



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y
COMUNICACIONES



ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA
MEDIANTE EL MÉTODO TRANSMISIÓN/REFLEXIÓN

ALVARO A. URDANETA R.

BARBULA, JUNIO 2012

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

**ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA
MEDIANTE EL MÉTODO TRANSMISIÓN/REFLEXIÓN**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

ALVARO A. URDANETA R.

BARBULA, JUNIO 2012

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado “ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA MEDIANTE EL MÉTODO TRANSMISIÓN/REFLEXIÓN”, realizado por el bachiller: ALVARO A. URDANETA R., cédula de identidad: 17.777.335, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Firma

PROF. ALFONSO ZOZAYA

Tutor

Firma

PROF. PAULINO DEL PINO

Jurado

Firma

PROF. CARLOS JIMENEZ

Jurado

BARBULA, JUNIO 2012

ÍNDICE GENERAL

	pág
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
CAPÍTULO I. MÉTODO TRANSMISIÓN/REFLEXIÓN.	1
1.1. Principio básico.	1
1.2. Implementación del Método T/R.	3
1.3. Corrección de resultados por GAP.	5
1.3.1. Probeta en forma de coaxial.	7
1.3.2. Probeta en forma de guía de onda rectangular.	8
CAPÍTULO II. OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN	9
2.1. Antecedentes.	9
2.2. Objetivos.	10
2.2.1. Objetivo general.	10
2.2.2. Objetivos específicos.	11
CAPÍTULO III. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA PROBETA.	13
3.1. Descripción del diseño.	13
3.1.1. Dimensiones.	14
3.1.2. Fabricación.	15

3.2. Medición de la probeta en vacío.	15
3.2.1. Parámetros S.	17
3.2.2. Cálculo de la impedancia característica.	20
CAPÍTULO IV. ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA.	25
4.1. Simulación.	25
4.1.1. Estimación de la permitividad eléctrica	26
4.1.2. Resultados.	27
4.2. Medición.	31
4.2.1. Configuración del equipo.	31
4.2.2. Muestras de los materiales.	32
4.2.3. Medición de los parámetros S.	33
4.2.4. Estimación de la permitividad eléctrica.	34
4.2.5. Resultados	34
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
5.1. Discusión de resultados	39
5.1.1. Teflón (PTFE)	40
5.1.2. Nylon	40
5.1.3. Silicon (Poliestireno).	40
5.1.4. Manteca Vegetal.	41
5.2. Conclusiones.	41
5.3. Recomendaciones	41
APÉNDICE A. CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.	43

A.1. Calibración con el método Full 2-port.	44
A.2. Configuración de la extensión de los puertos de medición.	47
REFERENCIAS	49

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Sección de línea coaxial	1
1.2. Sección de línea coaxial como probeta.	4
1.3. Algoritmo para el cálculo de la permitividad.	6
1.4. GAP entre la muestra y la probeta.	7
3.1. Línea coaxial de aire comercial.	13
3.2. Partes de un conector APC-7.	14
3.3. Croquis del dispositivo de pruebas.	15
3.4. Fotografías de las piezas	16
3.5. Conexión del equipo <i>HP 85064B S-Parameter Test Set</i>	17
3.6. Accesorios necesarios para conectar la probeta.	17
3.7. Parámetros S de la probeta.	19
3.8. Conexión del equipo <i>HP 43961A Impedance Test Kit</i>	20
3.9. Resultados obtenidos de Z y Γ^*	22
3.10. Impedancia característica de la probeta.	23
4.1. Muestra del material bajo estudio dentro del probeta.	26
4.2. Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Glass, obtenidos a partir de la simulación.	27
4.3. Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Fat, obtenidos a partir de la simulación.	29
4.4. Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Teflón, obtenidos a partir de la simulación.	30
4.5. Forma de la muestra de los materiales.	32
4.6. Muestras de los materiales bajo estudio.	33

4.7. Resultados de ϵ'_r del material Teflón, obtenidos a partir de la medición. . .	35
4.8. Resultados de ϵ'_r del material Nylon, obtenidos a partir de la medición. . .	36
4.9. Resultados de ϵ'_r del material Silicon, obtenidos a partir de la medición. . .	37
4.10. Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Manteca Vegetal, obtenidos a partir de la medición.	38
A.1. Accesorios necesarios para la calibración.	43
A.2. Conexión de los equipos.	44

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los campos electromagnéticos que se propagan en un medio, están estrechamente relacionados a las propiedades electromagnéticas del mismo. Estas propiedades electromagnéticas definen capacidades y características de un material, como por ejemplo: la capacidad de almacenar energía (eléctrica o magnética), tipo de material (aislante o conductor), atenuación por unidad de longitud, etc.

Por esto, la caracterización electromagnética es un tema de investigación importante en área de la física e ingeniería eléctrica y electrónica. Tales investigaciones se han reflejado en el avance que han tenido las telecomunicaciones hoy en día; desde mejoras en dispositivos de comunicación hasta aplicaciones en la medicina, han hecho que surjan nuevos métodos y técnicas para obtener las propiedades electromagnéticas de materiales. La mayoría de las investigaciones se basan en aplicaciones en el área de la biomedicina, que consisten en determinar las propiedades dieléctricas de tejidos biológicos.

Éste trabajo de investigación consta de cinco capítulos y un apéndice en el que se explica el principio teórico del Método Transmisión/Reflexión, así como la implementación del mismo. En el Capítulo I se describe la teoría detrás del método, así como técnicas para su implementación. En el Capítulo II, antecedentes y objetivos de la investigación. En el Capítulo III se comenta sobre el diseño y construcción del dispositivo que se usará para implementar el método. En éste, se muestran resultados sobre la medición de los parámetros eléctricos del dispositivo. En el Capítulo IV, se muestran los resultados de la estimación de la permitividad eléctrica de distintos materiales usando el Método Transmisión/Reflexión. Y por último, en el Capítulo V, se concluye sobre los resultados obtenidos y se aportan recomendaciones para estudios posteriores relacionados al método.

CAPÍTULO I

MÉTODO TRANSMISIÓN/REFLEXIÓN.

Este método consiste en estimar la permitividad eléctrica compleja ($\widehat{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) y la permeabilidad magnética compleja ($\widehat{\mu}_r = \mu'_r - j\mu''_r$) mediante la medición de los parámetros de dispersión (Parámetros S) de una línea de transmisión en cuyo interior se encuentra una muestra del material a caracterizar.

1.1. Principio básico.

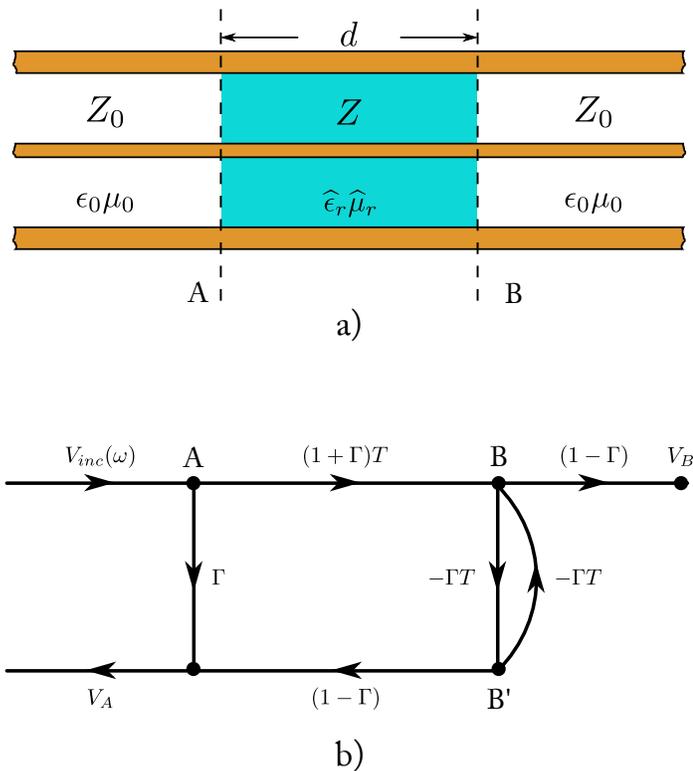


Figura 1.1: a) Sección de línea coaxial con una muestra de material en su interior[2]. b) Diagrama de flujo de señales de a)[3].

La Figura 1.1.a) es una representación de una sección de línea coaxial, con una muestra de material a caracterizar su interior. La longitud de la muestra es d .

La probeta esta dividida en tres regiones: I , II y III . En la región II , la impedancia característica de la línea es $Z = Z_0\sqrt{\widehat{\mu}_r/\widehat{\epsilon}_r}$, donde Z_0 es la impedancia característica de la línea sin la muestra de material. El coeficiente de transmisión entre las regiones I y II sera [3]:

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\widehat{\mu}_r/\widehat{\epsilon}_r} - 1}{\sqrt{\widehat{\mu}_r/\widehat{\epsilon}_r} + 1}, \quad (1.1)$$

y el coeficiente de transmisión en las interfaces A y B de la muestra sería [3]:

$$T = e^{-j\omega d\sqrt{\epsilon\mu}} = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_0}d\sqrt{\widehat{\epsilon}_r\widehat{\mu}_r}} \quad (1.2)$$

Del diagrama de flujo de señales (Figura 1.1.b), se obtienen los parámetros de dispersión en función de los coeficientes de transmisión y reflexión [3]. Otra manera de deducirlos se encuentran en [1][4]. Entonces:

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - T^2\Gamma^2}, \quad (1.3a)$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - T^2\Gamma^2}. \quad (1.3b)$$

El trabajo de Nicolson y Ross consistió en conseguir una expresión para calcular de manera explicita la permitividad y permeabilidad de la muestra del material, a partir de S_{11} y S_{21} [3][5]. A continuación se describe parte de la deducción, publicada en [3].

Se escribe la suma y diferencia de los parámetros S como:

$$V_1 = S_{21} + S_{22}, \quad (1.4a)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{22}, \quad (1.4b)$$

y

$$X = \frac{1 - V_1V_2}{V_1 - V_2}, \quad (1.5)$$

entonces, Γ puede ser obtenido de los parámetros S como:

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (1.6)$$

eligiendo como raíz el valor de $|\Gamma| \leq 1$. También

$$T = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - V_1\Gamma}. \quad (1.7)$$

Ahora, de la Ecuación (1.1) se define:

$$\frac{\hat{\mu}_r}{\hat{\epsilon}_r} = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)^2 = c_1, \quad (1.8)$$

y de la Ecuación (1.2):

$$\hat{\mu}_r \hat{\epsilon}_r = - \left[\frac{\lambda_0}{2\pi d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 = c_2. \quad (1.9)$$

Entonces:

$$\hat{\mu}_r = \sqrt{c_1 c_2}, \quad (1.10a)$$

$$\hat{\epsilon}_r = \sqrt{\frac{c_2}{c_1}}. \quad (1.10b)$$

Así, la permitividad eléctrica $\hat{\epsilon}_r$ y permeabilidad magnética $\hat{\mu}_r$ se puede obtener de los parámetros S de una línea de transmisión, que en cuyo interior se encuentra una muestra de material.

1.2. Implementación del Método T/R.

La implementación del método consiste en introducir una muestra del material en una probeta cuyo diseño se basa en una sección de línea coaxial de aire o una sección de guía de onda rectangular. Esta probeta se conecta a un analizador de redes vectorial para obtener la magnitud y fase de los parámetros S. En la Figura 1.2 se muestra una representación

gráfica de una sección de línea coaxial como probeta, donde d es la longitud de la muestra del material y L_1 L_2 son las distancias de los extremos de la probeta a la muestra. Los extremos de la probeta serán conectados al Puerto # 1 y al Puerto # 2 del analizador de redes.

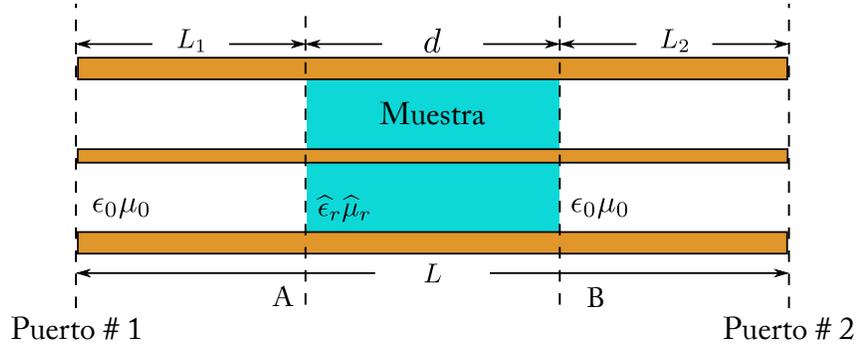


Figura 1.2: Sección de línea coaxial como probeta.[2]

Las Ecuaciones (1.3) están referidas a los extremos de la muestra, por lo que será necesario hacer una compensación de fase de los puertos de medición a los planos A B. Reescribiendo las Ecuaciones (1.3), quedan [1]:

$$S_{11} = \alpha_1 \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - T^2 \Gamma^2}, \quad (1.11a)$$

$$S_{21} = \alpha_1 \alpha_2 \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - T^2 \Gamma^2}, \quad (1.11b)$$

donde:

$$\alpha_1 = e^{-2\gamma_0 L_1},$$

$$\alpha_2 = e^{-2\gamma_0 L_2}.$$

Donde α_1 y α_2 son compensaciones de fase debido a las distancias L_1 y L_2 , y γ_0 es la constante de propagación del aire.

En el trabajo de James Baker-Jarvis [1] reescriben las Ecuaciones (1.10) de la siguiente forma:

$$\widehat{\mu}_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (1.12)$$

$$\widehat{\epsilon}_r = \frac{\lambda_0^2}{\widehat{\mu}_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{\Lambda^2} \right) \quad (1.13)$$

donde:

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}, \quad (1.14)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \quad (1.15)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - \Gamma(S_{11} + S_{21})}, \text{ para } |\Gamma| \leq 1 \quad (1.16)$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2, \quad (1.17)$$

y λ_c es la frecuencia de corte de la línea de transmisión que se este usando como probeta; para el caso de una línea coaxial $\lambda_c \rightarrow \infty$ [1].

En la Ecuación (1.17) tiene infinitos valores debido al termino $\ln\left(\frac{1}{T}\right)$. Para materiales, es necesario hallar el valor correcto comparando el retardo de grupo medido con el calculado [1][6][4]. Otra forma de hallar la raíz correcta se plantea en [7].

En esta investigación, se trabajará con una probeta tipo coaxial, por lo tanto $\lambda_c \rightarrow \infty$. También, los materiales estudiados serán no-magnéticos, es decir, $\widehat{\mu}_r = 1$. En la Figura 1.3 se representa, en forma de diagrama de flujo, el algoritmo que se aplicará para el cálculo de la permitividad compleja.

1.3. Corrección de resultados por GAP.

Se define GAP como el espacio de aire que existe entre cualquier superficie de la muestra y de la probeta (ver Figura 1.4). Cuando existe GAP entre la muestra la probeta

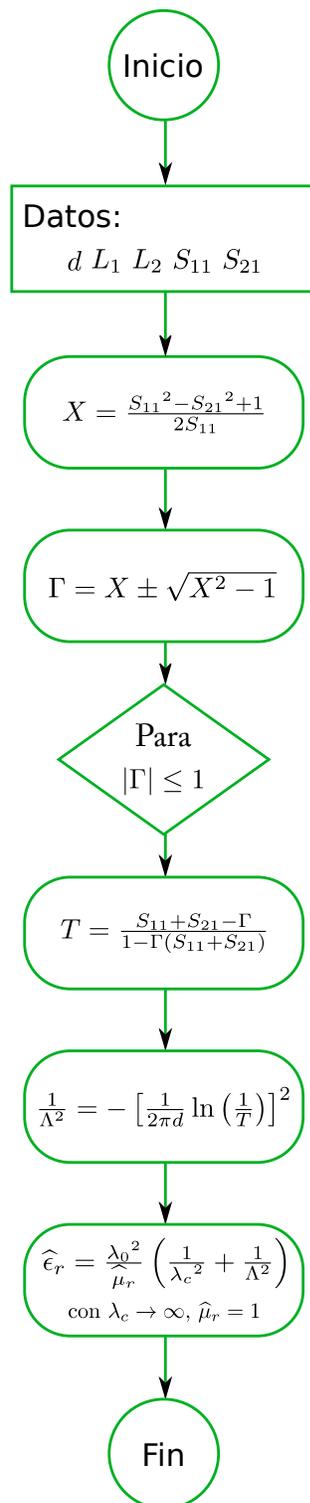


Figura 1.3: Algoritmo para el cálculo de la permitividad.[2]

los resultados de la estimación se ven afectadas [1]. Un valor permisible de GAP esta entre $2,54 \times 10^{-3}$ mm y $7,62 \times 10^{-3}$ mm [1].

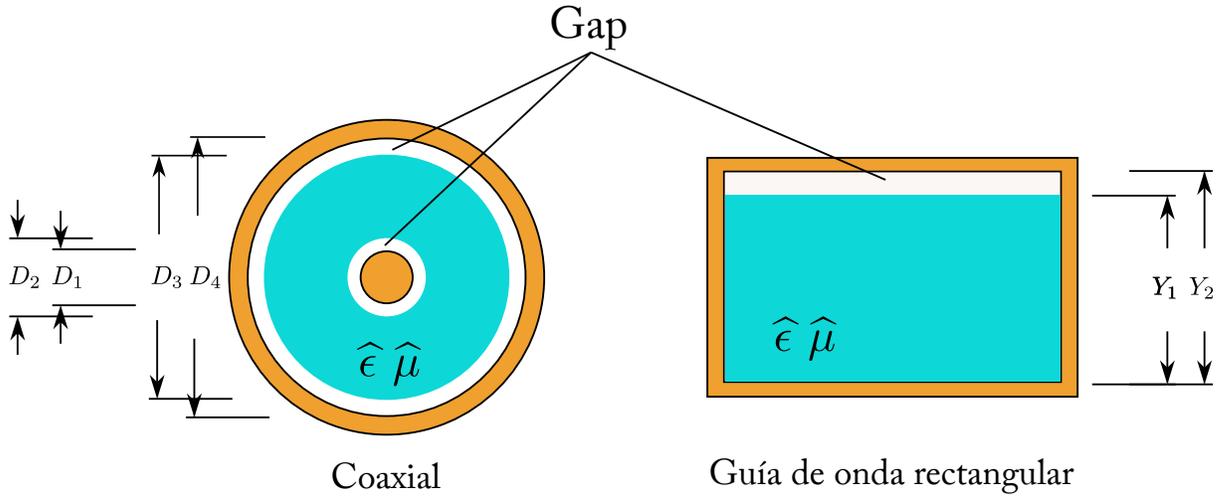


Figura 1.4: GAP entre la muestra y la probeta.[1]

1.3.1. Probeta en forma de coaxial.

Si llamamos ϵ'_c ϵ''_c los valores corregidos, y ϵ'_m ϵ''_m los medidos, entonces:

$$\epsilon'_c = \epsilon'_m \frac{K_2}{K_3 - \epsilon'_m K_1} \quad (1.18a)$$

$$\frac{\epsilon''_c}{\epsilon'_c} = \frac{\epsilon''_m}{\epsilon'_m} \left(1 + \epsilon'_c \frac{K_1}{K_2} \right), \quad (1.18b)$$

donde:

$$K_1 = \ln \frac{D_2}{D_1} + \ln \frac{D_4}{D_3}, \quad (1.19a)$$

$$K_2 = \ln \frac{D_3}{D_2}, \quad (1.19b)$$

$$K_3 = \ln \frac{D_4}{D_1}. \quad (1.19c)$$

$$(1.19d)$$

1.3.2. Probeta en forma de guía de onda rectangular.

Para este caso sería:

$$\epsilon'_c = \epsilon'_m \frac{Y_1}{Y_2 - \epsilon'_m(Y_2 - Y_1)}, \quad (1.20a)$$

$$\frac{\epsilon''_c}{\epsilon'_c} = \frac{\epsilon''_m}{\epsilon'_m} \left(\frac{Y_2}{Y_2 - \epsilon'_m(Y_2 - Y_1)} \right). \quad (1.20b)$$

donde ϵ'_c ϵ''_c son los valores corregidos, ϵ'_m ϵ''_m los valores medidos, y Y_1 Y_2 son las longitudes mostradas en la Figura 1.4.

CAPÍTULO II

OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Antecedentes.

Existen investigaciones sobre el comportamiento electromagnético de los materiales que datan de principios de 1930; estos consistían en inyectar corriente mediante electrodos introducidos al material, los cuales debían ser de una consistencia semi-sólida [8]. Para la década de los 50, ya se usaban cavidades resonantes para la determinación de las constantes dieléctricas de gases a frecuencias de microondas [9] [10], así como el uso de estructuras capacitivas [11] y líneas de transmisión ranuradas [12] rellenas del material de prueba basándose en patrón de onda estacionaria para el cálculo de las propiedades del material. Otros experimentos consistían en emitir una onda en espacio libre hacia el material, y determinar las propiedades, ya sea de la onda reflejada proveniente del material [13], o basándose en los índices de refracción y reflexión [14]; para esto, el material debía tener una forma plana.

Con el avance de la computación, se incorporaron a los sistemas de medición módulos de procesamiento de datos para un cálculo más rápido y con menos error. En los 80s, se comienza a experimentar con tejidos biológicos usando líneas coaxiales terminadas en circuito abierto [15]; y se comienza a usar líneas de microcinta para la determinación de las propiedades de sustratos [16].

En la actualidad se siguen usando los métodos de las décadas pasadas con un mayor refinamiento en las estructuras resonantes y líneas de transmisión, y adaptaciones para la caracterización de materiales con distintas formas y tamaños; incluso se realizan mediciones de tejidos biológicos vivos, que se denominan "*in vivo*". Recientes trabajos incorporan

módulos de cómputo de redes neuronales artificiales, ya que este puede aprender el comportamiento de la propiedad electromagnética del material [17].

En Venezuela, en la Universidad de Carabobo, se realizó un trabajo de caracterización electromagnética de dos tipos de petróleo venezolano [18]. Esta investigación consistió en determinar la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética rellenando un capacitor y un inductor apropiadamente diseñados. Estos parámetros se calcularon a través de la medición directa de la impedancia en un rango de 200 a 500 kHz.

La referencia [19] es una recopilación condensada de todas las técnicas y métodos que se usan para la caracterización electromagnética de materiales reportadas hasta la fecha.

2.2. Objetivos.

El objeto de esta investigación es aplicar el Método de Transmisión/ Reflexión para estimar la permitividad eléctrica compleja de distintos materiales. Para ello se diseñará una probeta con forma de cable coaxial que contendrá las muestras del material bajo estudio, luego se aplicará el método bajo un entorno de simulación para comprobar tanto el diseño de la probeta como el método en sí. Se fabricará la probeta y se aplicará el Método de Transmisión/Reflexión para estimar la permitividad eléctrica de algunos materiales cuyas propiedades electromagnéticas sean conocidas. Por último, se validarán los resultados con las simulaciones realizadas y con las propiedades referenciales del material bajo estudio.

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos que permitirán cumplir con el objeto de la investigación.

2.2.1. Objetivo general.

Estimar la permitividad eléctrica compleja de materiales mediante el método de Transmisión/Reflexión.

2.2.2. Objetivos específicos.

1. Estudiar los procedimientos y técnicas asociados a la estimación de la permitividad con el método Transmisión/Reflexión.
2. Diseñar la probeta que alojará las muestras de los materiales a caracterizar.
3. Realizar un modelo computacional de la probeta en el simulador CST Suite Studie 2010TM.
4. Estimar la permitividad de distintos materiales mediante el método de Transmisión/Reflexión, haciendo uso del modelo computacional bajo el simulador de onda completa CST Suite Studie 2010TM.
5. Fabricar la probeta y las muestras patrones de los materiales a caracterizar.
6. Medir los parámetros S de la probeta con distintas muestras, mediante un analizador de redes.
7. Estimar la permitividad eléctrica de los materiales a través el algoritmo del método de Transmisión/Reflexión.
8. Validar los resultados obtenidos mediante un análisis comparativo.

CAPÍTULO III

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA PROBETA.

3.1. Descripción del diseño.

La probeta es una replica de una línea coaxial comercial con dieléctrico de aire, sin soportes y de 7 mm de radio interno, conocida comercialmente en el idioma inglés como *7mm Beadless Air Lines*. Como toda línea coaxial, ésta consta de un conductor externo y otro interno. El conductor interno es una varilla cilíndrica con un diámetro de 3,04 mm, y el conductor externo tiene la forma de un tubo con un diámetro interno de 7 mm. Los diámetros antes expuestos obedecen a que la línea coaxial posee una impedancia característica de 50Ω . La Figura 3.1 muestra una imagen de una línea coaxial de aire comercializada por la empresa MAURY MICROWAVE, en la que se puede apreciar el conductor externo (objeto de mayor tamaño) y el conductor interno.



Figura 3.1: Línea coaxial de aire comercial. [20]

La probeta es compatible con conectores APC-7 (ver Figura 3.2), esto hace que los extremos tengan un diseño especial que describiré a continuación:

- **Conductor externo.** En sus extremos se hará una rosca de manera que la parte extraíble de un conector APC-7 (ver Figura 3.2) enrosque en los extremos del conductor externo.
- **Conductor interno.** La terminaciones deberán tener un diámetro menor al general, tal que se forme una especie de pin que deberá de encajar en la sección central de un conector APC-7 (ver Figura 3.2), lo que dará soporte al conductor interno.



Figura 3.2: Partes de un conector APC-7. [2]

3.1.1. Dimensiones.

En la Figura 3.3 se muestra un croquis del diseño de la probeta, cuyas dimensiones se expresan en Tabla 3.1. Las dimensiones ideales son aquellas propias del diseño, mientras que las reales son las obtenidas una vez fabricada la pieza (Las dimensiones reales se midieron con vernier manual de 0,05 mm de apreciación).

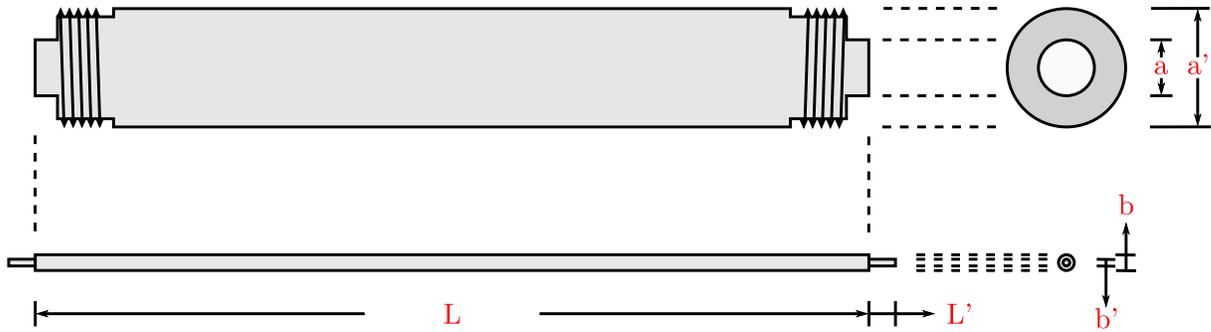


Tabla 3.1: Dimensiones de la probeta. [2]

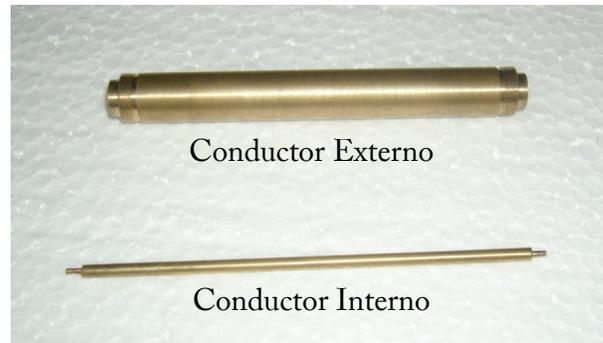
Dimensión	Ideal [mm]	Real [mm]
a	7	7
a'	N/A	12
b	3,04	3,05
b'	1	1,2
L	100	100
L'	3	3

3.1.2. Fabricación.

La elaboración de las piezas se llevaron a cabo en una empresa metal-mecánica ubicada en el sector La Candelaria del Municipio Valencia del Edo. Carabobo. Para la fabricación del conductor externo se partió de una barra de Bronce-Nickel de 3/4" de diámetro la cual se cortó a la longitud deseada, se perforó transversalmente un hoyo de 7 mm de diámetro, y luego se realizaron los extremos incluyendo la rosca. El conductor interior se realizó con una varilla de Bronce de 3,12 mm de diámetro, la cual se llevó al diámetro requerido con la ayuda de un taladro y lijas. En las imágenes de la Figura 3.4 se muestran las piezas fabricadas.

3.2. Medición de la probeta en vacío.

Para la comprobación de la probeta, se midieron los parámetros S y se halló la impedancia característica de la probeta, en el rango de 500 MHz a 1 GHz. Las mediciones se



a)



b)

Figura 3.4: a) El conductor exterior e interior. b) El conductor exterior con la parte extraíble de un conector APC-7 en sus extremos. [2]

realizaron en el Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas (*LabCom*) de la Universidad de Carabobo. Los equipos usados fueron:

- HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer.
- HP 85064B S-Parameter Test Set.
- HP 43961A Impedance Test Kit.

En la Figura A.2 se muestra una representación gráfica del equipo HP 85064B S-Parameter Test Set conectado al HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer. Para la conexión de la probeta al equipo *HP 85064B S-Parameter Test Set*, fue necesario usar (ver Figura 3.6):

- 4 Adaptadores APC-7 - SMA Macho.

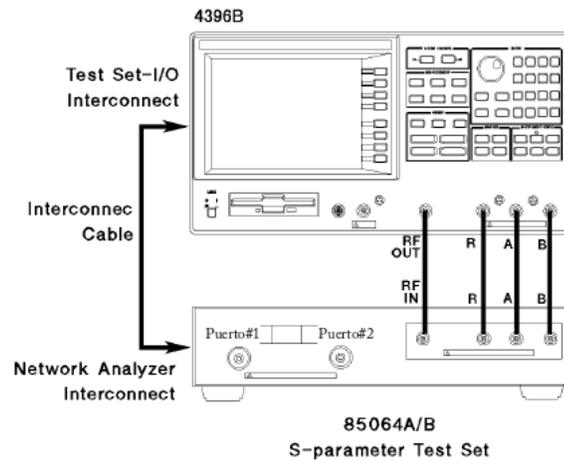


Figura 3.5: Conexión del equipo *HP 85064B S-Parameter Test Set*. [21]

- 2 Cables SMA Hembra - SMA Hembra.



Figura 3.6: Accesorios necesarios para conectar la probeta. [2]

A continuación se describirá el procedimiento para realizar las mediciones. Previo a las mediciones se deberá calibrar el equipo de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A.

3.2.1. Parámetros S.

1. Verifique que el equipo *HP 85064B S-Parameter Test Set* este conectado al *HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer*, como indica la Figura A.2.
2. Encienda el equipo *HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer*.

3. Oprima **Meas**.
4. Seleccione en la pantalla la opción **ANALYZER TYPE**, y luego **NETWORK ANALYZER**.
5. Conecte la probeta al equipo asegurándose de conectar el Cable#1 al Puerto 1 y el Cable#2 al Puerto 2.
6. Seleccione en la pantalla el parámetro que desee visualizar:
 - S11 **Ref1:FWD S11 [A/R]**,
 - S21 **Trans:FWD S21 [B/R]**,
 - S12 **Trans:REV S12 [B/R]**,
 - S22 **Ref1:REV S22 [A/R]**.
7. Para visualizar la fase de un parámetro oprima **Format**, seguido de **PHASE** en la pantalla.

Resultados.

En la Figura 3.7 se muestran los resultados obtenidos de la medición de los parámetros S de la probeta en vacío.

De las gráficas se observa que las magnitudes de S_{11} y S_{22} se aproximan a cero, mientras que las magnitudes de S_{21} y S_{12} se aproximan a la unidad. Estos valores concuerdan con los parámetros S teóricos de una sección de línea de transmisión. Para las fases se puede apreciar que S_{21} y S_{12} poseen un mismo comportamiento.

Para cada parámetro se tomaron 201 muestras en el rango de estudio. Los valores promedios de la magnitud de los parámetros son: $|S_{11}| = 0,0274$, $|S_{21}| = 1,0170$, $|S_{12}| = 1,0056$ y $|S_{22}| = 0,0255$.

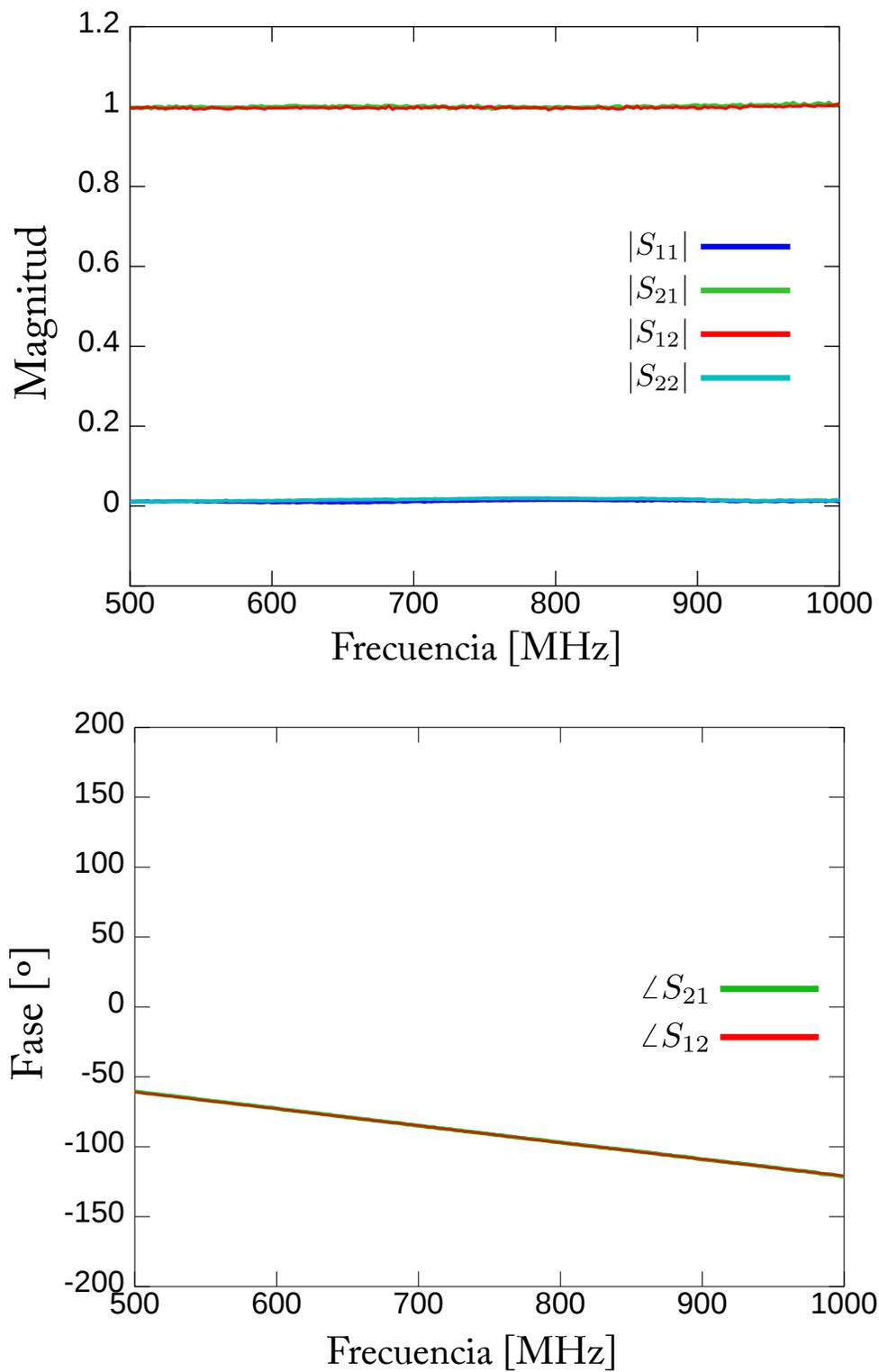


Figura 3.7: Parámetros S de la probeta. [2]

3.2.2. Cálculo de la impedancia característica.

Para el cálculo de la impedancia característica (Z_0), se midió la impedancia (Z) y el coeficiente de reflexión complejo (Γ^*), ambos vistos desde un extremo la línea. Considerando la probeta como una línea de bajas pérdidas, se expresará la impedancia de línea (a una distancia L de la carga) en función del coeficiente de reflexión complejo, como [22]:

$$Z(z) = Z_0 \frac{1 + \Gamma^*(z)}{1 - \Gamma^*(z)} \quad (3.1)$$

despejando Z_0 de la ecuación anterior, queda:

$$Z_0 = Z(z) \frac{1 - \Gamma^*(z)}{1 + \Gamma^*(z)}. \quad (3.2)$$

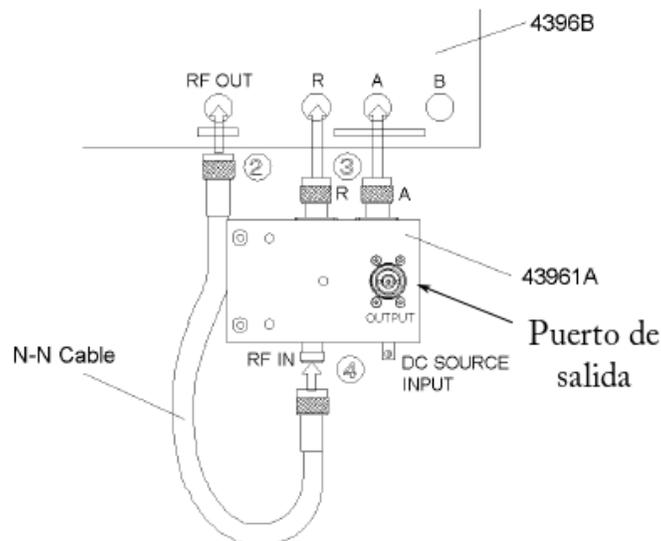


Figura 3.8: Conexión del equipo *HP 43961A Impedance Test Kit*. [23]

Medición de Z y Γ^* .

1. Apague el equipo.

2. Conecte el equipo *HP 43961A Impedance Test Kit* al *HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer*, como indica la Figura 3.8.
3. Encienda el equipo.
4. Oprima **Meas**.
5. Seleccione en la pantalla **ANALYZER TYPE**, seguido de **IMPEDANCE ANALYZER**.
6. Calibrar el equipo:
 - a) Oprima **Cal**, luego seleccione en la pantalla **CALIBRATE MENU**.
 - b) Conecte un Abierto APC-7 en el puerto de salida, luego seleccione en la pantalla **OPEN**.
 - c) Conecte un Corto APC-7 en el puerto de salida, luego seleccione en la pantalla **SHORT**.
 - d) Conecte una Carga de 50Ω APC-7 en el puerto de salida, luego seleccione en la pantalla **LOAD**.
 - e) Seleccione **DONE: CAL**.
 - f) Verifique que la notación **Cor** en la parte izquierda de la pantalla.
7. Conecte la probeta en el puerto de salida.
8. Conecte la carga de 50Ω a la probeta.
9. Para medir Z :
 - a) Oprima **Meas**.
 - b) Seleccione en la pantalla **RESIST(R)** para observar la parte real de Z .
 - c) Seleccione en la pantalla **REACT(X)** para observar la parte imaginaria de Z .
10. Para medir Γ^*
 - a) Oprima **Meas**.
 - b) Seleccione en la pantalla **MORE** hasta estar en el menú **REFL.COEF** (menú 3/5).
 - c) Seleccione en la pantalla **MAG(| Γ |)** para observar la magnitud de Γ^* .

Resultados.

En la Figura 3.9.a) se muestran las gráficas de la parte real e imaginaria de la impedancia, y en la Figura 3.9.b) se muestra la magnitud del coeficiente de reflexión.

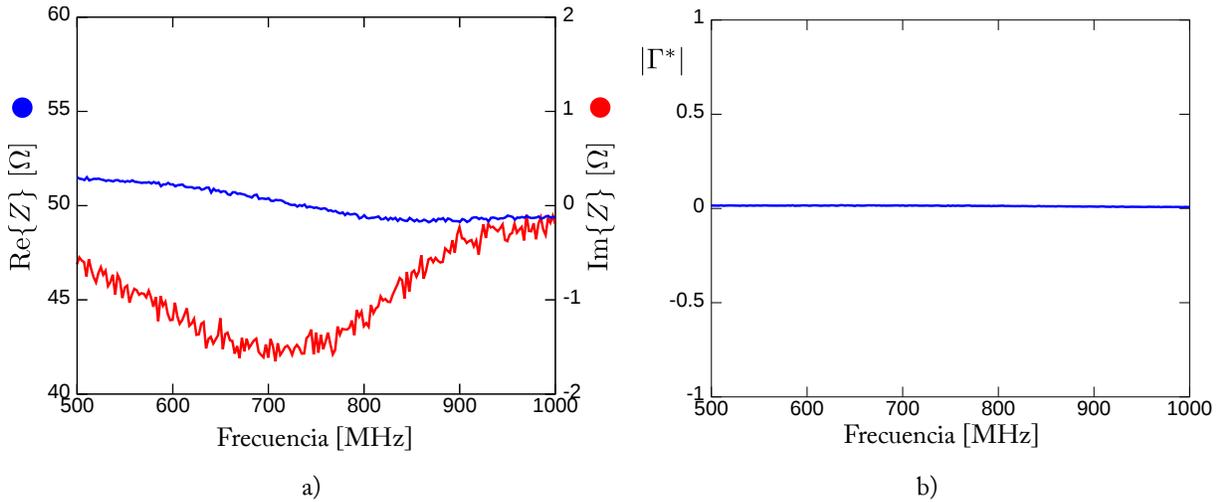


Figura 3.9: a) Parte real e imaginaria de Z . b) Magnitud de Γ^* . [2]

Se puede observar que los valores de la parte real de la impedancia no sobrepasa los 52 Ω para la sección baja del rango de estudio, mientras que para la sección alta no alcanza los 49 Ω , teniendo un valor promedio de 50,09 Ω . De la parte imaginaria podemos observar que presenta un comportamiento capacitivo en todo el rango de estudio que no alcanza los 4 Ω , teniendo un valor promedio de 0,94 Ω . La magnitud del coeficiente de reflexión es menor a 0,02, presentando un valor promedio de 0.01.

En la Figura 3.10 están las gráficas de la parte real e imaginaria de Z_0 , como resultado de aplicar la ecuación (3.2). La parte real de Z_0 es en promedio 49,98 Ω , y la parte imaginaria 0,04 Ω .

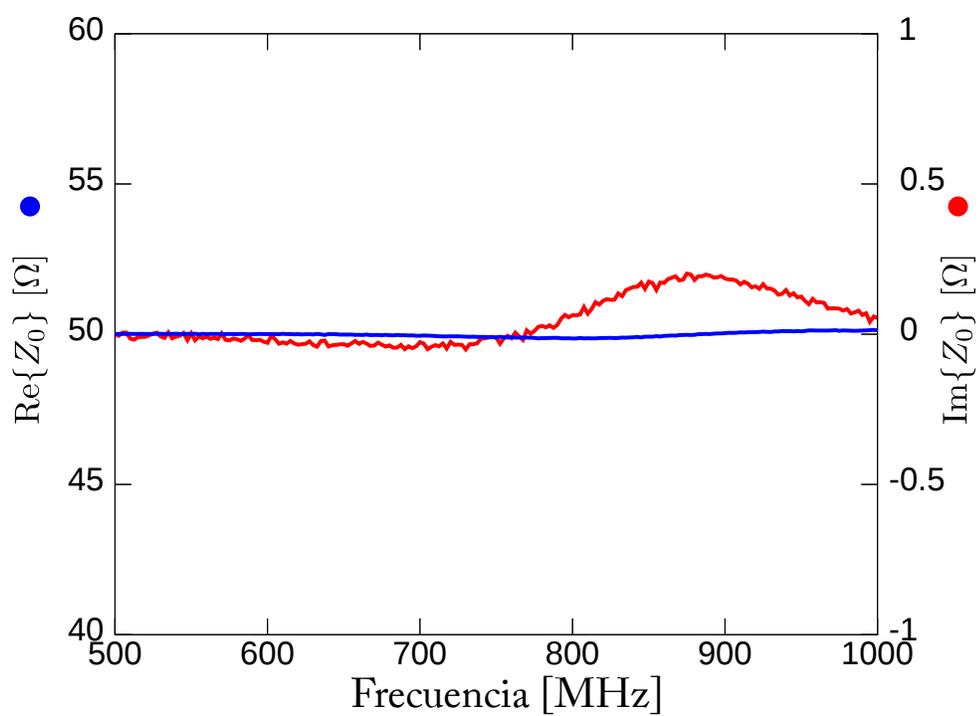


Figura 3.10: Impedancia característica de la probeta. [2]

CAPÍTULO IV

ESTIMACIÓN DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA COMPLEJA.

En este capítulo se mostrarán los valores calculados de las permitividades de distintos materiales, a partir de los parámetros S obtenidos tanto del software CST Suite Studio 2010TM, como de la medición directa con el analizador de redes vectoriales.

4.1. Simulación.

Para la obtención de los parámetros S en el software, se rellenó una sección del modelo computacional de la probeta con distintos materiales predeterminados del programa. Los nombres de los materiales seleccionados son:

- Glass Pyrex (Vidrio Pyrex),
- PTFE (Teflón),
- Fat (Grasa);

siendo Fat el material que presenta mayores pérdidas.

Tabla 4.1: Longitudes de las muestras.[2]

Material	Longitud [mm]
Glass Pyrex	47
PTFE	69
Fat	35

La simulación se llevó a cabo en el rango de frecuencia de 500 MHz a 1 GHz. Las longitudes de las muestras (d) se indican en la Tabla 4.1. Las muestras se colocaron en la mitad de la probeta, por lo que $L_1 = L_2$. En la Figura 4.1 representa el interior del modelo computacional de probeta, en la cual se observa la posición de la muestra de uno de los materiales bajo estudio. Se usaron fuentes de excitación tipo guía de onda en cada extremo de la probeta, las cuales se configuraron para que tomaran como plano de referencia los extremos de la muestra dentro de la probeta. Al configurar los planos de referencia obviamos α_1 y α_2 en las Ecuaciones (1.20).

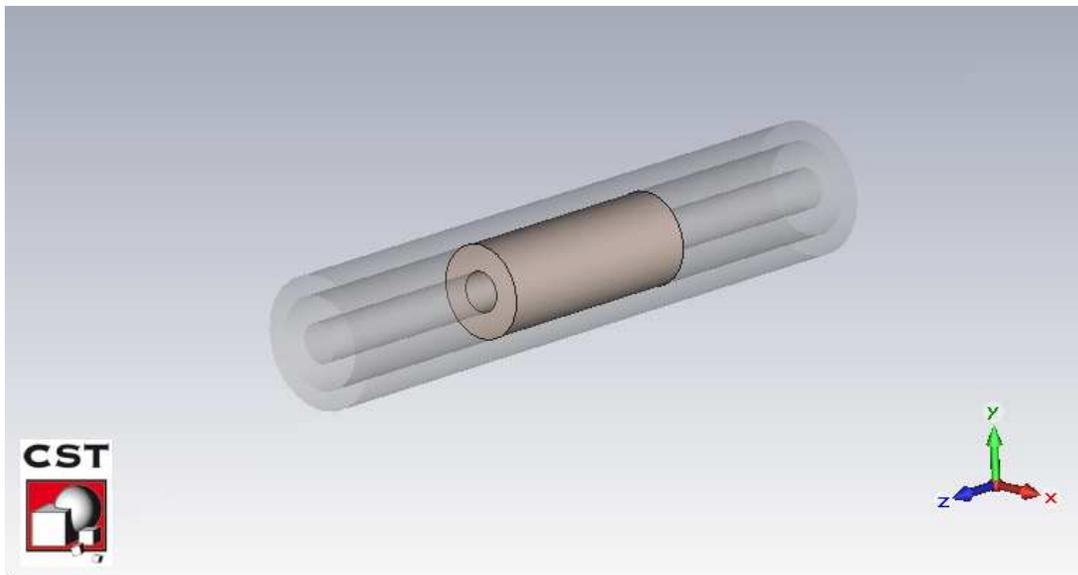


Figura 4.1: Muestra del material bajo estudio dentro del probeta.

4.1.1. Estimación de la permitividad eléctrica

De la simulación se obtuvieron 1001 datos para cada parámetro de dispersión, en el rango de 500 MHz a 1 GHz, con un paso de 0,5 MHz. De los parámetros S obtenidos de la simulación se estimó la permitividad eléctrica compleja de los materiales ($\hat{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) aplicando el diagrama de flujo de la Figura 1.3, donde S_{11} y S_{21} se obtuvieron de la simulación, y d según el material de acuerdo a la Tabla 4.1, y $L_1 = L_2 = 0$.

4.1.2. Resultados.

En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se observan los resultados de la estimación de la permitividad eléctrica completa mediante el Método Transmisión/Reflexión a partir de los parámetros S del modelo computacional de probeta, obtenidos de la simulación. En éstas, se muestran las permitividades obtenidas (en color) y las permitividades referenciales (negro). Las permitividades referenciales se obtienen de la librería de materiales de CST Suite Studie 2010TM. Los resultados son presentados en gráficas de dobles escala, es decir, la escala de izquierda indica valores de ϵ'_r , mientras que la derecha indica valores de ϵ''_r . A continuación se comentan los resultados obtenidos para cada uno de los materiales.

Glass

En la Figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r y ϵ''_r para el material Glass. Los valores de la permitividad se calcularon a partir de los parámetros S obtenidos de la simulación.

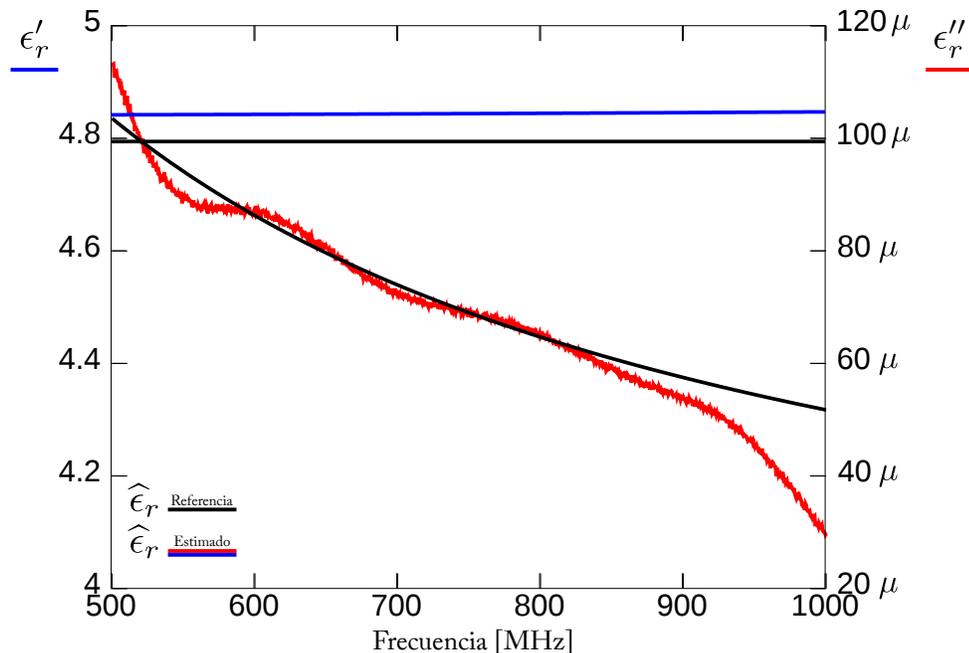


Figura 4.2: Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Glass, obtenidos a partir de la simulación. [2]

La recta de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r y la de color negro representa los valores referenciales. Se observa que el comportamiento de los valores obtenidos de ϵ'_r , son aproximadamente constante a lo largo de rango de frecuencias de estudio; con un valor promedio de 4,8439, comparado con el valor referencial de 4,7941. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ'_r , relativo para los valores referencia es de 1,04 %, y el error promedio cuadrático es de 0,25 %.

Por otra parte, la curva de color rojo representa los valores obtenidos de ϵ''_r y la de color negro representa los valores referenciales. Se observa que los valores obtenidos de ϵ''_r , decrecen de forma irregular a lo largo de rango de frecuencias de estudio, sin embargo observamos una tendencia con los valores referenciales. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ''_r , relativo para los valores referencia es de -4,75 %, y el error promedio cuadrático es de 3×10^{-9} %.

Fat

En la Figura 4.3 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r y ϵ''_r para el material Fat. Los valores de la permitividad se calcularon a partir de los parámetros S obtenidos de la simulación.

La recta de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r y la de color negro representa los valores referenciales. Se observa que el comportamiento de los valores obtenidos de ϵ'_r , son aproximadamente constante a lo largo de rango de frecuencias de estudio; con un valor promedio de 4,6464, comparado con el valor referencial de 4,6023. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ'_r , relativo para los valores referencia es de 0,96 %, y el error promedio cuadrático es de 0,19 %.

Por otra parte, la curva de color rojo representa los valores obtenidos de ϵ''_r y la de color negro representa los valores referenciales. Se observa que los valores obtenidos de ϵ''_r , decrecen de forma exponencial a lo largo de rango de frecuencias de estudio, de la misma forma que lo hacen los valores referenciales. El error promedio de los valores obtenidos de

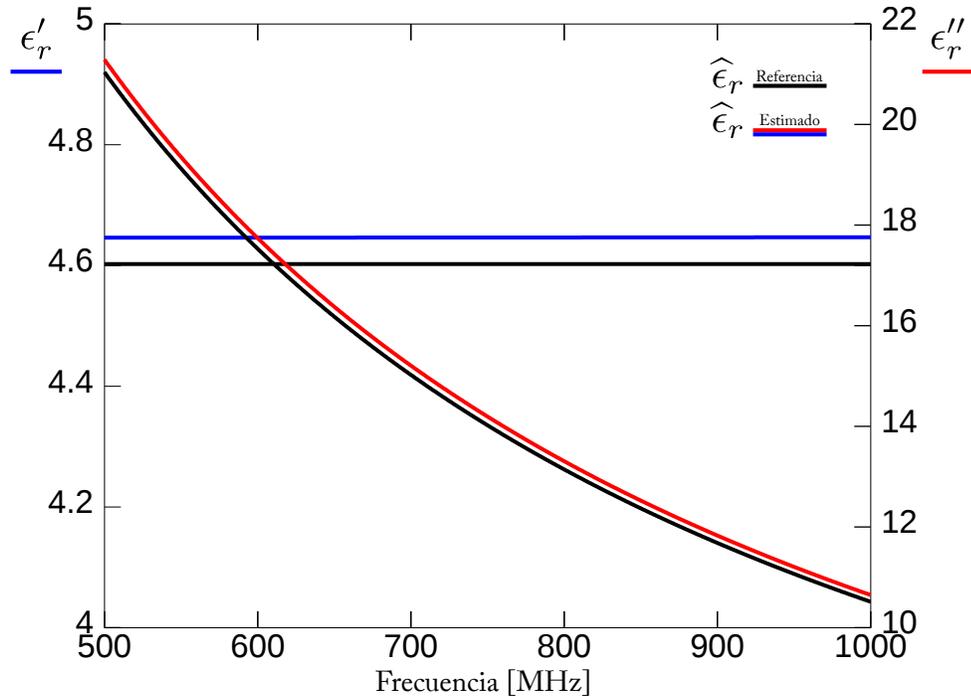


Figura 4.3: Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Fat, obtenidos a partir de la simulación. [2]

ϵ''_r , relativo para los valores referencia es de 1,23 %, y el error promedio cuadrático es de 3,31 %.

Teflón

En la Figura 4.4 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r y ϵ''_r para el material Teflón. Los valores de la permitividad se calcularon a partir de los parámetros S obtenidos de la simulación.

La recta de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r y la de color negro representa los valores referenciales. Se observa que el comportamiento de los valores obtenidos de ϵ'_r , son aproximadamente constante a lo largo de rango de frecuencias de estudio; con un valor promedio de 2,1142, comparado con el valor referencial de 2,1004. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ'_r , relativo para los valores referencia es de 0,66 %, y el error promedio cuadrático es de 0,02 %.

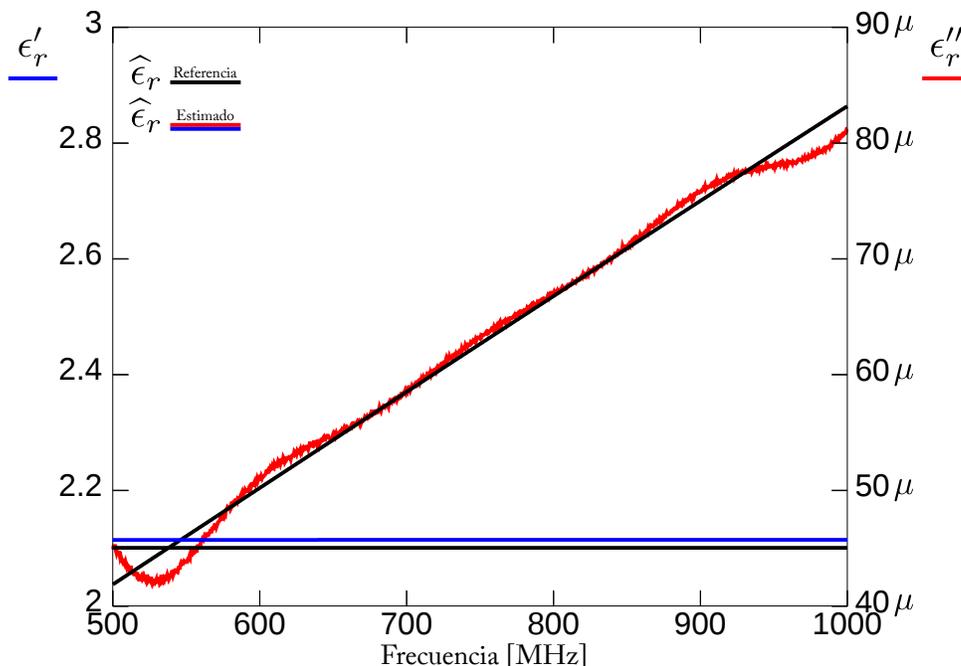


Figura 4.4: Resultados de ϵ_r' y ϵ_r'' del material Teflón, obtenidos a partir de la simulación. [2]

Por otra parte, la curva de color rojo representa los valores obtenidos de ϵ_r'' y la de color negro representa los valores referenciales. Se observa que los valores obtenidos de ϵ_r'' , aumentan de forma irregular a lo largo de rango de frecuencias de estudio, sin embargo observamos una tendencia con los valores referenciales. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ_r'' , relativo para los valores referencia es de -0.12% , y el error promedio cuadrático es de $2 \times 10^{-10} \%$.

En Tabla 4.2 se muestran los errores relativos promedios y los cuadráticos promedios para los valores estimados de los materiales.

Tabla 4.2: Errores asociados a la estimación. [2]

Materiales	Error relativo promedio		Error cuadrático promedio	
	ϵ_r'	ϵ_r''	ϵ_r'	ϵ_r''
Glass	1,04%	-4,75%	0,25%	$3 \times 10^{-9} \%$
Teflón	0,66%	-0,12%	0,02%	$1 \times 10^{-10} \%$
Fat	0,96%	1,23%	0,19%	3,31%

Los errores fueron calculados según las siguientes expresiones:

- Error relativo promedio.

$$E_{rp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_m(x_i) - y_r(x_i)}{y_r(x_i)} \right] 100 \%$$

- Error cuadrático promedio.

$$E_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_m(x_i) - y_r(x_i)]^2 100 \%$$

donde N es el número de muestras tomadas en el rango de frecuencias ($N = 1001$); los sub-índices m y r indican la variable medida y la real respectivamente.

4.2. Medición.

Los parámetros S fueron medidos con el Analizador de redes vectorial HP 4396B perteneciente al Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas (LabCom) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Previo a las mediciones, se realizó la configuración y calibración del equipo de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A.

4.2.1. Configuración del equipo.

El rango de frecuencia de medición de los parámetros S fue de 500 MHz a un 1 GHz, con un total de 201 datos para cada parámetro, con la siguiente configuración:

- Tiempo de barrido (SWEEP TIME): 70 ms,
- Tipo de barrido (SWEEP TYPE): LIN FREQ,
- Potencia de la fuente (SOURCE POWER): 0 dBm,
- Ancho de banda de IF (IF BANDWIDTH): 40 kHz.

4.2.2. Muestras de los materiales.

Los materiales caracterizados fueron:

- PTFE (Teflón),
- Nylon,
- Silicon (Pegamento caliente que se endurece al enfriarse, llamado coloquialmente como barra de silicon),
- Manteca vegetal.

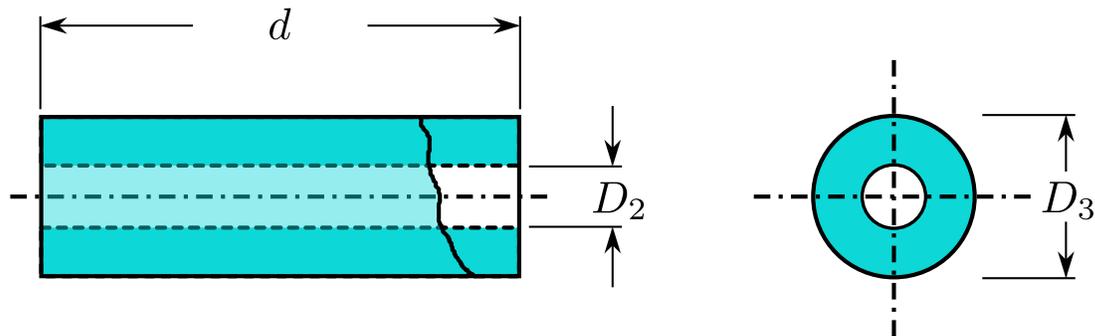


Figura 4.5: Forma de la muestra de los materiales. [2]

La forma de las muestras se observa en la Figura 4.5 y en la Tabla 4.3 las dimensiones de las muestras para cada material. La Figura 4.6 se observan fotografías de las muestras usadas en la medición.

Tabla 4.3: Dimensiones de las muestras.

Material	d [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]
Teflón	21,50	3,05	6,90
Nylon	22,10	3,05	6,55
Silicon	31,00	3,05	6,80
Manteca vegetal	36,50	3,05	6,60

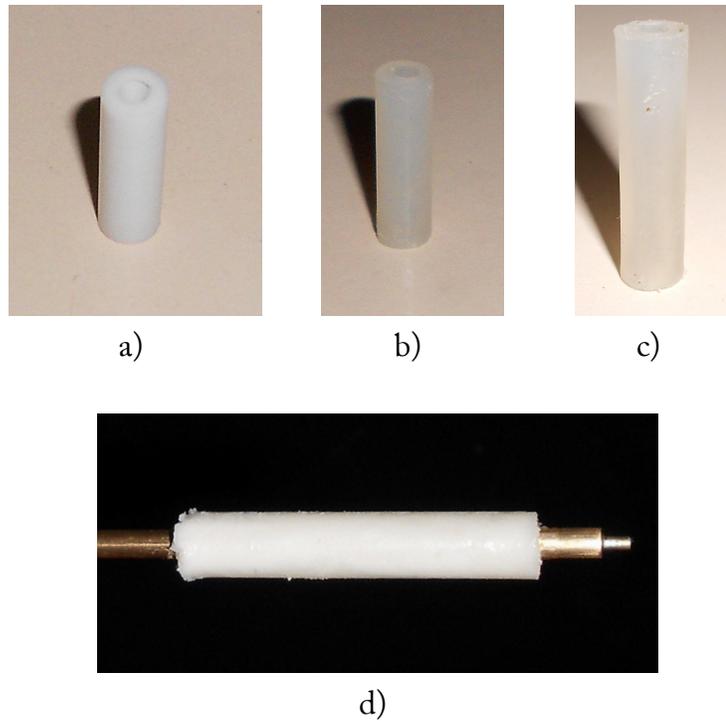


Figura 4.6: Muestras de los materiales bajo estudio. a) Teflón (PTFE). b) Nylon. c) Silicon. d) Manteca Vegetal. [2]

4.2.3. Medición de los parámetros S.

Previo a la medición.

A continuación se describen los pasos que se realizaron para medir los parámetros S de la probeta con la muestra del material bajo estudio adentro de la misma¹:

1. Preparar el equipo de acuerdo al procedimiento descrito en el Apéndice A.
2. Medir y tomar nota de la longitud de la muestra (d).
3. Introducir el conductor interno de la probeta en agujero central de la muestra.
4. Introducir la muestra, junto con el conductor interno, al interior del conductor externo.

¹Algunos pasos no aplican para el material Manteca Vegetal, ya que debido a su consistencia, la muestra se elaboró dentro de la probeta.

5. Medir y tomar nota de las distancias de los extremos de la probeta a la muestra (L_1 y L_2)(Ver Figura 1.1.a)).
6. Conectar los adaptadores APC-7 - SMA a los extremos de la probeta. Asegurarse de que los pines del conductor interior entren en el agujero de la sección central del conector APC-7.
7. Conectar el resto al equipo (Ver sección 3.2.1 del Capítulo 3).
8. Configurar la extensión de los puertos basados en las distancias L_1 y L_2 , de acuerdo al Apéndice A.

4.2.4. Estimación de la permitividad eléctrica.

De la medición de los parámetros S de la probeta, se calculó la permitividad eléctrica compleja ($\hat{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$) de los materiales bajo estudio aplicando el diagrama de flujo de la Figura 1.3, donde S_{11} y S_{21} se obtuvieron del equipo de medición, d según el material de acuerdo a la Tabla 4.3, y $L_1 = L_2 = 0$.

4.2.5. Resultados

Las Figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los resultados de la estimación de la permitividad eléctrica completa mediante el Método Transmisión/Reflexión a partir de los parámetros S de la probeta, obtenidos del analizador de redes vectorial. Los resultados son presentados en gráficas de doble escala, es decir, la escala de izquierda indica valores de ϵ'_r , mientras que la derecha indica valores de ϵ''_r . A continuación se comentan los resultados obtenidos para cada uno de los materiales.

Teflón

En la Figura 4.7 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r para el material Teflón. También se grafican los valores referenciales del material obtenidos de la librería del CST Suite Studio 2010TM. Los valores de la permitividad se calcularon a partir de los parámetros S obtenidos del analizador de redes.

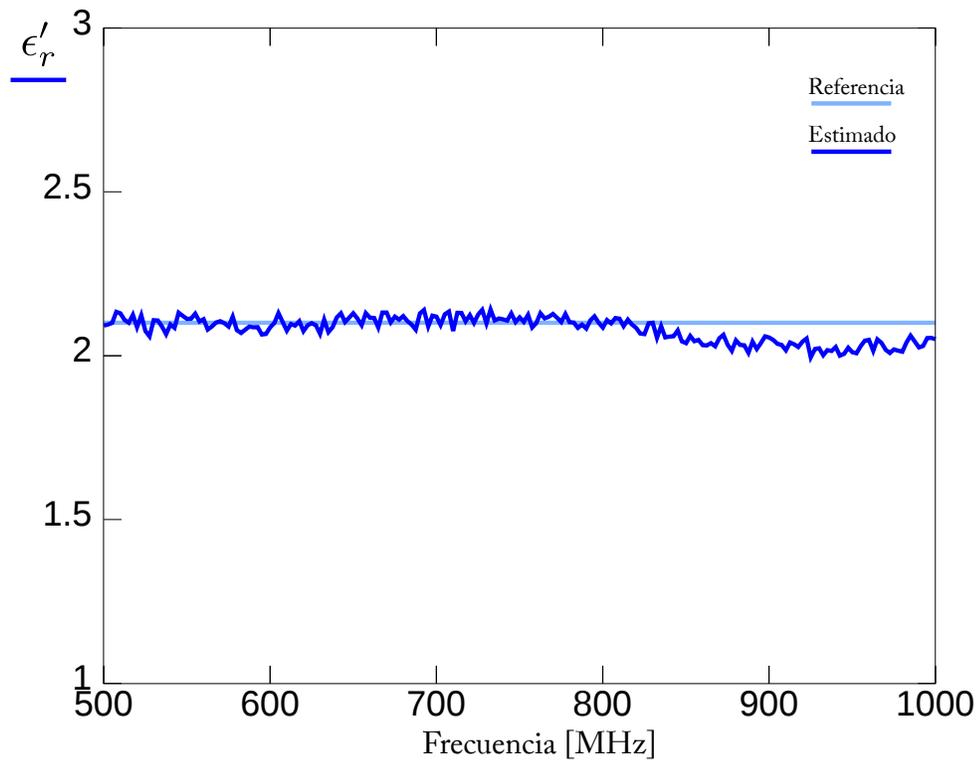


Figura 4.7: Resultados de ϵ'_r del material Teflón, obtenidos a partir de la medición. [2]

La gráfica de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r y la recta de color azul claro representa los valores referenciales. Se observa que los valores obtenidos de ϵ'_r no presentan un comportamiento definido a lo largo de rango de frecuencias de estudio, sin embargo, se aproximan al valor referencial. El promedio de ϵ'_r es de 2,08, comparado con el valor referencial de 2,10. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ'_r , relativo para los valores referenciales es de -0,94 %, y el error promedio cuadrático de 0,18 %. Los valores obtenidos de ϵ''_r no son mostrados debido a su elevada discrepancia con los valores referenciales.

Nylon

En la Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r para el material Nylon, calculados a partir de los parámetros S obtenidos del analizador de redes. También se grafican los valores referenciales del material obtenidos de una interpolación lineal de los valores registrados en [24].

Para ésta muestra de Nylon, fue necesario realizar la corrección de gap a los valores obtenidos de ϵ'_r , debido a que la muestra no quedaba ajustada en el interior del conductor externo de la probeta.

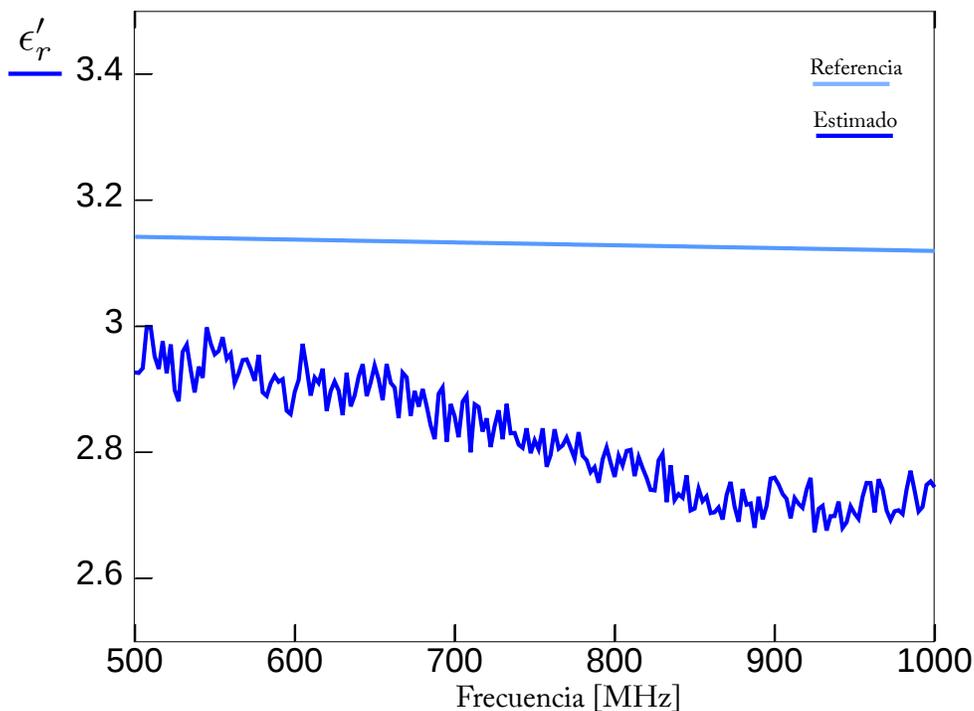


Figura 4.8: Resultados de ϵ'_r del material Nylon, obtenidos a partir de la medición. [2]

La gráfica de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r y la recta de color azul claro representa los valores referenciales. Se observa que los valores obtenidos de ϵ'_r no presentan un comportamiento definido a lo largo de rango de frecuencias de estudio. El promedio de ϵ'_r es de 2,82, comparado con el valor promedio referencial de 3,13. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ'_r , relativo para los valores referenciales es de -9,85%, y el error promedio cuadrático es de 10,21%. Los valores obtenidos de ϵ''_r no son mostrados debido a su elevada discrepancia con los valores referenciales.

Silicon

En la Figura 4.9 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r para el material Silicon, calculados a partir de los parámetros S obtenidos del analizador de redes. También se grafican los valores referenciales del material obtenidos de una interpolación lineal de dos valores registrados en [24].

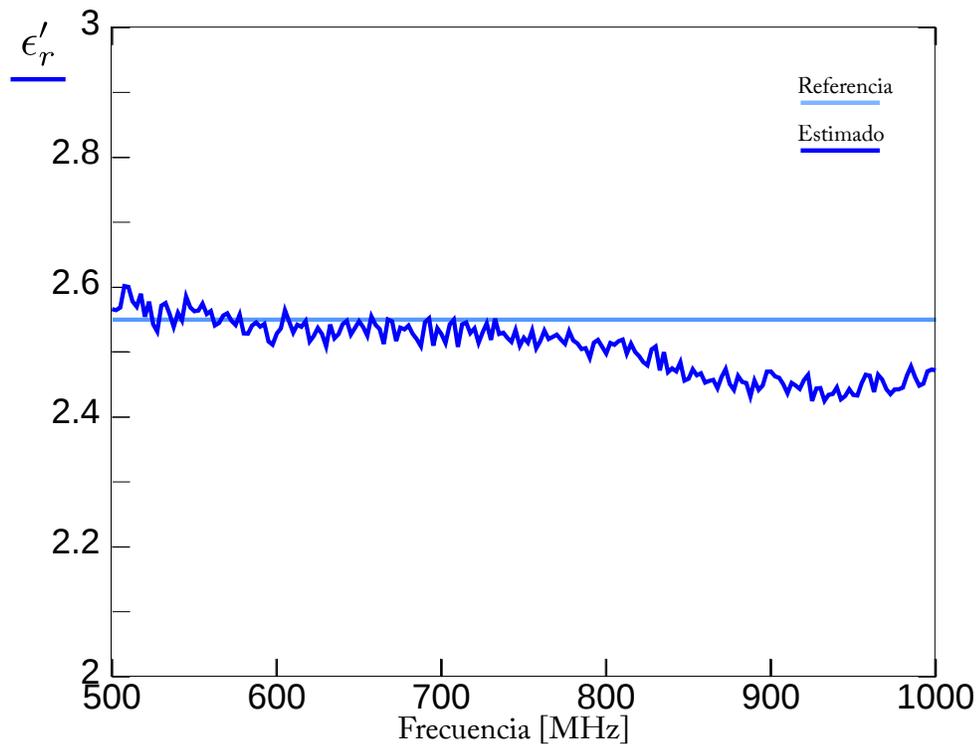


Figura 4.9: Resultados de ϵ'_r del material Silicon, obtenidos a partir de la medición. [2]

La gráfica de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r y la recta de color azul claro representa los valores referenciales. Se observa que los valores obtenidos de ϵ'_r no presentan un comportamiento definido a lo largo de rango de frecuencias de estudio, sin embargo, se aproximan al valor referencial. El promedio de ϵ'_r fue de 2,508, comparado con el valor referencial de 2,55. El error promedio de los valores obtenidos de ϵ'_r , relativo para los valores referencia es de -1,65 %, y el error promedio cuadrático es de 0,36 %. Los valores obtenidos de ϵ''_r no son mostrados debido a su elevada discrepancia con los valores referenciales.

Manteca Vegetal

En la Figura 4.9 se muestran los resultados obtenidos de ϵ'_r y ϵ''_r para el material Silicon, calculados a partir de los parámetros S obtenidos del analizador de redes.

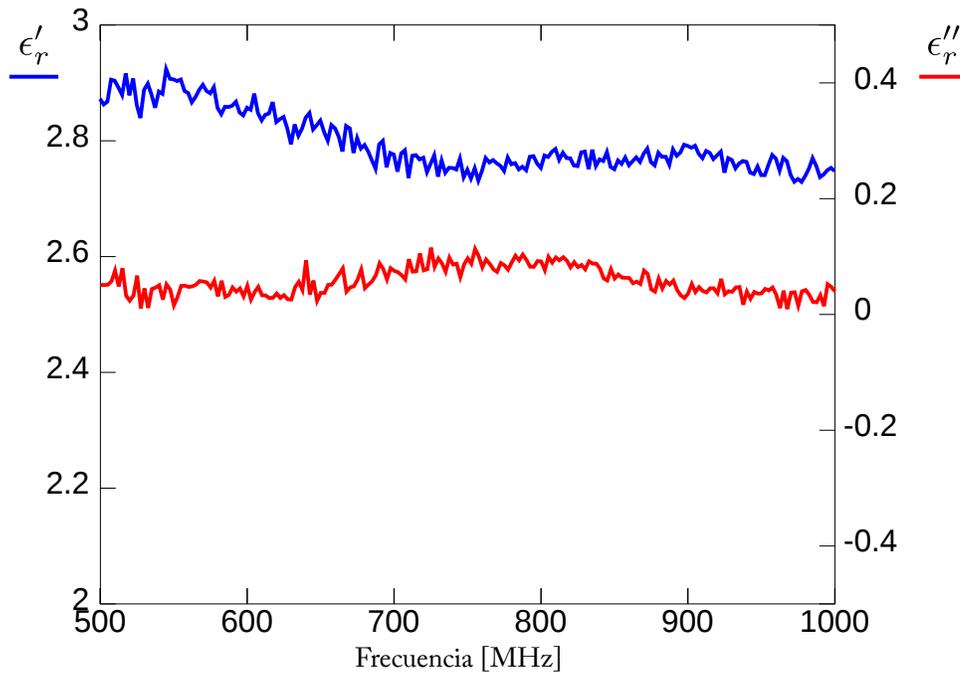


Figura 4.10: Resultados de ϵ'_r y ϵ''_r del material Manteca Vegetal, obtenidos a partir de la medición. [2]

La gráfica de color azul representa los valores obtenidos de ϵ'_r . Se observa que valores obtenidos de ϵ'_r no presentan un comportamiento definido a lo largo de rango de frecuencias de estudio, obteniendo un valor promedio de 2,79.

Por otra parte, la gráfica de color rojo representa los valores obtenidos de ϵ''_r . Se observa que los valores obtenidos de ϵ''_r , no presentan un comportamiento definido a lo largo de rango de frecuencias de estudio, siendo todos los valores positivos. El promedio de ϵ''_r fue de 0,067.

CAPÍTULO V

**DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

5.1. Discusión de resultados

Antes de discutir los resultados obtenidos de la estimación de permitividad eléctrica compleja, es necesario tener presente los valores referenciales de los materiales que se estudiaron, estos son:

- **Teflón (PTFE).**

La permitividad eléctrica compleja de éste material es conocida en todo el rango de frecuencia de estudio, ya que forma parte de la librería de CST Suite Studie 2010TM. Según los datos de la librería del software, el Teflón posee un ϵ'_r de 2,1004 constante en todo el rango de frecuencia, y un ϵ''_r de $41,9 \times 10^{-6}$ a 500 MHz, aumentando linealmente hasta llegar a un valor de $83,1 \times 10^{-6}$ a 1 GHz; tal como muestran las curvas de color negro en la Figura 4.4.

- **Nylon**

Según *Table of Dielectric Materials* del MIT [24], el Nylon posee un ϵ'_r de 3,16 a 100 MHz y 3,03 a 3 GHz, y un ϵ''_r de 0,066 a 100 MHz y 0.038 a 3 GHz.

- **Silicon**

Para éste material no existe registro de forma evidente sobre su permitividad eléctrica compleja, sin embargo, uno de sus compuestos principales es el *Poliestireno*, cuya permitividad es conocida. Según [24], el *Poliestireno* posee un ϵ'_r de 2,55 a 300 MHz y 3 GHz, y un ϵ''_r de $0,89 \times 10^{-3}$ a 300 MHz y $0,84 \times 10^{-3}$ a 3 GHz.

- **Manteca Vegetal** Para éste material no se halló registro de su permitividad eléctrica compleja, sin embargo, la decisión de incluirlo como material de estudio fue el pensar que se trataba de un material con pérdidas considerables (con respecto al resto de los materiales estudiados) para así estimar valores considerables de ϵ_r'' .

A continuación discutiremos los resultados obtenidos de manera individual para cada material.

5.1.1. Teflón (PTFE)

Al observar los resultados de ϵ_r' en la Figura 4.7, notamos, a simple vista la tendencia al valor referencial. El valor promedio de ϵ_r' es de 2,08, el cual se aproxima al registrado en el software, y coincide con el registrado en los trabajos de investigación [1][4].

5.1.2. Nylon

El valor promedio obtenido para ϵ_r' es de 2,82. Para comparar de una mejor manera los resultados obtenidos con los valores referenciales, se asumió que ϵ_r' referencial se comporta linealmente entre 100 MHz y 3 GHz de manera que podamos conocer los valores referenciales en el rango de frecuencias de estudio. Al calcular el error promedio relativo a estos valores referenciales, nos da un error de 9,85 %. Los resultados se aproximan a los obtenidos en [4].

5.1.3. Silicon (Poliestireno).

Se obtuvo un valor promedio para ϵ_r' de 2,508, el cual se aproxima a el valor referencial del Poliéstireno.

5.1.4. Manteca Vegetal.

Se obtuvo un valor promedio para ϵ'_r de 2,79, y de 0,057 para ϵ''_r .

5.2. Conclusiones.

- De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación, se puede afirmar que con el Método Transmisión/Reflexión, basado en el algoritmo desarrollado por Nicolson y Ross, se puede estimar la permitividad eléctrica compleja de manera precisa.
- De los resultados obtenidos de las permitividades calculadas a partir de la medición de los parámetros S, se afirma que con el Método Transmisión/Reflexión se pudo estimar de manera aproximada el ϵ'_r de los materiales bajo estudio.
- Los valores obtenidos de ϵ''_r , no fueron los esperados para los materiales estudiados. Los pobres resultados obtenidos en la estimación de ϵ''_r , puede deberse a:
 - Incertidumbre asociada a la medición de los valores de fase de los parámetros S.
 - Rugosidad en la parte interior de la probeta.
 - Desperfectos en las muestras de los materiales.

5.3. Recomendaciones

- Adquirir muestras de materiales de los cuales se tenga certeza de sus propiedades electromagnéticas.
- Aplicar el método a materiales con altas pérdidas para comprobar la viabilidad del Método Transmisión/Reflexión en la estimación de ϵ''_r .
- Aplicar el método con materiales magnéticos [6].
- Implementar el método con una probeta del tipo guía de onda rectangular [1][6].

- Estudiar las soluciones iterativas que se plantean en [1][6], y comparar los resultados con los aquí expuestos.
- Incluir un estudio de la incertidumbre asociada al método y al procedimiento de medición

APÉNDICE A

CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

La calibración de los equipos es necesaria para cancelar errores y mejorar la precisión en las mediciones. El equipo posee seis diferentes métodos de calibración que difieren en el nivel de precisión requerido en la medición. En nuestro caso se seleccionó el método "Full 2-port", ya que según el manual, éste es el indicado para mediciones de transmisión o reflexión de alta precisión.



Figura A.1: Accesorios necesarios para la calibración. a) Kit de calibración APC-7, b) Adaptadores APC-7 - SMA y cables SMA. [2]

Para realizar la calibración es necesario tener a la mano (ver Figura A.1):

- Equipos:
 - HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer.
 - HP 85064B S-Parameter Test Set.
- Kit de calibración APC-7:
 - Abierto.
 - Corto.

- Carga de 50Ω .
- (4) Adaptadores ACP-7 - SMA Macho.
- (2) Cables SMA Hembra - SMA Hembra.

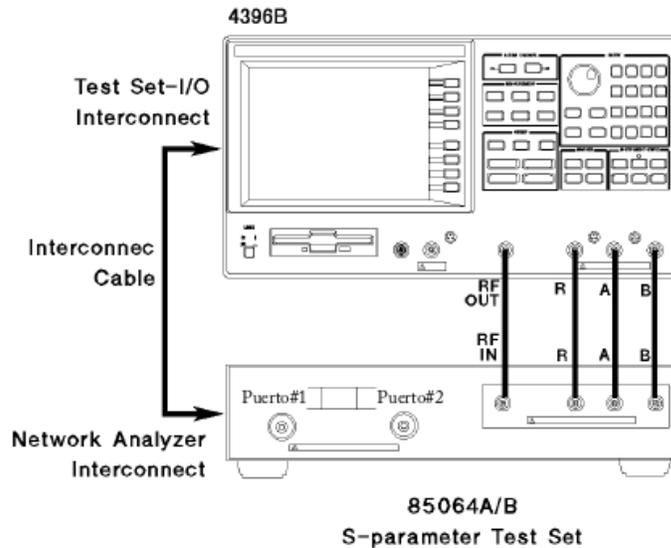


Figura A.2: Conexión de los equipos. [21]

A.1. Calibración con el método Full 2-port.

A continuación se describirá el procedimiento para calibrar el equipo con el método Full 2-port.

1. Verifique que el equipo *HP 85064B S-Parameter Test Set* este conectado al *HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer*, como indica la Figura A.2.
2. Encienda el equipo *HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer*.
3. Oprima **Meas**.
4. Seleccione en la pantalla la opción **ANALYZER TYPE**, y luego **NETWORK ANALYZER**.

5. Conecte los cables al equipo *HP 85064B S-Parameter Test Set*. El Cable#1 en el Puerto 1 y el Cable#2 en el Puerto 2.
6. Oprima **Cal**.

Antes continuar con la calibración del equipo es recomendable verificar que la impedancia característica usada por el equipo este configurada en 50Ω y el factor de velocidad sea 1. Para esto, en el menú de calibración, seleccione **MORE** seguido de **SET Z0** para configurar la impedancia característica, y **VELOCITY FACTOR** para el factor de velocidad.
7. Verifique en la pantalla que el menú **CAL KIT[]** muestre 7mm entre los corchetes, de lo contrario seleccione **CAL KIT[]** seguido de **7mm**.
8. Seleccione en la pantalla **CALIBRATE MENU**, luego **FULL 2-PORT**, seguido de **REFLECTÑ**.

Midiendo la Reflexión.

1. Conecte el ABIERTO al cable del puerto 1.
2. Seleccione en la pantalla **OPEN** para **S11:**. La palabra **OPEN** sera sub-rayada.
3. Desconecte el ABIERTO y conecte el CORTO en el cable del puerto 1.
4. Seleccione en la pantalla **SHORT** para **S11:**. La palabra **SHORT** sera sub-rayada.
5. Desconecte el CORTO y conecte la carga de 50Ω en el cable del puerto 1.
6. Seleccione en la pantalla **LOAD** para **S11:**. La palabra **LOAD** sera sub-rayada.
7. Repita los pasos del 1. al 6. en el cable del puerto 2 para **S22:**.
8. Seleccione en la pantalla **REFLECTÑ DONE**.

Los coeficientes de calibración de reflexión serán calculados y almacenados. En el menú de calibración **FULL 2-PORT**, aparecerá **REFLECTÑ** sub-rayado.

Midiendo la Transmisión.

1. Seleccione en la pantalla **TRANSMISSION**.
2. Conecte los cables del puerto 1 y 2 entre si.
3. Cuando la gráfica en la pantalla se estabilice, seleccione **FWD. TRANS. THRU**. Aparecerá **FWD. TRANS. THRU** sub-rayado.
4. Seleccione en la pantalla **FWD. MATCH. THRU**. Aparecerá **FWD. MATCH. THRU** sub-rayado.
5. Seleccione en la pantalla **REV. TRANS. THRU**. Aparecerá **REV. TRANS. THRU** sub-rayado.
6. Seleccione en la pantalla **REV. MATCH. THRU**. Aparecerá **REV. MATCH. THRU** sub-rayado.
7. Seleccione en la pantalla **TRANS. DONE**.

Los coeficientes de transmisión serán calculados y almacenados. En el menú de calibración **FULL 2-PORT**, aparecerá **TRANSMISSION** sub-rayado.

8. Seleccione en la pantalla **ISOLATION**, luego
9. Seleccione en la pantalla **OMIT ISOLATION**, seguido de
10. Seleccione en la pantalla **ISOLATION DONE** ..

Finalizar la calibración.

1. Seleccione en la pantalla **FULL 2-PORT DONE** para completar la calibración.

Los coeficientes de errores son calculados y almacenados. En el menú de calibración aparecerá **CORRECTION ON off**. A la izquierda de la pantalla se mostrara la notación **C2** indicando que la corrección de errores esta activada.

Para información adicional sobre la calibración revise el Paso 7 del Capitulo 4 (pag. 4-15) de manual "*Task Reference*" del equipo HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer.

Para información adicional sobre las funciones de calibración revise la pagina 36 del Capitulo 5 (pag. 5-36) del manual “*Function Reference*” del equipo HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer.

A.2. Configuración de la extension de los puertos de medición.

El equipo posee la opción de extender los puertos de una distancia cualquiera de los puertos físicos. El equipo toma como *puertos físicos* aquellos donde se llevó acabo la calibración. Antes, es necesario transformar la distancia de extension al tiempo en segundos que tomaría una onda en atravesar tal distancia¹, para esto aplicaremos la siguiente formula [2]:

$$t = \frac{L_i}{c_0}$$

donde t es el tiempo en segundos, L_i es la distancia de la extension en metros y c_0 es la velocidad de la luz en el vacío² en m/s.

A continuacion se describiran los pasos para configura la extension de los puertos:

1. Oprima **Cal**.
2. Seleccione en la pantalla **MORE**, seguido de **PORT EXTENSION**.
3. Compruebe que el valor de **EXTENSION INPUT R**, **INPUT A** y **INPUT B** sea cero.
4. Seleccione **EXTENSION PORT 1** y coloque la extension del Puerto# 1 en segundos.
5. Seleccione **EXTENSION PORT 2** y coloque la extension del Puerto# 2 en segundos.
6. Por ultimo, seleccione **EXTENSION on OFF** para la extension de los puertos **ON**.

¹Asegúrese que el equipo tenga configurado el factor de velocidad en 1.

²Usar 299.792.458 m/s

Para información adicional sobre la configuración de la extensión de los puertos revise la página 5-8 de manual "*Task Reference*" del equipo HP 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer.

REFERENCIAS

- [1] J. Baker-Jarvis. Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. NIST Technical Note 1341, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 1990.
- [2] Urdaneta R. Alvaro A., Junio 2012. Original del autor.
- [3] A. M. Nicolson y G. F. Ross. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 19(4):337-382, Octubre 1970.
- [4] Product note N 8510-3. Measuring Dielectric Constant with HP 8510 Network Analyzer: The Measurement of Both Permittivity and Permeability of Solid Materials. Hewlett Packard.
- [5] C. C. Courtney. Time-Domain Measurement of the Electromagnetic Properties of Materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46(5):517-522, Mayo 98.
- [6] J Baker-Jarvis, M. D. Janezic, J. H. Jr. Grosvenor, y R. G. Geyer. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability. NIST Technical Note 1355, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 1993.
- [7] Yanfei Li Hao Zhou, Guizhen Lu. An Improved Method of Determining Permittivity and Permeability by S Parameters. In *PIERS Proceedings*, Beijing, China, Marzo 2009. Communication University of China.

- [8] T. Iorwerth Jones. Mercury electrodes for measurements on solid dielectrics at radio frequencies. In *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Wireless Section*, volumen 9, pagina 58, 1934.
- [9] C. K. Jen. A method for measuring the complex dielectric constant of gases at microwave frequencies by using a resonant cavity. *Journal of Applied Physics*, 19:649, Julio 1948.
- [10] S. J. Birnbaum, George Kryder y Harold Lyons. Microwave measurements of the dielectric properties of gases. *Journal of Applied Physics*, pagina 95, Junio 1951.
- [11] Jr. Holtum, A.G. Complex dielectric-constant measurements in the 100 to 1,000 megacycle range. In *Proceedings of the IRE*, volumen 38, pagina 883, 1950.
- [12] Franklin H. Branin. The Determination of Complex Dielectric Constants of Absorptive Liquids by Microwave Interferometry. *Journal of Applied Physics*, 23:990, 1952.
- [13] T.E. Talpey. Optical Methods for the Measurement of Complex Dielectric and Magnetic Constants at Centimeter and Millimeter Wavelengths. In *Transactions of the IRE Professional Group on Microwave Theory and Techniques*, volumen 2, pagina 1, 1954.
- [14] J.S. Seeley. A spectrometer method for measuring the electrical constants of lossy materials. In *Proceedings of the IEE - Part C: Monographs*, volumen 105, pagina 18, 1958.
- [15] T. W. Athey, M. A. Stuchly, y S. S. Stuchly. Measurement of radio-frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line - Part I. *IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques*, 30(1):82 86, Enero 1983.

- [16] R.M. Pannell y B.W. Jervis. Two Simple Methods For The Measurement Of The Dielectric Permittivity Of Low-Loss Microstrip Substrates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 29:383, 1981.
- [17] Chen Qian Huang Ka-ma y Luo Ming Zeng Xiao-yong. The Measurement for Permittivity of Materials Based on Artificial Nerve Network. In *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, volumen 1, pagina 272, Marzo 2011.
- [18] Martínez C. Miriam C. y Velásquez G. Vanessa A. Caracterización Electromagnética de los Crudos Tía Juana Medio y de Uso General provenientes del Campo Tía Juana Estado Zulia. Trabajo de grado, Universidad de Carabobo, Febrero 2007.
- [19] C. K. Ong, C.P. Neo, L. F. Chen, V. K. Varadan, y V. V. Varadan. *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. John Wiley & Son, 2004 edición.
- [20] MAURY MICROWAVE CORPORATION. RF Device Characterization Solutions Catalog. Catalogo, 2011.
- [21] Agilent Technologies. *User's guide Agilent 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer*, 4ta edición.
- [22] Ing. Aldo N. Bianchi. MSc. *Sistemas de Ondas Guiadas*, Capítulo 3, pagina 40. Marcombo.
- [23] Agilent Technologies. *Operating Handbook Agilent 4396B Network/Spectrum/Impedance Analyzer Option 010*, 4ta edición. HP 43961A Impedance Test Kit.
- [24] Laboratory for Insulation Research. Table of Dielectric Materials. Technical Report Volumen IV, Massachusetts Institute of Technology, Enero 1953.