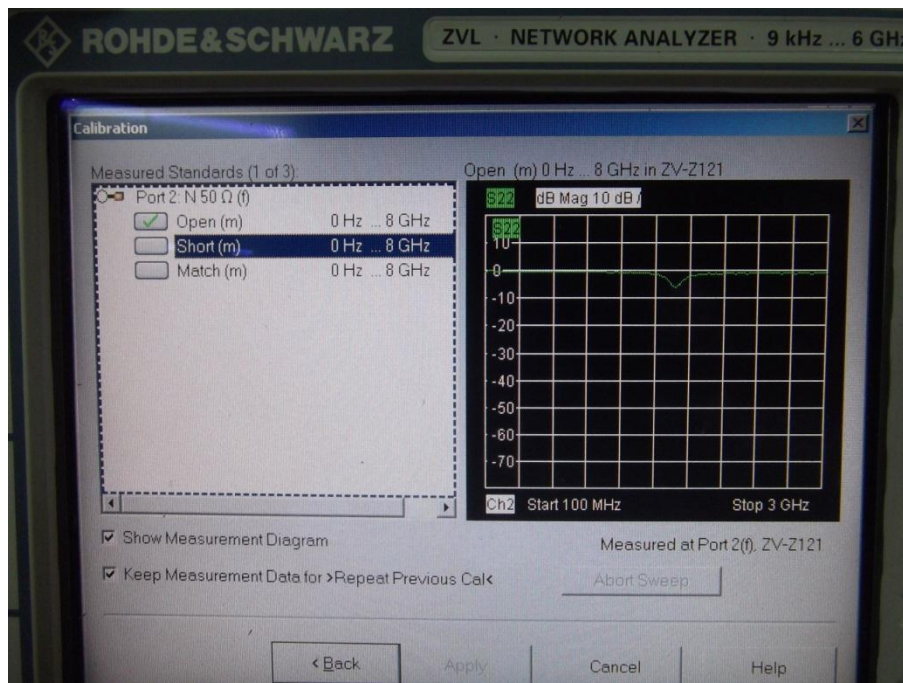


Fuente: Los Autores.

La siguiente ventana de dialogo del asistente de calibración muestra los tres estándares de calibración, conecte el abierto del kit de calibración (ZV-Z121), haga clic en la casilla 'open (m)' para iniciar el proceso de medida del estándar abierto.

El analizador lleva a cabo un barrido de calibración y muestra una ventana de mensaje con la barra de progreso (Figura 31). Una vez completado el barrido, aparece una marca verde de comprobación en la casilla del estándar abierto. Para continuar con la calibración de los otros estándares se realiza el mismo proceso descrito anteriormente, cuando realice el proceso con las tres terminaciones haga clic en 'Apply' para cerrar el asistente, calcular y almacenar los datos de corrección de error del sistema y aplicarlos a la medida en curso.

Figura 31. Ventana de dialogo del asistente de calibracion (Open, Short y Match).



Fuente: Los Autores.

La segunda etapa de calibración se hace con una opción que presta el analizador para realizar extensión de puerto, para guardar el archivo que describe la red de transformación virtualmente en el equipo se debe conectar una dispositivo de almacenamiento USB que contenga el archivo para guardarlo en la memoria del analizador de redes, después de haber guardado el archivo se hace clic con el

botón derecho del ratón sobre la opción del menú **Channel**, se abren los siguientes menús **-Cal-Port Extensions-De-Embedding**, cuando se abre el dialogo de-embedding haga clic en la pestaña *Read data from file* busque el archivo guardado y dele clic, luego asigne el puerto en el que se está trabando y cierre el dialogo. Ya habiendo realizado las dos etapas de calibración para el hardware del sistema de medida utilizado se da por terminada la calibración del equipo.

2.7.5 Acondicionamiento de la muestra Para tomar la medida del coeficiente de reflexión del lodo de perforación base agua es necesario antes de las medidas realizar una previa agitación de la muestra que se desea evaluar, después de la agitación se vierte la sustancia en el recipiente de medida y se coloca en perfecto contacto con la sonda coaxial abierta en un extremo (Figura 32). Inmediatamente la sonda entra en contacto con la muestra el analizador de redes presenta en la pantalla de visualización la respuesta del coeficiente de reflexión.

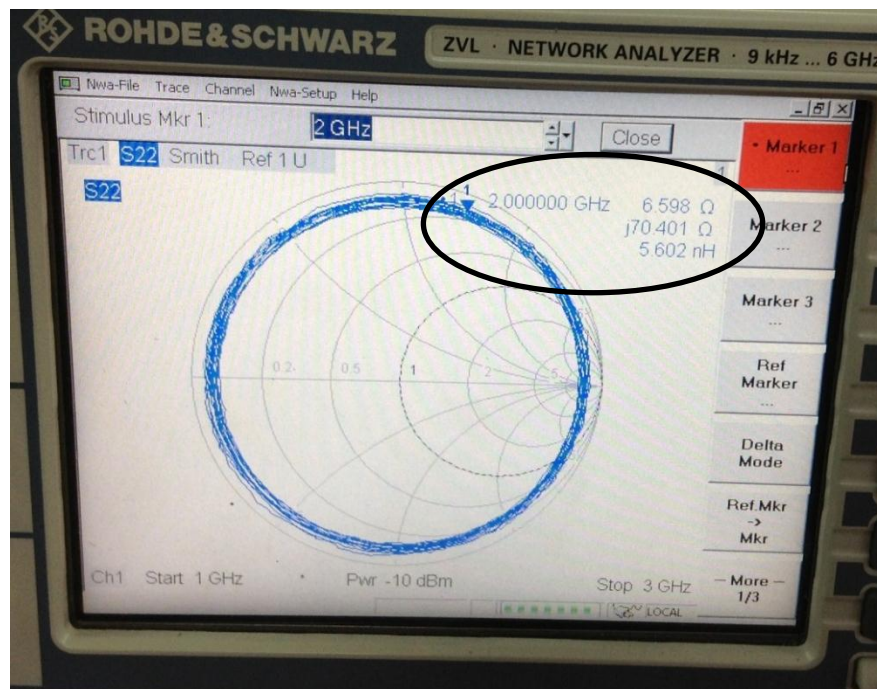
Figura 32. Sonda coaxial abierta en un extremo adjunta a un material bajo prueba (Lodo de perforacion base agua).



Fuente: Los Autores.

2.7.6 Evaluación de datos Para poder visualizar la respuesta del coeficiente de reflexión de manera numérica a una frecuencia determinada es necesario utilizar marcadores, para esto pulse la tecla de función **MKR** con ella se sitúa el marcador 1 en su posición predeterminada, aparece en la traza un símbolo (triángulo). El valor de estímulo (frecuencia) y el valor de respuesta (coeficiente de reflexión) se presentan en la pantalla en la esquina superior derecha del diagrama (Figura 33). Ya teniendo los datos del coeficiente de reflexión a las frecuencias de interés marcados, podemos continuar con la toma de datos para posterior cálculo de la permitividad compleja del material bajo prueba (lodo de perforación base agua).

Figura 33. Pantalla de visualización del analizador de redes (traza especificando el marcador y el valor de repuesta).



Fuente: Los Autores.

2.7.7 Repetición de las medidas Para tomar nuevamente las medidas del material bajo prueba y así comprobar la repetitividad de los datos tomados, se debe cerrar la ventana del archivo en el que se está trabajando, abrir un nuevo

archivo y repetir el protocolo a partir del párrafo (2.7.3) hasta realizar de nuevo la evaluación de los datos del coeficiente de reflexión por medio de los marcadores. Este proceso se puede repetir cuantas veces se necesite observar la precisión de los datos arrojados.

2.7.8 Apagar el instrumento Para apagar el equipo se cierran los archivos anteriormente creados y se pulsa la tecla de apagado del equipo que está situada en la esquina inferior izquierda del panel frontal, cuando está apagado el interruptor, ambos LEDs están apagados, para desconectar el equipo de la fuente de alimentación es necesario antes pulsar el interruptor CA en la parte posterior del equipo en la posición 0 (apagado), luego de esto se puede desconectar el instrumento de la fuente CA, finalmente se guarda el equipo en la funda protectora.

2.7.9 Determinación de la permitividad compleja La determinación de la permitividad compleja del lodo de perforación se calcula a partir del coeficiente de reflexión medido de la sustancia, luego con las constantes del circuito equivalente (halladas previamente con la permitividad compleja conocida y el coeficiente de reflexión medida del agua) se procede a operar las ecuaciones complejas (ver párrafo 2.5) y a calcular la permitividad del lodo de perforación.

3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS, MEDICIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE LODO DE PERFORACIÓN

3.1.1 Materiales A continuación se presentan los materiales que se utilizaron para preparar las muestras a las cuales se les hicieron las pruebas para hallar la permitividad dieléctrica compleja a un rango de frecuencias, en la tabla 10 se encuentra la formulación de las muestras que se utilizaron con las cantidades que las componen.

Aditivos utilizados para la preparación de las muestras de lodos:

- **Agua:** Es la fase continua del lodo, no requiere tratamiento químico, resulta el mejor dispersante químico para controlar sólidos por dilución. Cuando contiene Calcio y/o Magnesio se le conoce con el nombre de dura. Estos iones disminuyen el rendimiento de las arcillas y alteran el comportamiento reológico del lodo. Por tal razón, es conveniente determinar la dureza del agua antes de iniciar la preparación del lodo y proceder, en caso necesario, a pre tratarla con Soda ASH para precipitar esos contaminantes.
- **Bentonita:** El termino bentonita se usa para describir la montmorillonita sódica explotada comercialmente (la cual constituye una forma de esmectita) que se usa como aditivo para el lodo de perforación. En la industria de los fluidos de perforación, ciertos minerales tales como la esmectita, son usados para proporcionar viscosidad, estructura de gel y control del filtrado.

- **Barita:** Sulfato de Bario molido, es el agente densificante, satisface la especificación 13A, sección 2, de la API para la baritina de fluidos de perforación. Este agente se puede utilizar para aumentar la densidad de fluidos de perforación base aceite y base agua hasta alcanzar 21 Lb/gal. Posee un peso específico de 4,2 (mínimo).
- **Cloruro de Sodio:** El cloruro de sodio o cloruro sódico, popularmente denominado sal común, la contaminación con sal se da por su contenido de iones de magnesio e iones de calcio, ambos perjudiciales para los lodos base agua. Este tipo de contaminación puede provenir del agua que se usa para mezclar el lodo, en la perforación de domos salinos, siendo la halita (NaCl sal común), la que se perfora más frecuencia. Su efecto inicial sobre el lodo de perforación es la floculación de las arcillas causadas por la acción del ion sodio.
- **Carbonato de Calcio:** Este es un aditivo que se utiliza para controlar la presión de los fluidos de la formación previniendo disparos. La característica de importancia de los materiales densificantes es su gravedad específica, debido a que a una mayor gravedad específica se tiene una menor concentración de sólidos en el lodo.
- **Polímeros:** Un polímero es una molécula de gran tamaño, constituida de unidades pequeñas, iguales y repetidas llamadas monómeras. Hay dos clases de carácter químico los cuales son los iónicos o no iónicos, este tipo de aditivo tiene dos funciones uno como viscosificadores y la otra como controlador de filtrado.
- **Arcillas (Recortes de perforación):** Las arcillas de formación se incorporan inevitablemente en el sistema de fluido de perforación durante las operaciones de perforación y puede causar varios problemas. Por lo tanto, los minerales arcillosos pueden ser beneficiosos o dañinos para el sistema de fluido.

Tabla 10. Formulación de las muestras a utilizar con sus respectivas cantidades.

Muestra	Bentonita [lpb]	Barita [lpb]	Sal [lpb]	Carbonatos de Calcio [lpb]	Polímeros [lpb]	Arcillas [lpb]
1	12	-	-	-	-	-
2	12	37	-	-	-	-
3	12	61	-	-	-	-
4	12	-	-	-	5	-
5	12	-	-	-	6	-
6	28	-	-	-	-	-
7	28	-	2	-	-	-
8	28	-	6	-	-	-
9	28	-	10	-	-	-
10	28	-	-	10	-	-
11	28	-	-	20	-	-
12	28	-	-	30	-	-
13	28	-	-	-	-	10
14	28	-	-	-	-	20

Fuente: Los Autores.

3.1.2 Instrumental requerido para la preparación y caracterización de las muestras Los equipos que se utilizaron para la preparación y caracterización de las muestras de lodo se muestran a continuación:

- Espátula: Esta herramienta se utiliza para tomar pequeñas cantidades de aditivo desde su recipiente contenedor hacia la balanza (figura 34. a).
- Balanza digital: Este instrumento se utiliza para medir la masa de los aditivos utilizados para la preparación de las muestras de lodos de perforación (figura 34. b).
- Agitador: Este equipo se utiliza para homogeneizar por medio de la agitación las muestras de lodo de perforación base agua (figura 34. c).

- Viscosímetro de Fann: Se utiliza para realizar lecturas directas de parámetros importantes en el cálculo de las propiedades reológicas (figura 34. d).
- Balanza para medir la densidad del lodo: Con este equipo se realiza la medida de la densidad en las muestras de lodo de perforación (figura 34. e).

Figura 34. Instrumental requerido para la preparación y caracterización de las muestras de lodo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fuente: Los Autores.

3.1.3 Procedimiento

1. Seleccionar los aditivos que intervienen en la preparación del lodo para las medidas de la permitividad dieléctrica compleja.
2. Determinar las cantidades necesarias de cada aditivo con la ayuda de la espátula y la balanza digital.
3. Mezclar los componentes seleccionados con ayuda del agitador hasta lograr la homogeneidad de la muestra.
4. Caracterizar el comportamiento reológico de cada muestra de lodo a medir para profundizar en sus propiedades (viscosidad plástica, punto cedente, fuerza de gel y viscosidad aparente).

La reología se determina a través de un viscosímetro de Fann de lectura directa, en el cual se miden las lecturas de 600 RPM, 300 RPM, 6 RPM y 3 RPM. Con los datos obtenidos se puede encontrar las siguientes propiedades:

- Viscosidad Plástica, expresada en centipoise (cp): se obtiene de la Lect 600 RPM – Lect 300 RPM. Esta viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido.
- Punto Cedente, expresado en libras por cada 100 pies cuadrados ($lbs / 100 pies^2$): se obtiene de la lectura de 300 RPM – Viscosidad Plástica. El punto cedente es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento.

- Fuerza de Gel: se corre a 3 RPM. fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Está relacionada con la capacidad de suspensión del fluido y se controla, en la misma forma, como se controla el punto cedente, puesto que la origina el mismo tipo de sólido (reactivo)
 - Viscosidad Aparente, expresada en centipoise (cp), se obtiene al dividir la lectura de 600 RPM entre 2. Se ve influenciada por la concentración de sólidos y por el tamaño de las partículas.
5. Determinar la densidad del lodo con la ayuda de una balanza cuyas unidades pueden ser leídas en lbs/gal y lbs/pies³. La medida de la densidad se hace llenando con lodo el recipiente que se encuentra adherido a la balanza. El fluido que rebosa el recipiente una vez es tapado es retirado para evitar errores en la medición. La balanza es ubicada sobre un soporte fijo, y por medio del contra peso se busca establecer un equilibrio de la burbuja niveladora y así con esto obtener la densidad del lodo.

En la tabla 11 se presenta la densidad y la reología de las muestras a las que se les hacen las pruebas.

Tabla 11. Densidad y propiedades reológicas de las muestras.

Muestra	V. Plástica [centipoise]	V. Aparente [centipoise]	Punto Cedente [lb/100 pies ²]	Fuerza de Gel (10 seg) [lb/100 pies ²]	Densidad [lb/gal]
1	2,5	5	5	2	8,3
2	6	7	2	5	9
3	5	7	4	5	9,5
4	57	113,5	113	16	10,5
5	14	150	272	19	10,2
6	8	15	14	7	8,9

Muestra	V. Plástica [centipoise]	V. Aparente [centipoise]	Punto Cedente [lb/100 pies ²]	Fuerza de Gel (10 seg) [lb/100 pies ²]	Densidad [lb/gal]
7	7	24,5	35	31	9,1
8	6	21,5	31	29	9
9	4	18,5	29	9	9
10	10	17	14	10	9,2
11	14	24,5	21	16	9,3
12	10	20,5	21	15	9,5
13	11	24,5	27	15	8,9
14	11	20,5	19	10	9

Fuente: Los Autores.

6. Finalmente una vez preparado el lodo y conocidas todas sus propiedades se mide la permitividad dieléctrica compleja a cada una de las muestras, la medida se realiza de la misma manera como se realiza con la sustancia de validación (parágrafo 2.6), los resultados de estas medidas se presentan en el siguiente parágrafo con su respectivo análisis.

3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS

En este apartado, se muestran los resultados de la medida de la admitancia, las constantes del circuito equivalente y la permitividad compleja de cada muestra de lodo de perforación, obtenidos con el prototipo de sonda coaxial abierta en un extremo construido a partir de un conector SMA. Tal y como se mostró anteriormente, para monitorizar un material, basta con tener medidas en tiempo real del coeficiente de reflexión de la muestra a una frecuencia determinada para hallar la permitividad compleja del material de interés.

El primer conjunto de muestras contienen Bentonita y Barita, este último es el componente a evaluar mediante un cambio en la permitividad. En la tabla 12 se observa la cantidad (Lpb) de cada aditivo presente en las muestras 1, 2 y 3.

La muestra 1 se considera la muestra base al ser preparada con la misma concentración de bentonita (12 Lpb) para los aditivos: barita y polímero, a esta muestra se le mide el coeficiente de reflexión que sirve como referencia para hacer la comparación de la permitividad antes y después de adicionar el aditivo a diferentes concentraciones.

Tabla 12. Composición de las muestras 1, 2 y 3

Muestra	Bentonita [lpb]	Barita [lpb]
1	12	-
2	12	37
3	12	61

La tabla 13 contiene los resultados de la permitividad compleja, aquí se observa la variación que tiene ésta a medida que se adiciona al lodo de concentración constante de bentonita ciertas cantidades de barita.

Tabla 13. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 1, 2 y 3.

Muestra	Re [Y_{11}]	Im [Y_{11}]	Re [E_c]	Im [E_c]	C_0	G_0
1	0,009934	0,04212	76,0767	12,5052	3,70E-14	5,863E-08
2	0,009532	0,04127	74,4415	12,064	3,70E-14	5,863E-08
3	0,009378	0,04012	72,3508	12,1273	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

En las tablas 14, 15 y 16 se encuentran los parámetros dieléctricos medidos a 2,4 GHz de las muestras 1, 2 y 3 (respectivamente) a diferentes tiempos de medida, los primeros siete resultados se tomaron el mismo día con una diferencia de tiempo 5 a 10 minutos mientras se calibra el equipo y se cambia la muestra, los

cuatro últimos resultados se tomaron 3 días después, también a diferentes tiempos de medida.

Tabla14. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 1.

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0084	0,04037	72,52	10,4111	3,70E-14	5,863E-08
0,0082	0,0398	71	10,1524	3,70E-14	5,863E-08
0,0086	0,04074	73,23	10,6413	3,70E-14	5,863E-08
0,0083	0,04053	72,79	10,2623	3,70E-14	5,863E-08
0,0085	0,04183	76,59	10,2377	3,70E-14	5,863E-08
0,0085	0,04076	73,23	10,3913	3,70E-14	5,863E-08
0,0096	0,0422	76,11	11,8867	3,70E-14	5,863E-08
0,0092	0,0414	74,57	11,4349	3,70E-14	5,863E-08
0,0093	0,0420	75,66	11,4168	3,70E-14	5,863E-08
0,0087	0,0404	72,65	10,8406	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

Tabla 15. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 2.

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0082	0,03886	69,7721	10,4536	3,70E-14	5,863E-08
0,0085	0,04059	72,9506	10,5518	3,70E-14	5,863E-08
0,0082	0,03939	70,737	10,4147	3,70E-14	5,863E-08
0,0082	0,04012	72,034	10,188	3,70E-14	5,863E-08
0,0076	0,03954	70,815	9,1806	3,70E-14	5,863E-08
0,0079	0,0402	72,0944	9,6631	3,70E-14	5,863E-08
0,0086	0,0396	71,1997	10,9053	3,70E-14	5,863E-08
0,0081	0,0390	69,9900	10,2062	3,70E-14	5,863E-08
0,0089	0,0397	71,4634	11,4059	3,70E-14	5,863E-08
0,0087	0,0397	71,4063	11,0519	3,70E-14	5,863E-08

Tabla 16. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 3.

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0078	0,03921	70,29	9,70	3,70E-14	5,863E-08
0,0079	0,03962	71,05	9,76	3,70E-14	5,863E-08
0,0082	0,03959	71,07	10,23	3,70E-14	5,863E-08
0,0079	0,03934	70,56	9,91	3,70E-14	5,863E-08
0,0076	0,03932	70,4	9,39	3,70E-14	5,863E-08
0,0081	0,03949	71	10,10	3,70E-14	5,863E-08
0,0075	0,0385	68,95	9,24	3,70E-14	5,863E-08
0,0075	0,0388	69,48	9,16	3,70E-14	5,863E-08
0,0077	0,0394	70,59	9,37	3,70E-14	5,863E-08
0,0076	0,0397	71,09	9,11	3,70E-14	5,863E-08

En las tablas 17 y 18 se encuentran los resultados del análisis estadístico realizado a la muestra 1, 2 y 3. El análisis se le hace a once valores medidos a diferentes tiempos de medida.

Tabla 17. Análisis estadístico de la permitividad parte real de las muestras 1, 2 y 3

Muestras	Mo	Me	X	S ²	r
1	-	73,2388	74,0829	3,1680	1,7799
2	-	71,4063	71,5367	1,7798	1,3341
3	-	70,5913	70,6165	0,7885	0,8880

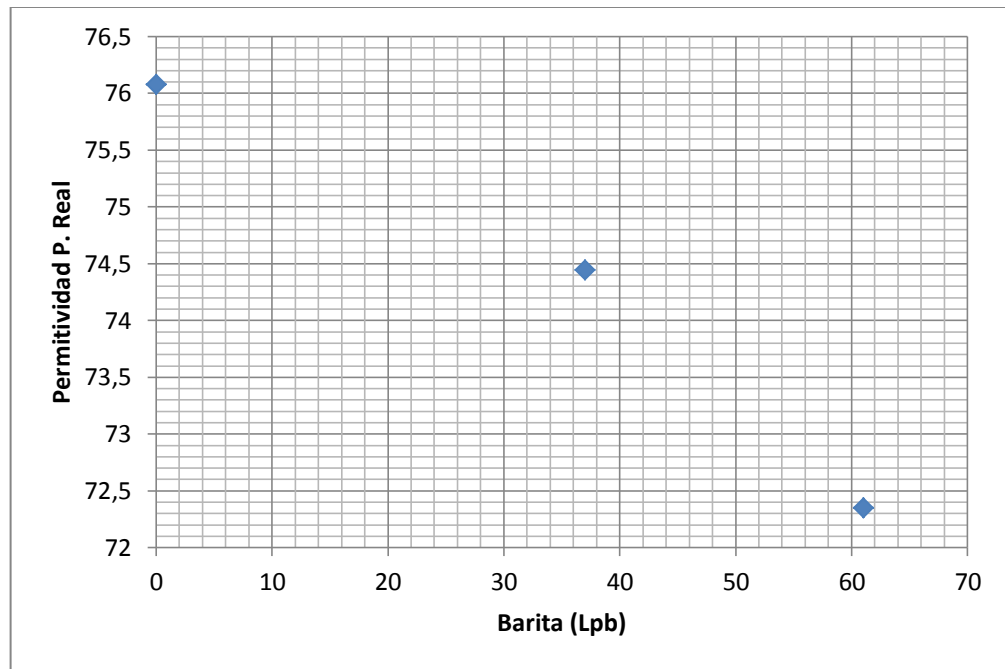
Tabla 18. Análisis estadístico de la permitividad parte imaginaria de las muestras 1, 2 y 3

Muestras	Mo	Me	X	S ²	r
1	-	10,6413	10,9255	0,6068	0,7790
2	-	10,4536	10,5532	0,6341	0,7963
3	-	9,7052	9,8302	0,7249	0,8514

En la gráfica 6 se evidencia el descenso que se produce en la parte real de la permitividad cuando se le adiciona a la muestra base diferentes cantidades de barita, en la gráfica 7 se presenta un comportamiento similar hasta 35 Lpb pero al

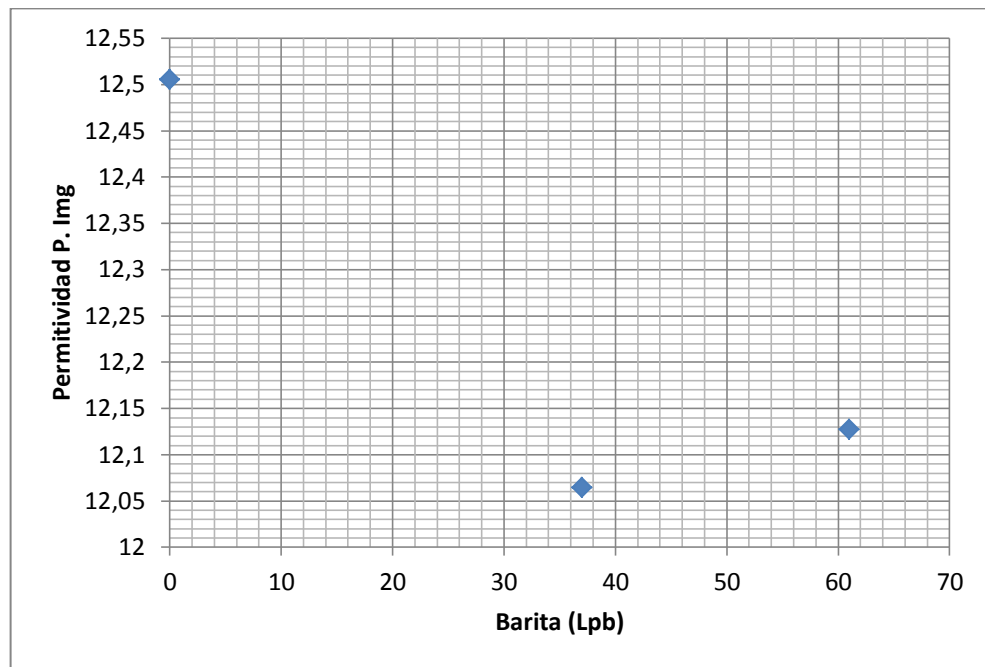
agregársele más cantidad la parte imaginaria de la permitividad sufre un pequeño ascenso.

Gráfica 6. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 1,2 y 3 con la barita a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

Gráfica 7. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 1, 2 y 3 con la barita a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

En la tabla 19 encontramos un conjunto de muestras preparadas a base de bentonita y polímeros, este último a diferentes concentraciones manteniendo la misma concentración de bentonita en todas las muestras.

Tabla 19. Composición de las muestras 1,4 y 5.

Muestra	Bentonita [lpb]	Polímeros [lpb]
1	12	-
4	12	5
5	12	6

Fuente: Los Autores.

La tabla 20 compara la permitividad compleja que se obtiene en la muestra base y las muestras 4 y 5. Las muestras con presencia de polímero producen un descenso en el valor de la parte real de la permitividad dieléctrica con respecto a

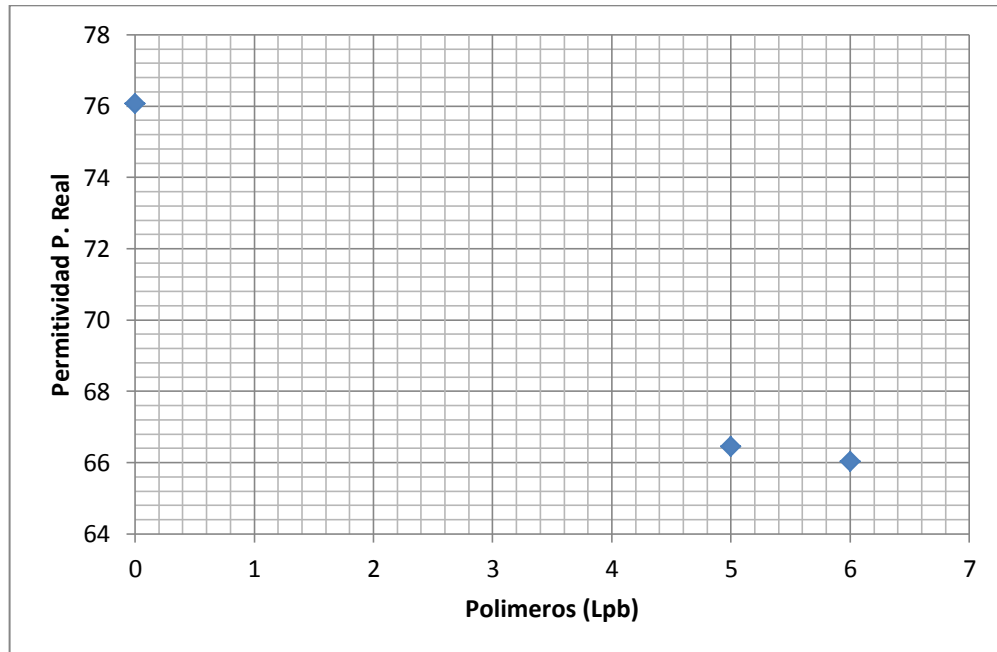
la muestra base. La parte imaginaria aumenta al inicio del proceso pero a medida que aumenta la concentración de polímero se obtiene el mismo comportamiento.

Tabla 20. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 1,4 y 5.

Muestra	Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
1	0,009934	0,04212	76,0767	12,5052	3,70E-14	5,863E-08
4	0,009837	0,03675	66,4442	13,8707	3,70E-14	5,863E-08
5	0,009652	0,03655	66,0362	13,5913	3,70E-14	5,863E-08

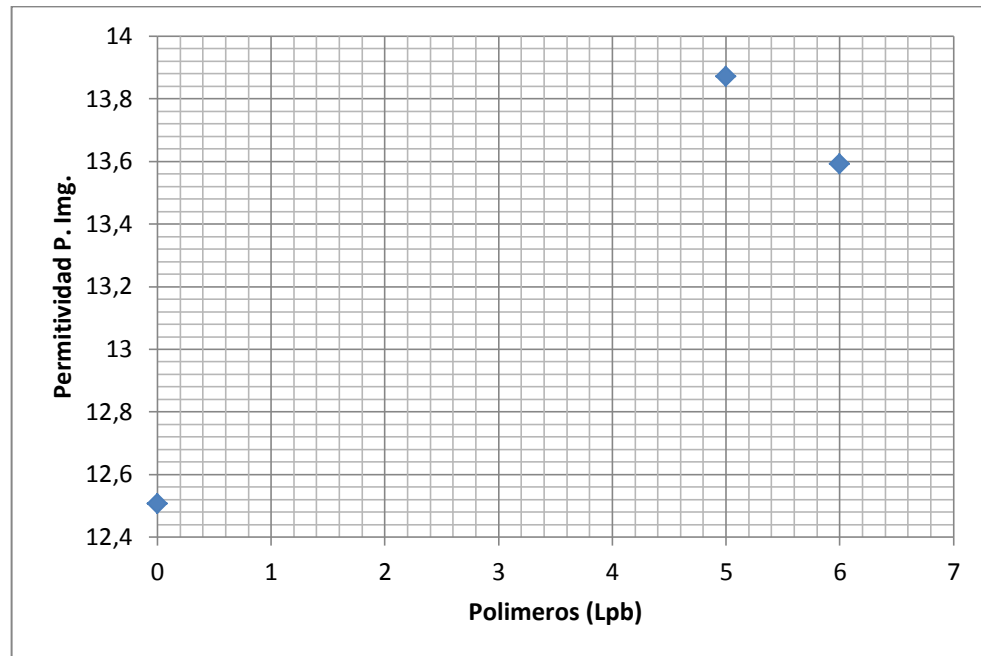
Fuente: Los Autores.

Gráfica 8. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 1, 4 y 5 con polímeros a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

Gráfica 9. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 1, 4 y 5 con polímeros a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

En la tabla 21 se observa la cantidad (Lpb) de aditivos de un nuevo lodo, en este caso la concentración de bentonita se mantiene constante en todas las muestras pero aumenta de 12 Lpb a 28 Lpb, la muestra número 6 es ahora considerada la muestra base para los aditivos: sal (cloruro de sodio), carbonatos de calcio y arcillas (recortes de perforación).

Tabla 21. Composición de las muestras 6, 7, 8 y 9.

Muestra	Bentonita [lpb]	Sal [lpb]
6	28	-
7	28	2
8	28	6
9	28	10

Fuente: Los Autores.

La tabla 22 evidencia la variación drástica de la permitividad al adicionar sal. El cambio más drástico se da en la parte imaginaria, esta situación se debe a las sales en solución que provocan la aparición de cargas iónicas libres que causan pérdidas.

Tabla 22. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 6, 7, 8 y 9.

Muestra	Re [Y_{11}]	Im [Y_{11}]	Re [E_c]	Im [E_c]	C_0	G_0
6	0,009524	0,03922	70,7824	12,659	3,70E-14	5,863E-08
7	0,01292	0,03898	71,332	18,8411	3,70E-14	5,863E-08
8	0,01801	0,03713	69,3772	28,8422	3,70E-14	5,863E-08
9	0,02511	0,03338	63,8104	43,5035	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

En las tablas 23, 24, 25 y 26 se encuentran los parámetros dieléctricos medidos a 2,4 GHz de las muestras 6, 7, 8 y 9 (respectivamente) a diferentes tiempos de medida, los primeros siete resultados se tomaron el mismo día con una diferencia de tiempo 5 a 10 minutos mientras se calibra el equipo y se cambia la muestra, los cuatro últimos resultados se tomaron 3 días después, también a diferentes tiempos de medida.

Tabla 23. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 6.

Re [Y_{11}]	Im [Y_{11}]	Re [E_c]	Im [E_c]	C_0	G_0
0,008	0,03828	68,755	10,57	3,70E-14	5,863E-08
0,0083	0,0387	69,547	10,759	3,70E-14	5,863E-08
0,0084	0,0384	69,034	10,977	3,70E-14	5,863E-08
0,0084	0,03867	69,513	10,893	3,70E-14	5,863E-08
0,0082	0,03962	71,123	10,203	3,70E-14	5,863E-08
0,0091	0,04003	72,123	11,747	3,70E-14	5,863E-08
0,0089	0,0401	72,176	11,285	3,70E-14	5,863E-08
0,0087	0,0398	71,584	11,021	3,70E-14	5,863E-08
0,0087	0,0397	71,406	11,051	3,70E-14	5,863E-08
0,0089	0,0403	72,532	11,224	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

Tabla 24. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 7.

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,01211	0,03684	67,2041	17,9616	3,70E-14	5,863E-08
0,01124	0,03632	66,0295	16,5163	3,70E-14	5,863E-08
0,008612	0,02872	51,6924	13,3892	3,70E-14	5,863E-08
0,01222	0,03777	68,9148	17,9336	3,70E-14	5,863E-08
0,01248	0,03886	70,9837	18,0772	3,70E-14	5,863E-08
0,01251	0,03792	69,2722	18,4138	3,70E-14	5,863E-08
0,0124	0,0375	68,4694	18,3407	3,70E-14	5,863E-08
0,0123	0,0379	69,1759	18,0393	3,70E-14	5,863E-08
0,0122	0,0377	68,7807	17,9185	3,70E-14	5,863E-08
0,0123	0,0374	68,2575	18,1897	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

Tabla 25. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 8.

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0182	0,0344	64,286	30,0472	3,70E-14	5,863E-08
0,0185	0,0348	65,199	30,4011	3,70E-14	5,863E-08
0,0182	0,0346	64,618	29,9038	3,70E-14	5,863E-08
0,0186	0,0350	65,624	30,6311	3,70E-14	5,863E-08
0,0188	0,0358	67,805	31,1871	3,70E-14	5,863E-08
0,0188	0,0352	65,991	31,0056	3,70E-14	5,863E-08
0,0181	0,0355	66,315	29,4666	3,70E-14	5,863E-08
0,0186	0,0355	66,453	30,4146	3,70E-14	5,863E-08
0,0181	0,0353	65,933	29,5223	3,70E-14	5,863E-08
0,0182	0,0354	66,151	29,6837	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

Tabla 26. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de la muestra 9.

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0240	0,0318	61,3454	42,4553	3,70E-14	5,863E-08
0,0248	0,0324	62,0533	43,4599	3,70E-14	5,863E-08
0,0246	0,0324	62,0186	43,0185	3,70E-14	5,863E-08
0,0246	0,0325	62,2044	43,0365	3,70E-14	5,863E-08
0,0249	0,0333	63,8185	43,2708	3,70E-14	5,863E-08
0,0244	0,0319	61,0764	428.406	3,70E-14	5,863E-08

Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
0,0247	0,0333	63,9687	43,0491	3,70E-14	5,863E-08
0,0250	0,0336	64,2057	43,1932	3,70E-14	5,863E-08
0,0246	0,0332	63,9664	43,0526	3,70E-14	5,863E-08
0,0251	0,0335	64,0475	43,435	3,70E-14	5,863E-08

Fuente: Los Autores.

En las tablas 27 y 28 se encuentran los resultados del análisis estadístico realizado a la muestra 6, 7, 8 y 9. El análisis se le hace a once valores medidos a diferentes tiempos de medida.

Tabla 27. Análisis estadístico de la permitividad parte real de las muestras 6, 7,8 y 9.

Muestras	Mo	Me	X	S ²	r
6	-	71,1239	70,7799	1,8255	1,3511
7	-	68,7807	67,2829	28,9541	5,3809
8	-	65,9912	66,1595	2,0346	1,4264
9	-	63,8104	62,9559	1,4658	1,2107

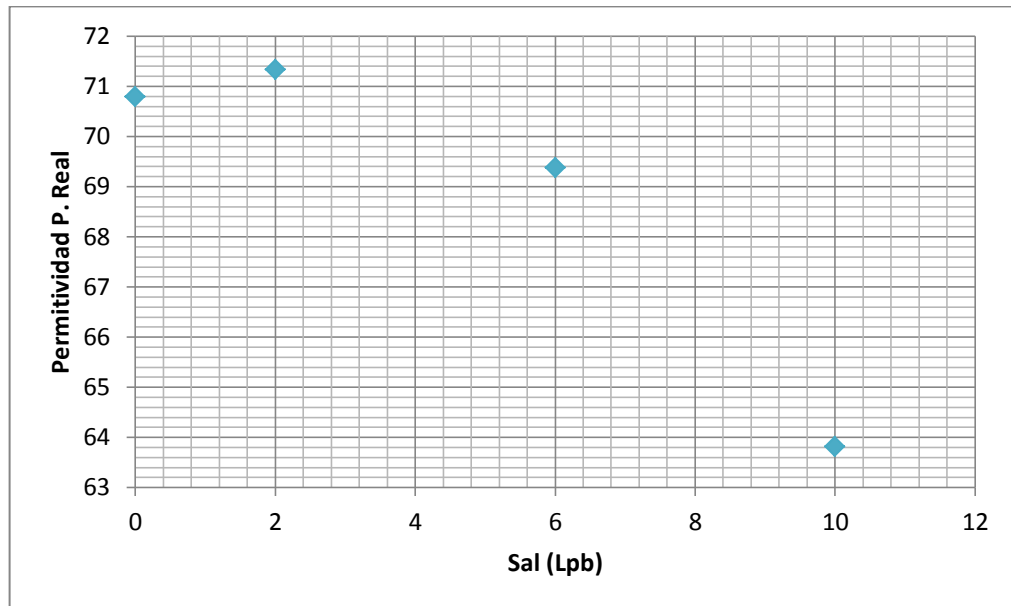
Fuente: Los Autores.

Tabla 28. Análisis estadístico de la permitividad parte imag de las muestras 6, 7,8 y 9.

Muestras	Mo	Me	X	S ²	r
6	-	11,0216	11,1273	0,4151	0,6443
7	-	18,0393	17,6019	2,2768	1,5089
8	-	30,0472	30,1005	0,5006	0,7075
9	-	43,0526	43,1195	0,0936	0,3060

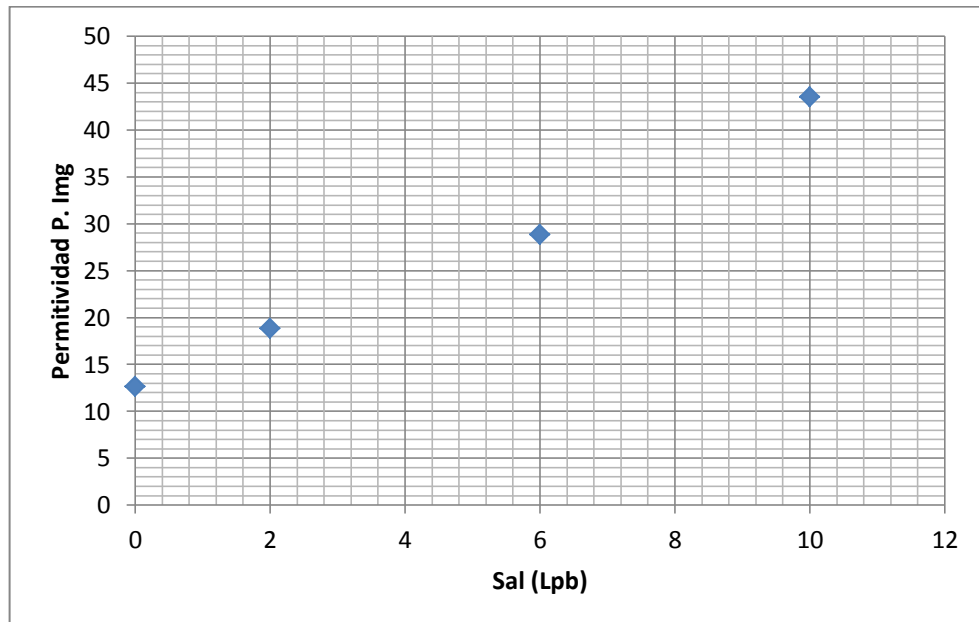
Fuente: Los Autores.

Gráfica 10. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 6, 7, 8 y 9 con la sal (cloruro de sodio) a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

Gráfica 11. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 6, 7, 8 y 9 con la sal (cloruro de sodio) a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

En la tabla 29 se encuentra un nuevo conjunto de muestras en donde la cantidad de bentonita sigue siendo constante, el nuevo aditivo presente en este lodo es el carbonato de calcio a diferentes concentraciones.

Tabla 29. Composición de las muestras 6, 10, 11 y 12.

Muestra	Bentonita [lpb]	Carbonatos de Calcio [lpb]
6	28	-
10	28	10
11	28	20
12	28	30

Fuente: Los Autores.

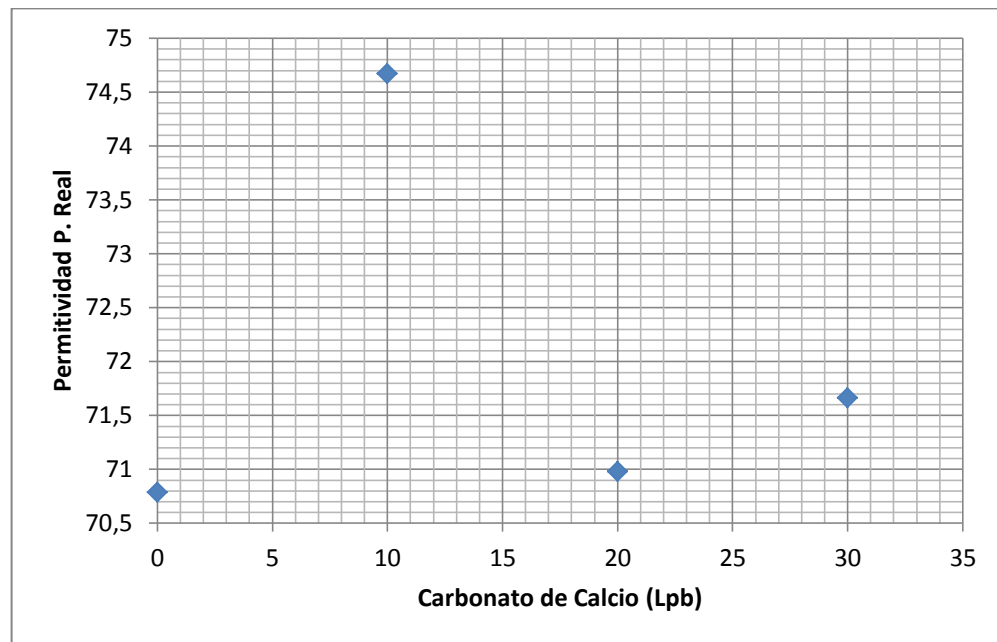
En la tabla 30 se evidencia el cambio que hay en las muestras a las que se les adiciona el carbonato de calcio a diferentes concentraciones con respecto a la muestra base, es posible concluir que a menor concentración de carbonato de calcio mayor es el valor de la permitividad compleja y a mayor concentración de carbonato de calcio se obtiene menores valores en la propiedad.

Tabla 30. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 6, 10, 11 y 12.

Muestra	Re [Y_{11}]	Im [Y_{11}]	Re [E_c]	Im [E_c]	C_0	G_0
6	0,009524	0,03922	70,7824	12,659	3,70E-14	5,863E-08
10	0,0105	0,04123	74,6684	13,794	3,70E-14	5,863E-08
11	0,009888	0,03927	70,9759	13,2919	3,70E-14	5,863E-08
12	0,00984	0,03966	71,6622	13,0884	3,70E-14	5,863E-08

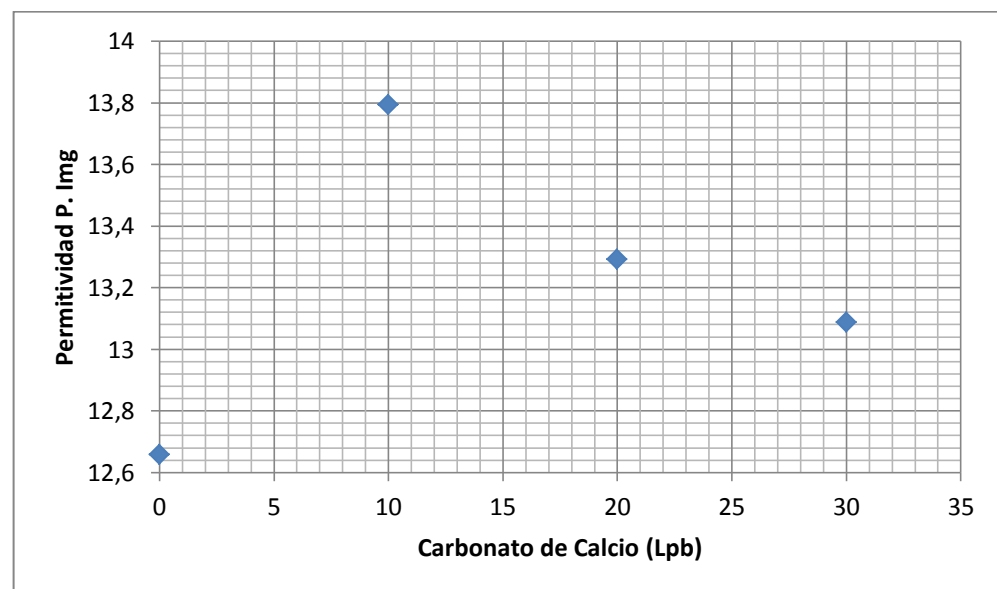
Fuente: Los Autores.

Gráfica 12. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 6, 10, 11 y 12 con el carbonato de calcio a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

Gráfica 13. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 6, 10, 11 y 12 con el carbonato de calcio a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

Finalmente el último aditivo en estudio es la arcilla (recortes de perforación). La tabla 31 muestra la concentración de éste aditivo y su variación de una muestra a otra. En la tabla 32 es posible comparar el valor de la permitividad de la muestra base con respecto a las muestras 13 y 14. La grafica 14 muestra el comportamiento descendente del valor de la permitividad en su parte real al aumentar las concentraciones de arcilla a diferencia de la parte imaginaria que al inicio posee un comportamiento ascendente y a partir de valores por encima de 10 Lpb el comportamiento es descendente.

Tabla 31. Composición de las muestras 6, 13 y 14.

Muestra	Bentonita [lpb]	Arcillas [lpb]
6	28	-
13	28	10
14	28	20

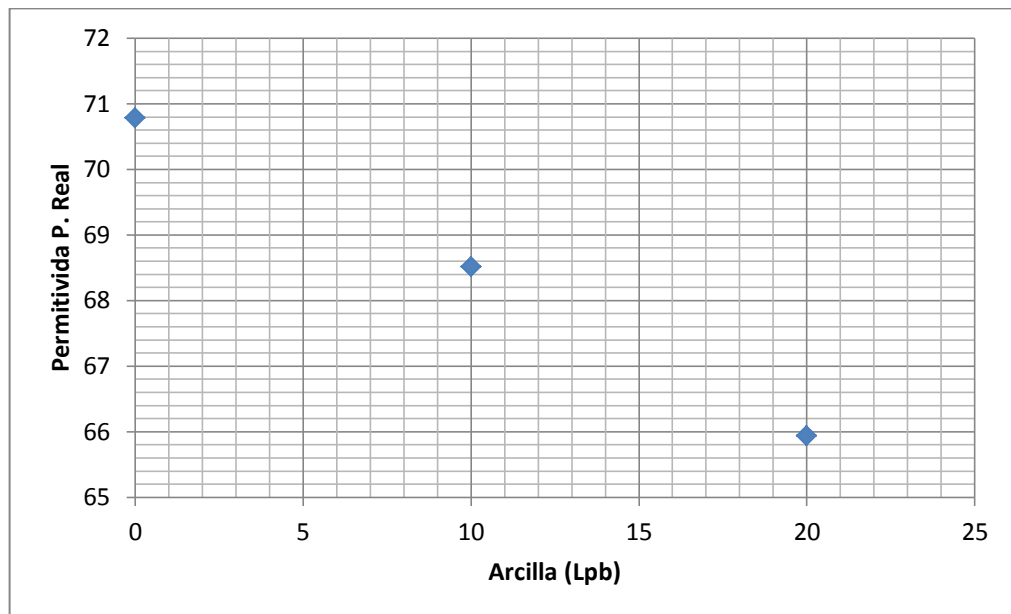
Fuente: Los Autores.

Tabla 32. Parámetros dieléctricos a 2,4 GHz de las muestras 6, 13 y 14.

Muestra	Re [Y ₁₁]	Im [Y ₁₁]	Re [E _c]	Im [E _c]	C ₀	G ₀
6	0,009524	0,03922	70,7824	12,659	3,70E-14	5,863E-08
13	0,009563	0,03794	68,5092	13,0637	3,70E-14	5,863E-08
14	0,008679	0,03663	65,9316	11,8296	3,70E-14	5,863E-08

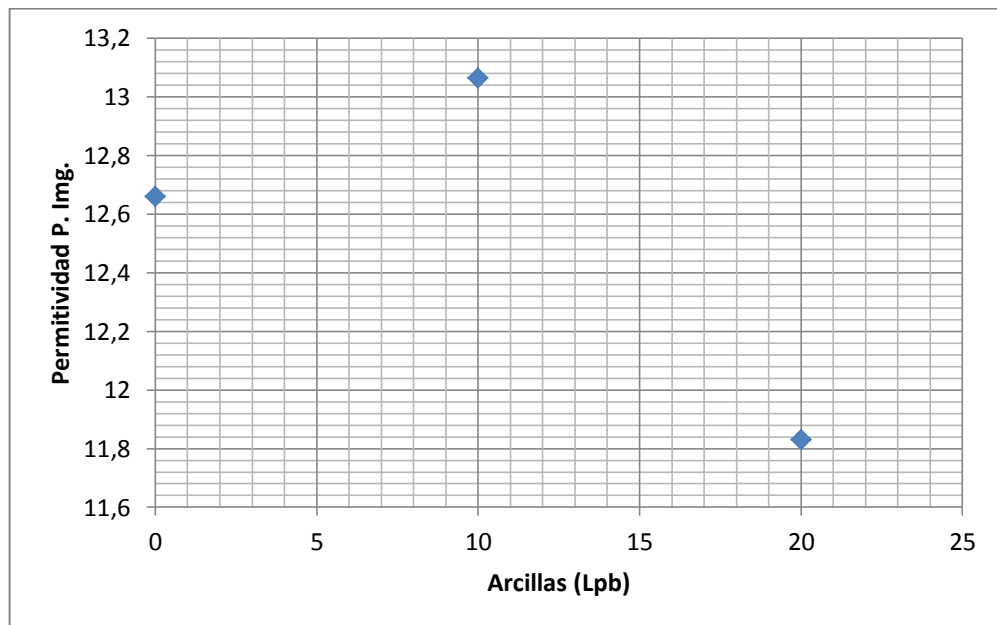
Fuente: Los Autores.

Gráfica 14. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ' de las muestras 6, 13 y 14 con las arcillas (recortes de perforación) a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

Gráfica 15. Variación de la permitividad dieléctrica ϵ'' de las muestras 6, 13 y 14 con las arcillas (recortes de perforación) a 2,4 GHz.



Fuente: Los Autores.

4. CONCLUSIONES

- Se desarrolló una revisión bibliográfica de las diferentes técnicas para medir experimentalmente la permitividad dieléctrica de los materiales, eligiendo la técnica más acorde a los requerimientos establecidos en el trabajo tales como, ser un método no destructivo, que cubriera altas frecuencias, medir materiales líquidos y que no requiriera una extenuante preparación de la muestra.
- Se construyó un prototipo de sonda coaxial abierta en un extremo con el fin de medir el coeficiente de reflexión de materiales dieléctricos a partir de un conector SMA, la conexión de la sonda se realizó a partir de un convertidor de cable coaxial tipo N a tipo SMA, para que la sonda pudiese ser acoplada al analizador de redes vectorial.
- Se elaboró un protocolo para la medición de la permitividad donde se expone la metodología para realizar la medición a partir de una sonda coaxial abierta en un extremo, en este se especifica el sistema de medida, la calibración de la configuración y la validación de la sonda a partir del agua destilada.
- Se midió el coeficiente de reflexión de diferentes muestras de lodos de perforación con diferentes composiciones de cloruro de sodio, barita, polímeros, recortes de perforación, bentonita y carbonatos de calcio; y a partir de este se calculó la permitividad del lodo de perforación determinando el comportamiento de los campos electromagnéticos por este medio.

- Se comprobó la validez de la media realizada con el prototipo de sonda construido por medio de un ajuste lineal realizado a los valores experimentalmente medidos, observándose claramente la cercanía del modelo analítico de Debye con respecto a los datos obtenidos.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio por separado de cada uno de los aspectos que intervienen en la calibración, teniendo en cuenta especialmente el proceso de De-embedding del aparato de medida, realizado a partir del simulador.
- Se recomienda efectuar un estudio detallado de los diferentes métodos para realizar la extensión de puerto en el analizador de redes con el que se cuenta en la universidad, debido a que este ofrece muchas alternativas para lograr este proceso.
- Elaborar un estudio de las causas del cambio en los valores de la permitividad dieléctrica compleja en los lodos de perforación base agua en base a los aditivos empleados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BUYUKOZTURK, Oral. YU, Tzu-Yang. ORTEGA, Jose Alberto. *A methodology for determining complex permittivity of construction materials based on transmission-only coherent, wide-bandwidth free-space measurements*, Paper Cement & Concrete Composites 28, pp. 349–359, 2006.
- [2] V. RAICU, T. SAIBARA, A. IRIMAJIRI, *Dielectric properties of rat liver in vivo: a noninvasive approach using an open-ended coaxial probe at audio/radio frequencies*, Paper Bio electrochemistry and Bioenergetics 47, pp. 325–332, 1998.
- [3] AL-HARAHSEH, Mohammad. KINGMAN, Sam. ABDURRAHMAN, Saeid. ROBINSON, John. DIMITRAKIS, Georgios. ALNAWAFLEH, Hani. *Dielectric properties of Jordanian oil shales*, Paper completo Processing Technology 90, pp. 1259–1264, 2009.
- [4] S. O. NELSON, *Dilectric properties measurement techniques and applications*, Trans. ASAE, vol. 42 (2), pp. 523-529, 1999.
- [5] AGILENT TECHNOLOGIES, Agilent Network Analyzer Basics.[En línea]. Available: <http://www.agilent.com/find/na>, 2004.
- [6] PATIÑO SUAREZ, Cesar Augusto. MOSSE, Laurent. CHAPARRO, Diana. MANTILLA, Jorge. MULETT, Felix. DECOSTER, Eric. MIKHALTSEVA, Irina. *Dielectric Logging Uncovers New Reserves in a Reactivated Colombian Field*, Society of Petrophysicists and Well Log Analysts.Colombia, 2012.

- [7] P. S. ADISOEMARTA y S.L. MORRISS, *Electrical Impedance Variation With Frequency in Shales and Shaly Sands*, Paper SPE 24675, 1992.
- [8] KNIGHT, ROSEMARY, and AMOS NUR, *The Effect of Level of Water Saturation on the Dielectric Constant of Sandstones*, SPWLA 25th Annual Logging Symposium, 1984.
- [9] KNIGHT R., y ABAD A., 1995. *Rock/water interaction in dielectric properties: Experiment with hydrophobic sandstones*. Geophysics 60(2):431-436. doi: 10.1190/1.1443780.
- [10] *Agilent Propertie of Materials*.Inc. 2005, 2006.Printed in USA, June 26, 2006.5989-2589EN.
- [11] GARCIA B, Beatriz. *Estudio y Optimización de Sensores de Microondas para la Caracterización y Monitorización de Materiales en Procesos Industriales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España, Departamento de comunicaciones U.P.V.pp 22-31.
- [12] WAYNE Tomassi. *Sistemas de Comunicaciones* Cap 9, Pag 347.
- [13] JERRY D, Wilson, ANTHONY J Buffa, *Física* 5 ed, 2003.
- [14] ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, Inc.,United States of America, 1993, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*.
- [15] A. P. GREGORY, R. N. CLARKE, *Dielectric metrology with coaxial sensors*, Measurement Science & Technology 18 (2007) 1372.

- [16] DEVENDRA MISRA, MOHINDER CHABBRA, BENJAMIN R. EPSTEIN, MARK MIROTZNIK AND KENNETH R. FOSTER, *Noninvasive Electrical Characterization of Materials at Microwave Frequencies Using an Open-Ended Coaxial Line: Test of an Improved Calibration Technique*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 38, NO. 1. Enero1990.
- [17] G. P. Otto and W. C. Chew, *Improved Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for Dielectric Measurements*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, NO. 4, Agosto 1991.
- [18] GANCHEV StoyanI., QADDOUMI Nasser, BAKHTIARI Sasan and ZOUGHI Reza, *Calibration and Measurement of Dielectric Properties of Finite Thickness Composite Sheets with Open-Ended Coaxial Sensors*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 44, NO. 6, Diciembre 1995.
- [19] BRINGHURST Shane, ISKANDER Magdy F., and WHITE Mikel J., *Thin-Sample Measurements and Error Analysis of High-Temperature Coaxial Dielectric Probes*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 45, No. 12, Diciembre 1997.
- [20] T.P. MARSLAND, S. EVANS, *Dielectric measurements with an open-ended coaxial probe*, Desarrollado en *IEEE* , Vol. 134, Pt. H, No. 4, Agosto 1987.
- [21] Z. Abbas, Y. K. Yeow, A. H. Shaari, K. Khalid, J. Hassan, and E. Saion, *Complex permittivity and moisture measurements of oil palm fruits using an open-ended coaxial sensor*, *Sensors Journal, IEEE*, vol. 5, pp. 1281-1287, 2005.
- [22] SEEWATTANAPON Somporn, AKKARAEKTHALIN Prayoot, *A Broadband Complex Permittivity Probe Using Stepped Coaxial Line*, Disponible [En línea]:

(<http://www.SciRP.org/journal/jemaa>), *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, pp. 312-318, 2011.

[23] D. V. Blackham and R. D. Pollard, *An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe*, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1093-1099, 1997.

[24] NELSON Stuart O., *Fundamentals of Dielectric Properties Measurements and Agricultural Applications*, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 44 (2), pp. 98-113, 2010.

[25] A. D. Haigh, F. Thompson, A. A. P. Gibson, G. M. Campbell, and C. Fang, *Complex Permittivity of Liquid and Granular Materials Using Waveguide Cells*, *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 2, pp. 425-434, 2001.

[26] F. J. Tischer, *Measurement of the wave propagation properties of plasma in the microwave region*, *IRE Trans. In strum*, vol. 2, pp. 167-171, 1960.

[27] J. Musil, and Zacek, F., *Microwave measurements of complex permittivity by free space methods and their applications: Elsevier*, Oxford, 1986.

[28] H. S. Chua, A. D. Haigh, F. Thompson, and A. A. P. Gibson, *Measurement of the wet-mass, moisture content, volume and density of single wheat grain kernels*, *Science, Measurement and Technology, Procede IEEE*, vol. 151, pp. 384-388, 2004.

[29] A. W. Kraszewski and S. O. Nelson, *Observations on resonant cavity perturbation by dielectric objects*, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 40, pp. 151-155, 1992.

- [30] A. W. Kraszewski and S. O. Nelson, *Resonant-cavity perturbation measurement for mass determination of the perturbing object*, presentado en Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994. IMTC/94. Conference Proceedings. 10th Anniversary. Advanced Technologies in I & M., 1994 *IEEE*, 1994.
- [31] G. Birnbaum and J. Franeau, *Measurement of the Dielectric Constant and Loss of Solids and Liquids by a Cavity Perturbation Method*, *Journal of Applied Physics*, vol. 20, pp. 817-818, 1949.
- [32] Malo I., Gallego J. D., Diez M., López I., García R., *Medida de la Permitividad a temperaturas criogénica y ambiente con el método de Perturbación de Cavidad*, Fecha de impresión 29 de Julio 2010.
- [33] A. W. Kraszewski, S. Trabelsi y S. O. Nelson, *Grain permittivity measurements in free space*, presentado en: European Microwave Conference, 1995. 25th, 1995.
- [34] T. W. ATHEY y M. A. STUCHLY, Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line, (Part 1 y 2) *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-30, January 1982, pp. 82-92.
- [35] FILALI Bilal, BOONE François, *Member, IEEE*, RHAZI. Jamal, y BALLIVY Gérard, Design and Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for the Measurement of the Dielectric Properties of Concrete, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol. 56, NO. 10, Octubre 2008.
- [36] V. RAICU, T. SAIBARA, A. IRIMAJIRI, Dielectric properties of rat liver in vivo: a noninvasive approach using an open-ended coaxial probe at audio/radio frequencies, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 47 (325–332), 1998.

[37] K. NOVOTNY, (2001). Theory of Electromagnetic Field II: Field and Waves, Press CTU in Prague.

[38] OPPL Ladislav, *Measurement of Dielectric Properties*. Dissertation Thesis, CTU in Prague, Dept. of EM field, 2001. (In Czech).

[39] ZAJÍCEK, Radim. VRBA, Jan. Broadband Complex Permittivity Determination for Biomedical Applications. 2010. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/advancedmicrowavemicrocircuitsandsystems/broadband-complex-permittivity-determination-for-biomedical-applications>.

[40] JOURNAL OF ELECTROMAGNETIC ANALYSIS AND APPLICATIONS. A Broadband Complex Permittivity Probe Using Stepped Coaxial Line, [En línea]. Disponible: <http://www.SciRP.org/journal/jemaa>, 2011, pp. 312-318.

[41] SERRADILLA ARELLANO, Carlos. Mejora de la Técnica de Medida por Sonda Coaxial: Medida de la Permitividad de las Evaporitas en el Marco de las Misiones de Exploración de Marte, Universidad de Sevilla, España, Enero 2007.

[42] Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers, *Agilent Application Note 1369-1*.

[43] L.F. CHEN, C.K. ONG, C.P. NEO, V.V. VARADAN, V.K. VARADAN, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. John Wiley & Sons, Ltd (2004).

[44] LIU L., X. et al. (1986). Improvement in Dielectric Measurement Technique of Open-ended Coaxial Line Resonator Method. *Electronics Letters*, Vol. 22, No. 7, pp. 373-375.

[45] G. B. Gajda and S. S. Stuchly, Numerical Analysis of Open-Ended Coaxial Lines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-31, No. 5, May 1983, pp. 380-384.

[46] U. Kaatze, Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature, *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 34, No. 4, 1989, pp. 371-374.