UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Measurement of permittivity at microwave frequencies using coplanar transmission lines

A Degree Thesis

Submitted to the Faculty of the

Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

by

Pedro González Martínez

In partial fulfilment

of the requirements for the degree in

Telecommunications Systems ENGINEERING

Advisor: Joan O'Callaghan

Barcelona, January 2017

Abstract

This thesis studies the possibility of using CPW to measure the permittivity of materials. For this purpose, the material to be measured (MUT) is deposited on the CPW and measurements of S parameters are made from which the characteristics of the MUT can be determined.

Furthemore we had to find the equivalent generic line using ADS and made the data fitting of the measurements taken in the laboratory with the VNA (Vector Network Analyzer) using the optimization tools of this sotware.

We also tried to simulate the CPW with the different samples on the top and study the S-Parameters in those cases. To recreate this system we use HFSS.

Finally we analyze the data obtained, extract the capacity and inductance of the line and study how they vary according to the permittivity of the sample.

We try to perform these measurements in the band from 1 to 50 GHz but due to problems with the software used we decided to reduce the bandwith to 20 GHz.

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau estudia la possibilitat d'utilitzar línies CW per mesurar la permitivitat de materials. Per això es disposa d'un material a mesurar (MUT) sobre la CPW i es realitzen mesures dels paràmetres S a partir dels cuals es pot determinar les característiques del MUT.

Vam haver de trobar la línia genérica equivalent de l'ADS i fer l'ajust de dades, respecte de les mesures adquirides emprant l'analitzador de xarxes vectorials, amb les eines d'optimització d'aquest programa.

També vam tractar de simular la CPW amb les diferents mostres a la part superior i estudiar els paràmetres S en aquests casos. Per crear aquest sistema vam utilitzar HFSS.

Finalment vam haver d'analitzar les dades obtingudes, extreure la capacitat i la inductància de la línia i estudiar com varien d'acord amb la permitivitat de la mostra.

Vam tractar de fer aquests mesuraments a la banda d'1 a 50 GHz, però a causa de problemes amb el software utilitzat vam decidir reduir l'ample de banda fins a 20 GHz.

Resumen

Este Trabajo Fin de Grado estudia la posibilidad de utilizar líneas CPW para la medida de permitividad de materiales. Para ello se dispone el material a medir (MUT) sobre la CPW y se realizan medidas de parámetros S a partir de los cuales se puede determinar las características del MUT.

Además tuvimos que encontrar la línea genérica equivalente de ADS y realizar el ajuste de datos, respecto de las mediciones tomadas en el laboratorio con el VNA (Vector Network Analyzer), usando las herramientas de optimización de este programa.

También tratamos de simular la CPW con las diferentes muestras en la parte superior y estudiar los parámetros S en esos casos. Para recrear este sistema usamos HFSS.

Finalmente analizar los datos obtenidos, extraer la capacidad e inductancia de la línea y estudiar cómo varían según la permitividad de la muestra.

Intentamos realizar estas mediciones en la banda de 1 a 50 GHz pero debido a problemas con el software utilizado decidimos reducir el ancho de banda hasta 20 GHz.

Acknowledgements

I want to dedicate this section to the people who helped me during the thesis. In the first instance I thank my tutor for the knowledge and help he has provided me throughout the entire process.

Secondly to the rest of the projectist working in the D3 specifically to Susana Amorós for the help with the software part.

And finally to the computer support department and the laboratory technicians to solve all the technical problems during the proces

Historial de revisiones y Registro de aprobación

Revision	Date	Purpose
0	10/12/2016	Document creation
1	19/12/2016	Document revision
2	9/01/2017	Document revision
3	11/01/2017	Document revision
4	12/01/2017	Document revision
5	13/01/2017	Final Document revision

DOCUMENT DISTRIBUTION LIST

Name	e-mail
Pedro González Martínez	pgoma94@gmail.com
Joan O'Callaghan	joano@tsc.upc.edu

Written by:	Reviewed and approved by:		
Date	10/12/2016	Date	13/01/2017
Name	Pedro González	Name	Joan O'Callaghan
Position	Project Author	Position	Project Supervisor

Tabla de contenidos

Abstract....2
Resum....3
Resumen....4
Acknowledgements....5
Historial de revisiones y Registro de aprobación....6
1.Introducción....11
1.1 Declaración de propósito....11
1.2 Requerimientos y especificaciones....11
1.3 Métodos y procedimientos....12
1.4 Plan de trabajo 12
1.5 Incidencias....12
2.Estado del arte....13
2.1 Sonda Coaxial....13
2.2 Línea de Transmisión....14
2.3 Free Space....14
2.4 Cavidad Resonante....14
2.5 Placas Paralelas....15
2.6 Tabla comparativa....15
3. Metodología / Desarrollo del proyecto:....16
3.1 Permitividad....16
3.2 Línea Coplanar (CPW)....17
3.3 Simulaciones CPW....18
3.4 Circuito Equivalente ADS....20
3.5 Medidas Prácticas....21
3.6 Ajuste de datos y optimización....21
3.7 Simulaciones HFSS....22
3.8 Simulaciones Momentum / Optimización....23
3.9 Medidas con agua destilada....24
4. Resultados....26
4.1 Resultados Momentum....26
4.2 Resultados medidas prácticas....30
5. Balance....34
6. Impacto ambiental:....36
7. Conclusiones y futuros desarrollos:....37
Bibliografía:....38
Anexo:....40
Glosario....64

Lista de figuras:

Fig.1 :Esquema vectorial tangente de pérdidas....16
Fig.2 : Esquema línea coplanar....17
Fig.3 : Placa de trabajo....18
Fig.4: Simulación CPW con ADS....19
Fig.5: Estación de medidas....21
Fig.6: Estructura línea CPW en Momentum....23
Fig.7 : a) Gota de agua destilada depositada sobre la línea b) Vista de la gota desde la pantalla conectada al microscopio....24
Fig.8: Ajuste de datos de las medidas prácticas del laboratorio, con agua destilada como muestra....25
Fig.9: Capacidad e inductacia vs Er. Línea W=101um g=50um l=10mm....26
Fig.10: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=45um g=25um l=5mm....27
Fig.11: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=20mm banda 1-20GHz....28
Fig.12: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=2,5mm....29
Fig.13: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz....30
Fig.14: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz....31
Fig.15: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz....32
Fig.16: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz....33
Fig. 17: Esquemático de ADS, optimización línea genérica (TLINP) y línea coplanar....42
Fig.18: Herramienta de optimización de ADS (Optimization Cockpit)....42
Fig.19: a) Vista en planta línea coplanar b) Vista frontal c) Vista lateral d) Vista 3D....43
Fig.20: a) Vista en planta de la línea con muestra en la parte superior b) Vista 3D de la línea con muestra....44
Fig.21: Fase parámetro S(1,2) para distintos valores de permitividad de la muestra, (parametric sweep)....44
Fig.22: a) Fase S(1,2) simulación HFSS b) Fase S(1,1), S(1,2) medida práctica c) Módulo S(1,1), S(1,2) simulación HFSS d) Módulo S(1,1), S(1,2) medida práctica e) Carta Smith S(1,1), S(1, 2) simulación HFSS f) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida práctica....46
Fig.23: Materiales dieléctricos creados con Momentum....47
Fig.24: Esquemático de ADS, optimización línea genérica (TLINP) y simulación Momentum....47
Fig.25: Esquemático de ADS recreando la línea con muestra en la parte superior....52
Fig.26: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 1-2GHz línea W=101um g=50um l=20mm....53
Fig.27: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=50um l=20mm 1-2 GHz....54

Fig.28: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 1-2GHz línea W=101um g=81um l=20mm.....55
Fig.29: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=81um l=20mm 1-2 GHz.....56
Fig.30: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 10-15GHz línea W=101um g=50um l=20mm.....57
Fig.31: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=50um l=20mm 10-15 GHz.....58
Fig.32: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 10-15GHz línea W=101um g=81um l=20mm.....59
Fig.33: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=81um l=20mm 10-15 GHz.....60

Lista de tablas:

Tabla 1: Comparativa dispositivos medidores de permitividad.....15
Tabla 2: Tamaño de las diferentes líneas de la placa.....18
Tabla 3: Ajuste de datos medidas teóricas.....20
Tabla 4: Ajuste de datos medidas prácticas.....22
Tabla 5: Coste de herramientas.....34
Tabla 6: Coste de personal 34
Tabla 7: Coste de Material 35
Tabla 8: Time Plan 40
Tabla 9: Diagrama Gantt.....40
Tabla 10: Fase 1, bloque de trabajo.....41
Tabla 11: Fase 2, bloque de trabajo.....41
Tabla 12: Fase 3, bloque de trabajo.....41
Tabla 13: Simulación Momentum Línea W=101um g=50um l=10mm (Zo=50Ω). Banda 1-50 GHz.....48
Tabla 14: Simulación Momentum: W=45um g=25um l=5mm (Zo=50Ω).Banda 1-50 GHz 49
Tabla 15: Simulación Momentum: W=101um g=50um l=20mm(Zo=50Ω).Banda 1-20 GHz 50
Tabla 16: Simulación Momentum:W=101um g=50um l=2.5mm(Zo=50Ω).Banda 1-20 GHz 51
Tabla 17: Valores capacidad e inductancia línea w=101um g=50um l=10mm. Momentum banda 1-50 GHz.....61
Tabla 18: Valores capacidad e inductancia línea w=45um g=25um l=5mm. Momentum banda 1-50GHz.....61
Tabla 19: Valores capacidad e inductancia línea w=101um g=50um l=20mm. Momentum banda 1-20 GHz.....61
Tabla 20: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=50um l=2.5mm. Momentum banda 1-20 GHz.....62
Tabla 21: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz.....62
Tabla 22: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz.....62
Tabla 23: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz.....63
Tabla 24: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz.....63

1. Introducción

1.1 Declaración de propósito

El proyecto se ha llevado a cabo en el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Escola Técnica Superior de Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona (ETSETB).

Pretende analizar el comportamiento de los parámetros S de las líneas coplanares, y como varían, cuando a estas se les añade una muestra en la parte superior con el fin de encontrar su permitividad eléctrica.

Inicialmente realizaremos simulaciones de la línea hasta 50GHz para conocer la dependencia de los parámetros S en función de la frecuencia.

Seguidamente encontraremos la línea genérica equivalente de ADS y con la ayuda de las herramientas de optimización de este programa calcularemos la inductancia y capacidad por unidad de longitud de cada una de las diferentes líneas.

Para analizar como varían los parámetros S y la capacidad e inductancia por unidad de longitud de las líneas cuando colocamos una muestra en la parte superior utilizaremos el software HFSS con la intención de recrear dicha estructura.

De manera paralela realizamos el mismo trabajo pero en este caso usando la herramienta Momentum que contiene ADS que nos permite colocar muestras con diferentes permitividades eléctricas sobre nuestra línea y mediante un mallado de la estructura calcular los campos electromagnéticos y parámetros S.

Por otra parte realizaremos medidas prácticas con la ayuda de la estación de medidas y el analizador de redes vectoriales primero sin ninguna muestra y añadiendo agua destilada después.

1.2 Requerimientos y especificaciones

El dispositivo debe medir la permitividad eléctrica de las muestras depositadas sobre la línea.

El conjunto de líneas debe ser capaz de medir los parámetros S hasta 50GHz. No hay especificaciones para la frecuencia máxima de determinación de la permitividad, no obstante uno de los mayores retos de este proyecto es lograr el máximo ancho en frecuencia dentro de la capacidad de medición disponible.

1.3 Métodos y procedimientos

Esta tesis, que es la continuación de un proyecto anterior que pretendía realizar cálculos sobre la permitividad de muestras biológicas usando CPW, puede no ser definitivo y servir de punto de partida para otros proyectistas con el fin de mejorar diseños y realizar nuevas mediciones.

Los métodos usados para llevarlo a cabo han sido mayoritariamente simulaciones de los parámetros S con diferentes programas entre los cuales se encuentran principalmente ADS, HFSS y Momentum.

Por otra parte han sido utilizadas la estación de medidas y el analizador de redes vectoriales para tomar las medidas prácticas.

Paralelamente se han empleado los algoritmos de optimización que ofrece ADS para realizar el ajuste de datos de medidas reales.

1.4 Plan de trabajo

Anexo 1: a) Bloques de trabajo y b) Diagrama de Gantt

1.5 Incidencias

A lo largo del proyecto, tanto mi tutor Joan O'callaghan como yo, hemos encontrado numerosas incidencias de las que no todas han podido ser solucionadas.

Los inconvenientes principales se han producido durante simulaciones de HFSS para obtener parámetros S debido a que los resultados extraídos no eran fieles a la realidad, habiendo comparado estas simulaciones con medidas reales tomadas en el laboratorio.

Este problema nos llevó a utilizar Momentum con la intención de obtener mejores resultados. Durante el ajuste de datos observamos que las herramientas de optimización de ADS no eran capaces de adaptar adecuadamente las variables de una línea equivalente genérica para que sus parámetros S y los logrados con Momentum fueran lo más parecidos posible. Bajo la supervisión de mi tutor decidimos acortar la frecuencia máxima de las simulaciones hasta 20 GHz en lugar de los 50 GHz previstos, con el fin de solventar estas dificultades.

Por otra parte al inicio de esta tesis se llegó a un acuerdo con un químico que iba a cooperar con nosotros depositando materiales ferro-eléctricos sobre la placa fabricada, debido a problemas técnicos durante este proceso el colaborador no consiguió llevar a cabo la tarea y dicho inconveniente limitó el alcance de nuestro trabajo, ya que carecíamos de materiales que poder depositar sobre las líneas.

2. Estado del arte

Las técnicas de medida de permitividad eléctrica están en constante evolución en la actualidad, debido a su posible aplicación en diversos campos de investigación entre los cuales encontramos la industria alimentaria, ya que esta tecnología tiene la capacidad de cuantificar la composición de cualquier material o alimento.

Por otra parte también se usa en el ámbito biológico para analizar como afectan las radiaciones en los tejidos, para detectar las células cancerígenas debido a que estas tienen una mayor permitividad que las sanas etc.

Existen varios métodos para llevar a cabo estas mediciones: cavidades resonantes, placas paralelas, lineas de transmisión, free space y sonda coaxial entre otros.

Cada uno de ellos tiene sus ventajas e inconvenientes y su uso será más o menos adecuado según el tipo de muestra o medida que se pretenda hacer.

A continuación nos centraremos en cada uno de ellos para comentar su funcionamiento y características. [1]

2.1 Sonda Coaxial

La sonda coaxial de extremo abierto es una sección cortada de línea de transmisión. El material se mide poniéndolo en contacto con la sonda o sumergiéndola en caso de que sea líquido.

Los campos radiados por la sonda varían al entrar en contacto con dicha muestra lo que nos permite medir los parámetros S, S11 en este caso, y relacionarlo con la permitivad.

Uno de los problemas de este método cuando se trata de una muestra sólida es el gap de aire que se puede crear entre esta y la sonda, que puede ser una fuente significativa de error. Puede suceder de la misma manera en caso de que la muestre sea líquida y se creen burbujas en el extremo de la sonda.

Este tipo de prueba es compatible con cualquier analizador de redes vectoriales y su medición es sencilla con este aparato.

2.2 Línea de Transmisión

Este tipo se basa en colocar la muestra a medir sobre dicha línea y partir de los parámetros S, en este caso S11 y S22, se pueden obtener la permitividad eléctrica y magnética.

Esta es la técnica en la que se basa este Trabajo Fin de Grado. Consiste en colocar la muestra de material a medir en la línea de transmisión y, a partir de la medida de sus parámetros S (S11, S21, S22), determinar la permitividad eléctrica y permeabilidad magnética del material.

Estos dispositivos extienden su rango de frecuencias hasta las ondas milimétricas. Un sistema típico de medición es el formado por una línea coaxial o guía de onda, un analizador de redes y una parte software para realizar la conversión de parámetros S a permitividades tanto eléctrica como magnética.

2.3 Free Space

Free Space utiliza antenas para centrar la energía a traves de un trozo de muestra. Este método no entra en contacto con el material a medir y puede aplicarse a bajas temperaturas y en ambientes hostiles.

El sistema ejemplar estaría formado por dos antenas encaradas una frente a la otra y la muestra en el centro, un analizador de redes donde conectar ambas antenas y el software necesario para extraer la permitividad respecto de los parámetros S.

2.4 Cavidad Resonante

Este dispositivo es una estructura de alto factor de calidad que resuena a cierta frecuencia.

La muestra se coloca en el centro de la cavidad y esta induce un cambio en la frecuencia de resonancia. A partir de analizar dicho cambio se puede cuantificar la dependencia de la frecuencia de resonancia con la permtividad con la ayuda de un analizador de redes y un software.

Este procedimiento requiere muestras pequeñas para que los campos en el interior de la cavidad se modifiquen ligeramente para desplazar la resonancia.

Aunque es un método muy preciso también está sujeto a errores. El analizador de redes debe tener una resolución de 1 Hz para medir cambios muy pequeños en el factor de calidad.

Otro inconveniente es la fabricación de la cavidad.

2.5 Placas Paralelas

El método de placas paralelas consiste en colocar una fina lámina de material entre dos electrodos para formar un condensador.

2.6 Tabla comparativa

Sonda Coaxial	• Dispositivo de banda ancha • Muestras con pérdidas, líquidos o semi sólidos.
Línea de Transmisón	• Dispositivo de banda ancha • Muestras con bajas pérdidas y sólidas.
Free Space	• Sin contacto con la muestra • Altas temperaturas. Muestras grandes y planas.
Cavidad Resonante	• Preciso • Muestras con bajas pérdidas y pequeñas.
Placas Paralelas	• Preciso • Bajas frecuencias. Muestras finas y lisas en láminas.

Tabla 1: Comparativa dispositivos medidores de permitividad

3. Metodología / Desarrollo del proyecto:

3.1 Permitividad

Cada material tiene unas características únicas que dependen de sus propiedades eléctricas. Dentro de estas se encuentran la permitividad, permeabilidad, resistividad... No obstante nos centraremos en la permitividad ya que es la que tiene mayor relevancia en nuestra tesis.

La permitividad eléctrica es una constante física que describe como un campo eléctrico afecta a un medio y es afectado por dicho medio. En definitiva explica como interactúan campo eléctrico y medio.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j\,\varepsilon_r''$$

Este parámetro consta de parte real e imaginaria. La parte real de la permitividad cuantifica cuanta energía de un campo eléctrico externo se acumula en el material. La parte imaginaria, también llamada factor de pérdidas, es una medida de cuan disipativo es un material para cierto campo eléctrico externo, es siempre mayor que cero y suele ser menor que la parte real. El factor de pérdidas incluye los efectos de pérdidas dieléctricas y la conductividad.

Cuando la permitividad se dibuja en un diagrama vectorial complejo la parte real e imaginaria están desfasadas 90º. La suma vectorial forma un ángulo llamado δ respecto del eje real. La pérdida relativa de un material es la relación entre la energía perdida y la almacenada.

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = \frac{Energia\ perdida}{Energia\ almacenada}$$

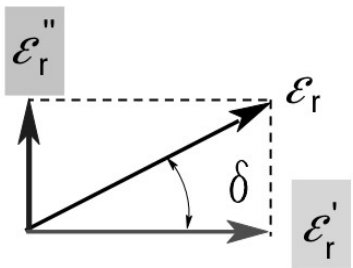


Fig.1 :Esquema vectorial tangente de pérdidas

3.2 Línea Coplanar (CPW)

Las líneas coplanares son un tipo de líneas de transmisiones utilizadas en microondas. Consiste en una pista conductora impresa sobre un sustrato junto a dos de planos de masa colocados a cada lado del conductor central con un determinado gap de separación.

Una de las ventajas de este tipo de líneas son sus dos grados de libertad a la hora de calcular la impedancia característica. Se puede obtener el mismo valor de Zo con diferentes relaciones del ancho del conductor central (W) y gap (g).

Nuestro proyecto pretende estudiar las características de un material cuando es depositado sobre la línea CPW, analizar mediante la estación de sondas los cambios que este produce en la inductancia por unidad de longitud (L) y capacidad por unidad de longitud (C) ya que la permitividad del material debería estar relacionada con los cambios en C y la permeabilidad con los cambios en L.

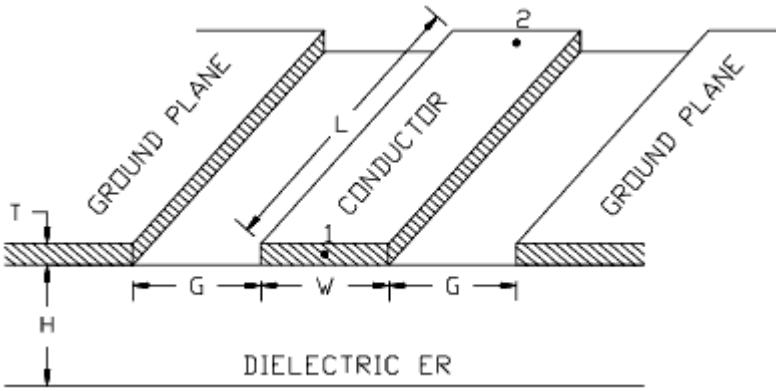


Fig.2 : Esquema línea coplanar

3.3 Simulaciones CPW

La placa sobre la que trabajamos está formada por líneas coplanares con diferentes impedancias y longitudes. Además consta de dos configuraciones distintas para un mismo valor de Zo.

Dicha placa consiste en líneas de oro de 5um de grosor sobre un sustrato de alúmina (Al_2O_3) de 0,635mm.

Z_0 (Ω)	W (μm)	g(μm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	L_5 (mm)
50	101	50	20	15	10	5	2,5
50	45	25	20	15	10		
58	101	81	20	15	10	5	2,5
58	45	40	20	15	10		
42	101	28	20	15	10	5	2,5
42	45	14	20	15	10		

Tabla 2: Tamaño de las diferentes líneas de la placa.

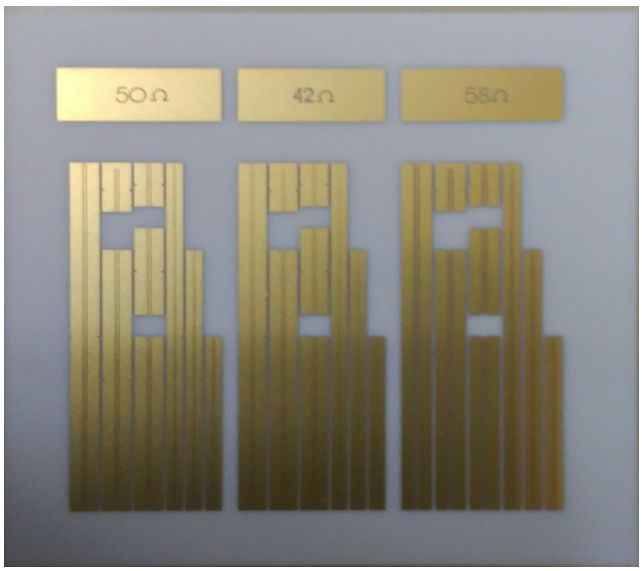


Fig.3 : Placa de trabajo.

Inicialmente simulamos las diferentes líneas con la ayuda de ADS para conocer cual es su comportamiento en el margen de 1 a 50 GHz. Una vez hecho esto pasamos a analizar los parámetros S en módulo y fase.

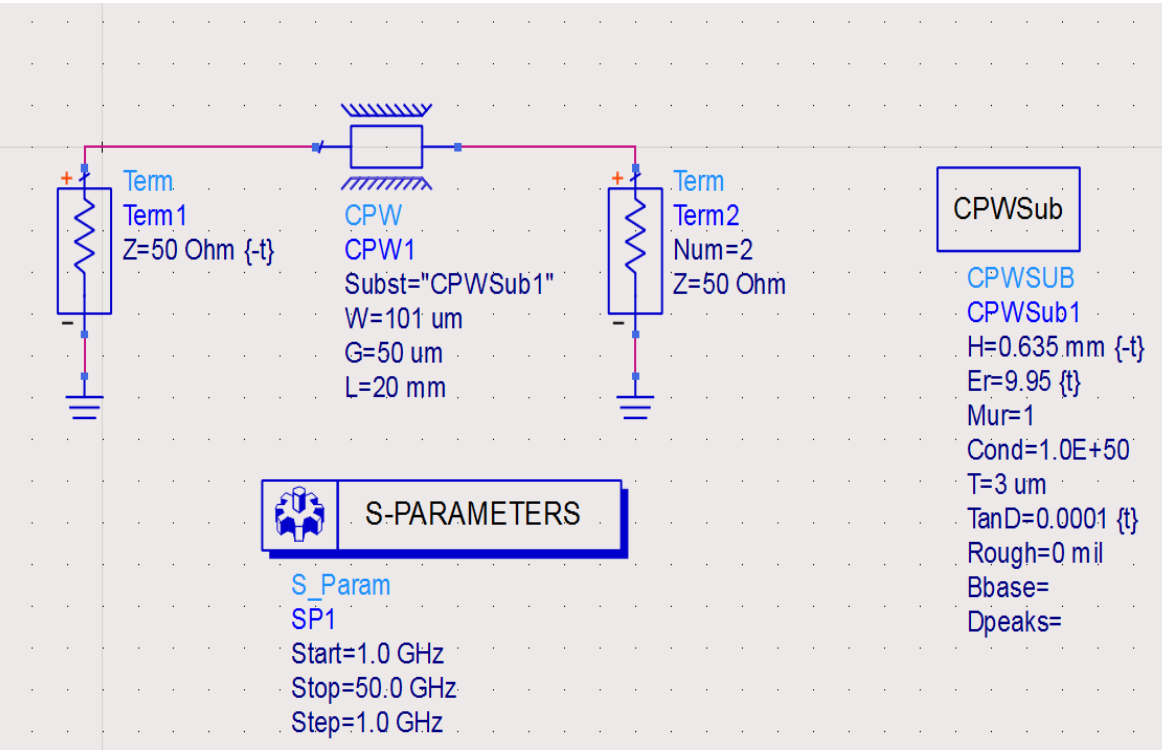


Fig.4: Simulación CPW con ADS

3.4 Circuito Equivalente ADS

Seguidamente buscamos el circuito equivalente de ADS formado por una línea genérica (TLINP) con la intención de caracterizar las diferentes líneas de la placa.

Para llevar a cabo este proceso usamos las herramientas de optimización de este software con la finalidad de que la diferencia entre los parámetros S de la línea coplanar y la genérica sea mínima obteniendo como resultado la impedancia característica y permitividad efectiva.

Anexo 2: Circuito equivalente ADS

Las metas a alcanzar fueron las siguientes:

$$|S_{11}^{cpw} - S_{11}^{tlinp}| = 0\,; \qquad |S_{21}^{cpw} - S_{21}^{tlinp}| = 0$$

Una vez obtenidos dichos parámetros pasamos a calcular capacidad e inductancia por unidad de longitud de cada una de las configuraciones.

Anexo 3: Cálculo capacidad e Inductancia

Z_0 (Ω)	W (μm)	g(μm)	ε_{eff}	C (pF/m)	L (nH/m)
49,73	101	50	5,29	154,15	381,26
49,90	45	25	5,075	150,49	374,71
57,69	101	81	5,31	133,14	443,1
57,70	45	40	5,18	131,48	437,74
41,62	101	28	5,12	181,22	313,92
41,58	45	14	4,96	178,54	308,68

Tabla 3: Ajuste de datos medidas teóricas

3.5 Medidas Prácticas

Por otra parte tomamos medidas prácticas con la ayuda de la estación de medidas y el VNA (analizador de redes vectoriales).

Antes de ello fue necesario utilizar una placa que contenía líneas de 50Ω, cortocircuito y thru para calibrar el analizador (substrato de calibración). Después llevamos a cabo las mediciones de los parámetros S de 1 a 50 GH de las diversas líneas.

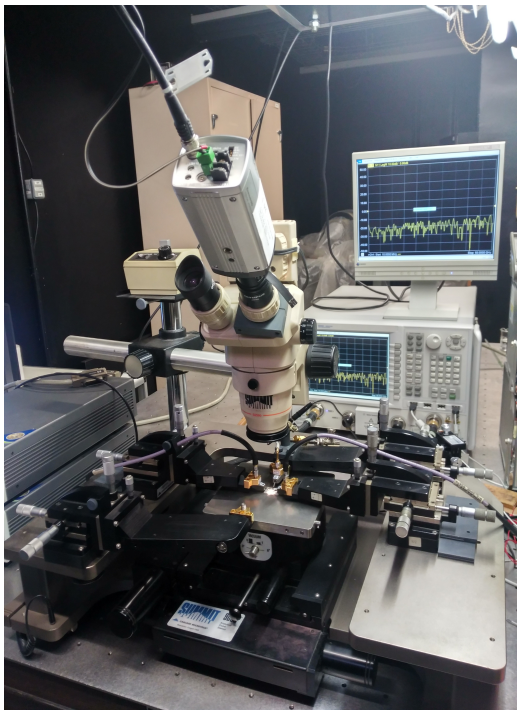


Fig.5: Estación de medidas

Por último extrajimos las medidas obtenidas en formato S2P, el cual se puede añadir a ADS mediante un módulo en el esquemático para realizar simulaciones y optimizaciones.

3.6 Ajuste de datos y optimización

Seguidamente introducimos las medidas prácticas en ADS para mediante la herramienta Optimization Cockpit extraer la impedancia característica y permitividad efectiva de la línea equivalente genérica y poder calcular de esta manera la capacidad e inductancia por unidad de longitud en la banda de 1 a 50 GHz.

La metodología a seguir fue la misma que en el caso de las medidas teóricas de las CPW, manteniendo las expresiones y variables a optimizar de la línea genérica.

Z_0 (Ω)	W (μm)	g(μm)	ε_{eff}	C (pF/m)	Error (%)	L (nH/m)	Error (%)
50,13	101	50	5,27	151,98	1,41	385,29	1,06
49,97	45	25	5,082	150,38	0,07	375,50	0,21
57,67	101	81	5,30	133,066	0,05	442,55	0,12
58,09	45	40	5,15	130,22	0,96	439,42	0,38
42	101	28	5,14	179,93	0,71	317,40	1,11
41,94	45	14	4,99	177,54	0,56	312,29	1,17

Tabla 4: Ajuste de datos medidas prácticas.

3.7 Simulaciones HFSS

De manera paralela construimos diferentes líneas con el software HFSS con la intención de en un futuro colocar una muestra sobre la línea ya que este programa nos permite colocar elementos con la forma y tamaño deseada con un cierto valor de permitividad.

Inicialmente realizamos simulaciones de los parámetros S sin depositar muestra en la parte superior de la línea.

Anexo 4.1: Vista del diseño de la línea en HFSS

A continuación pasamos a colocar la muestra con una permitividad inicial de ε_r=1 y realizamos un barrido de este parámetro hasta ε_r=80 con saltos de 10 analizando como afecta en la fase de S_{21} , esperando obtener un desfase proporcional a la diferencia de permitividades efectivas con muestra y sin.

Anexo 4.2: Simulaciones HFSS con muestra

Anexo 5: Desfase S_{21}

No obstante dejamos de lado este proceso debido a que los resultados obtenidos no encajaban con las medidas prácticas tomadas en el laboratorio.

Anexo 6: comparativa medidas prácticas vs HFSS

3.8 Simulaciones Momentum / Optimización

Debido a la falta de precisión en las simulaciones de HFSS decidimos usar la herramienta Momentum de ADS como alternativa.

Este programa permite colocar capas de material dieléctrico sobre la línea y realizar simulaciones de los parámetros S.

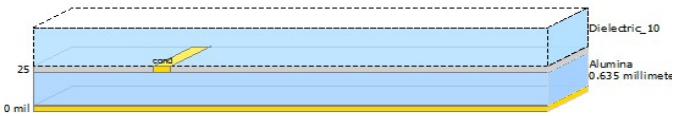


Fig.6: Estructura línea CPW en Momentum

Previamente creamos diversos materiales con diferentes permitividades, manteniendo constante la permeabilidad magnética, que fuimos depositando sobre la línea para finalmente extraer los parámetros S de 1 a 50GHz.

Seguidamente realizamos el ajuste de datos de la misma manera que con las medidas prácticas. En este caso pretendíamos que la diferencia entre los parámetros S obtenidos con Momentum y los de la línea genérica fuera mínima y cercana a cero.

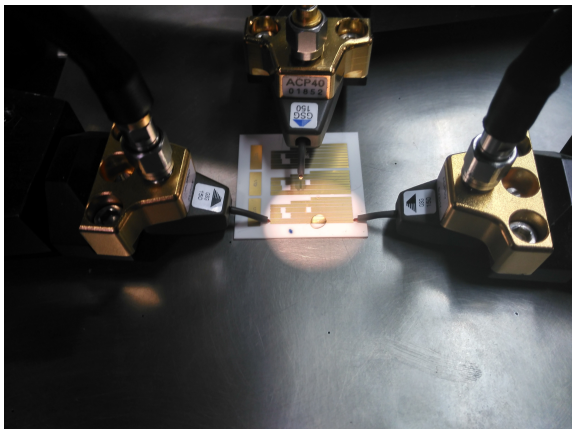
Debido a que los resultados obtenidos y las simulaciones carecían de sentido físico decidimos recortar la banda de frecuencia de 1-20 GHz. No obstante con esta medida no logramos un mejor comportamiento de los parámetros S.

Anexo 7: Simulaciones Momentum

3.9 Medidas con agua destilada

Debido a que el químico encargado de depositar los materiales ferro-eléctricos sobre las líneas no logró llevar a cabo su tarea a tiempo, decidimos realizar medidas prácticas usando líquidos con valores de permitividad conocidos. El problema que se nos presentó fue que la mayoría de líquidos de los que disponíamos no tenían la tensión superficial suficiente para formar gotas definidas y se esparcían a lo largo de la placa. Por otra parte debíamos ser capaces de retirar las muestras sin dañar las líneas, por ello el único candidato viable fue el agua destilada.

Después de calibrar el analizador de redes vectoriales colocamos la placa sobre la estación de medidas y con ayuda de una pipeta depositamos una gota de agua destilada sobre una línea concreta. Realizando mediciones de los parámetros S de 1 a 50 GHz.



a) b)

Fig.7 : a) Gota de agua destilada depositada sobre la línea b) Vista de la gota desde la pantalla conectada al microscopio.

A continuación extrajimos el contenido de las simulaciones en formato S2P y realizamos el ajuste de datos con las herramientas de optimización de ADS siguiendo el mismo método que las veces anteriores con la pequeña diferencia de que en este caso añadíamos la conductividad (σ) y la tangente de pérdidas (tan δ) como parámetros de optimización debido a que la muestra introduce pérdidas.

En este caso el esquemático variaba ligeramente. Tenemos un tramo central modificado por la gota de agua y otros dos en los que esta no llega y por tanto quedan sin modificar, el inconveniente es que no podemos conocer con precisión la localización exacta de la gota, ni la longitud de cada tramo pese a saber la longitud total de la línea, es por ello que debemos optimizar también el valor de las longitudes de cada tramo.

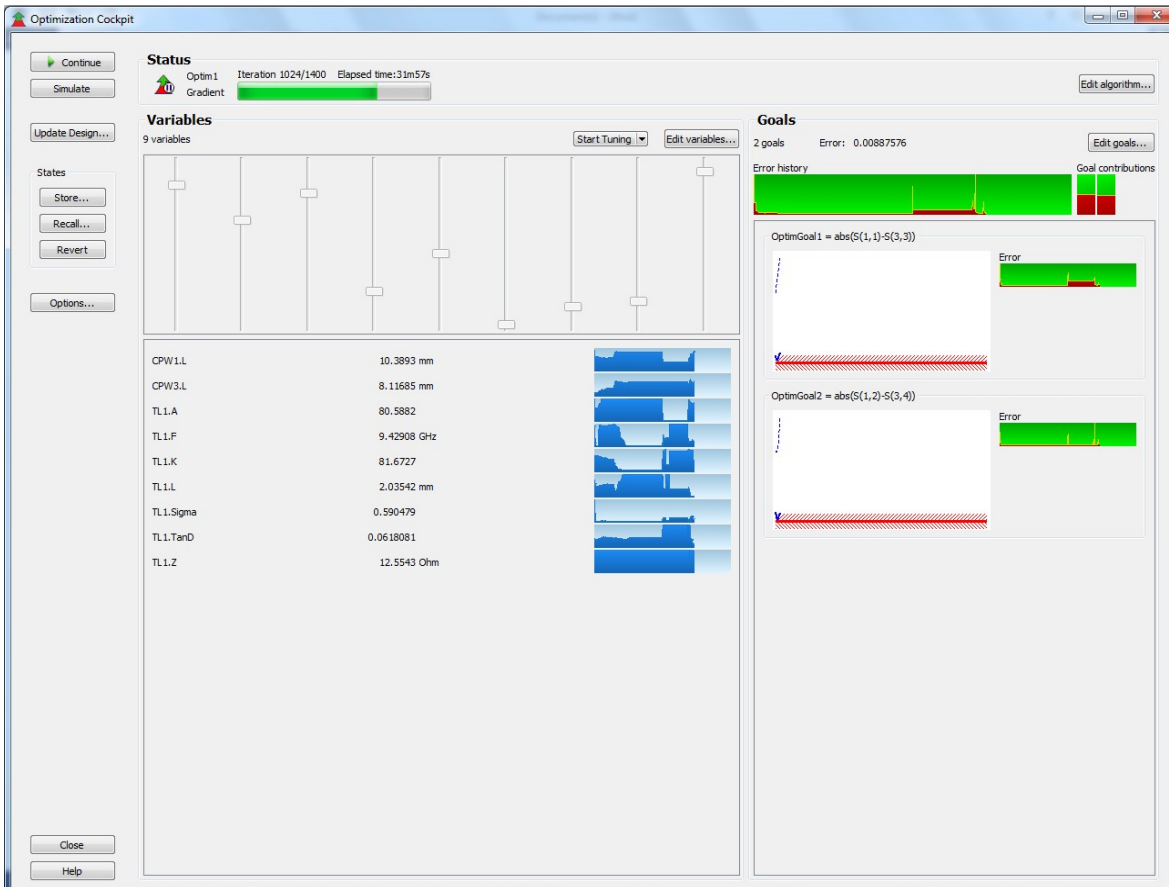


Fig.8: Ajuste de datos de las medidas prácticas del laboratorio, con agua destilada como muestra.

A causa de que el valor de la permitividad relativa del agua no tiene un comportamiento constante en función de la frecuencia decidimos realizar el ajuste en diversas bandas más estrechas. Empezando en la banda de 1-2GHz y finalmente en la de 10-15GHz.

Anexo 8: Medidas con agua destilada

Una vez obtenida la capacidad de la línea con la gota de agua destilada es posible calcular la permitividad, de manera aproximada, de la muestra mediante la relación del valor de la capacidad con y sin muestra. [9]

$$\varepsilon_{eff.w(f)} \approx \frac{C_w}{C_0}$$

C_W → Capacidad de la línea con agua destilada
C_0 → Capacidad sin muestra (aire)

4. Resultados

Una vez realizado el ajuste de datos con la simulaciones de Momentum y medidas prácticas, obtuvimos la impedancia característica y permitividad efectiva, y pasamos a analizar la manera en que la capacidad por unidad de longitud de la línea variaba en función de la permitividad de la muestra.

4.1 Resultados Momentum

Inicialmente realizamos el cálculo de la capacidad de la línea para la banda de 1-50 GHz para diferentes líneas variando la permitividad de la muestra.

a) Línea Z_0=50Ω W=101um g=50um l=10mm

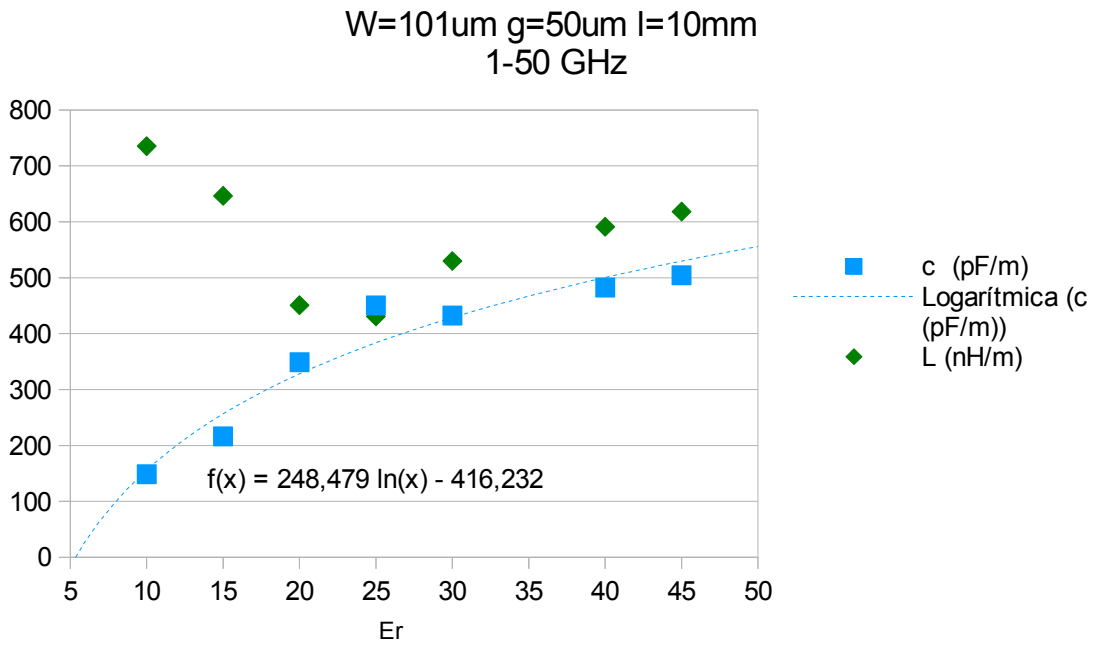


Fig.9: Capacidad e inductacia vs Er. Línea W=101um g=50um l=10mm

Anexo 9.1: Línea W=101um g=50um l=10mm (Z_0=50Ω). Banda 1-50 GHz

b) Línea Z_0=50Ω W=45um g=25um l=5mm

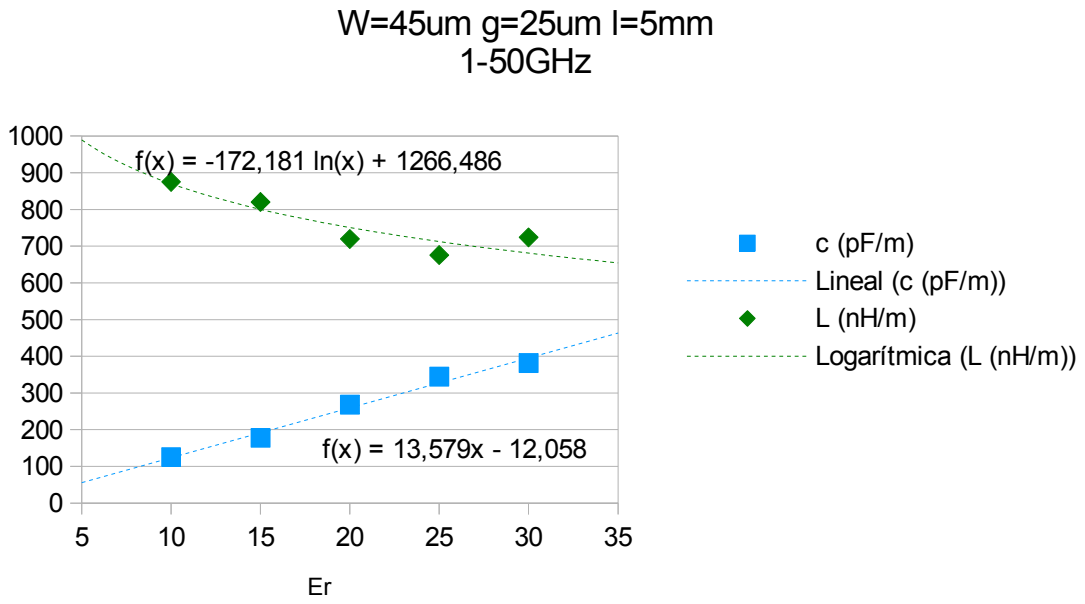


Fig.10: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=45um g=25um l=5mm

Anexo 9.2: Línea W=45um g=25um l=5mm (Z_0=50Ω). Banda 1-50 GHz

Dado que la inductancia de la línea variaba sin modificar la permeabilidad de las muestras porque las simulaciones carecían de sentido físico decidimos repetir el mismo proceso con Momentum estrechando la banda de frecuencia de 1-20 GHz.

c) Línea Z_0=50Ω W=101um g=50um l=20mm

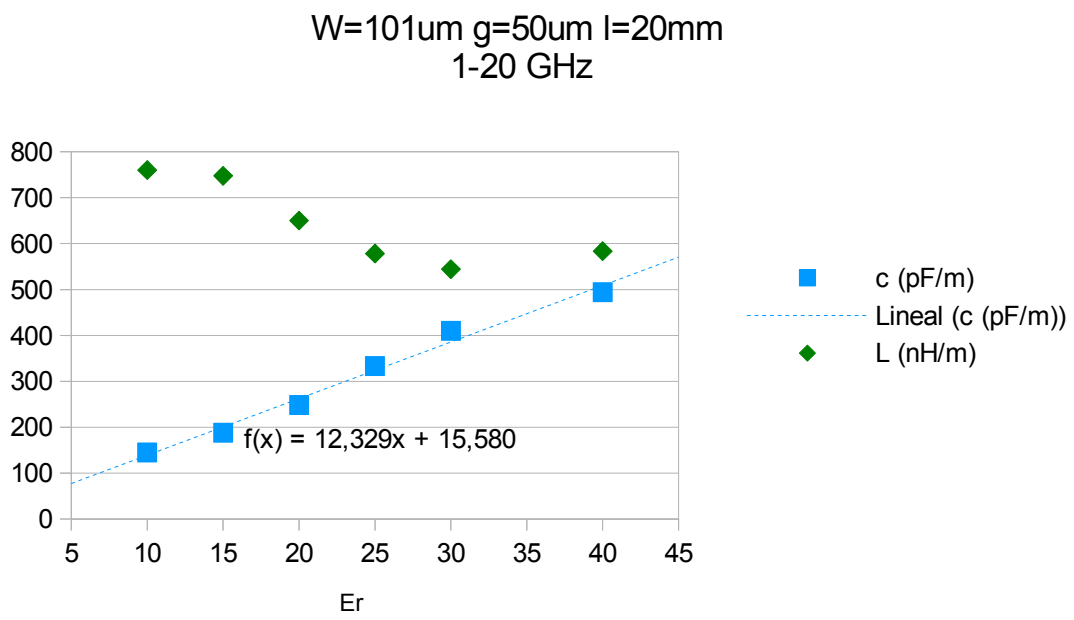


Fig.11: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=20mm banda 1-20GHz

Anexo 9.3: Línea W=101um g=50um l=20mm (Z_0=50Ω). Banda 1-20 GHz

d) Línea Z_0=50Ω W=101um g=50um l=2,5mm

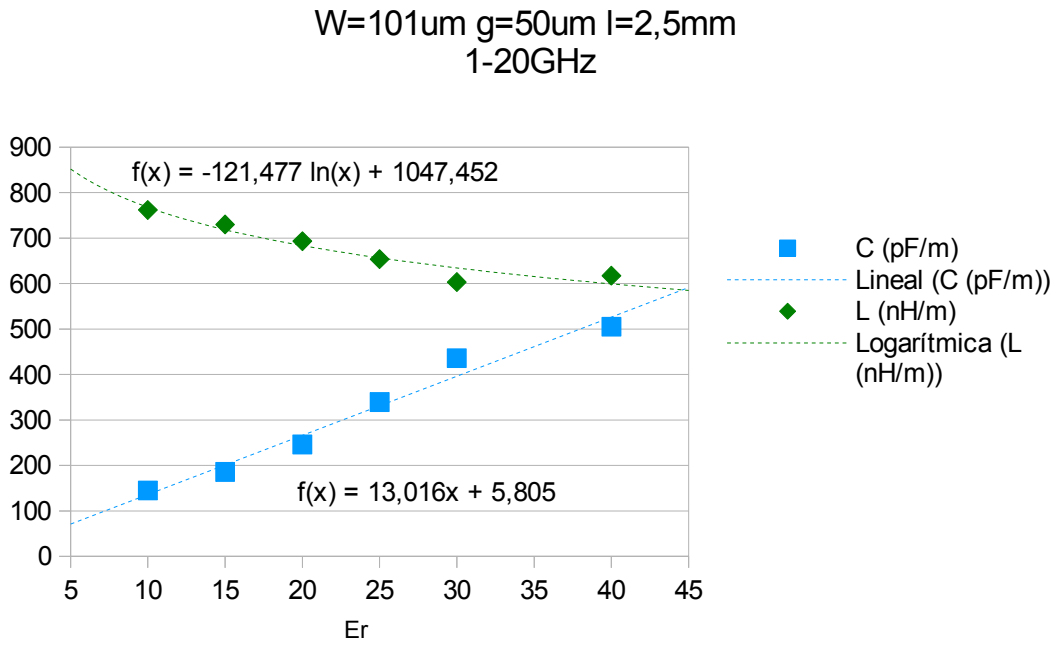


Fig.12: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=2,5mm

Anexo 9.4: Línea W=101um g=50um l=2.5mm (Z_0=50Ω). Banda 1-20 GHz

4.2 Resultados medidas prácticas

En este apartado analizamos la dependencia de la capacidad e inductancia en función de la permitividad de diferentes líneas al añadirles una gota de agua destilada.

Debido a que el valor de la permitividad de este líquido varía con la frecuencia decidimos realizar el ajuste de datos en dos bandas más estrechas, de 1-2 GHz y de 10-15 GHz respectivamente.

a) Línea Z_0=50Ω W=101um g=50um l=20mm. 1-2 GHz

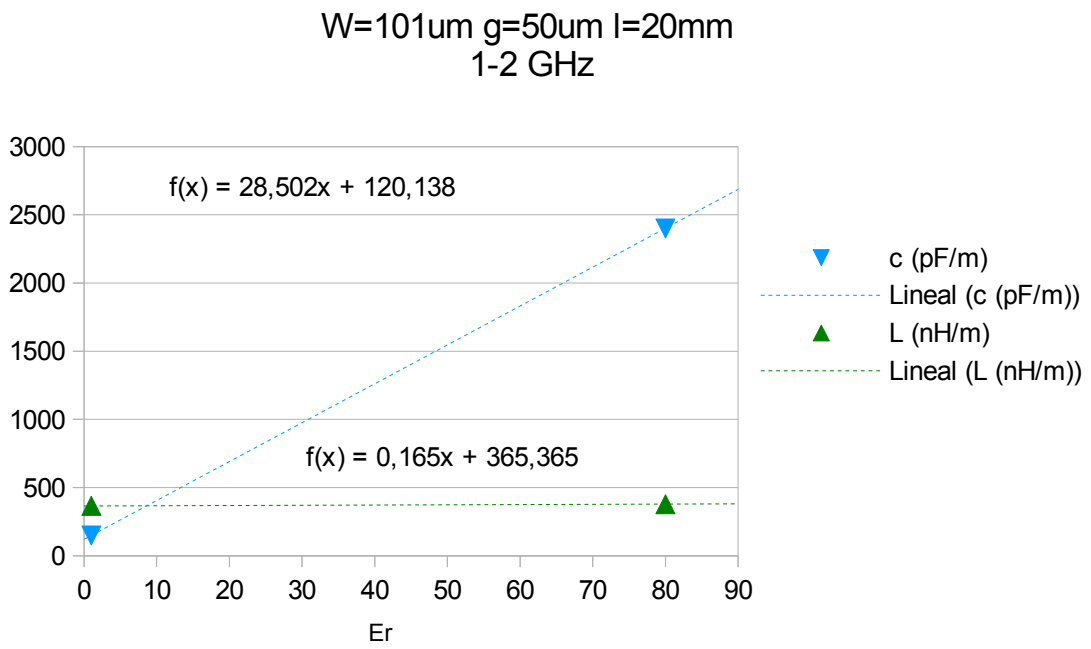


Fig.13: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz

$\varepsilon_{eff.w}$= 16,15

Anexo 10.1: Línea W=101um g=50um l=20mm (Zo=50Ω). Banda 1-2 GHz

b) Línea Z_0=58Ω W=101um g=81um l=20mm. 1-2 GHz

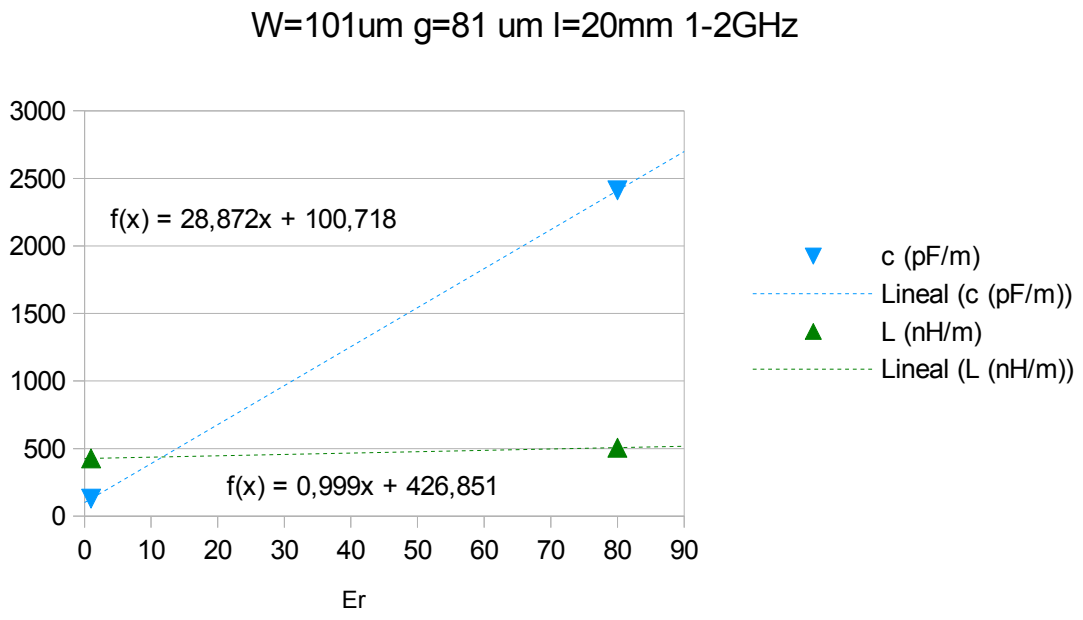


Fig.14: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz

$\varepsilon_{eff.w}$= 18,60

Anexo 10.2: Línea W=101um g=81um l=20mm (Zo=58Ω). Banda 1-2 GHz

c) Línea Z_0=50Ω W=101um g=50um l=20mm. 10-15 GHz

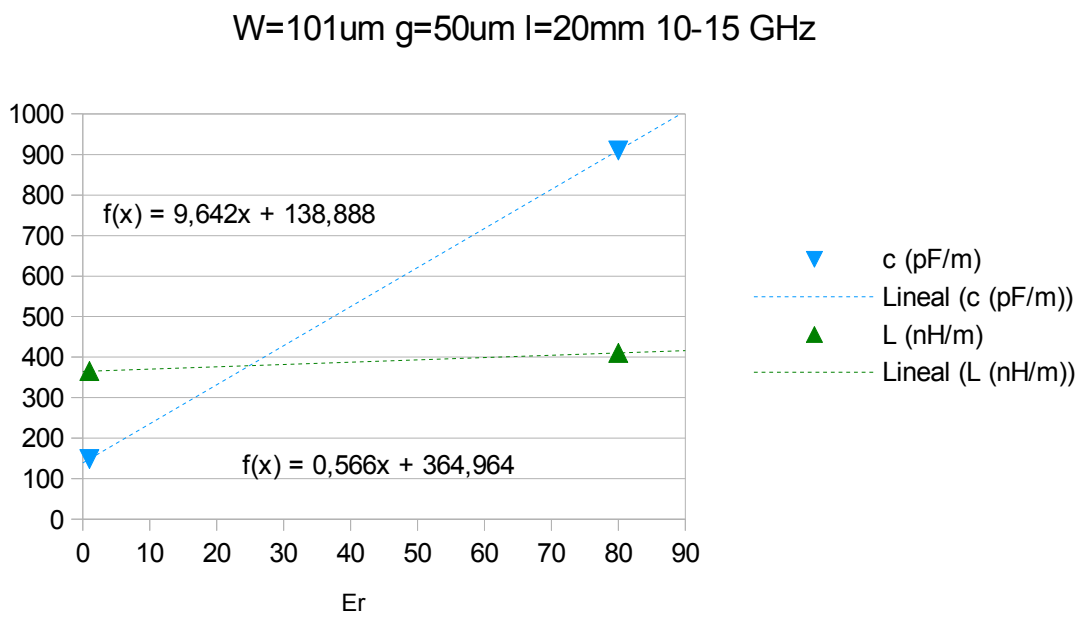


Fig.15: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz

$\varepsilon_{eff.w}$= 6,12

Anexo 10.3: Línea W=101um g=50um l=20mm (Zo=50Ω). Banda 10-15 GHz

d) Línea Z_0=58Ω W=101um g=81um l=20mm. 10-15 GHz

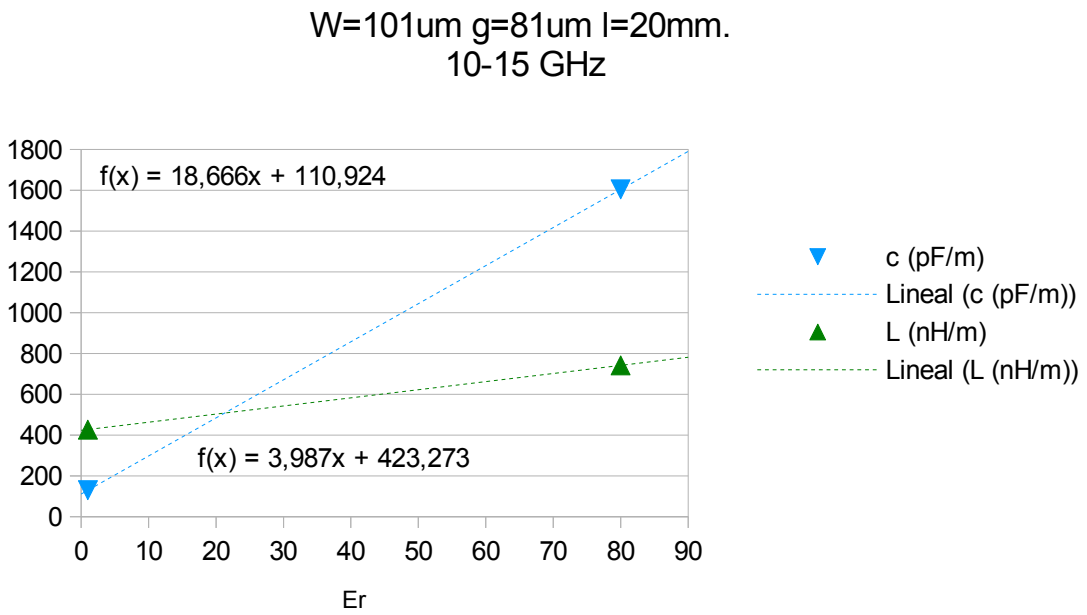


Fig.16: Capacidad e inductancia vs Er. Línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz

$\varepsilon_{eff.w}$= 12,38

Anexo 10.4: Línea W=101um g=81um l=20mm (Zo=58Ω). Banda 10-15 GHz

5. Balance

Coste de Herramientas	
HERRAMIENTA	COSTE
Licencia de (estudiante) ADS	0 €
Licencia de (estudiante) HFSS	0 €
Analizador de redes vectoriales (VNA)	47.500 €
Estación de medidas para CPW	50.000 €
Substrato de Calibración	3.000 €
Ordenador	700 €
Total	101.200 €

Tabla 5: Coste de herramientas

Coste de personal		
PROCESO	HORAS	COSTE
Búsqueda	100	800 €
Simulación y análisis	250	2000 €
Test	15	120 €
Total	365	2920 €

(En este apartado se ha considerado el sueldo de un ingeniero junior de 8 €/h)

Tabla 6: Coste de personal

Coste de Material		
MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO
Circuito impreso (CPW)	1	1.000 €
Total		1.000 €

Tabla 7: Coste de Material

6. Impacto ambiental:

Durante el desarrollo de este proceso no se ha llevado a cabo ningún tipo de tarea que tenga un impacto medioambiental relevante, no obstante se pueden adoptar medidas para que el proceso de fabricación, en caso de que hubieran de volverse a fabricar las placas, o el reciclaje de estas sea más sostenible, ya que los procesos de gestión del material una vez finalizada su vida útil si pueden tener un impacto relevante.

Nuestra placa está formada por un conjunto de líneas coplanares, con conductor de oro (Au), de diversas longitudes e impedancias características depositadas sobre un substrato de alúmina (Al_2O_3).

Inicialmente es necesario destacar que el incremento de la demanda de aparatos electrónicos ha causado un aumento considerable en la producción de residuos de este tipo. Uno de los mayores problemas es el reciclaje de las placas de circuitos impresos, no obstante existen procesos industriales para separar la parte metálica de la no-metálica y recuperar los materiales en gran parte.

Una vez acabada la vida de nuestra placa sería posible la separación de la parte metálica, oro en este caso, de la no-metálica, alúmina, y mediante un proceso de refinamiento reutilizar el oro.

Existen compañías que se dedican a realizar este tipo de tareas con la intención de reutilizar o disminuir el impacto ecológico que causa la exposición de ciertos materiales usados en electrónica al tratamiento que reciben cuando acaba su vida útil, en caso de desecharse de manera incorrecta.

7. Conclusiones y futuros desarrollos:

Como principal conclusión a extraer del proyecto podemos decir que se observa una variación en la capacidad de una línea coplanar en función del valor de permitividad de la muestra al realizar el experimento con agua en un margen de frecuencias de 1 a 2 GHz y 10 a 15 GHz. Por ello, podemos afirmar que, con ciertas limitaciones, el sistema puede utilizarse para la determinación de la permitividad eléctrica de materiales.

De la misma manera ocurre con la fase del parámetro S_{21} cuando se deposita muestra.

Por otra parte es fundamental destacar que los métodos software usados no son adecuados para simular nuestro sistema de medidas de permitividad debido a que una vez extraída la información la inductancia, la cual debería mantenerse constante, varia en función de la permitividad relativa de la muestra.

Como consecuencia abandonaría la vía seguida en este proyecto respecto de los programas HFSS y Momentum y plantearía otras herramientas como alternativa.

En cuanto a los futuros desarrollos y tareas a llevar a cabo se encuentran las de:

- Depositar materiales ferro-eléctricos sobre las líneas para poder realizar mediciones prácticas y cuantificar la variación de la capacidad y fase de S_{21} en función de la permitividad.
- Encontrar líquidos con la suficiente tensión superficial para formar gotas y que puedan limpiarse de manera sencilla cuando se pretenda retirar la muestra sin dañar los conductores de oro.
- Simular de nuevo la estructura de la línea coplanar, con y sin muestras, usando un software distinto, CST por ejemplo.
- Comparar los resultados con otros métodos de medida de permitividad (placas paralelas, cavidades resonantes, sonda coaxial...)

Bibliografía:

[1] Agilent Technologies, “Basics of Measuring the dielectric properties of materials”, 2006

[2] Agilent Technologies, *Advanced Design System 1.5. User's Guide*. February 2001.

URL: http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads15/pdf/usrguide.pdf

[3] Ansoft Corporation, *User's guide – High Frecuency Structure Simulator*, June 2005.

URL: http://anlage.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf

[4] Muhammad Taha Jilani, Muhammad Zaka ur Rehman, Abid, Muhammad Khan, Muhammad Talha Khan, Syed Muzamil Ali *“A Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials”* ITEE Journal, December 2012

[5] M. F. S. Kashif Saeed, Matthew B. Byrne, Ian C. Hunter Ed., “*Planar Microwave Sensors for Complex Permittivity Characterization of Materials and Their Applications”*. In'Tech, 2012

[6] J. Hinojosa , *“S-parameter broadband measurements on-coplanar and fast extraction of the substrate intrinsic properties,”* IEEE Microw. and Wireless Comon. Lett., Vol. 11, No. 2, 80–82, 2001.

[7] J. Hinojosa, “*Dielectric permittivity measuring technique of film-shaped materials at low microwaves frequencies from open-end coplanar waveguide”* 2008

[8] Hussein Kassem, Valérie Vigneras, Guillaume Lunet. *“Characterization techniques for materials' properties measurement*” University of Bordeaux

[9] Scoot Skidmore, *“Analysis and Optimization of Broadband Measurement Cells for Characterization of Dielectric Polymer Films”*, University of South Florida, January 2012. pag. 25

[10] Rainee N. Simons *“Coplanar Waveguide Circuits. Components and Systems”* John Wiley & Sons 2001.

ISBN: 0-471-16121-7

[11] Juan García y J.M. Torrents. *“Measurement of mortar permittivity during setting using a coplanar waveguide”*. UPC Barcelona, February 2010

[12] Beatriz García Baños. “*Estudio y Optimización de Sensores de Microondas para la Caracterización y Monitorización de Materiales en Procesos Industriales*”, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia

[13] Davidson and Cole, “*Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol, and n-propanol*” Vol. 9

[14] Nihad I. Dib and Linda P.B. Katehi “*Theoretical characterization of coplanar waveguide transmission lines and discontinuities*” November 1992

[15] Jochem T. Roelvink and Samir Trabelsi, “*Planar transmission-line permittivity sensor and calibration method for the characterization of liquids, powders and semisolid materials*”, Augost 2015

[16] James C. Booth, Nathan D. Orloff, Jordi Mateu, Michael Janezic, Matthew Rinehart, James A. Beall "*Quantitative permittivity measurements of nanoliter liquid volumes in microfluidic channels to 40 GHz*" , ieee transactions on instrumentation and measurement, vol.59, 12 December 2010

[17] R.B. Marks and D.F. Williams "*A general waveguide circuit theory"*, J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol., vol.97, no.5, pp.533-562, September 1992. pag. 541

Anexo:

1. Gantt y bloques de trabajo

		12/09/2016	19/09/2016	26/09/2016	03/10/2016	10/10/2016	17/10/2016	24/10/2016	31/10/2016	07/11/2016	14/11/2016	21/11/2016	28/11/2016	05/12/2016	12/12/2016	19/12/2016	26/12/2016
	Week	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Task / WP																
	M1-Kick-Off	x															
Phase 1	100- Bibliography study and search		x	x													
	200-CPW measurements			x	x												
	301- ADS equivalent circuit				x	x	x										
	M2-Phase 1/ADS fitting of CPW measurements						x	x									
Phase 2	302-Permittivity via HFSS simulations							x	x	x	x						
	M3- Phase 2/ Material permittivity											x					
Phase 3	303-M matrix data fitting (tentative)											x	x	x			
	400-Thesis preparation							x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	M4-Thesis																x

Tabla 8: Time Plan

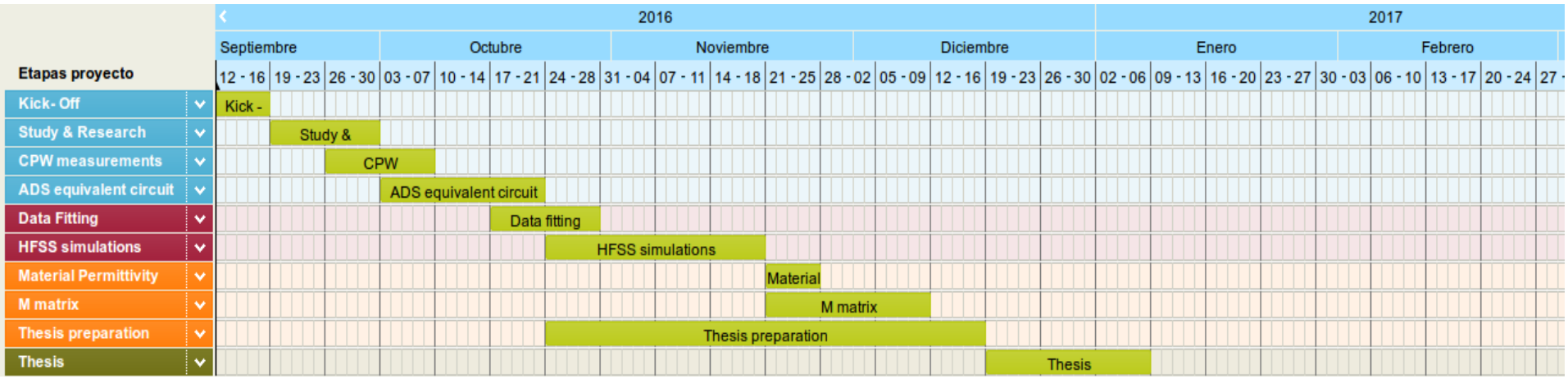


Tabla 9: Diagrama Gantt

Project: Phase 1	WP ref: (1)	
Major constituent: Research, simulation	Sheet 1 of 3	
Short description: This phase includes the bibliography research and the cpw simulations using ads.	Planned start date:12/09/16 Planned end date: 24/10/16 Start event: 12/09/16 End event: 24/10/16	
Internal task T1: Bibliography study and research Internal task T2: CPW Measurement Internal task T3: ADS equivalent circuit Internal task T4: ADS fitting of CPW measurement	Deliverables:	Dates:

Tabla 10: Fase 1, bloque de trabajo

Project: Phase 2	WP ref: (2)	
Major constituent: Simulation, test	Sheet 2 of 3	
Short description: This phase includes CPW simulations using HFSS with different samples.	Planned start date: 24/10/16 Planned end date:21/11/16 Start event: 24/10/16 End event: 21/11/16	
Internal task T1: Permittivity via HFSS simulation Internal task T2: Material permittivity	Deliverables:	Dat es:

Tabla 11: Fase 2, bloque de trabajo

Project: Phase 3	WP ref: (3)	
Major constituent: Simuation	Sheet 3 of 3	
Short description: This phase inlcudes the possibility of calculate the M matrix and the thesis preparation	Planned start date: 21/11/16 Planned end date: 16/12/16 Start event: 21/11/16 End event: 16/12/16	
Internal task T1: M matrix data fitting Internal task T2: Thesis preparation	Deliverables:	Dat es:

Tabla 12: Fase 3, bloque de trabajo

2. Circuito equivalente de ADS

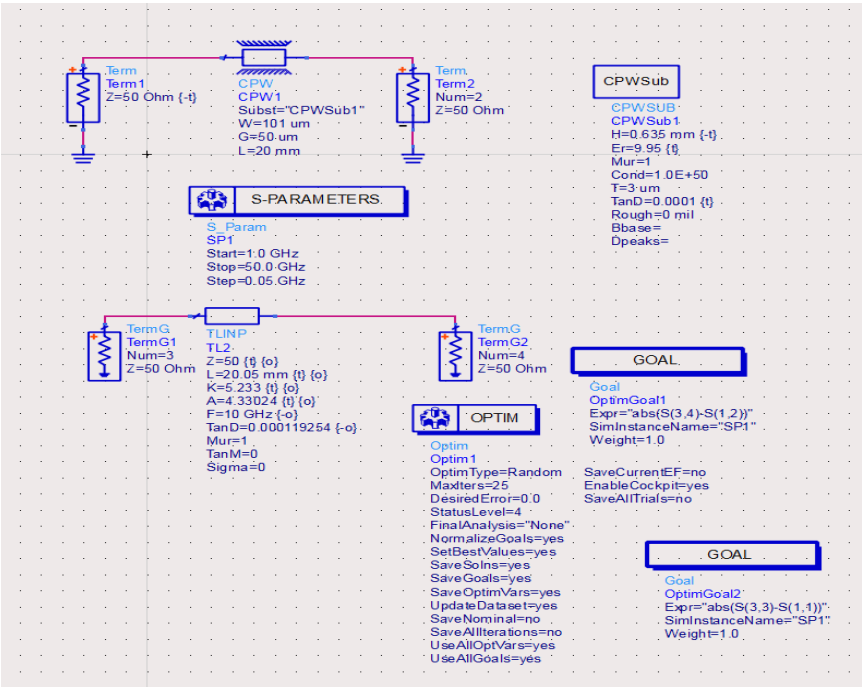


Fig. 17: Esquemático de ADS, optimización línea genérica (TLINP) y línea coplanar.

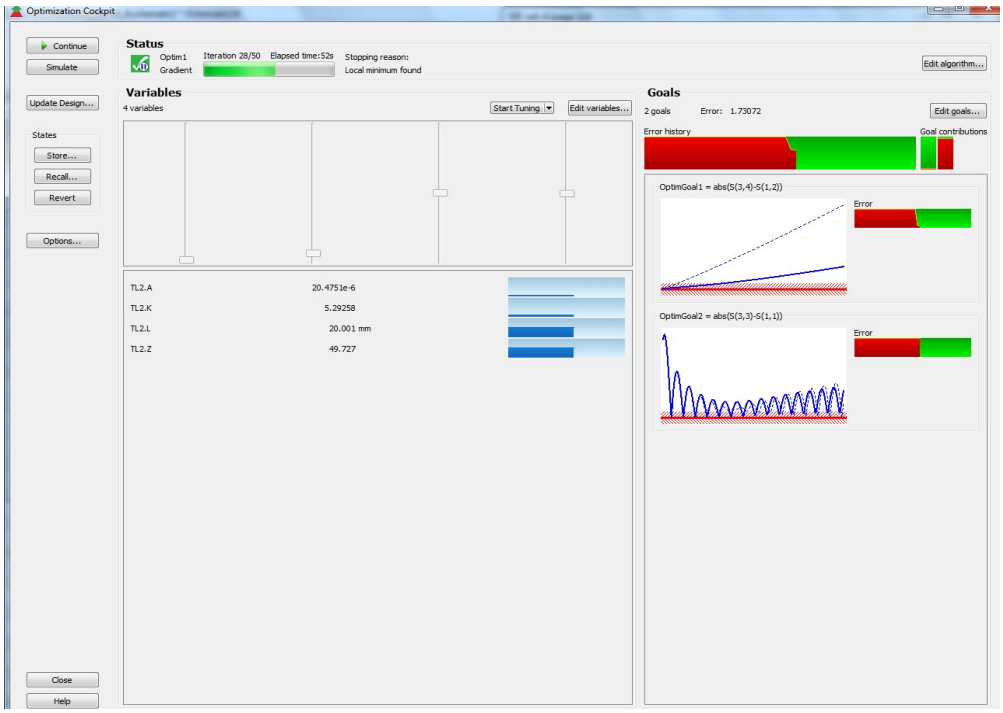


Fig.18: Herramienta de optimización de ADS (Optimization Cockpit)

3. Cálculo capacidad e inductancia

$$\begin{cases} v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \\ Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases} \quad \begin{cases} L = \frac{1}{v_p^2 \cdot C} \\ L = Z_0^2 \cdot C \end{cases} \quad \begin{cases} C = \frac{1}{Z_0 \cdot v_p} \\ L = \frac{Z_0}{V_p} \end{cases}$$ [17]

4. Vistas del diseño de la línea en HFSS

4.1 Simulaciones sin muestra

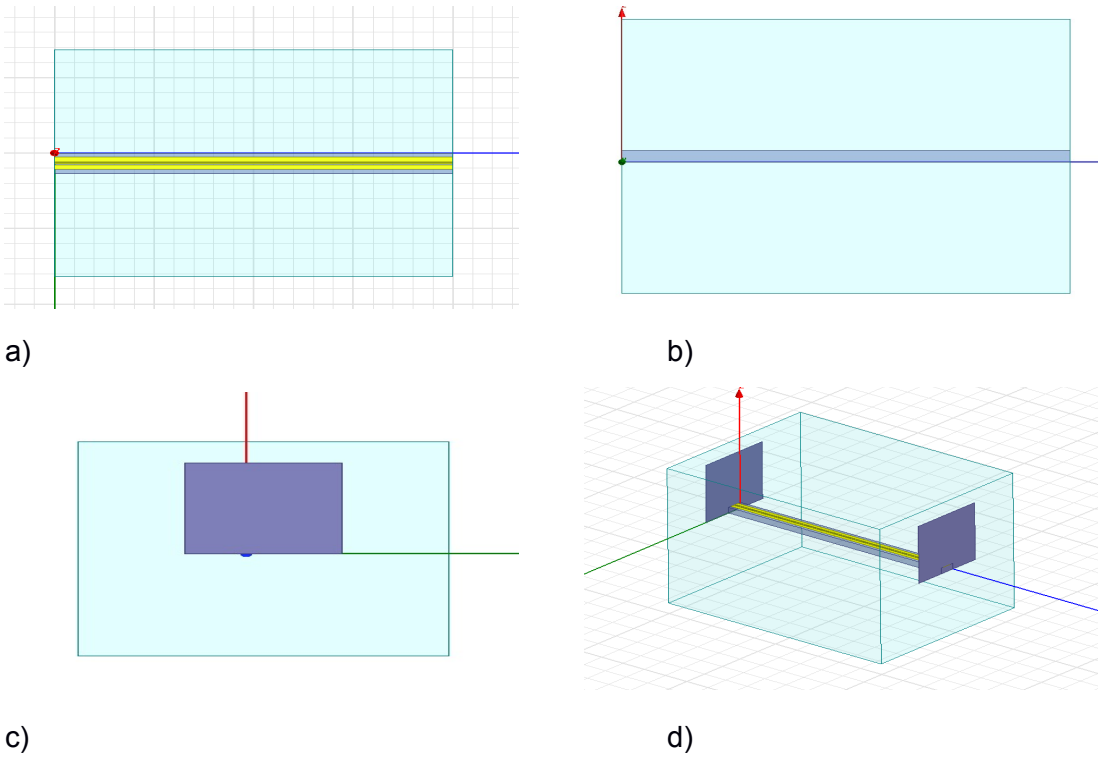
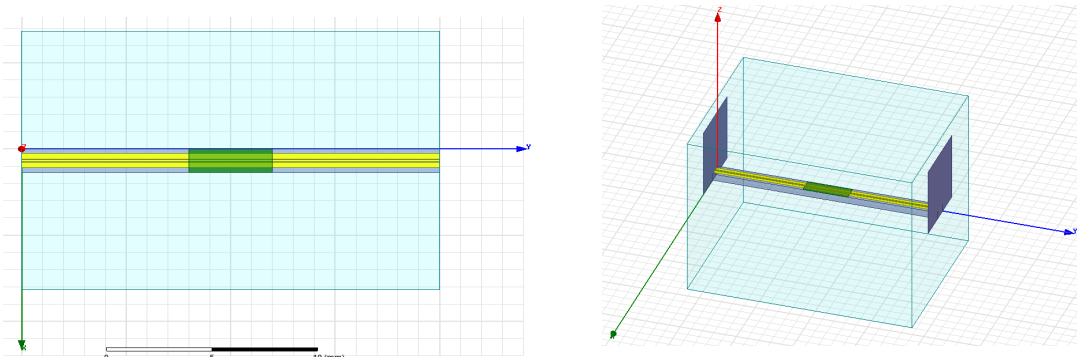


Fig.19: a) Vista en planta línea coplanar b) Vista frontal c) Vista lateral d) Vista 3D

4.2 Simulaciones con muestra



a) b)

Fig.20: a) Vista en planta de la línea con muestra en la parte superior b) Vista 3D de la línea con muestra.

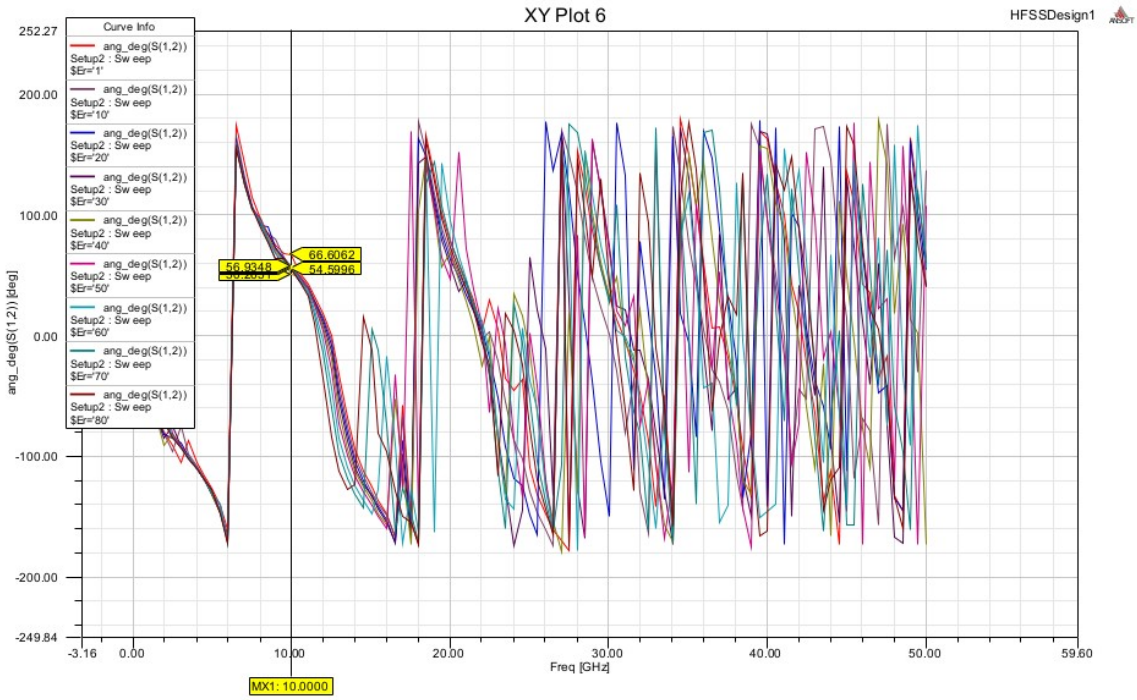


Fig.21: Fase parámetro S(1,2) para distintos valores de permitividad de la muestra, (parametric sweep).

5. Desfase parámetro S(2,1)

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} 0 & e^{-\phi} \\ e^{-\phi} & 0 \end{bmatrix}$$

Donde Φ=γl es el cambio de fase y L la longitud de la línea.

γ=α + jβ ≈ β En el caso de bajas pérdidas.

$$\beta=\frac{j\cdot\omega}{c}\cdot\sqrt{\varepsilon_{eff}}$$

$$\Delta\phi=(\beta_0-\beta_c)\cdot l=\frac{j\cdot\omega}{c}\cdot l\cdot(\sqrt{\varepsilon_{eff.o}}-\sqrt{\varepsilon_{eff.c}})$$

β_0 → Fase sin muestra (aire)

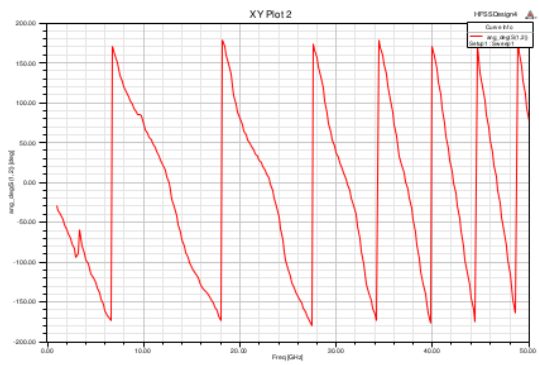
β_c → Fase con muestra

$\varepsilon_{eff.o}$ → Permitividad efectiva sin muestra (aire)

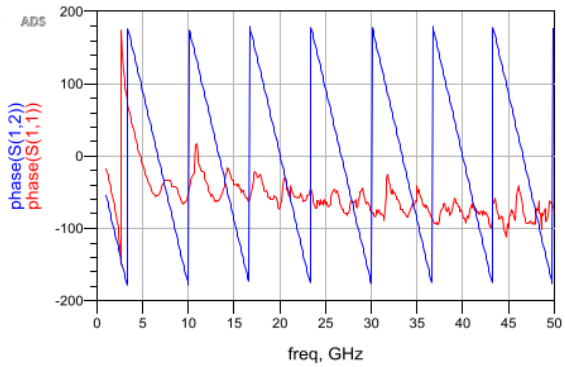
$\varepsilon_{eff.c}$ → Permitividad efectiva con muestra

[8] [9] [11]

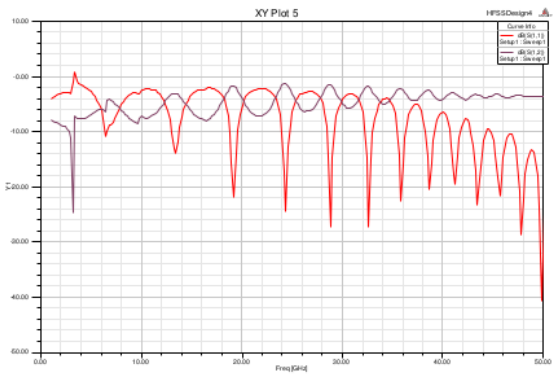
6. Comparativa medidas prácticas vs HFSS



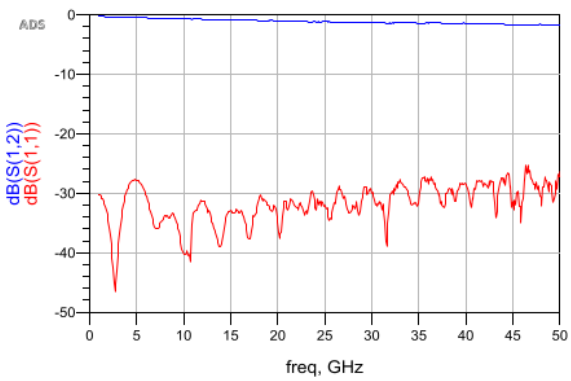
a)



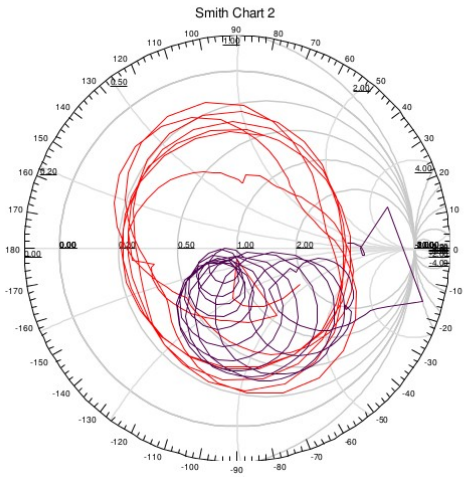
b)

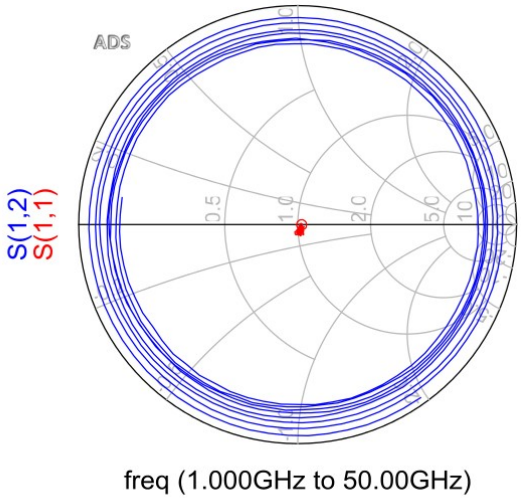


c)



d)





e) f)

Fig.22: a) Fase S(1,2) simulación HFSS b) Fase S(1,1), S(1,2) medida práctica c) Módulo S(1,1), S(1,2) simulación HFSS d) Módulo S(1,1), S(1,2) medida práctica e) Carta Smith S(1,1), S(1, 2) simulación HFSS f) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida práctica.

7. Simulaciones Momentum

View Technology for this Library: MyLibrary_lib

Conductors | Dielectrics | Semiconductors | Surface Roughness

Material		Permittivity (Er)			Permeability (MUr)		Djordjevic			
Material Name	Library	Real	Imaginary	TanD	Real	Imaginary	Type	TanD Freq	Low Freq	High Freq
Alumina	MyLibrary_lib	9.95		0.0001	1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Alumina1	MyLibrary_lib	9.6			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_1	MyLibrary_lib	1			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_10	MyLibrary_lib	10			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_100	MyLibrary_lib	100			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_15	MyLibrary_lib	15			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_20	MyLibrary_lib	20			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_25	MyLibrary_lib	25			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_30	MyLibrary_lib	30			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_35	MyLibrary_lib	35			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_40	MyLibrary_lib	40			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_45	MyLibrary_lib	45			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_50	MyLibrary_lib	50			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_55	MyLibrary_lib	55			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz
Dielectric_60	MyLibrary_lib	60			1		Svensson/Djordjevic	1 GHz	1 KHz	1 THz

Add Dielectric | Add From Database... | Remove Dielectric

OK | Cancel | Apply | Help

Fig.23: Materiales dieléctricos creados con Momentum.

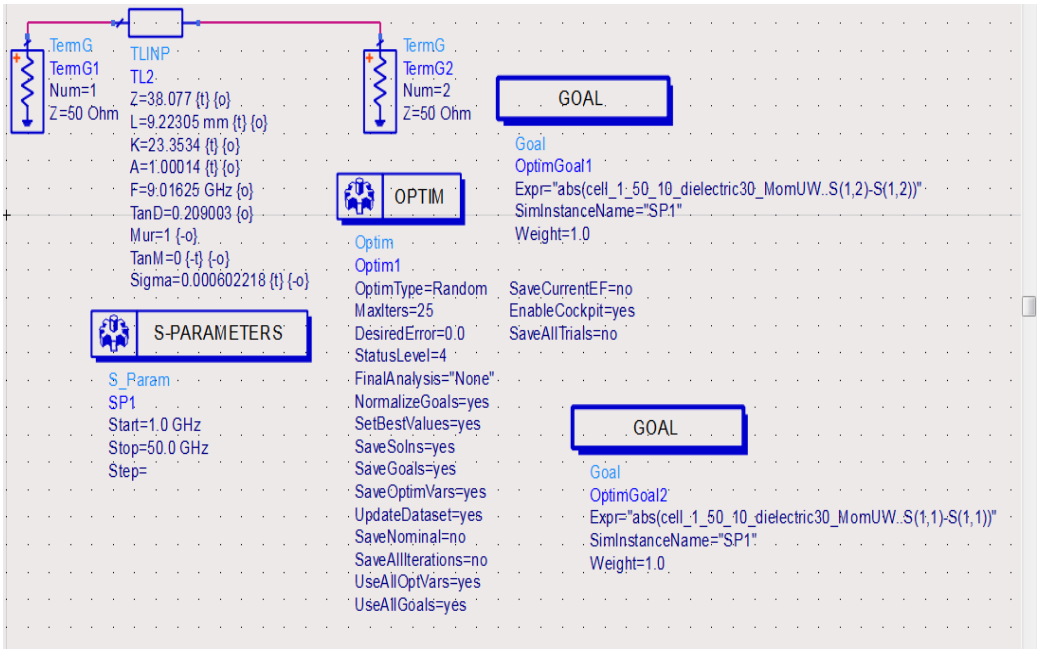


Fig.24: Esquemático de ADS, optimización línea genérica (TLINP) y simulación Momentum

7.1 Línea W=101um g=50um l=10mm (Zo=50Ω). Banda 1-50 GHz

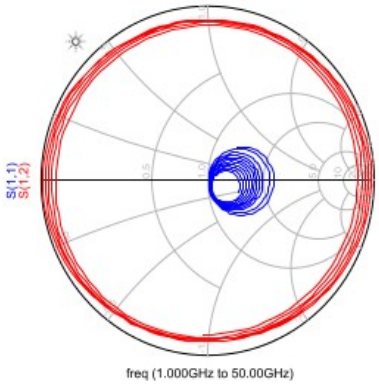
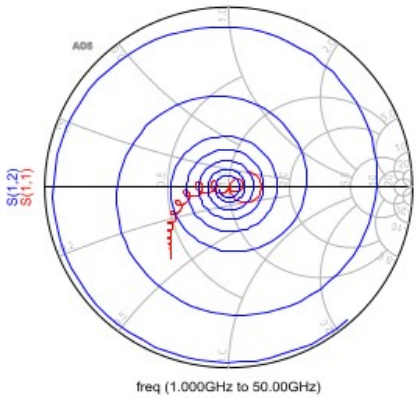
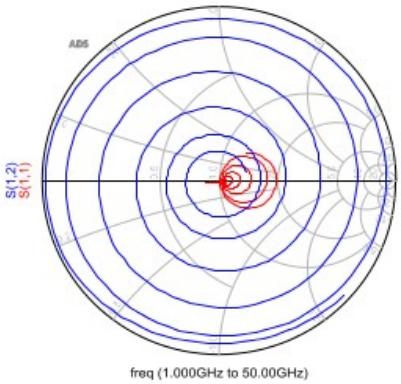
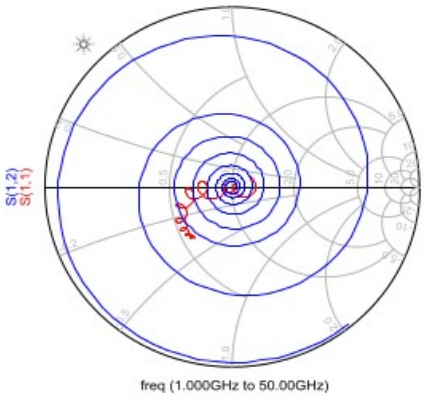
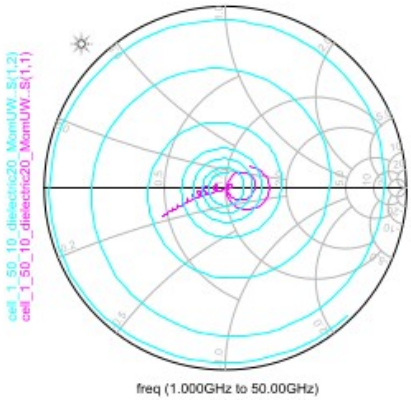
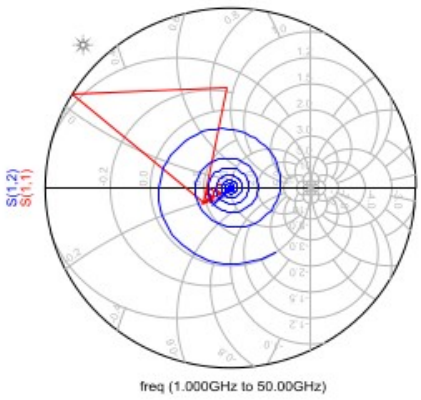
ε_r	Plot	ε_r	Plot
10		25	
15		30	
20		40	

Tabla 13: Simulación Momentum Línea W=101um g=50um l=10mm (Zo=50Ω). Banda 1-50 GHz

7.2 Línea W=45um g=25um l=5mm (Zo=50Ω). Banda 1-50 GHz

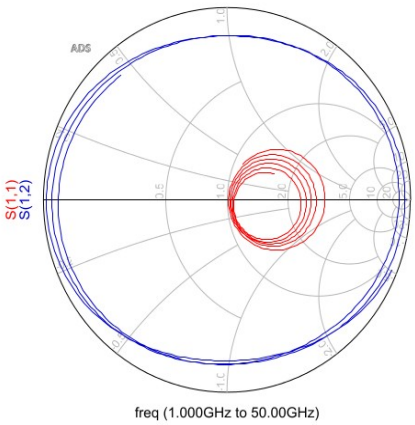
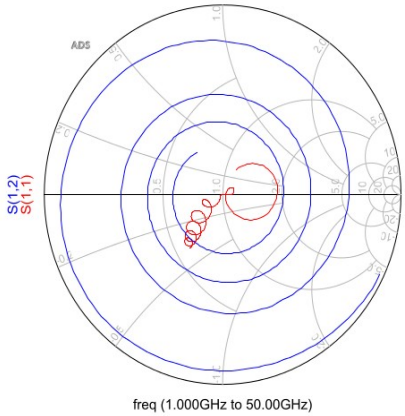
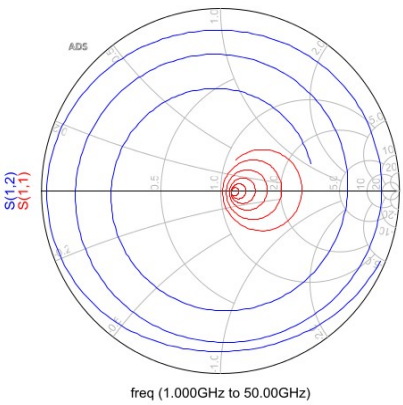
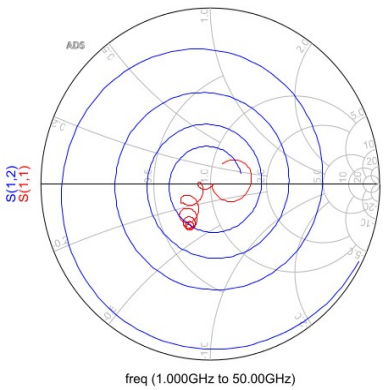
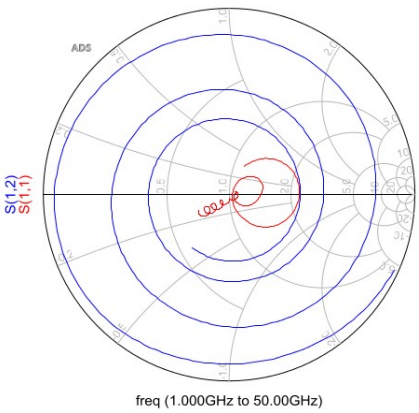
ε_r	Plot	ε_r	Plot
10		25	
15		30	
20			

Tabla 14: Simulación Momentum: W=45um g=25um l=5mm (Zo=50Ω).Banda 1-50 GHz

7.3 Línea W=101um g=50um l=20mm (Zo=50Ω). Banda 1-20 GHz

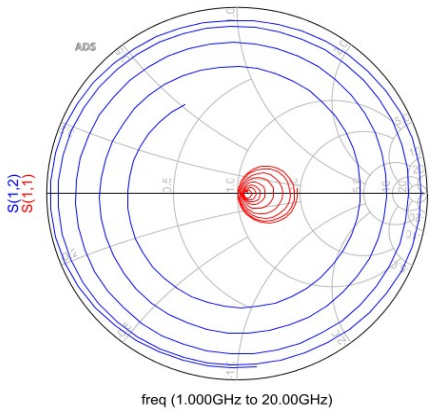
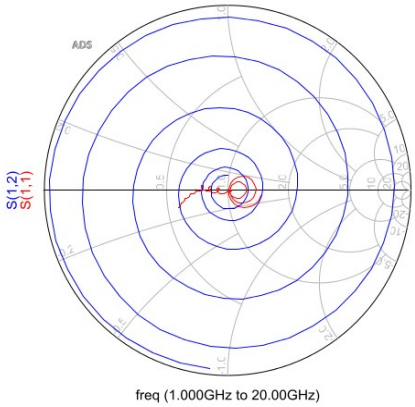
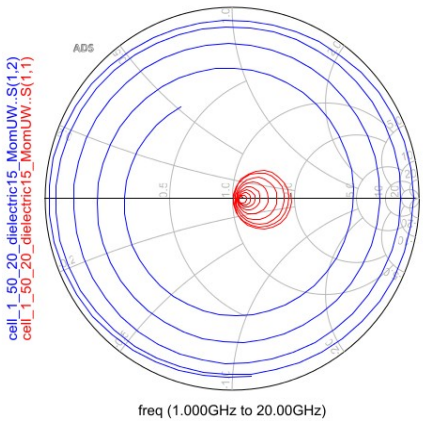
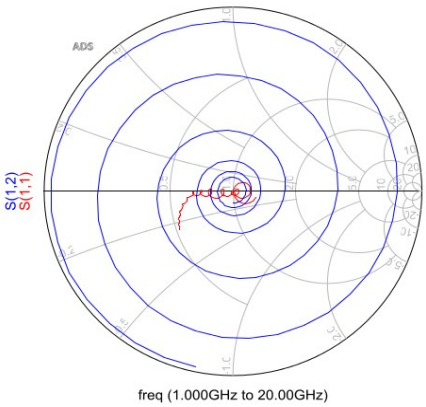
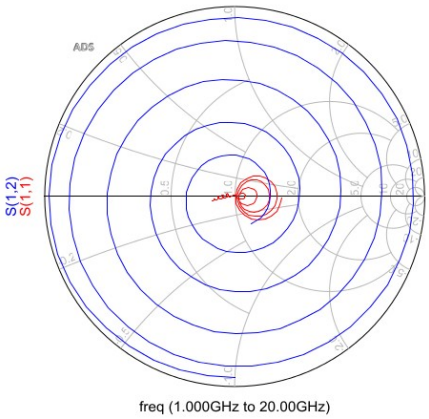
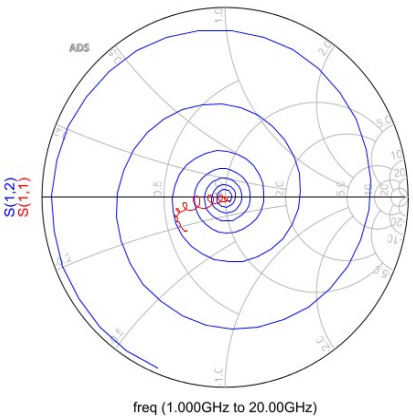
ε_r	Plot	ε_r	Plot
10		25	
15		30	
20		40	

Tabla 15: Simulación Momentum: W=101um g=50um l=20mm(Zo=50Ω).Banda 1-20 GHz

7.4 Línea W=101um g=50um l=2.5mm (Zo=50Ω). Banda 1-20 GHz

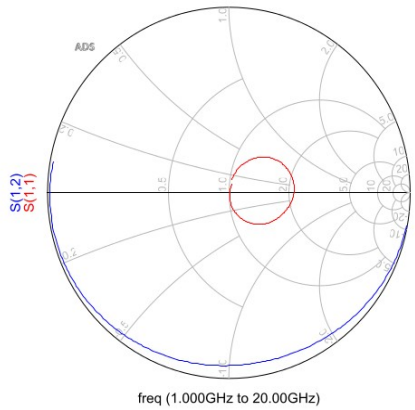
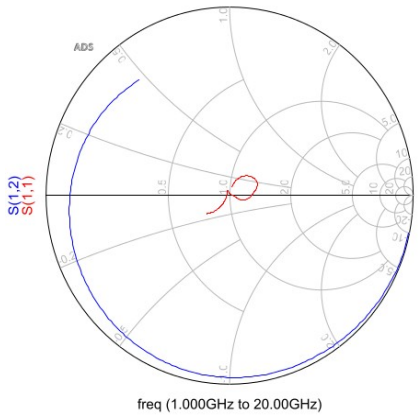
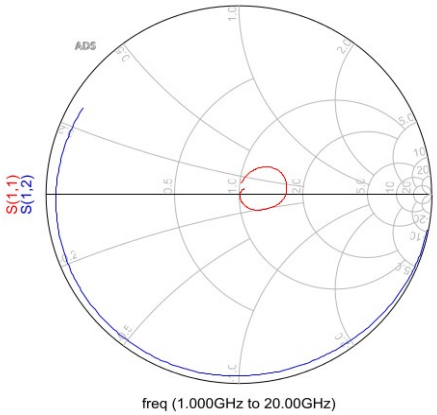
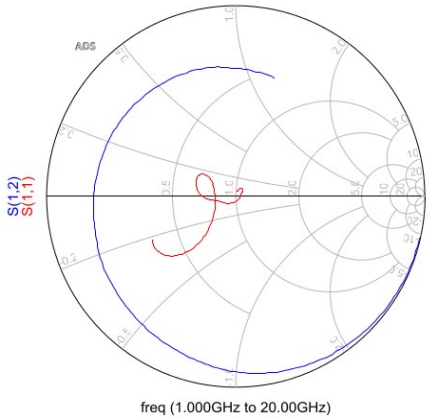
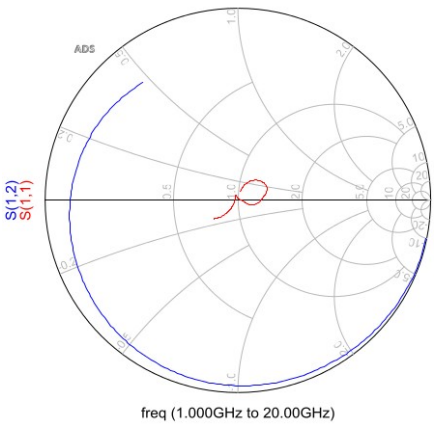
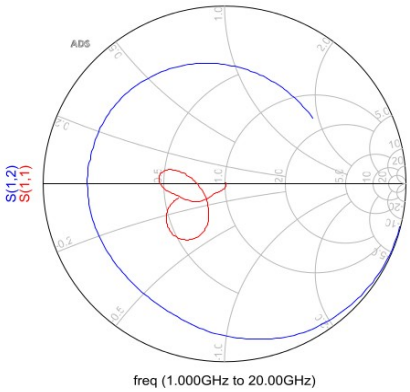
ε_r	Plot	ε_r	Plot
10		25	
15		30	
20		40	

*Tabla 16: Simulación Momentum:*W=101um g=50um l=2.5mm(Zo=50Ω).Banda 1-20 GHz

8. Medidas con agua destilada

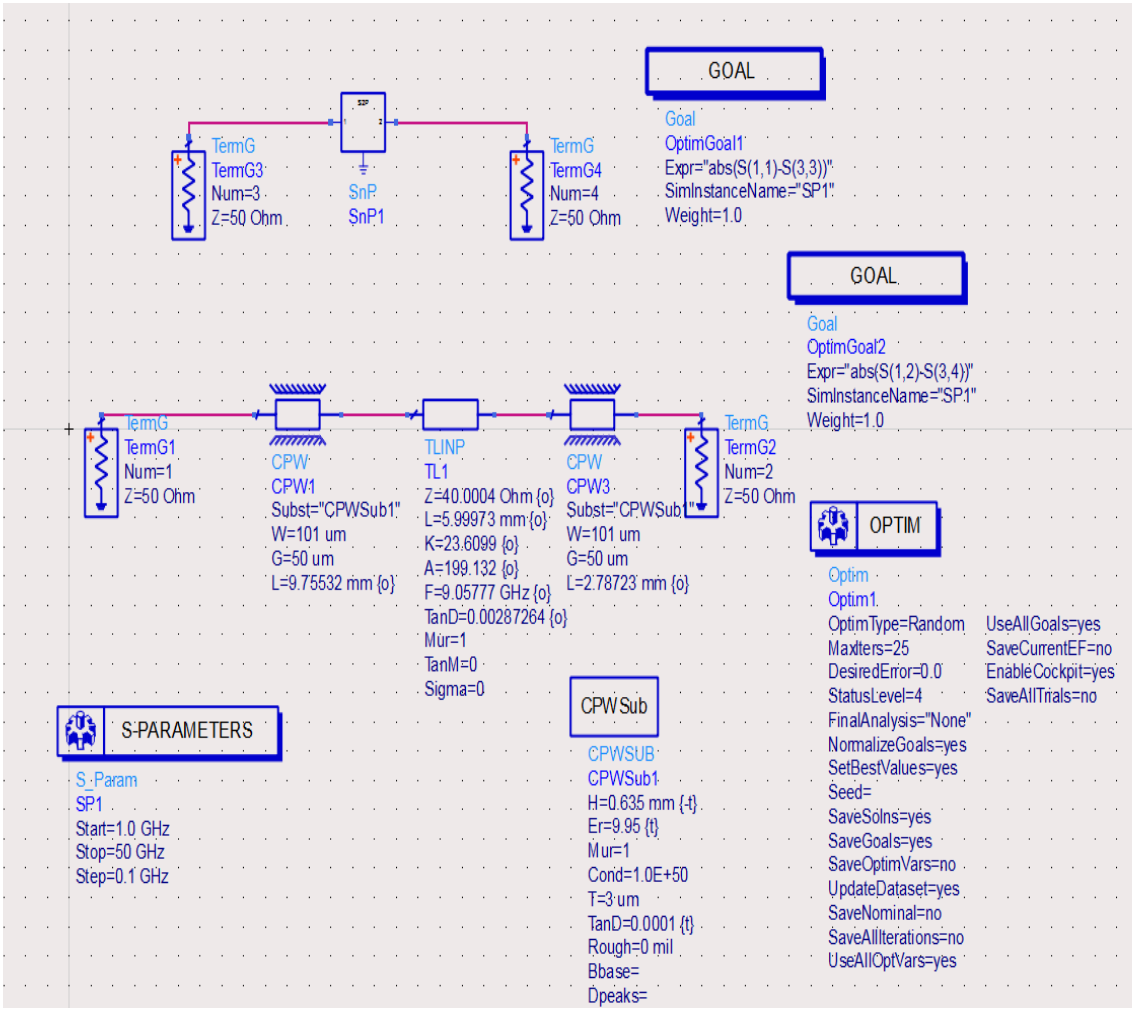


Fig.25: Esquemático de ADS recreando la línea con muestra en la parte superior.

8.1 Línea W=101um g=50um l=20mm. Banda 1-2GHz

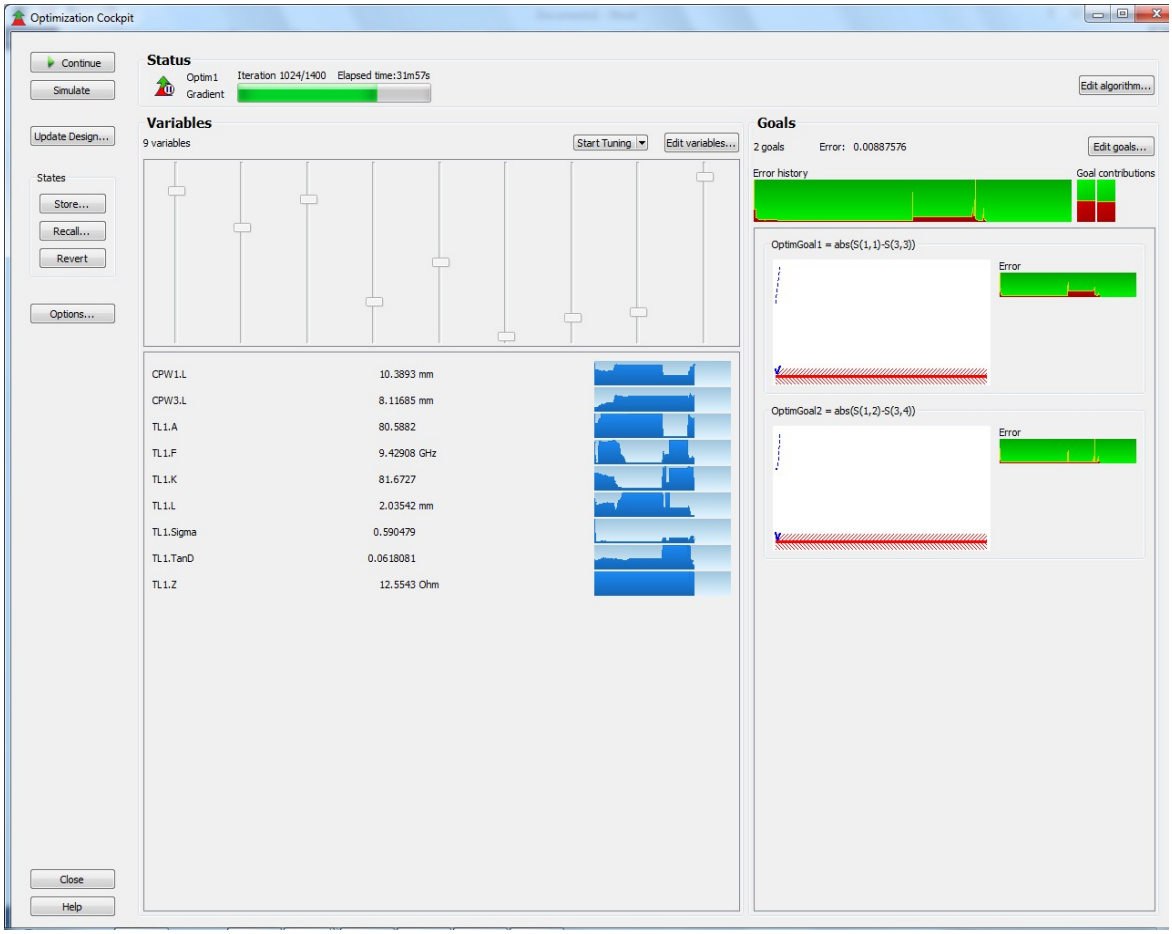


Fig.26: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 1-2GHz línea W=101um g=50um l=20mm

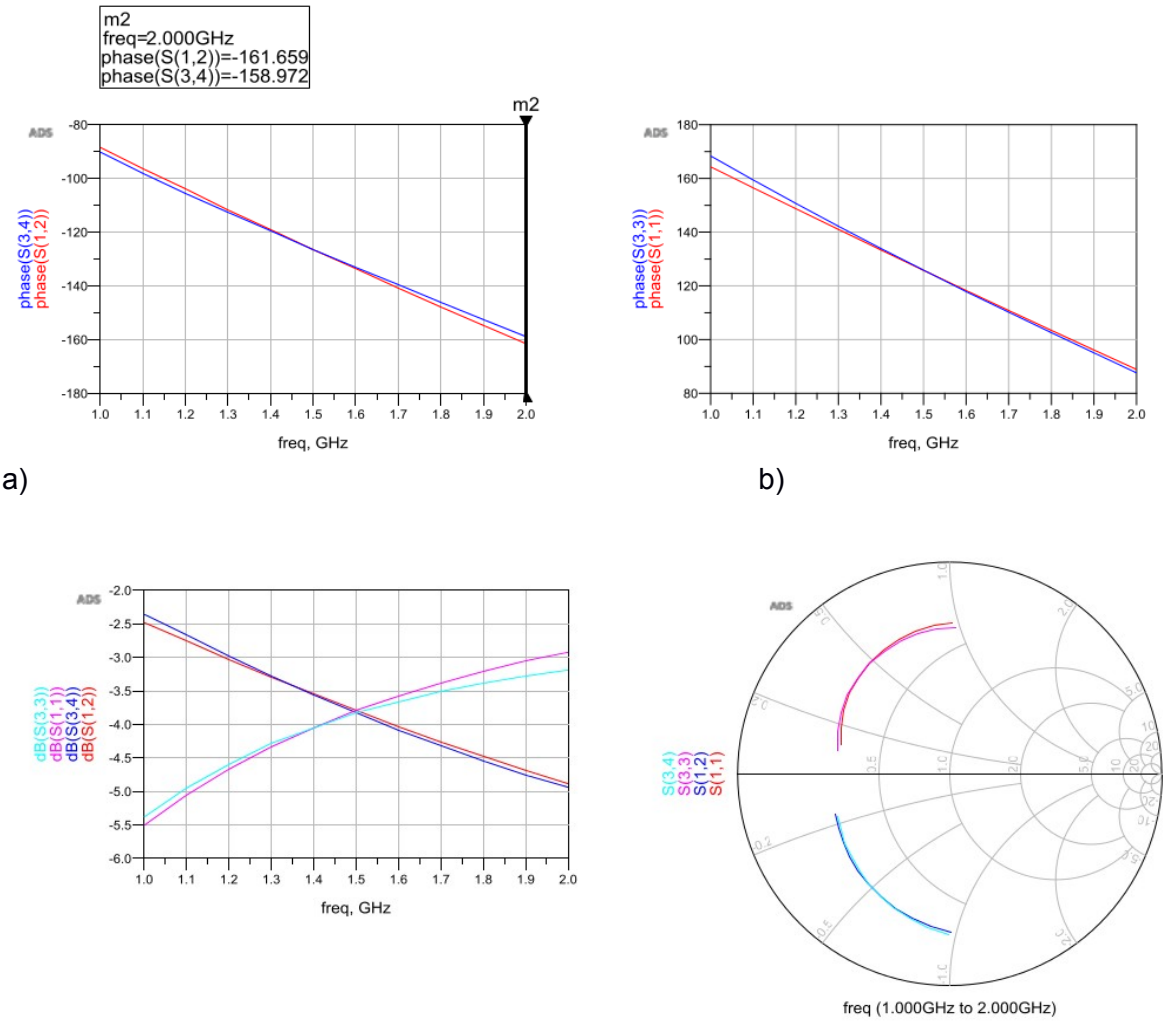


Fig.27: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=50um l=20mm 1-2 GHz

8.2 Línea W=101um g=81um l=20mm. Banda 1-2 GHz

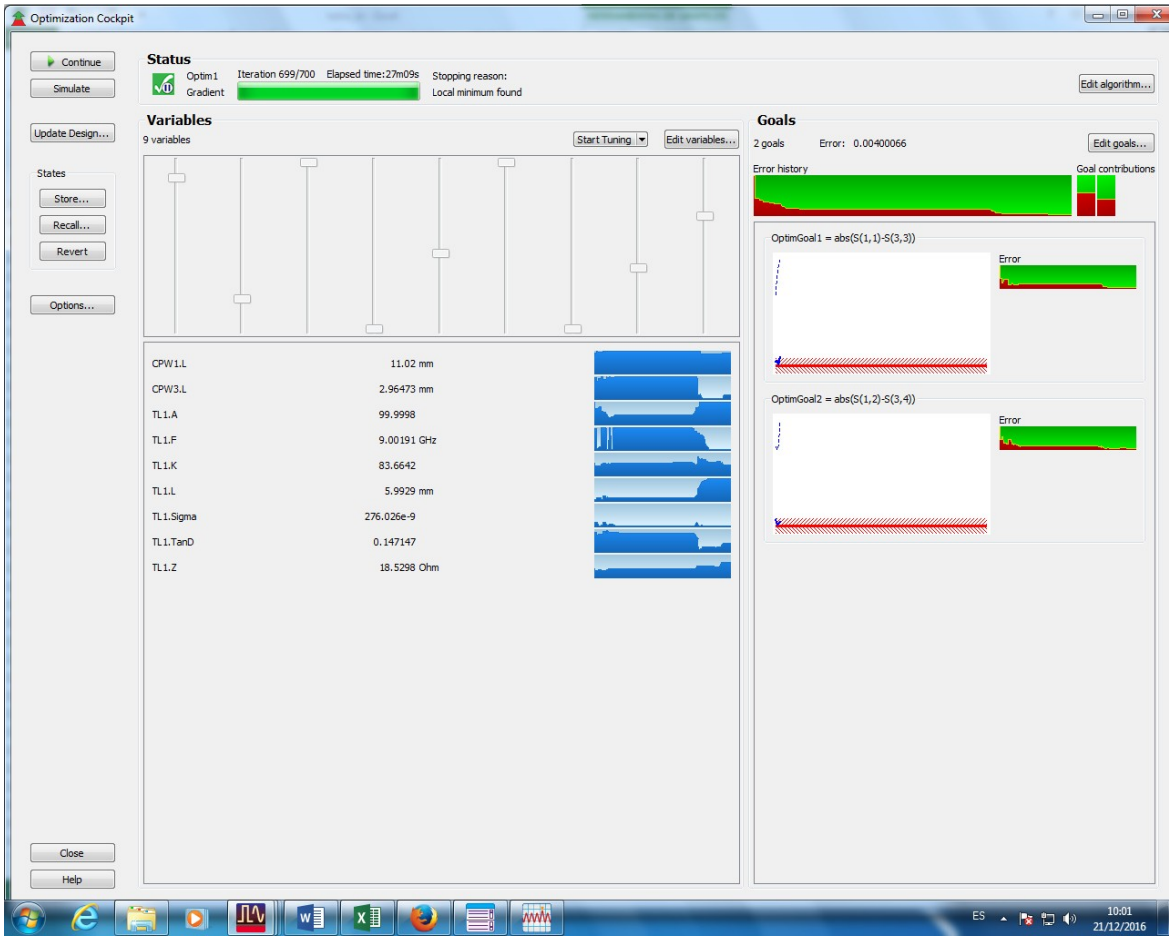


Fig.28: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 1-2GHz línea W=101um g=81um l=20mm

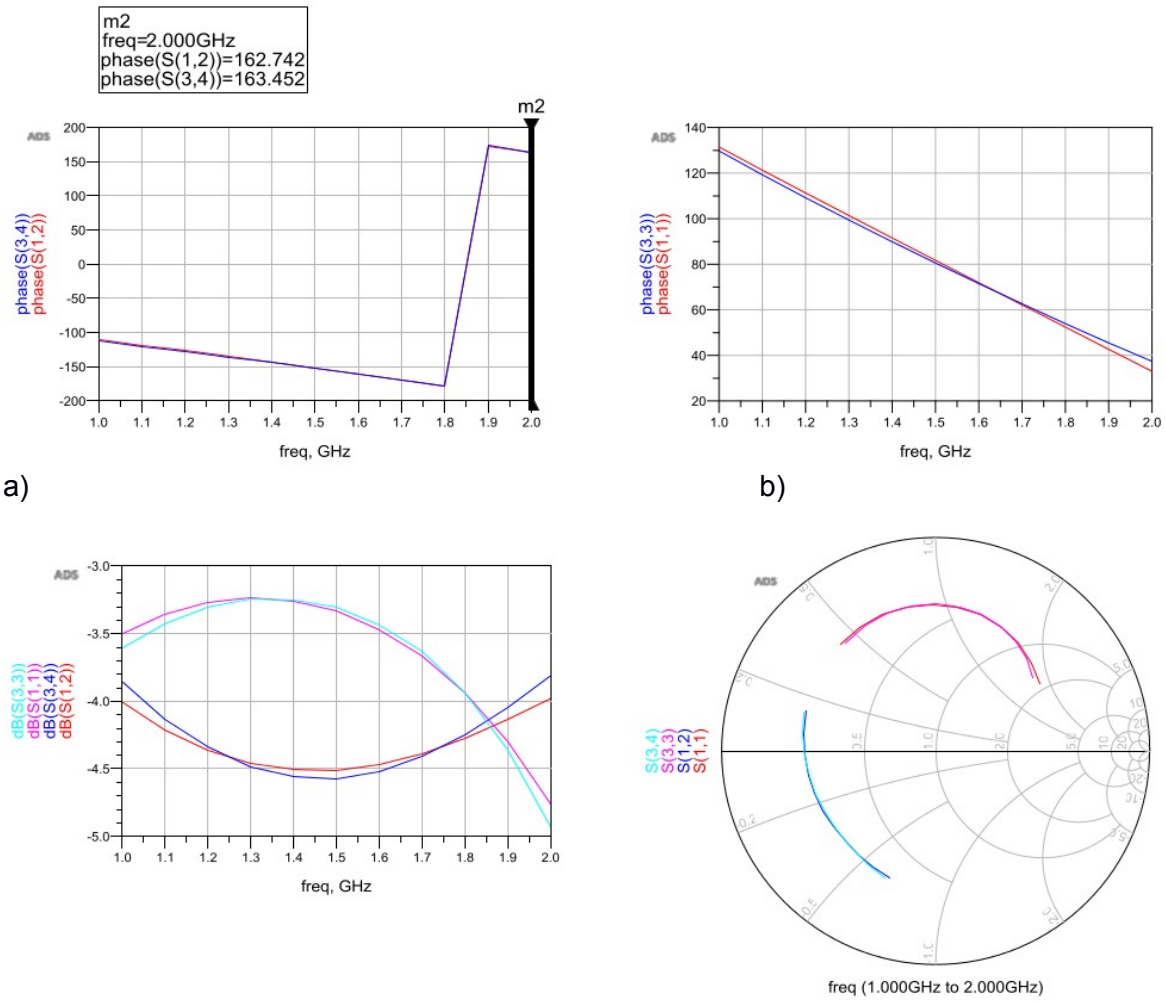


Fig.29: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=81um l=20mm 1-2 GHz

8.3 Línea W=101um g=50um l=20mm. Banda 10-15 GHz

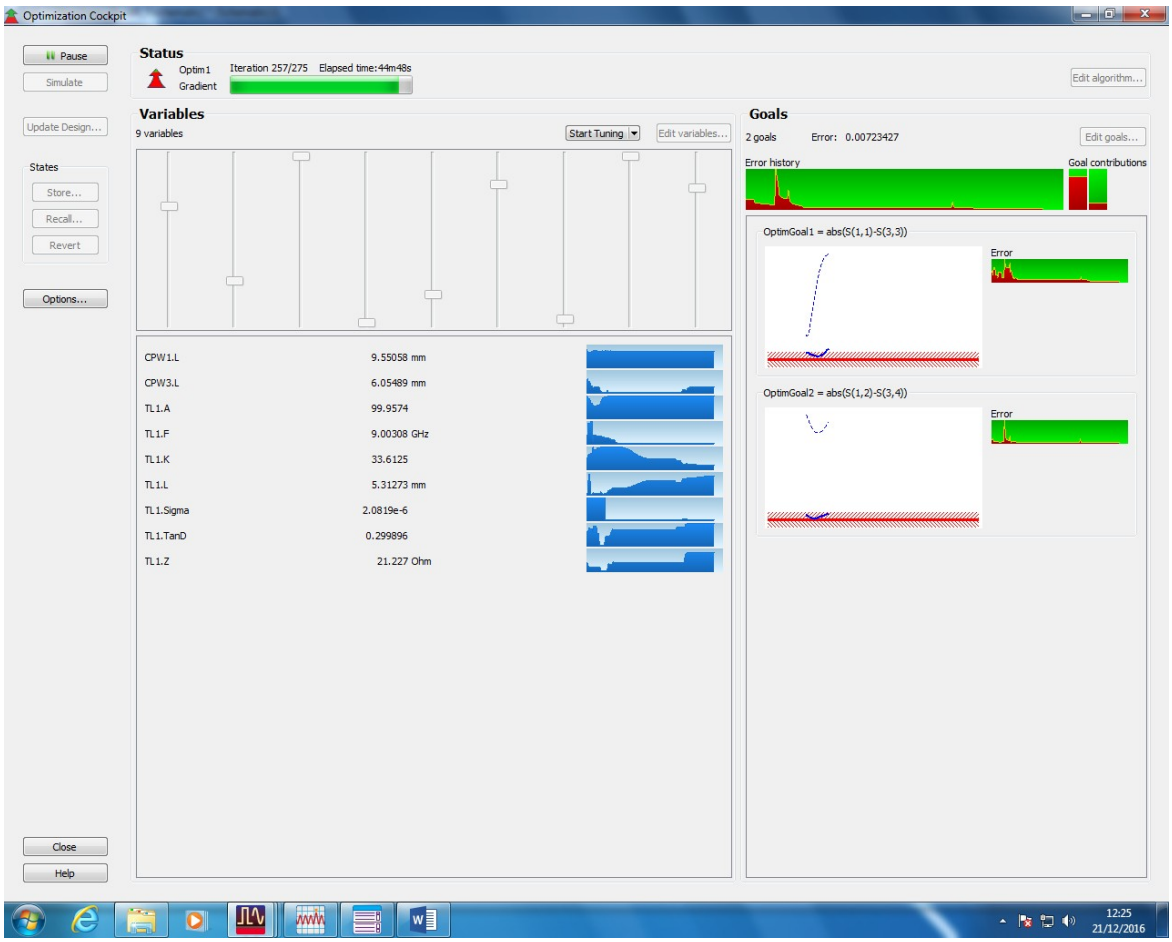
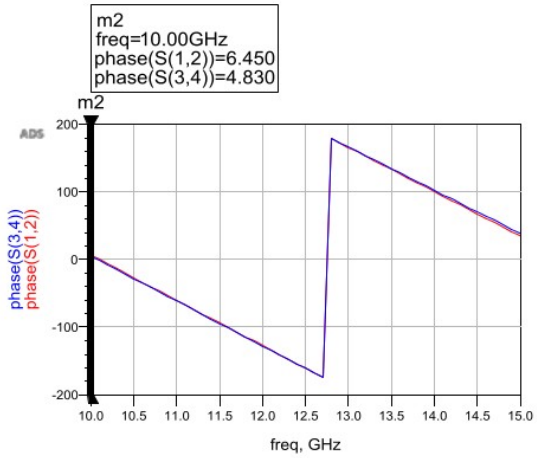
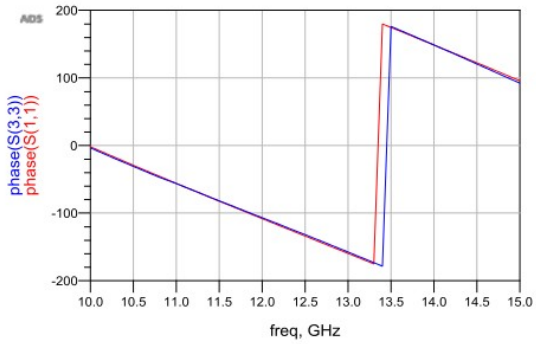


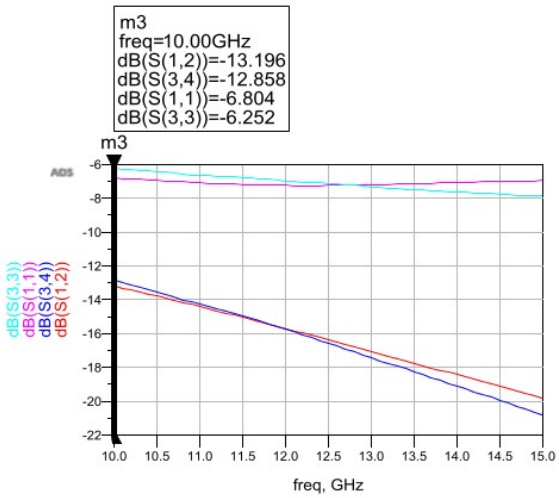
Fig.30: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 10-15GHz línea W=101um g=50um l=20mm



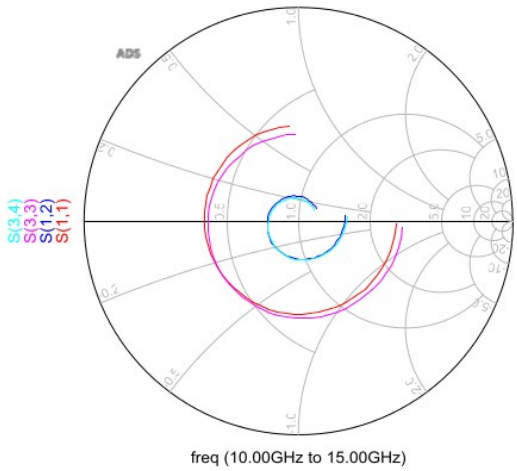
a)



b)



c)



d)

Fig.31: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=50um l=20mm 10-15 GHz.

8.4 Línea W=101um g=81um l=20mm. Banda 10-15 GHz

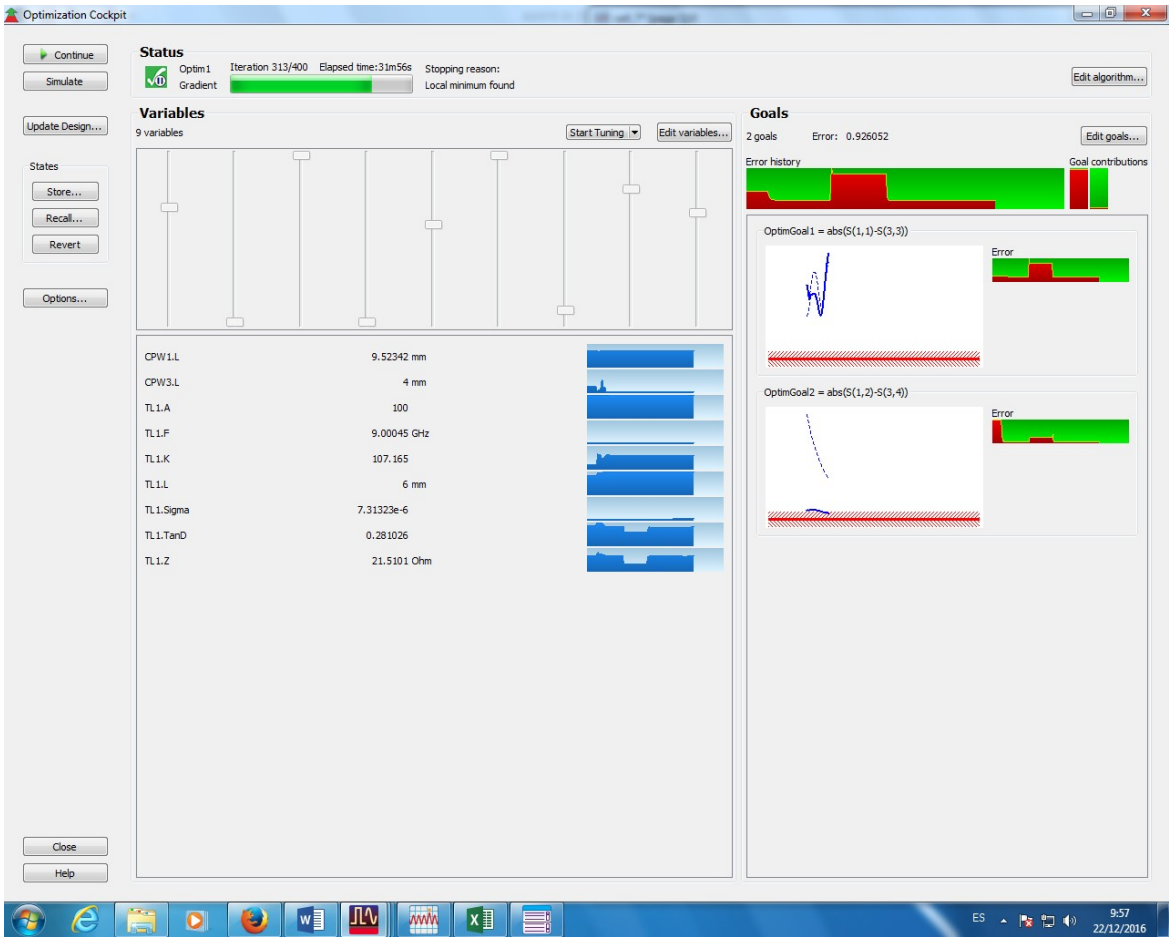


Fig.32: Ajuste de datos mediante Optimization Cockpit en la banda 10-15GHz línea W=101um g=81um l=20mm

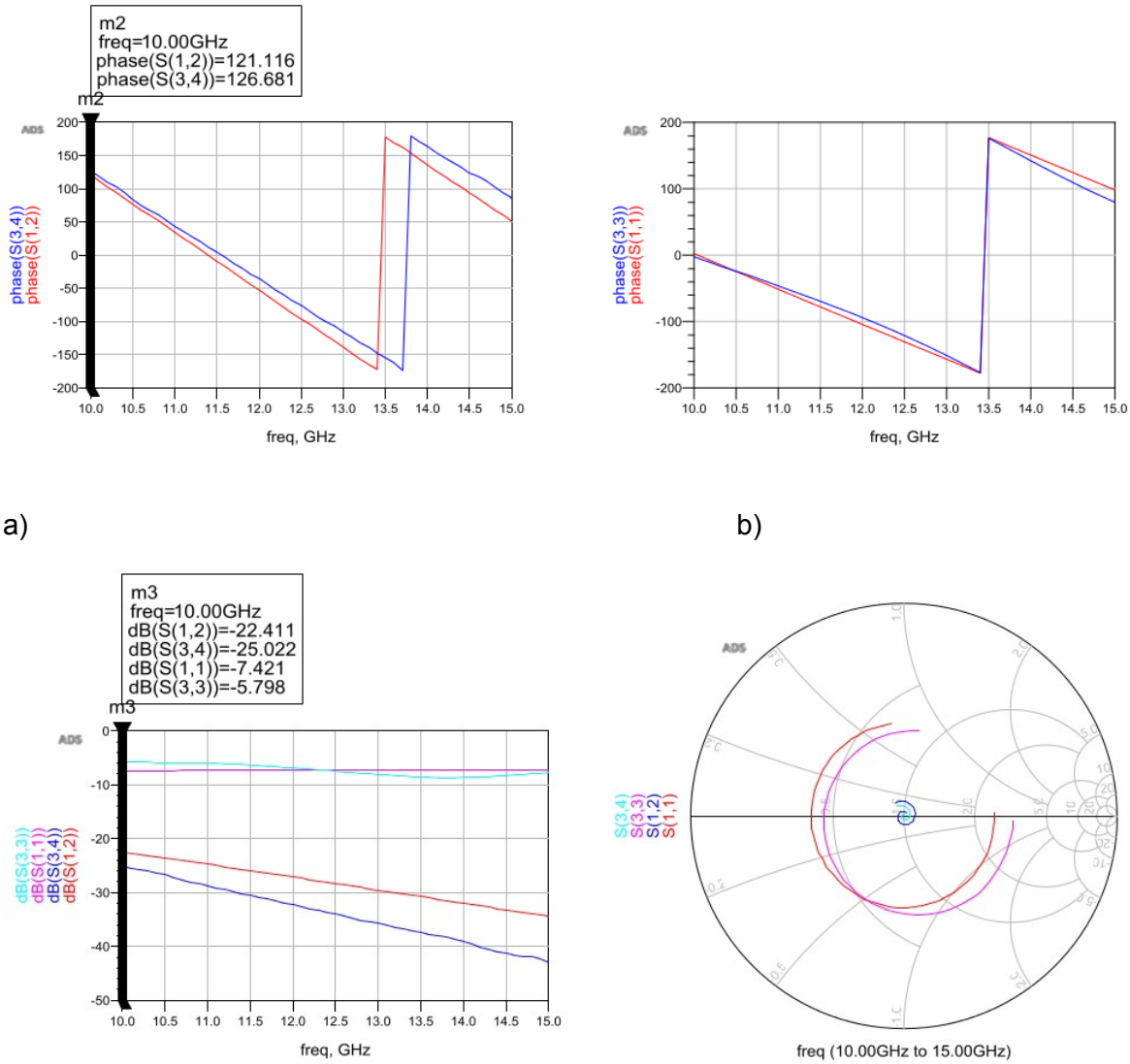


Fig.33: a) Fase S(1,2) medida real y optimización b) Fase S(1,1) medida real y optimización c) Módulo S(1,1), S(1,2) medida real y optimización d) Carta Smith S(1,1), S(1,2) medida real y optimización. Línea W=101um g=81um l=20mm 10-15 GHz

9. Resultados Momentum

9.1 Línea W=101um g=50um l=10mm. Banda 1-50 GHz

er	k	Zo (Ω)	C (pF/m)	L (nH/m)
10	9,83	70,37	148,51	735,43
15	12,59	54,65	216,42	646,37
20	14,15	35,95	348,79	450,77
25	17,47	30,92	450,6	430,77
30	20,61	35,02	432,12	529,95
40	25,67	35	482,53	591,1
45	28,064	35,02	504,24	618,4

Tabla 17: Valores capacidad e inductancia línea w=101um g=50um l=10mm. Momentum banda 1-50 GHz

9.2 Línea W=45um g=25um l=5mm (Zo=50Ω). Banda 1-50 GHz

er	k	Zo (Ω)	c (pF/m)	L (nH/m)
10	9,88	83,51	125,46	874,98
15	13,13	67,91	177,86	820,25
20	17,36	51,8	268,12	719,42
25	20,96	44,28	344,64	675,74
30	24,85	43,55	381,55	723,65

Tabla 18: Valores capacidad e inductancia línea w=45um g=25um l=5mm. Momentum banda 1-50GHz

9.3 Línea W=101um g=50um l=20mm (Zo=50Ω). Banda 1-20 GHz

er	k	Zo (Ω)	c (pF/m)	L (nH/m)
10	9,94	72,31	145,34	759,92
15	12,66	63,03	188,17	747,55
20	14,53	51,16	248,36	650,04
25	17,35	41,64	333,44	578,15
30	20,08	36,43	410	544,15
40	25,95	34,36	494,19	583,45

Tabla 19: Valores capacidad e inductancia línea w=101um g=50um l=20mm. Momentum banda 1-20 GHz

9.4 Línea W=101um g=50um l=2.5mm (Zo=50Ω). Banda 1-20 GHz

er	k	Zo (Ω)	C (pF/m)	L (nH/m)
10	9,94	72,51	144,94	762,03
15	12,19	62,75	185,47	730,03
20	15,36	53,07	246,16	693,3
25	19,97	43,89	339,39	653,78
30	23,67	37,2	435,95	603,28
40	28,07	34,96	505,16	617,41

Tabla 20: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=50um l=2.5mm. Momentum banda 1-20 GHz

10. Resultados medidas prácticas (con agua destilada)

10.1 Línea W=101um g=50um l=20mm (Zo=50Ω). Banda 1-2 GHz

er	k	Zo (Ω)	c (pF/m)	L (nH/m)
1	4,89	49,59	148,64	365,53
80	81,67	12,55	2400,3	378,53

Tabla 21: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz

10.2 Línea W=101um g=81um l=20mm (Zo=58Ω). Banda 1-2 GHz

er	k	Zo (Ω)	c (pF/m)	L (nH/m)
1	4,99	57,46	129,59	427,85
80	109,95	14,5	2410,51	506,81

Tabla 22: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 1-2 GHz

10.3 Línea W=101um g=50um l=20mm (Zo=50Ω). Banda 10-15 GHz

er	k	Zo (Ω)	c (pF)	L (nH)
1	4,89	49,59	148,64	365,53
80	33,61	21,23	910,25	410,26

Tabla 23: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=50um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz

10.4 Línea W=101um g=81um l=20mm (Zo=58Ω). Banda 10-15 GHz

er	k	Zo (Ω)	c (pF)	L (nH)
1	4,99	57,46	129,59	427,26
80	107,16	21,51	1604,19	742,22

Tabla 24: Valores capacidad e inductancia línea W=101um g=81um l=20mm. Medidas prácticas 10-15 GHz

Glosario

CPW → Coplanar Waveguide

ADS → Advanced design system

TLIN → Transmission Line

HFSS → High Frequency Structure Simulator

MUT → Material Under Test