

Metodología para el cálculo de la constante dieléctrica y pérdida en una línea de transmisión.

Corredor,Diego(261465). Bejarano,Ari(261456). Neuta,Jairo(261227). Ochoa,Mauricio(261490)

Abstract—This document presents a procedure for the characterization of a dielectric substrate which includes fabrication, measurement and calculation to obtain the dielectric constant and loss tangent of the material is applicable to the characterization of sample in the band 2 – 3 GHz whit permit values in the ranges 2 – 10. A stripline is manufactured with SMA connectors that allow it's connection to the Vector Network Analyzer which provides the full 2 ports parameters of the system. These parameters are them used to obtain the material parameters sought.

Index Terms—Caracterización Sustrato Dieléctrico, FR4, sistema stripline, constante dieléctrica, constante de perdidas, VNA, conector SMA.

I. INTRODUCTION

EL proceso de caracterización de un sustrato dieléctrico, corresponde a un factor de vital importancia en el mundo actual, ya que muchas de las aplicaciones tecnológicas, dependen de las propiedades electromecánicas y del comportamiento que presentan los materiales dieléctricos a altas frecuencias y que influyen de manera directa el desempeño de dispositivos electrónicos tales como acopladores, resonadores y antenas entre otros.

En el momento de realizar la caracterización de un sustrato dieléctrico, se evidencian diversos factores que muchas veces no son controlables y dependen únicamente de las condiciones en las que se desarrolle la prueba de caracterización e indispensablemente de las herramientas tecnológicas con las que se cuente. Estos parámetros constituyen el éxito, prestigio o fracaso de un método empleado para la caracterización del sustrato dieléctrico. En la bibliografía actual existen distintos métodos de caracterización de sustratos dieléctricos, los cuales se ven diferenciados unos de otros, por aspectos tales como; el uso de instrumentación específica, el costo tecnológico de la misma, el rango de frecuencias en las que se puede evaluar, la facilidad de construcción e implementación del método, la precisión en la medición, el acople adecuado entre dispositivos de medida y la capacidad de repetir tantas veces sea necesario el método de caracterización y obtener resultados similares bajo condiciones similares.

En este documento se presenta el desarrollo de la metodología de caracterización de un sustrato dieléctrico en general, empleado en un sistema stripline. Con el objetivo de obtener experimentalmente los valores de constante dieléctrica del sustrato caracterizado y adicionalmente las perdidas dieléctricas del mismo.

Es importante mencionar que desde su creación en el año de 1950 por Robert M. Barrett del centro de investigación de la fuerza aérea de Cambridge, la Stripline corresponde a una

línea de transmisión plana, en la categoría de placas paralelas que soporta modos de transmisión TEM (Transversal Electro-Magnéticos) Útiles para los sistemas integrados de microondas, implementada bajo procesos de construcción mediante métodos de fotolitografía.

En la primera parte del documento, se hace una revisión conceptual de las características de fabricación de los sistemas Stripline, seguido se presenta la medición técnica desarrollada, donde se muestra el procedimiento computacional y experimental del método propuesto, posteriormente se presentan los resultados y análisis de los datos experimentales y finalmente a manera de conclusiones se presentan los aspectos fundamentales en el método de caracterización del sustrato desarrollado.

II. SISTEMA STRIPLINE

A. Estructura de fabricación

El sistema stripline consiste en un tipo de una franja de material conductor generalmente de cobre; con un ancho W y un largo L y un espesor T definido, en medio de dos placas conductoras paralelas, que se referencian como planos de masa, separados una distancia b por un material dieléctrico. El material o sustrato dieléctrico mencionado representa uno de los componentes más importantes que caracterizan una línea stripline; estas características varían de acuerdo al material dieléctrico a emplearse en la fabricación del sistema stripline, pues depende del espesor b del dieléctrico, la permitividad relativa y una constante de perdidas característica que definirán el funcionamiento general de la línea de transmisión. (Ver Figura 1). [1] Para el desarrollo del proyecto, se deben tener en cuenta que el método debe funcionar para una permitividad entre los rangos $2 < \epsilon_r < 10$. El valor de la tangente de perdidas esta dado entre los valores de $0.001 < \tan(\delta) < 0.1$ y la banda de operación está entre $2GHz$ a $3GHz$.

B. Diseño

Para argumentar que el método de caracterización del sustrato empleado es el más adecuado, se plantea un ambiente en el que se tienen distintas muestras de sustratos dieléctricos desconocidos, de los cuales no se conocen los valores de permitividad relativa y de la tangente de pérdidas de cada material, la única información que se ha suministrado es el rango de posibles valores en que se encuentra la permitividad ($2 - 10$), el rango de frecuencias de medición ($2 - 3 GHz$) y la perdidas dieléctricas del material ($0.001 - 0.1$). El objetivo del método propuesto es la de encontrar una buena aproximación del valor de ϵ_r y $\tan(\delta)$ de cada uno de los sustratos seleccionados

Dado el planteamiento anterior lo más indicado es desarrollar un método general que sirva para determinar los parámetros característicos de las distintas placas analizadas, así, entonces se cuenta con una muestra de N sistemas Stripline que servirán como medios para poder caracterizar los distintos sustratos seleccionados, a partir del uso y medición de los parámetros S de las líneas de transmisión, que se logran determinar con el Analizador Vectoriales de redes (VNA). Resulta necesario entonces, fabricar líneas de transmisión para cada sustrato que se desee identificar.

El valor W y L se escogen de la tal manera que sean los valores más convenientes y requeridos en el método empleado, en este caso W se escogió con la intención de construir una línea de la manera más practica y sencilla, esto debido a que si tenemos un W muy pequeño, la construcción se dificultará bastante, y el error debido al ancho medido tendrá una mayor incertidumbre, el precio de esto será, valores de impedancias Z_0 menores a 50 ohms como se verá a continuación.

Es importante resaltar que el metodo de dise;o es independiente del conocimiento de las propiedades del sustrato.

Se diseñaron dos líneas con las dimensiones que se muestran en la tabla.

Baquelita		FR4	
W	39 mm	W	3 mm
L	5 mm	L	56 mm
b	3.2 mm	b	1.6 mm

Tabla I
DIMENSIONES SUSTRATOS

III. SIMULACIÓN

El Primer paso para la simulación consiste en calcular los parámetros característicos de la línea es decir la impedancia (Z) y γ y con las dimensiones seleccionadas previamente, con los datos del epsilon relativo y tangente de pérdidas entregados por el fabricante, esto por medio de las siguientes formulas

$$Z = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{b}{w + 0.441b} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} \quad (2)$$

Con el fin de verificar los valores obtenidos por medio de las formulas se utiliza el programa WCalc figura

Este programa calcula la impedancia característica y las pérdidas totales en db/m, estos valores son utilizados en las siguientes formulas para finalmente obtener los parámetros S que serán utilizados para validar el proceso y algoritmos del método de caracterización:

Los parámetros S son simulados con base a las siguientes Formulas

$$\Gamma_2 = \frac{Z_{ref} - Z_c}{Z_{ref} + Z_c} \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_c \frac{1 + \Gamma_2 \exp(-2\gamma l)}{1 - \Gamma_2 \exp(-2\gamma l)} \quad (4)$$

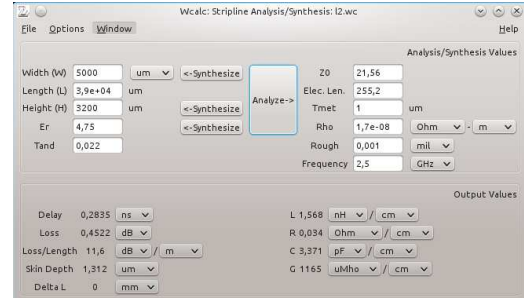


Fig. 1. interfaz WCalc

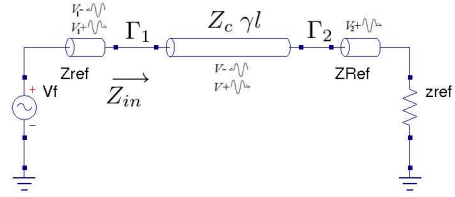


Fig. 2. Modelo Linea De Transmisión

$$S_{11} = S_{22} = \Gamma_1 = \frac{Z_{in} - Z_{ref}}{Z_{ref} + Z_{in}} \quad (5)$$

$$S_{21} = S_{12} = \frac{[1 + \Gamma_1][1 + \Gamma_2]}{\exp(\gamma l) + \Gamma_2 \exp(-\gamma l)} \quad (6)$$

La simulación de los parámetros para las líneas se observan en las figuras 3 y 4 para la baquelita y FR4 respectivamente;

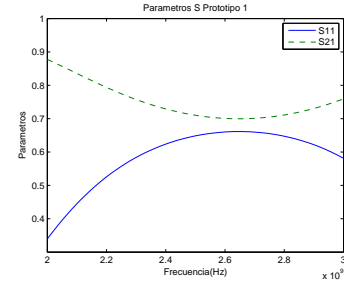


Fig. 3. Parámetros S11 y S21 para el prototipo 1-baquelita

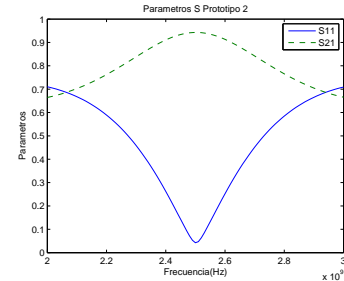


Fig. 4. Parámetros S11 y S21 para el prototipo 2-FR4

Con los parámetros S previamente calculados se encuentra el epsilon relativo y la tangente de perdidas, Siguiendo los pasos indicados en [4].

En las figuras 6 y 7 se observa el epsilon relativo y la tangente de perdidas indicando su valor a la frecuencia central para el prototipo 2(FR4).

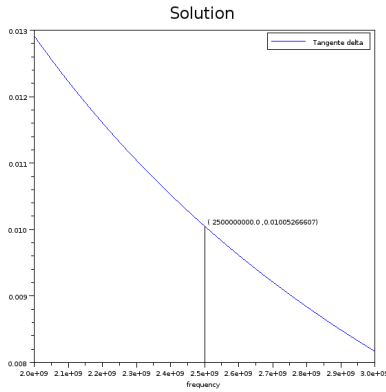


Fig. 5. Tangente de Perdidas Prototipo 1

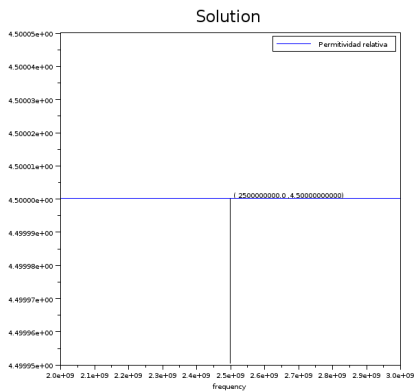


Fig. 6. epsilon Relativo -Prototipo1

En las figuras 8 y 9 se observa el epsilon relativo y la tangente de perdidas indicando su valor a la frecuencia central para el prototipo 1(Baquelita).

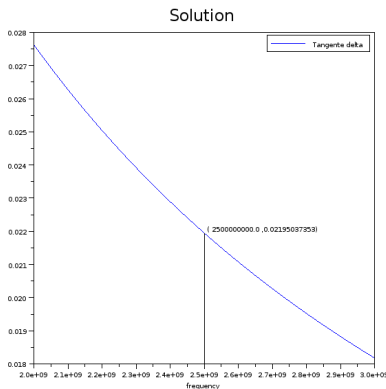


Fig. 7. Tangente de Perdidas- prototipo 2

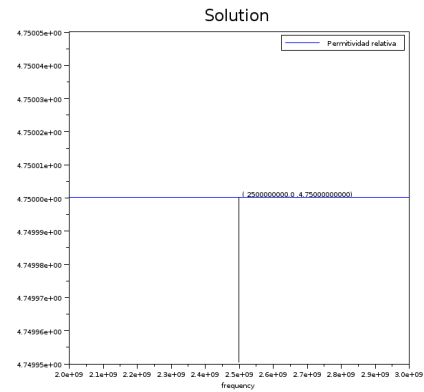


Fig. 8. Epsilon Relativo -Prototipo 2

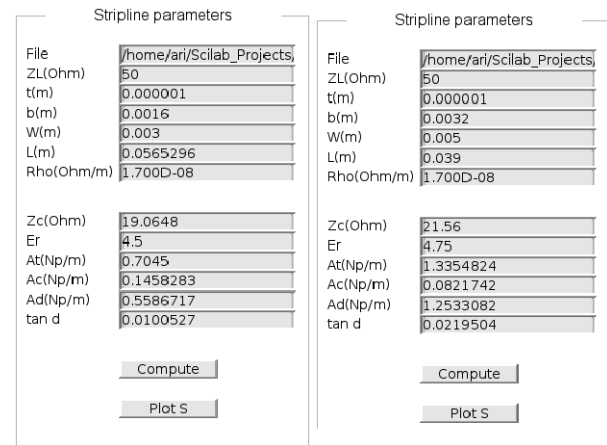


Fig. 9. Resumen características Linea de Transmisión a la frecuencia Central

El Resumen de todos los resultados a la frecuencia de 2.5 GHz obtenidos de la simulación se observa en la figura 9.

Las figuras 5 y 7 correspondientes a la tangente de perdidas cumplen con el valor que se fijo para la simulación de los parámetros S , pero unicamente lo hace a la frecuencia central, debido a que las perdidas totales fueron introducidas de forma constante en todo el intervalo de frecuencias, lo que genera que al aumentar la frecuencia, las perdidas por conducción aumentan originando una disminución en las perdidas dieléctricas.

IV. DATOS EXPERIMENTALES

Con los prototipos de las líneas descritas con anterioridad pasamos a la medición real de los coeficientes de transmisión, el análisis del ϵ_r y la influencia de la frecuencia sobre este.

1) *Prototipo 1-baquelita*: En la figura 10 se observa un comportamiento variable en todo el rango de frecuencias del epsilon relativo, lo que dificulta determinar un valor acertado para el sustrato. Con base a la gráfica que muestra el error absoluto se puede determinar que el epsilon, apropiado es de aproximadamente $\epsilon_r = 5.3$.

La tangente de perdidas disminuye con aumento de la frecuencia como se observo en la simulación, pero debido a las grandes variaciones que presenta, para algunas frecuencia empieza a tener parte negativa.

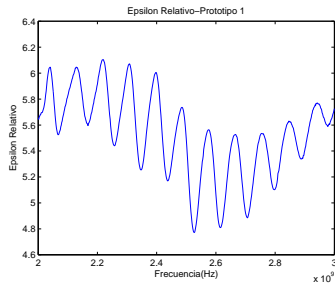


Fig. 10. Epsilon Relativo -Prototipo 1-Baquelita

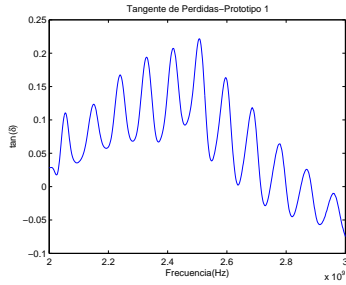


Fig. 11. Tangente de Perdidas-Prototipo 2-Baquelita

2) *Prototipo 2-FR4*: Tomando en cuenta los valores teóricos obtenidos y los resultados experimentales podemos afirmar que la metodología de cálculo empleada opera de forma regular, presentando buenos resultados en la parte alta del rango de frecuencia entre 2,7 GHz a 3 GHz, mientras que en la parte inferior del rango se observan variación bastante diversas alrededor de un epsilon relativo igual a cuatro. Esto se debe a que el beta obtenido en el método tiene un salto debido a la resonancia. El epsilon Relativo para este prototipo se observa en la figura 12

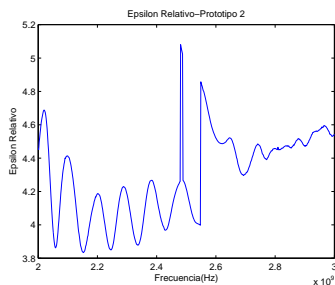


Fig. 12. Epsilon Relativo Prototipo 2-FR4

Vale la pena resaltar que el el pico que se observa en la figura se debe a que la línea tiene una longitud eléctrica de 360 grados en frecuencias cercanas a 2.5 GHz, esto genera un comportamiento poco deseado. En la simulación que se hizo anteriormente este problema no se evidencio debido a que el beta da completamente lineal, pero en la practica este tiene pequeñas curvas que modifica su linealidad. Posteriormente en el análisis de la perdidas se obtuvo un valor cercano a 0,05, para las frecuencias de 2,7 y 3 GHz como se observa en la figura 13, en otras frecuencias se observan valores

inadecuado para las características de la tangente de perdida ya que entre las frecuencias de 2,3 y 2,58 su valor se encuentra por debajo de 0, esto como se menciono antes se debe a los picos obtenidos a la frecuencia de 2,5 GHz

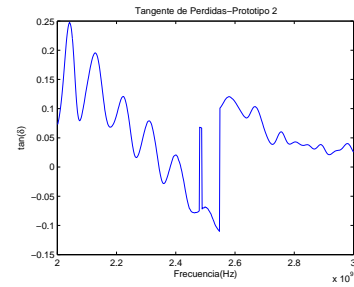


Fig. 13. Tangente de Perdidas Prototipo 2-FR4

V. ANÁLISIS DEL MÉTODO (ERROR)

Una parte del análisis del método consiste en verificar la incertidumbre de los valores medidos, para tener una estimación de la calidad del método, y determinar en qué sección de las frecuencias evaluadas se presenta mayor incertidumbre. Para poder determinar esto se realiza un análisis de las posibles variaciones del epsilon relativo ante una magnitud de ruido adicionada a los parámetros de dispersión, el valor de la magnitud mencionada es de 0,01 El error absoluto para el prototipo 1 cambia constantemente en todo el rango de frecuencias evaluadas como se muestra en la figura 14, El menor error se encuentra para las frecuencias altas.

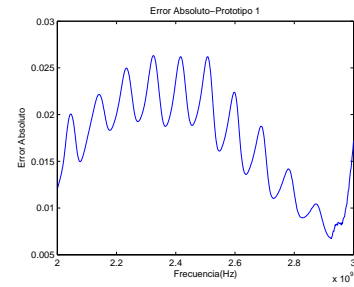


Fig. 14. Error Absoluto prototipo 1-baquelita

El error absoluto para el prototipo 2 esta caracterizado por dos picos en las frecuencias próximas a 2.5 GHz como se muestra en la figura 15, esto se debe como fue mencionado antes a que la línea a frecuencias cercanas a 2.5 GHz tiene una longitud eléctrica de 360 grados lo que genera que el parámetro S11 se igual a cero.

VI. PRUEBA ADICIONAL

En base a los parámetros S suministrados y las dimensiones $W=4\text{mm}$, $b=2\text{mm}$ y $L=10\text{cm}$ se obtienen los resultados mostrados en la figura 16, el epsilon relativo y la tangente de perdidas se observan en las figuras 17 y 18 respectivamente

Como el nombre del material conductor no es suministrado en los parámetros, en un principio se asume el cobre, pero al

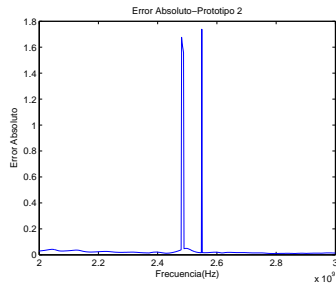


Fig. 15. Error absoluto prototipo 2-FR4

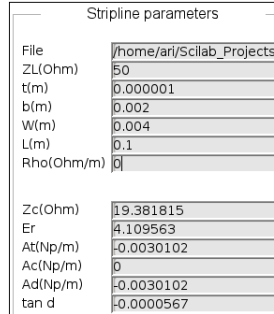


Fig. 16. Resultados obtenidos-P. adicional

ver que las pérdidas totales oscilan en 0 Np/m lo más lógico es pensar que se trata de un conductor perfecto o uno con una muy alta conductividad y un dieléctrico sin pérdidas, por lo tanto las pérdidas del conductor y la tangente delta son 0 o muy cercanas a 0 como se indica en la figura 17.

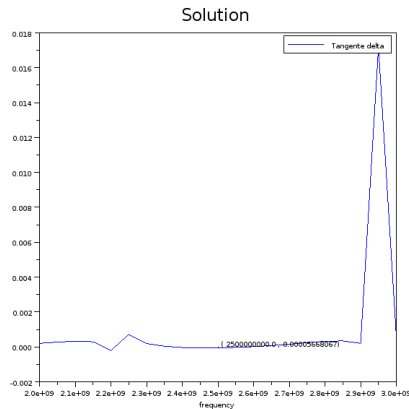


Fig. 17. Tangente de Pérdidas -P. Adicional

La figura 18 muestra la permitividad relativa que según esta es de 4.1 más o menos 0.045, se observan también unos pequeños picos debido que la línea tiene una longitud $\lambda/2$ a la frecuencia de 2.2 GHz, lo que genera que el sistema este acoplado y se produzcan unos valores con una incertidumbre mayor.

VII. CONCLUSIONES

- Los materiales y las dimensiones no son las únicas especificaciones que debemos tener en cuenta a la hora de

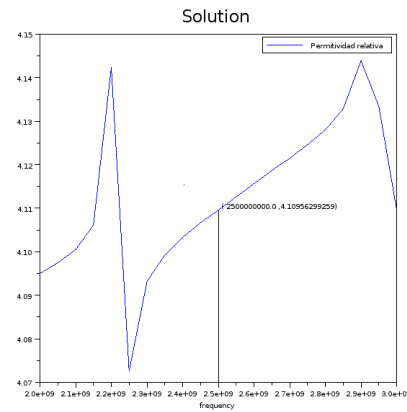


Fig. 18. Epsilon Relativo -P. Adicional

hacer un diseño óptimo, en ocasiones influyen variables como costos o trabajo a ciertas temperaturas, facilidad de construcción, propiedades mecánicas etc. Lo cual permite considerar varias posibilidades de materiales, si se tiene un diseño óptimo.

- El simular es una herramienta de diseño indispensable a la hora de llevar a cabo la caracterización y comprobación del método y del comportamiento del sistema, brindando bases sólidas para emitir juicios correctos.
- Es posible asegurar de forma correcta la influencia de la variación de frecuencia frente a las propiedades eléctricas del material que forma la línea de transmisión, siendo necesario para todo proceso de fabricación y diseño la caracterización de los materiales a emplear y la construcción de prototipos de confiabilidad para la realización de las pruebas y verificación de funcionamiento.
- Los valores identificados de la constante dieléctrica de los materiales empleados fueron acordes a los objetivos planteados para el proyecto, haciendo énfasis en el estudio de la región de operación definida y calculando los errores correspondientes. Con respecto a la región de falla se plantearon posibles fuentes para explicar su comportamiento, como: fuentes de ruido externas, espacios de aire entre los sustratos y líneas acopladas a una frecuencia determinada

REFERENCES

- [1] D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & sons, 1998.
- [2] C. Riedell, M. Steer, M. Kay, J. Kasten, M. Basel, and R. Pomerleau, "Dielectric characterization of printed circuit board substrates," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 39, no. 2, pp. 437–440, apr 1990.
- [3] J. L. Araque-Quijano, "Computation of transmission line parameters from complex reflection and transmission coefficients," October 2011.
- [4] Heping Yue, "Dielectric constant and loss tangent measurement using a stripline fixture" Electronic Components & Technology Conference, 1998. 48th IEEE pp. 1077–1082, May 1998.
- [5] D. A.R., R. Biljic, V. Likar-Smiljanic, and T. Sarkar, "Wideband frequency-domain characterization of fr-4 and time-domain causality," Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, vol. 43, no. 4, pp. 662–667, nov. 2001.