

”Medición de Constante Dieléctrica con Sonda”

Gómez, Nicolás Martín

Laborde, Santiago Agustín

Porres, Augusto

Sucunza, Lucía

Medidas Electrónicas 2, UTN - FRBA

Diciembre 2020

Índice

1. INTRODUCCIÓN	2
2. DESARROLLO DEL TRABAJO	2
2.1. Descripción	2
2.2. Construcción de la sonda	2
2.3. Principio de funcionamiento	4
2.4. Análisis teórico	5
2.5. Modelo matemático	6
2.6. Simulaciones	7
2.6.1. Sonda	7
2.6.2. Calibración	8
2.6.3. Sonda + Material	11
2.6.4. Sonda + Material base + Material interpuesto	11
3. RESULTADOS	12
4. DISCUSIÓN	15
5. CONCLUSIONES	16
BIBLIOGRAFÍA	16

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de este informe se podrá abordar todo el trabajo realizado durante el particular año 2020. El proyecto asignado fue una mejora del proyecto "Medición de Materiales Dieléctricos con Sonda". La propuesta fue heredar la aplicación ya desarrollada por un grupo de estudiantes que cursó la materia durante el 2019. Dada las limitaciones impuestas por la pandemia ciertos recursos se pudieron aprovechar mientras que otros quedaron totalmente inutilizables.

Como objetivo del proyecto, en un principio, se propuso responder a las propuestas planteadas por el grupo anterior como aspectos a mejorar. Estos eran lograr un ambiente de medición controlado, un método sistemático de medición, aumentar la cota superior en el rango de medición y ampliar la gama de mediciones patrón en la base de datos.

El año trajo sus inconvenientes, mientras los meses de cuarentena se comenzaron a extender cada vez mas y mas, el proyecto tuvo que ser replanificado constantemente. Terminando por descartar la idea de en algún momento hacer uso de la sonda física y el VNA de la facultad.

A su vez, no solo la manera de trabajar tuvo que ser reconsiderada, sino que además el cuerpo docente agregó nuevos objetivos. Dentro de estos la medición y caracterización de materiales cuando a estos se le interponen otros materiales distintos.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1. Descripción

El proyecto se separa en dos grandes bloques. Por un lado, la obtención de los parámetros de reflexión del material dieléctrico a medir. Y por el otro, la interpretación de estos parámetros obtenidos.

La primer distinción que se debe realizar, frente al proyecto elaborado en 2019, yace en el bloque de medición del material. Mientras que el grupo anterior lograba este cometido mediante un VNA midiendo a un puerto a través de una sonda coaxial física este año, dada la situación de confinamiento, se planteó la medición mediante la simulación de la sonda coaxial.

Para llevar a cabo la simulación, se buscó recrear la sonda del 2019 en el simulador CST. Debido a que el material obtenido de dicho proyecto solo incluía fotos y descripciones generales en relación a las características constructivas del dispositivo, se buscaron diferentes variantes para los componentes que lo integran.

El bloque de interpretación de las mediciones se lleva a cabo mediante el uso del sistema de cómputo MATLAB. Se caracterizan los resultados a través, a grandes rasgos, de una ecuación diferencial a resolver. Las soluciones a esta ecuación serán los posibles valores de constante dieléctrica del material bajo análisis.

2.2. Construcción de la sonda

Cable coaxil

El mismo fue modelizado en función del modelo RG402 comercializado por HUBER + SUHNER.

Sus características más relevantes son:

- Conductor interno de acero. Diametro: 0.92mm
- Conductor externo de aluminio. Diametro: 3.58mm
- Dielectrico de PTFE. Diametro: 2.99mm
- $Z_0 = 50 \Omega$
- $F_{max} = 33\text{GHz}$



Conector SMA

Se modelizó en base al producto de catálogo comercializado por el mismo vendedor (compatible con el cable antes mencionado). Se enuncian también las características más importantes:

- Conductor interno y externo de cobre.
- Dielectrico de PTFE.
- $Z_0 = 50 \Omega$
- $F_{max} = 18\text{GHz}$



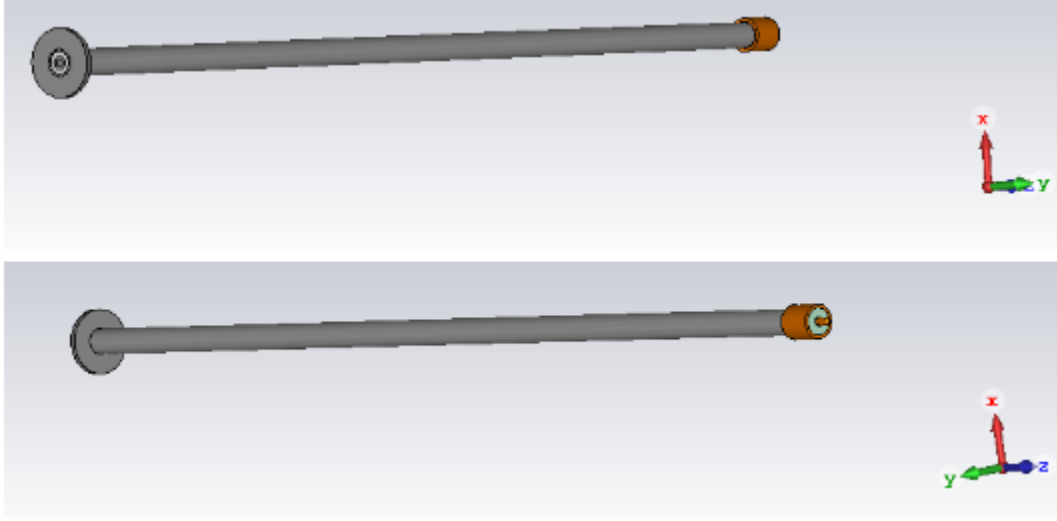
Arandela

Se eligió una arandela DIN9021 – M3 que cumple con las especificaciones de la norma ISO7093. El diámetro interno tuvo que modificarse en función de las características del cable coaxial:

- D1(interno) de 3.58mm.

- D2(externo) de 9mm.

Sonda Completa



2.3. Principio de funcionamiento

Al entrar en contacto la sonda con el material a medir, el sistema completo forma un circuito equivalente como el siguiente:

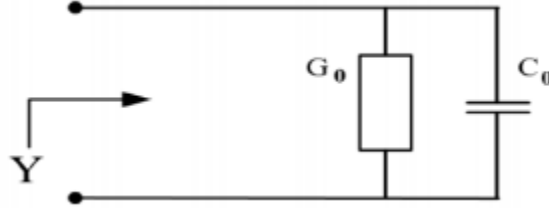


Figura 1: Circuito equivalente de la sonda en contacto con el material bajo ensayo

$$Y = j\omega\epsilon_0 C_0 + \epsilon_0^{5/2} G_0$$

Donde C_0 está compuesta por dos capacidades, siendo una de esas la capacidad marginal en el dieléctrico del conector y la otra la capacidad debido al campo de dispersión que aparece producto del material bajo ensayo. G_0 por otro lado es el coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas por radiación en la sonda. Y por otra parte es la admitancia medida de la sonda, la cual está relacionada con el coeficiente de reflexión S_{11} .

$$Y = \left(\frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \right) \frac{1}{Z_0}$$

La capacidad y la conductancia son dependientes de la permitividad del medio, la frecuencia y de las dimensiones de la sonda. Por otro lado la sonda también puede ser considerada como una antena con una admitancia de entrada:

$$Y = G_o(e_o, w) + jwC_o(e_o, w)$$

Donde C_o y G_o son constantes si la antena irradia en el espacio libre. Si se cambia el espacio libre que rodea la sonda por un medio con pérdidas, la dependencia de la admitancia de la antena respecto de las propiedades del medio pueden ser descritas mediante el teorema de Deschamps.

$$Y(e_c, w) = \sqrt{e_c} Y_o(1, w\sqrt{e_c})$$

Esto significa que la admitancia de un medio de permitividad e_c a una frecuencia angular w es la misma que la admitancia medida en el espacio libre a una frecuencia mayor (raíz de la permitividad, en veces) y multiplicada por dicha constante. Partiendo de las expresiones de la conductancia y capacidad en función de las dimensiones de la sonda, y expandiendo la función de Bessel en ella a una serie de MacLaurin, despejando y luego aplicando el teorema de Deschamps, se llega a la ecuación final:

$$Y = jwe_c C_o + e_c^{5/2} G_o$$

Donde Y es la admitancia medida de la sonda, C_o y G_o son constantes dadas por el circuito equivalente de la sonda en el espacio abierto. El circuito equivalente del capacitor por campo marginal es útil para bajas frecuencias mientras que el circuito que consiste en el capacitor mencionado y la conductancia de radiación es útil en altas frecuencias, a partir de 1GHz.

Sin embargo, tal como se lo presenta, el método pierde precisión en la medición de materiales a frecuencias superiores los 3GHz, por tal motivo se opta por utilizar cuatro patrones conocidos en la calibración, de forma tal de que los errores de mayor influencia sean contemplados en el modelo matemático y, posteriormente, disminuidos.

2.4. Análisis teórico

El método implementado para la medición, parte del mismo circuito equivalente presentado en la *sección 2.3*.

Como también se mencionó anteriormente, al independizarse de los errores no requiere métodos complementarios de corrección.

Se propone la calibración de la sonda mediante el uso de cuatro patrones: agua, alcohol isopropílico, open y short. En la expresión final de la impedancia del sistema, los errores quedan en función de los coeficientes de reflexión de los mismos.

La permitividades complejas del agua y el alcohol isopropílico deben ser conocidas perfectamente. Para realizar dicha caracterización se optó por recurrir al modelo de Debye, el cual constituye una herramienta para poder conocer el comportamiento de estos materiales en función de la frecuencia.

A continuación se presentan las curvas correspondientes a la permitividad compleja del agua y el alcohol isopropílico, respectivamente.

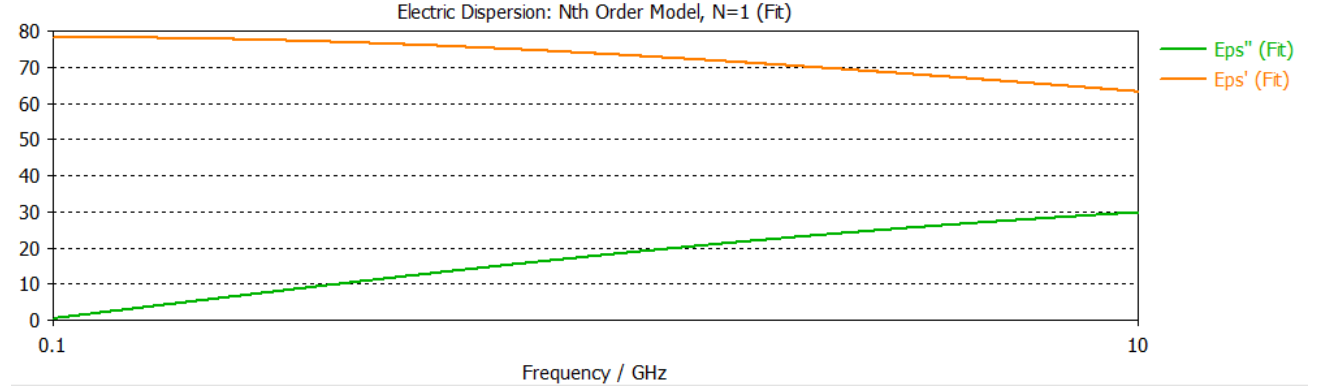


Figura 2: Permitividad compleja del agua (modelo de Debye)

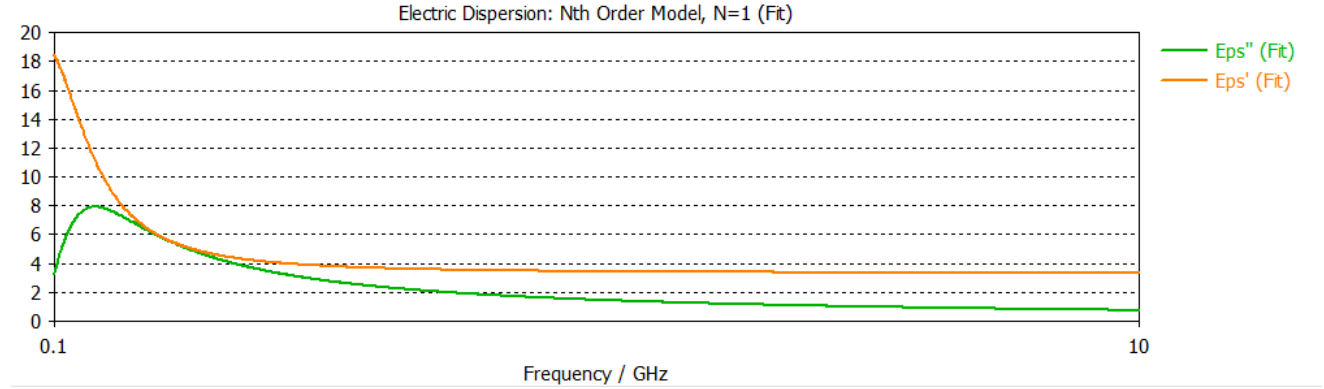


Figura 3: Permitividad compleja del alcohol (modelo de Debye)

2.5. Modelo matemático

A continuación, se presenta la ecuación matemática que permite obtener la permitividad compleja del material bajo análisis a partir de los coeficientes de reflexión obtenidos de la calibración y las permitividades complejas del agua y el alcohol:

$$E_m + G_n E_m^{5/2} + (e_{r\text{agua}} + G_n e_{r\text{agua}}^{5/2})X + (1 + G_n)Z = 0$$

Donde:

$$X = \frac{(\Gamma_{\text{medido}} - \Gamma_{\text{open}}) * (\Gamma_{\text{short}} - \Gamma_{\text{agua}})}{(\Gamma_{\text{medido}} - \Gamma_{\text{short}}) * (\Gamma_{\text{agua}} - \Gamma_{\text{open}})}$$

$$Z = \frac{(\Gamma_{\text{medido}} - \Gamma_{\text{agua}}) * (\Gamma_{\text{open}} - \Gamma_{\text{short}})}{(\Gamma_{\text{medido}} - \Gamma_{\text{short}}) * (\Gamma_{\text{agua}} - \Gamma_{\text{open}})}$$

Y G_n se obtiene a partir del proceso de calibración.

Los fundamentos matemáticos que permiten obtener este conjunto de ecuaciones, se encuentran descriptos en el informe *Medición de permitividad dieléctrica en líquidos con parámetros S*, Ing. Ariel Das, Ing. Deborah Higa, Ing. Luciano Cismondi, Pablo Grass, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Electrónica, 2015

2.6. Simulaciones

2.6.1. Sonda

A continuación se muestran los resultados observados al colocar monitores de la propagación en modo TEM del campo eléctrico a las frecuencias de 10 GHz, 15 GHz, 18 GHz y 20 GHz.

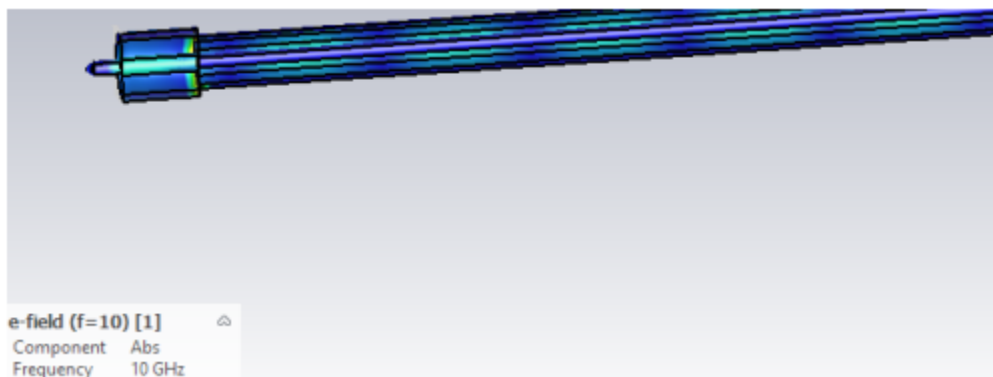


Figura 4: Propagación a 10GHz

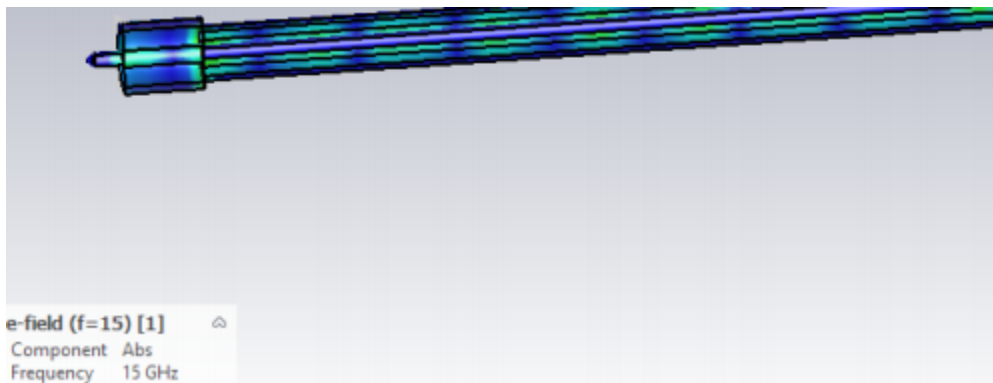


Figura 5: Propagación a 15GHz

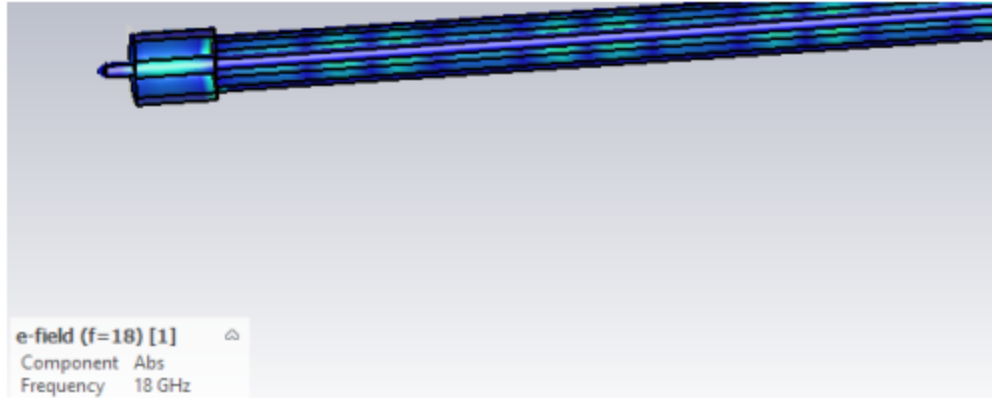


Figura 6: Propagación a 18GHz

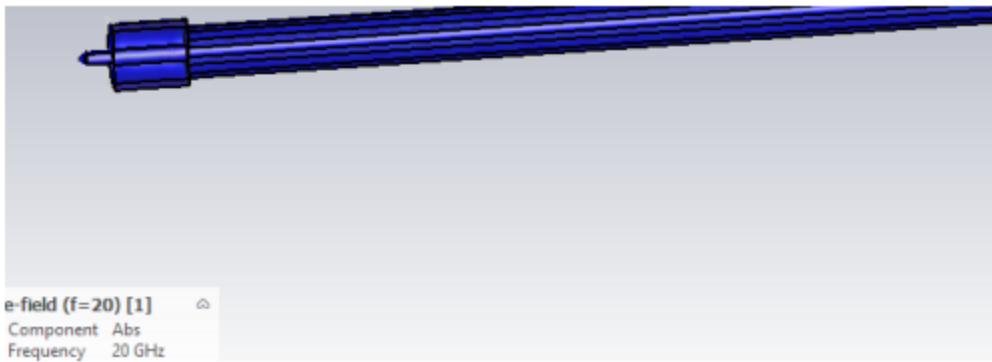


Figura 7: Propagación a 20GHz

Se puede observar, que a partir de los 18GHz la sonda comienza a dejar de propagarse desde el puerto 1 hacia el 2. Esto se debe a que la frecuencia de corte del conector SMA es de 18GHz. Por lo tanto este será el factor limitante a la hora de realizar mediciones en frecuencia

2.6.2. Calibración

En un principio, se comenzó con materiales en estado liquido y para poder llevar a cabo las mediciones se creó, en CST, un recipiente capaz de contener a los mismos. Este se diseñó con una forma cilíndrica de base circular y en su parte superior abierta, quedando la sustancia en contacto con el exterior. Sobre la superficie expuesta se apoyaba la arandela de la sonda mientras que sobre el extremo opuesto de la sonda se colocaba el puerto donde se inyectaría la señal.

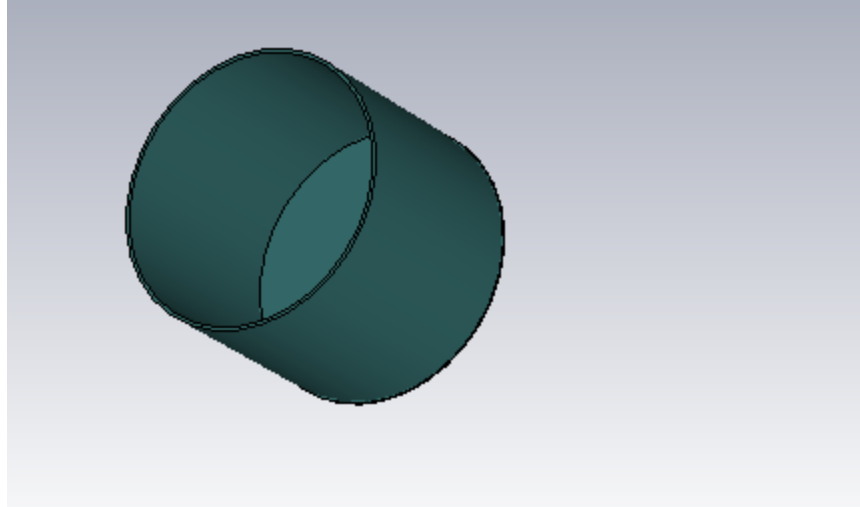


Figura 8: Recipiente de vidrio utilizado para contener muestras líquidas

Se presentan a continuación, las simulaciones realizadas para la obtención de los parámetros S utilizados para la calibración en MATLAB.

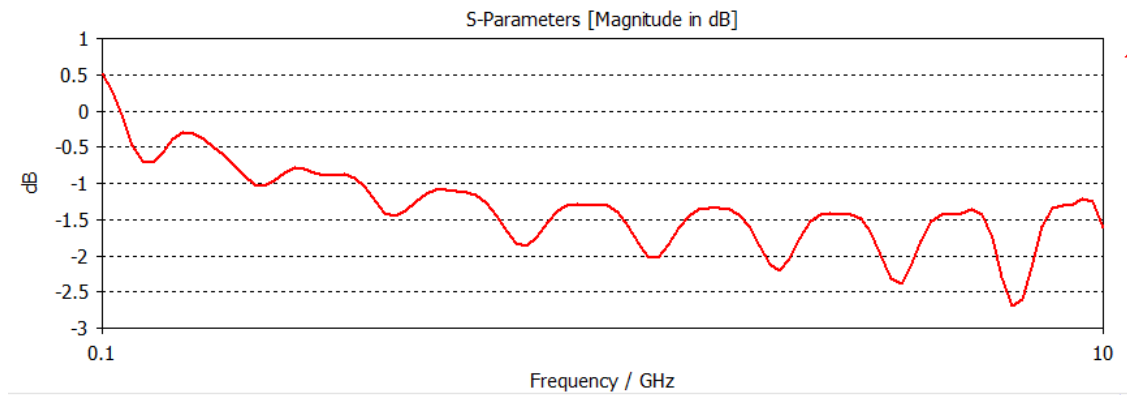


Figura 9: Medición de agua

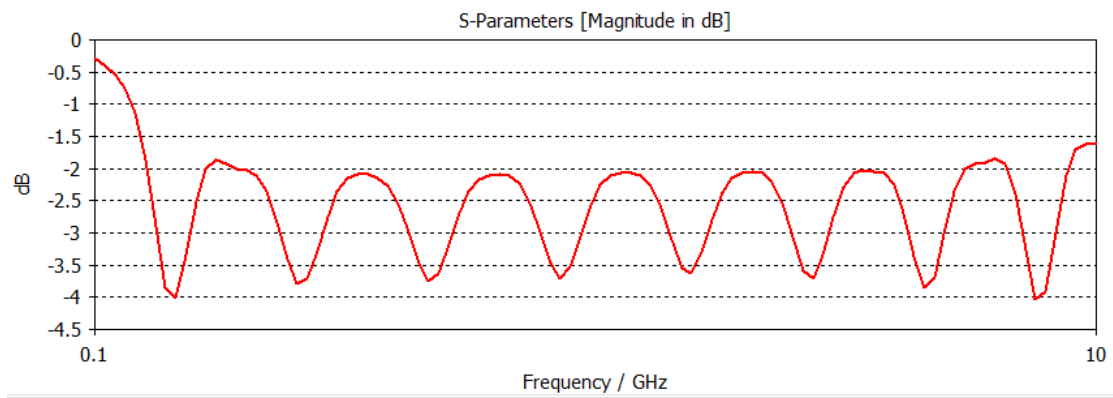


Figura 10: Medición de alcohol

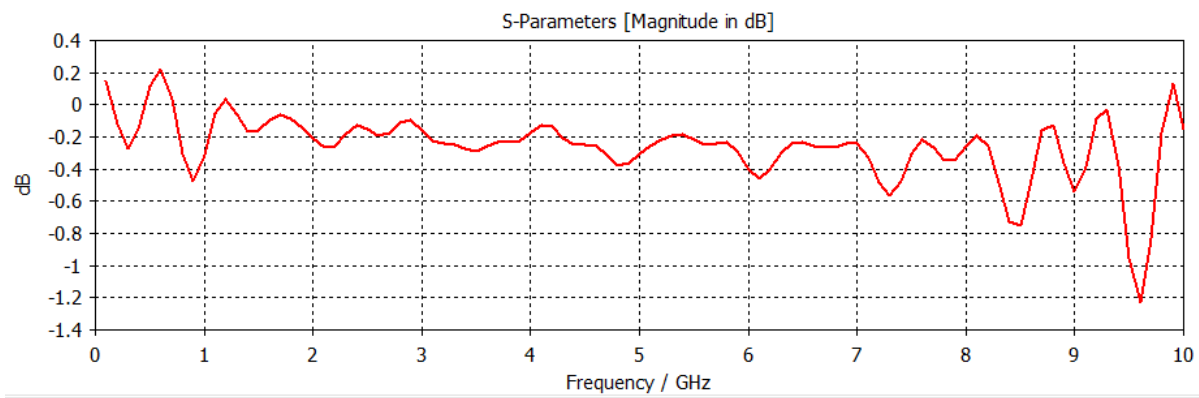


Figura 11: Medición de open

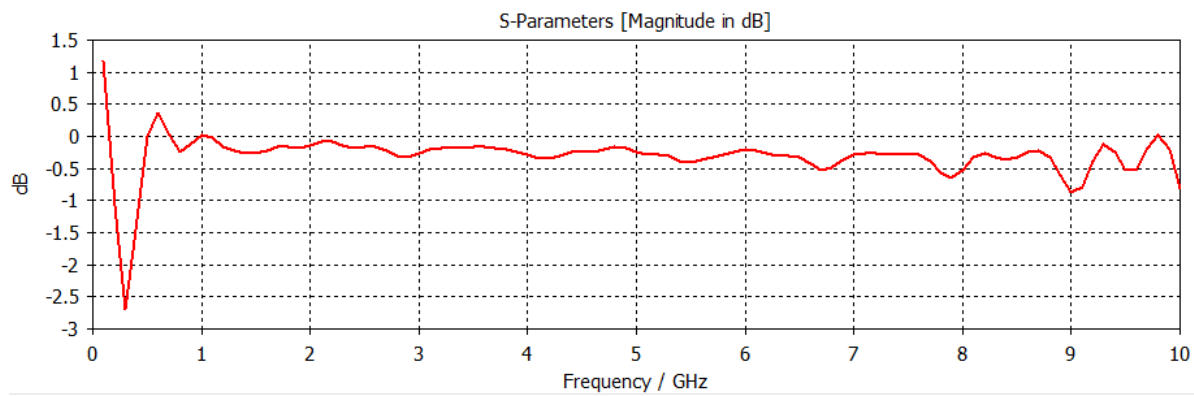


Figura 12: Medición de short

2.6.3. Sonda + Material

Posteriormente, se procedió a la caracterización en CST de un material a medir con la sonda ya calibrada. Para tales fines, se accedió a una base de datos online que posee información de las características eléctricas de diferentes materiales, en un amplio rango de frecuencias. Dicha información se obtuvo a partir de una serie de mediciones realizadas sobre elementos y tejidos orgánicos reales (Fuente: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>).

Del repositorio mencionado se extrajo la información correspondiente al comportamiento del tejido muscular (material a medir elegido) para el rango de frecuencias de interés. A continuación se presenta el modelo de CST resultante.

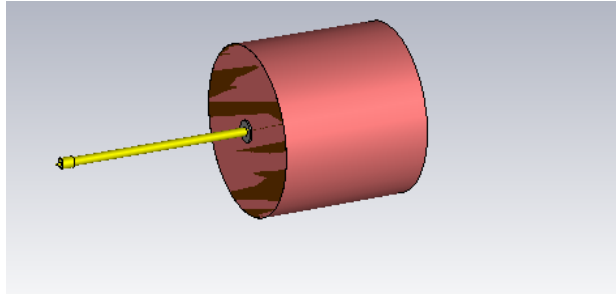


Figura 13: Medición de tejido muscular

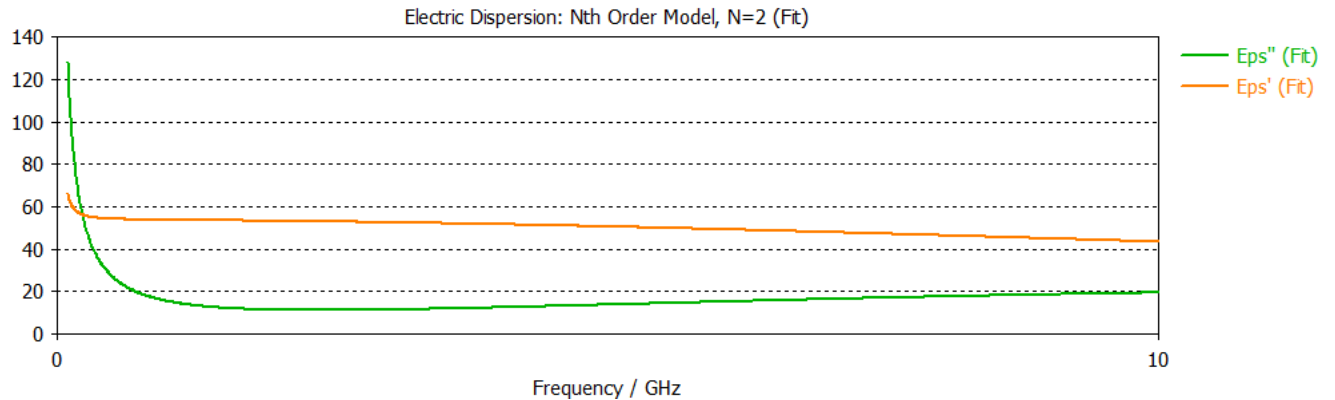


Figura 14: Permitividad dieléctrica compleja del tejido muscular

2.6.4. Sonda + Material base + Material interpuesto

Al agregar materiales interpuestos, estos serán los que quedarán en contacto con la arandela de la sonda, modificando en función del espesor de dichos materiales la curva de permitividad compleja medida.

Para poder caracterizar dicho comportamiento, se tomó el modelo de aceite de CST para interponerlo entre la sonda y el tejido muscular, como se observa a continuación.

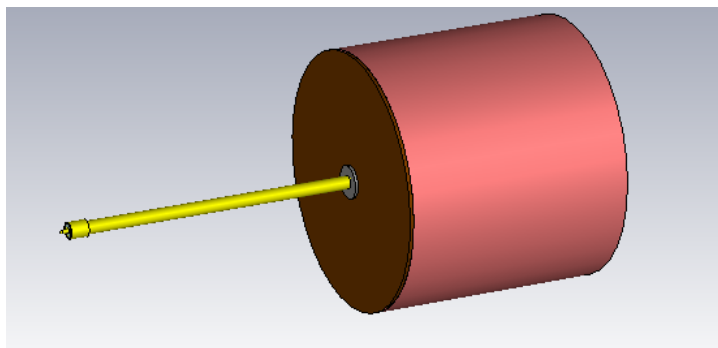


Figura 15: Medición de tejido muscular + aceite (1mm de espesor)

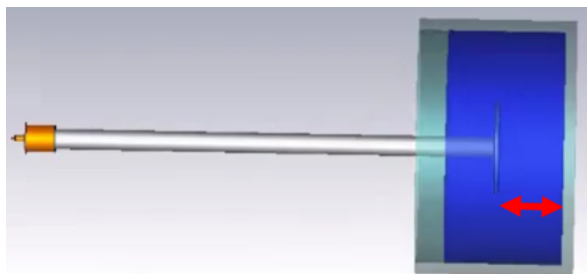
3. RESULTADOS

En esta sección se podrán visualizar los resultados obtenidos al efectuar las mediciones de materiales dieléctricos con la sonda desarrollada en el simulador.

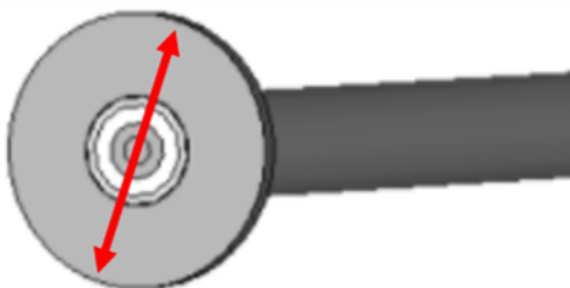
Para conseguir los parámetros constructivos óptimos del sistema se hicieron simulaciones barriendo tres dimensiones (profundidad de la sonda, diámetro de la arandela, diámetro del recipiente) y comparando los resultados mediante un script desarrollado en MATLAB, el cual calcula el desvío punto a punto en función de la frecuencia de medición.

Los resultados se observan a continuación:

- Profundidad de la sonda entre 1mm y 10mm



- Diámetro de la arandela entre 5mm y 10mm



- Diámetro del recipiente entre 25mm y 35mm

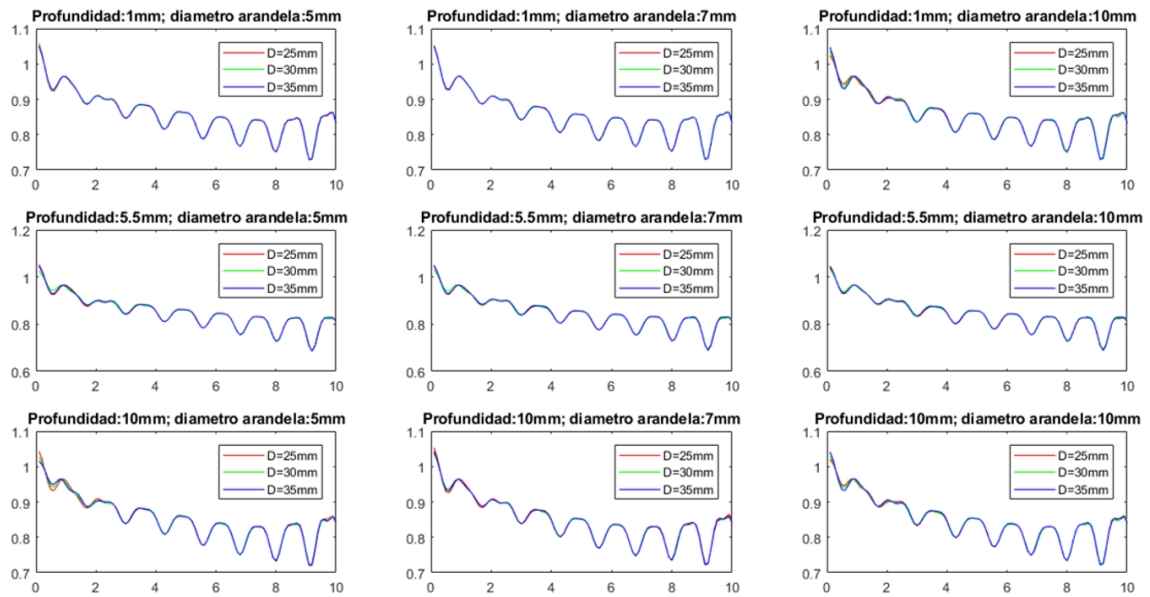
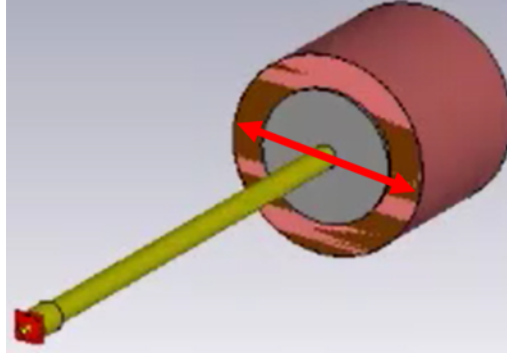


Figura 16: Resultados obtenidos a partir de la optimización

Se encuentra que la modificación de estas tres dimensiones en los rangos de barrido planteados, a priori, no conlleva a grandes variaciones en el parámetro S11 obtenido. Sin embargo, cuando al ancho del recipiente contenedor de la muestra se lo lleva mas allá de este rango se observa una mejora en todo el rango de medición.

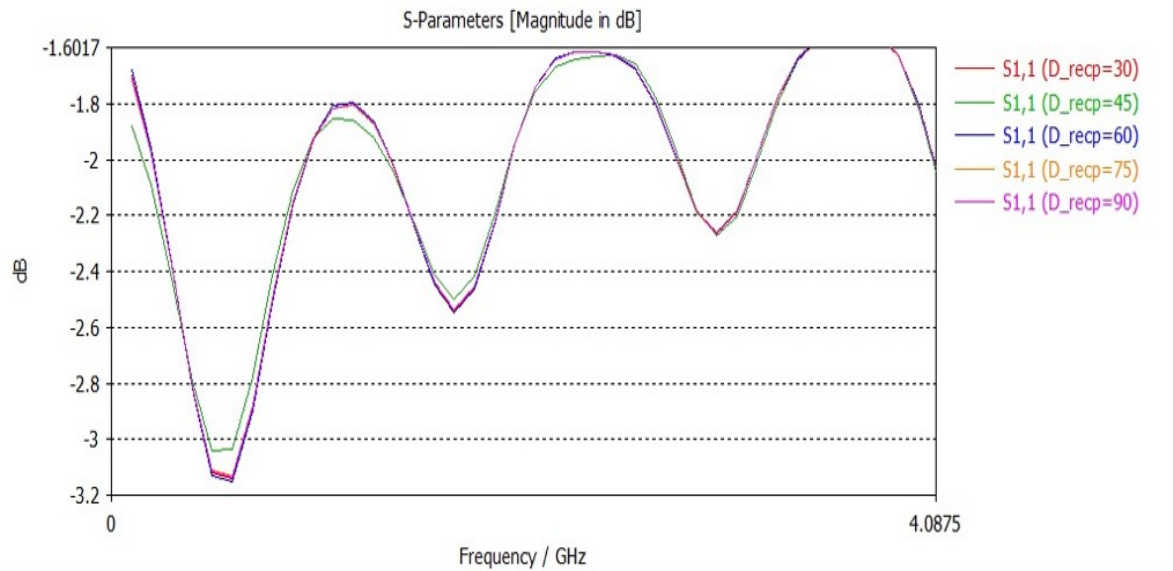


Figura 17: Optimización: diámetro del recipiente contenedor

Habiendo tomado 70mm como diámetro de recipiente, dado que implica una buena relación entre la cantidad de celdas de la simulación y el resultado, se procedió a interponer materiales entre las mediciones. Durante este proceso se encontró que una cuarta dimensión influía en los resultados. Esta era la profundidad del recipiente contenedor y la relación de espesores del material base y el material interpuesto. Comenzando por 10mm como base y 3mm como interpuesto, se concluyó que el espesor del primero debía ser mas grueso mientras que del segundo mas fino. Luego de varias simulaciones, a prueba y error, se llegó a concluir que para obtener un resultado adecuado bastaba con 25mm como base y 0.2mm como interpuesto.

A continuación la curva de la constante dieléctrica obtenida de la medición de músculo como material base y aceite como material interpuesto, al cual se lo hace variar entre 0.04mm y 0.2mm.

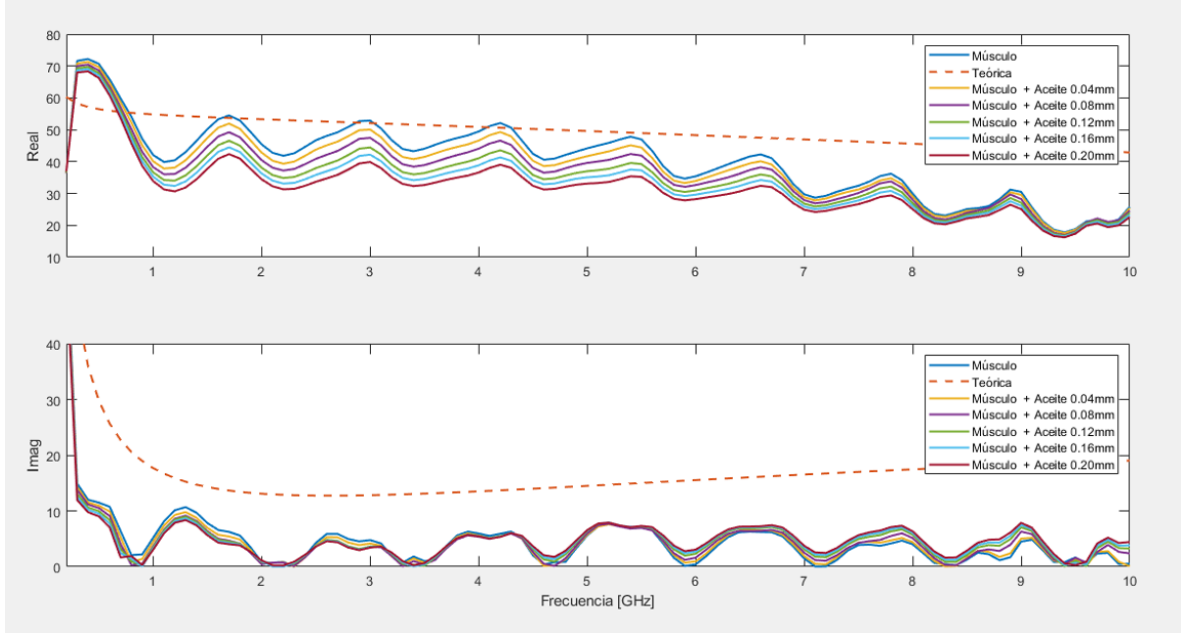


Figura 18: Medición con barrido paramétrico del espesor del material interpuesto

Observándose que la curva que más se aproxima a la teórica es la del músculo sin aceite interpuesto, y a medida de que a este último se le aumenta su espesor aleja mas los resultados.

4. DISCUSIÓN

El presente trabajo permite validar que la medición, aun implementando el método de calibración incorporado presenta errores sistemáticos que deben ser corregidos para lograr una medición aceptable. Las dimensiones y material del recipiente que contendrá el material a medir y la profundidad de inmersión de la sonda se transforman en variables que deben ser controladas precisamente para lograr una buena medición.

Además, se observa que no todos los materiales logran ser caracterizados con la misma precisión y, por otro lado, si se requiere ampliar el rango de frecuencias de medición, se debe optar por implementar métodos complementarios de corrección / calibración, ya que a partir de los 5GHz/6Ghz, los errores sistemáticos adquieren mayor relevancia.

La investigación realizada, también demuestra que las mediciones pueden verse seriamente alteradas por la presencia de materiales interpuestos, aún siendo los mismos de poco espesor. Este factor puede ser más o menos relevante dependiendo del material intercalado.

5. CONCLUSIONES

El método implementado logra caracterizar con cierto grado de precisión el comportamiento del material bajo análisis en un amplio rango de frecuencias. Sin embargo, para extender el rango de medición, es necesario desarrollar técnicas complementarias / implementar otra metodología.

En el caso de efectuarse una medición con materiales interpuestos con espesores que pueden estar en el orden de las decenas de micrómetros, la medición se ve afectada considerablemente. Este grado de afectación puede ser mayor o menor en función del par de materiales escogido.

El material del recipiente contenedor debe ser seleccionado cuidadosamente, de forma tal de evitar reflexiones que puedan afectar la medición. Además, si dicho recipiente no posee un diámetro / ancho adecuado, la medición del parámetro S11 varía considerablemente. Para nuestro caso, fue necesario utilizar recipientes de un ancho mayor a los 60mm.

Referencias

- [1] Medición de permitividad dieléctrica en líquidos con parámetros S, Dic 2016.
- [2] Medición de materiales con sonda coaxial, Dic 2019.