

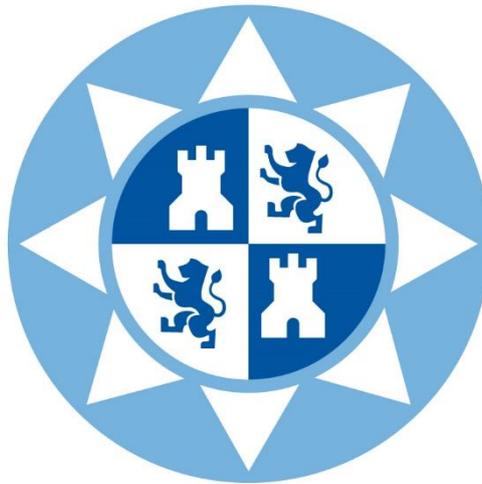


Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**



# **Diseño de una antena de parche con ancho de banda mejorado usando técnicas de adaptación de impedancias**

**Proyecto de fin de carrera 2017/2018**

**AUTOR: Jaime Torrecillas Caballero**

**DIRECTOR: David Cañete Rebenaque**

# Índice

CAPÍTULO 1.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Fases.....	2
1.4. Contenido.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
2.1. Definiciones teóricas de la tecnología utilizada.....	5
2.1.1 Tecnología microstrip.....	5
2.1.2. Antenas de parche.....	5
2.1.2.1. Técnicas de alimentación.....	6
2.1.2.2. Parámetros a tener en cuenta de las antenas de parche....	7
2.1.3. Sustrato FR4.....	7
2.2. Software utilizado para el desarrollo del proyecto.....	8
2.2.1 Advanced Design Systems.....	8
2.2.1.1. Controles de simulación.....	9
2.2.1.2. Herramientas ADS.....	9
2.2.2 AWR Microwave Office.....	10
2.2.2.1. Modos de simulación.....	11
2.2.2.2. Herramientas AWR.....	12
CAPÍTULO 3.....	13
3.1. Especificaciones y objetivos buscados en el proyecto.....	14
3.2. Creación del circuito.....	14
3.3. Métodos de análisis.....	16
3.3.1. Método de análisis circuital.....	16
3.3.2. Método de momentos.....	16
3.4. Diseño de la antena original.....	16
3.4.1. Antena original sin línea de transmisión.....	18
3.4.2. Antena original con línea de transmisión.....	28
3.5. Cálculo de valores de impedancia de las líneas.....	33

CAPÍTULO 4.....	39
4.1. Resultados obtenidos con los valores calculados.....	40
4.1.1 Análisis circuital.....	40
4.1.2. Análisis de método de momentos.....	41
4.2. Resultados obtenidos con los valores optimizados sin restricciones.....	44
4.2.1. Análisis circuital.....	44
4.2.2. Análisis de método de momentos.....	46
4.3. Resultados obtenidos con los valores optimizados con restricciones.....	47
4.3.1. Análisis circuital.....	47
4.3.2. Análisis de método de momentos.....	48
4.4. Resultados obtenidos con los valores finales del circuito.....	51
4.4.1. Análisis circuital.....	51
4.4.2. Análisis de método de momentos.....	53
4.4.2.1. Resultados para 12 células/ $\lambda$ .....	54
4.4.2.2. Resultados para 20 células/ $\lambda$ .....	56
4.4.2.3. Resultados para 30 células/ $\lambda$ .....	57
CAPÍTULO 5.....	63
5.1. Proceso de fabricación de ambos circuitos.....	64
5.1.1. Circuitos finales impresos.....	70
5.2. Obtención de los resultados de los circuitos fabricados.....	71
5.2.1. Antena original.....	73
5.2.2. Antena adaptada.....	74
5.3. Comparación con los valores teóricos.....	75
5.4. Simulación con el software HFSS.....	78
CAPÍTULO 6.....	80
Conclusión.....	81
Líneas futuras.....	81
CAPÍTULO 7.....	82
Bibliografía.....	83
ANEXO I.....	84

## Agradecimientos

En primer lugar querría agradecer a mi director de proyecto David Cañete Rebenaque por toda la confianza depositada en mi para la realización de este proyecto y por toda la ayuda prestada durante la realización de este.

En segundo lugar quiero agradecer a mis padres, Jaime y Maricarmen por permitirme estudiar la carrera que yo escogí sin ponerme ninguna pega y poniéndome todas las facilidades del mundo para que pudiera tener éxito en ello, y por ser unos pilares en los que apoyarme cada vez que la vida me ponía un obstáculo.

En tercer lugar a mi hermana María y a mi novia Marta por ser mis otros dos pilares fundamentales en todos los éxitos que he tenido y por saber darme solo los mejores consejos, aunque no fuesen las que quería escuchar.

Por último agradecer a mis amigos de Cartagena por haber hecho que estos años en la universidad hayan superado todas las expectativas que yo tenía porque, pese a no ser mi sitio preferido, han hecho que me olvide de donde estaba regalándome momentos que guardaré para toda mi vida.

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

El uso de las antenas microstrip de parche está ampliamente extendido en varios campos, sin embargo en el que más son utilizadas es en el campo de las comunicaciones inalámbricas. Estas antenas microstrip de parche tienen bastantes características muy interesantes tales como su bajo peso, un grosor bastante delgado, un bajo coste puesto que el proceso de fabricación es bastante sencillo y barato. Además, son fácilmente integrables con otros circuitos de microondas. Sin embargo, su aplicación está limitada por su estrecho ancho de banda.

Muchas técnicas han sido propuestas para intentar conseguir una mejora en el ancho de banda de este tipo de antenas, tales como el incremento del volumen de la antena, usando elementos coplanares o multicapa, o incluso múltiples elementos resonadores. Estas técnicas hacen que aumente la complejidad de la estructura y además su tamaño, lo que produce un empeoramiento de las características de radiación.

En este proyecto se ha propuesto el método de implementación de una red de adaptación de impedancias. La ventaja de este método es que no modifica la estructura del elemento radiante ya que la red de adaptación se coloca a la entrada de este .

### 1.2. Objetivos

El objetivo principal del trabajo fin de grado es el diseño de una antena de parche (tecnología microstrip) cuyo ancho de banda sea mayor que el típico para este tipo de antenas en la banda de las microondas.

Por ello, existen varios objetivos diferenciados:

1. Estudio de técnicas de adaptación de impedancias.
2. Implementación de la técnica de adaptación de impedancias.
3. Familiarización con el uso de software comercial de diseño de circuitos de microondas.
4. Diseño de antenas de parche.
5. Identificación de los principales parámetros de una antena y sus prestaciones

### 1.3. Fases

El Proyecto se ha dividido en las siguientes fases:

1. Estudio de técnicas de adaptación de impedancias.
2. Elección de una técnica de adaptación de impedancias apropiada para mejorar el ancho de banda de antenas de parche.
3. Implementación de la técnica de adaptación de impedancias.
4. Manejo de software de diseño de circuitos de microondas Microwave Office.
5. Manejo de software de diseño de circuitos de microondas ADS.
6. Diseño de una antena de parche típica y una antena de parche de ancho de banda mejorado.
7. Obtención de los principales parámetros de las antenas.
8. Conclusión sobre las prestaciones de las antenas y sus parámetros

#### 1.4. Contenido

Este proyecto final de carrera se compone de 7 capítulos. El resto de la memoria se estructura como se muestra a continuación.

El **segundo capítulo** está formado por las distintas definiciones y explicaciones de las antenas de parche y de sus parámetros fundamentales, así como de una introducción a los dos programas que hemos utilizado para el diseño y obtención de resultados de la red de adaptación.

El **tercer capítulo** se compone del diseño del circuito que vamos a realizar tanto del diseño de la antena original como de los cálculos para la obtención de las distintas dimensiones de las líneas de transmisión que forman el circuito completo.

En el **cuarto capítulo** se presentan los resultados obtenidos a través de los dos programas utilizados. Aquí se realizará una comparación de los parámetros obtenidos en el nuevo diseño con respecto a la antena original.

En el **quinto capítulo** se muestra el proceso de fabricación que se ha seguido para poder obtener el circuito físicamente además de incluir un apartado con los resultados obtenidos con la red de adaptación y su comparación con los resultados obtenidos.

En el **sexto capítulo** se expondrán las diferentes conclusiones obtenidas a lo largo de la realización del proyecto, así como las posibles líneas de mejora para un futuro diseño.

Por último, en el **séptimo capítulo** se recoge toda la bibliografía que se ha seguido para la realización de este proyecto.

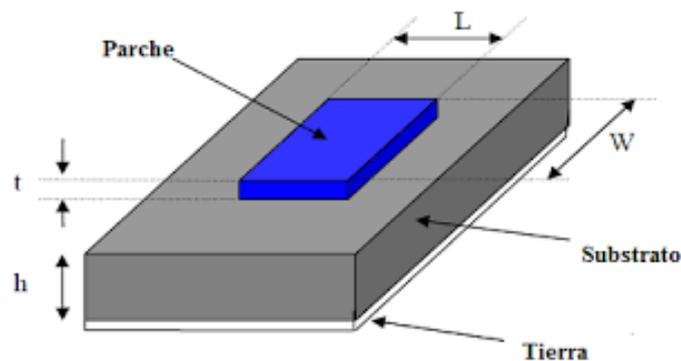
CAPÍTULO 2  
DESAROLLO TEÓRICO E  
INTRODUCCIÓN AL  
SOFTWARE UTILIZADO

## 2.1 DEFINICIONES TEÓRICAS DE LA TECNOLOGÍA UTILIZADA

Para el presente proyecto la tecnología utilizada ha sido la tecnología microstrip debido a su facilidad de integración y de fabricación. Gracias a ella se ha podido realizar el diseño de las antenas de parche requeridas, tanto de la antena original como de la antena adaptada.

### 2.1.1 Tecnología microstrip

Está compuesta por una superficie conductora separada del plano de masa por un sustrato dieléctrico de un determinado espesor. Gracias a la tecnología de microondas se pueden fabricar numerosos circuitos de microondas como antenas, filtros, divisores, etc. [1]



*Figura 1 Esquema de las partes que componen una placa para tecnología microstrip.*

En la Figura 1 se pueden observar los principales parámetros que tendría una placa para la tecnología microstrip. Estos se pueden resumir en los siguientes: plano de masa o tierra, altura del sustrato, espesor de la cobertura metálica, anchura y longitud del parche.

Las ventajas que tiene la tecnología microstrip se basan en su sencillez de fabricación, el bajo coste que tiene la misma. A su vez son muy compactos y ligeros, a la vez que son fácilmente integrables con multitud de circuitos.

Sin embargo, las grandes desventajas que tiene esta tecnología es que la potencia es de menor capacidad y a su vez tenemos unas pérdidas más altas que si la comparamos con la tecnología de guía de onda. También al no estar cubierta, es más susceptible a la radiación de diafonía y a las interferencias del exterior.

### 2.1.2 Antenas de parche

Se diseñan a partir de líneas de transmisión o resonadores sobre sustrato dieléctrico. Por su tamaño reducido, son idóneas para aplicaciones de aeronáutica, satélites, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas y para circuitos que impliquen frecuencias elevadas. [1]

Las ventajas que nos pueden ofrecer estas antenas son: posibilitan la construcción de equipos cada vez más pequeños y bastante ligeros, son fáciles de adaptar con circuitos de microondas, versátiles en polarización y frecuencia de resonancia, además de ser fáciles de integrar tanto en superficies planas como no planas.

Entre las mayores desventajas, tenemos la bajas potencia de radiación, su ancho de banda reducido, una baja ganancia, la baja eficiencia que tienen y si se trabaja sobre sustratos flexibles, son fácilmente afectadas por el factor térmico.

#### 2.1.2.1. Técnicas de alimentación

Existen varias formas de alimentar la antena tipo parche: mediante línea microstrip, mediante sonda coaxial, alimentación por proximidad o apertura, etc. Dentro de este grupo de formas de alimentar una antena de parche, las más habituales son las dos primeras y van a ser explicadas brevemente a continuación.

- Alimentación por línea microstrip → reducción del ancho de banda entre el 2-5% y tiene facilidad en su fabricación.

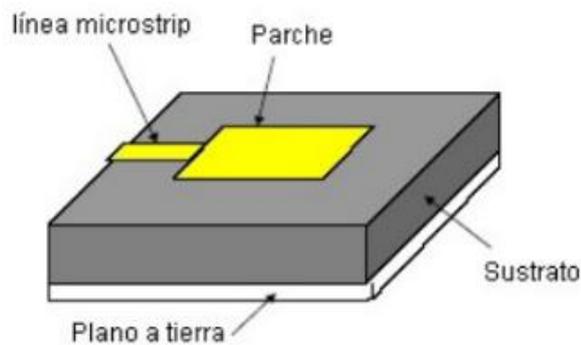


Figura 2 Alimentación por línea microstrip [2]

- Alimentación por coaxial → reducción del ancho de banda entre el 2-5% y tiene facilidad para la adaptación.

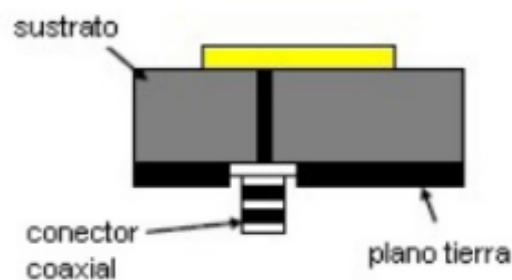


Figura 3 Alimentación por conector coaxial [2]

### 2.1.2.2. Parámetros a tener en cuenta de las antenas de parche

Existen varios parámetros fundamentales para describir las características de una antena tales como impedancia de entrada, intensidad de radiación, diagrama de radiación, ganancia, directividad, eficiencia de radiación, ancho de banda, etc. Para este proyecto nos hemos centrado en los siguientes:

- **Ganancia** → La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena. Se mide en dBi, definido como los Decibelios de ganancia sobre un radiador isotrópico o una Relación logarítmica entre la potencia de emisión de una antena en relación a un radiador isotrópico
- **Eficiencia de radiación** → Relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. También se puede definir como la relación entre ganancia y directividad.
- **Ancho de banda** → representa el rango de frecuencias en el cual unas determinadas condiciones son cumplidas por los parámetros de la antena. Además se puede expresar el ancho de banda relativo de la siguiente forma:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0}$$

- **Factor de mérito** → Este factor o figura de mérito lo vamos a usar nosotros como parámetro de calidad, ya que aumentar el ancho de banda tendrá un coste (en eficiencia y ganancia) y habrá que realizar un diseño cuyo compromiso entre todos los parámetros sea razonable como el producto del ancho de banda de una antena por la ganancia de la misma en lineal.

### 2.1.3 Sustrato FR4

El sustrato FR4 está formado por varias hojas de Prepeg, el cual a su vez está constituido por capas tejidas de fibra de vidrio impregnadas con resina epoxi. El material de espesor standard (1,6mm) consta de 8 capas de Prepeg y una de cobre de 35 micrómetros. Las capas de Prepeg y el laminado de cobre se prensan bajo presión y temperatura controladas para conformar el material final que se utilizará en los procesos de fabricación. A su vez el valor de la constante dieléctrica es 4,7 a 1 MHz. En el anexo I se puede observar la hoja de especificaciones técnicas del sustrato FR4.

## 2.2. SOFTWARE UTILIZADO PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

### 2.2.1. Advanced Design System

Advanced Design System (ADS) es un sistema de software de automatización de diseño electrónico producido por Keysight EEsof EDA , una división de Keysight Technologies . Proporciona un entorno de diseño integrado para los diseñadores de productos electrónicos de RF, como teléfonos móviles, buscapersonas, redes inalámbricas, comunicaciones por satélite, sistemas de radar y enlaces de datos de alta velocidad. [3]

La idea de este software es la de realizar avanzadas simulaciones con precisión bastante alta de modelos circuitales formados principalmente por todo tipo de elementos incluidos en las librerías de componentes que posee el ADS. A través de simulaciones sucesivas y con la ayuda de diversas herramientas de análisis de circuitos se puede ir refinando el circuito de acuerdo con nuestros objetivos principales. ADS implementa además algoritmos de simulación y rutinas de convergencia avanzadas que reducen considerablemente los tiempos de simulación con respecto a otros programas semejantes.

ADS pone a tu disposición dos maneras de visualizar los circuitos para poder trabajar con ellos, el esquemático en donde se introducen los componentes físicos y se conectan entre sí y sobre los que se pueden realizar los análisis y simulaciones necesarios, y el Layout en el que se va a mostrar la forma final que va a tener el circuito como si fuese la placa. La ventaja de estas ventanas es que están conectadas entre sí por lo que de esta manera se puede ir diseñando en una de las ventanas e inmediatamente actualizarlo en la otra.

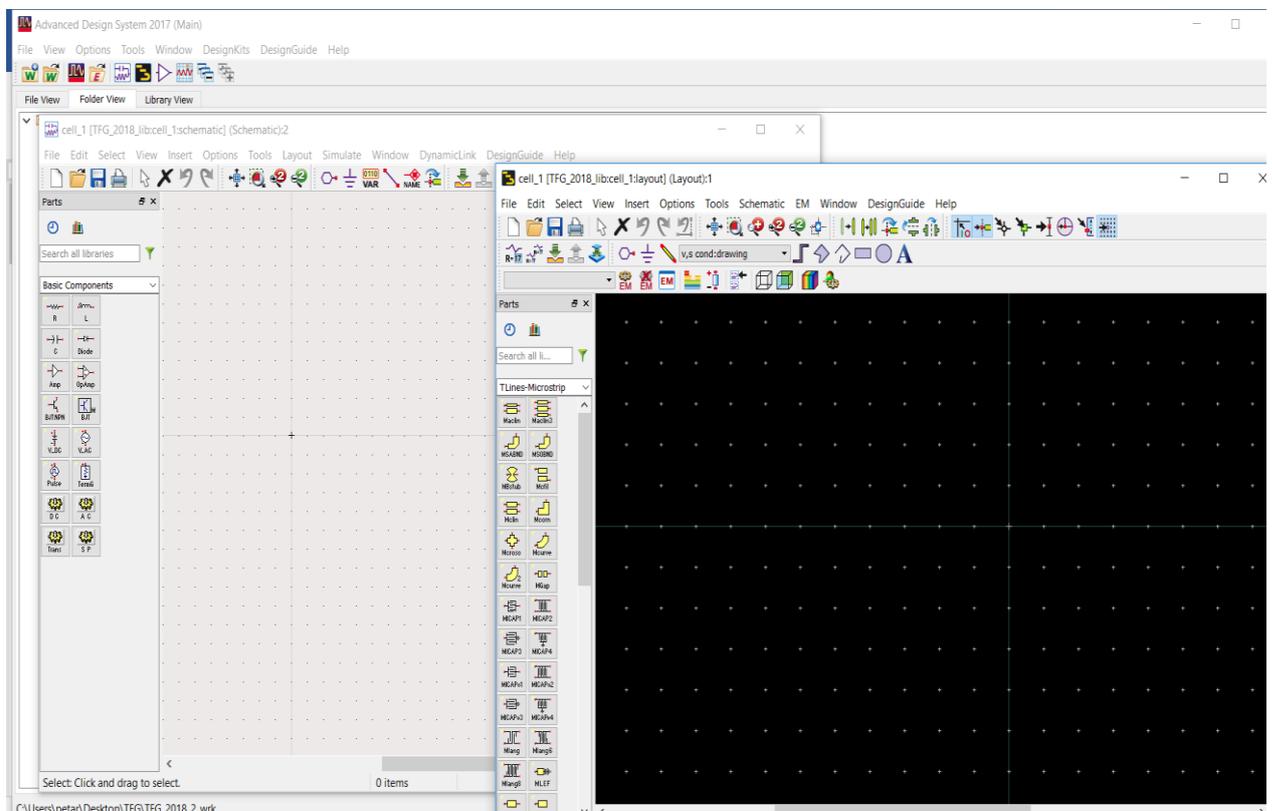


Figura 4 Vista general del software ADS

### 2.2.1.1. Controles de simulación

ADS dispone de varios controles y modos de simulación para poder realizar el análisis del circuito deseado, sin embargo el modo que se ha usado en nuestro circuito ha sido:

- **S-PARAMETERS:** Este es el análisis de los parámetros de Scattering, que son básicamente los parámetros de transmisión o reflexión, dependiendo de los subíndices, que caracterizan a un determinado dispositivo. Su uso está muy extendido en la caracterización de componentes a alta frecuencia y microondas, y lo que hace es realizar un análisis en pequeña señal en unas condiciones de polarización y temperatura previamente impuestas. Además de permitirnos hallar los parámetros S también se puede realizar el cálculo de la impedancia, de la figura de ruido y de otros muchos más parámetros.

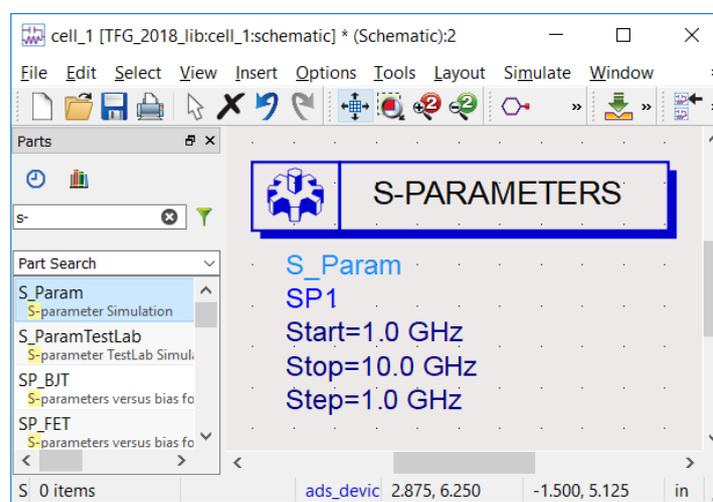


Figura 5 Controlador S-Parameters

### 2.2.1.2. Herramientas ADS

ADS pone a nuestra disposición numerosas herramientas que pueden sernos de utilidad a la hora de diseñar nuestro circuito, sin embargo aquí se mostrarán las características de aquellas que más se van a utilizar en el diseño del circuito de nuestro proyecto:

- **LineCalc:** es un programa de análisis y síntesis para calcular parámetros eléctricos y físicos de líneas de transmisión individuales y acopladas. En él se pueden seleccionar distintas tecnologías mediante el tipo de componente, sin embargo en nuestro proyecto solamente se usará el MLIN, el cual se refiere a una Microstrip Line.

LineCalc puede comunicarse directamente con los simuladores de circuito. Puede enviar datos de parámetros para los elementos de diseño del circuito seleccionados, junto con los datos sobre los sustratos, directamente desde el simulador al LineCalc. Después de que se calculan los valores de los parámetros del elemento, puede actualizar el diseño del circuito esquemático o de diseño asociado en el simulador activo inmediatamente con los resultados del LineCalc.

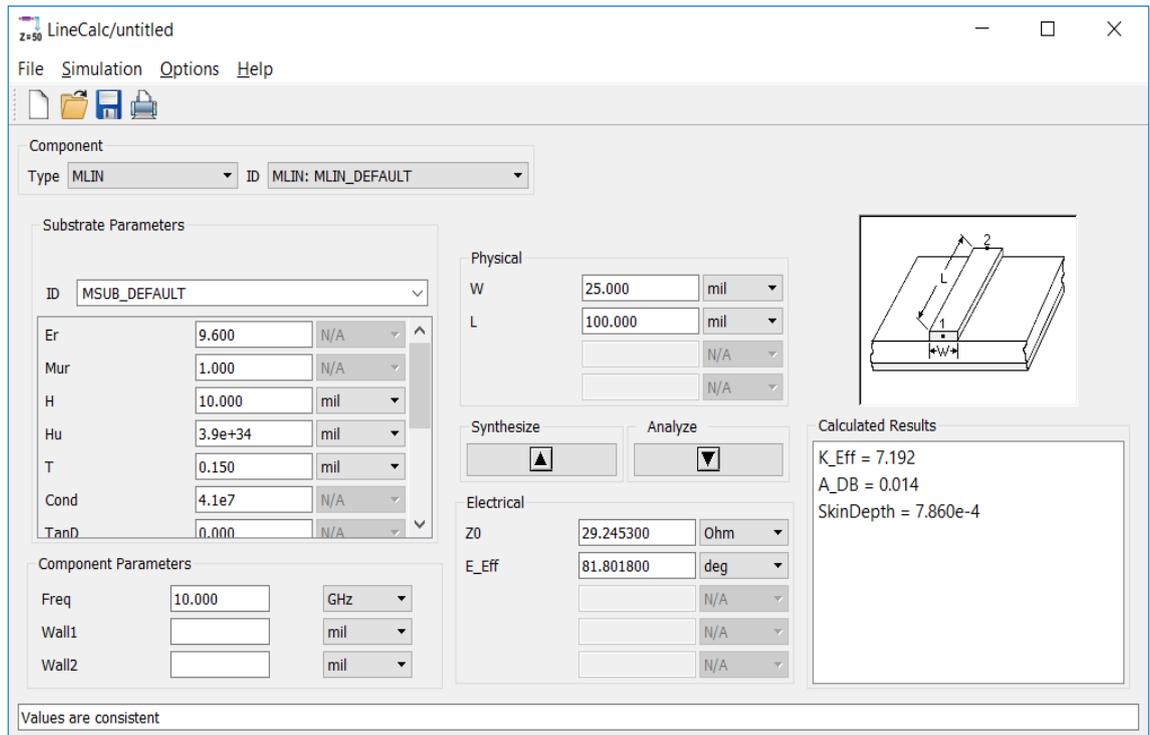


Figura 6 Herramienta LineCalc del ADS

### 2.2.2. AWR Microwave Office

AWR Microwave Office es un software especializado en el análisis y simulación de sistemas en radiofrecuencias, este programa posee un potente simulador en el que se puede analizar modelos tanto lineales como no lineales.

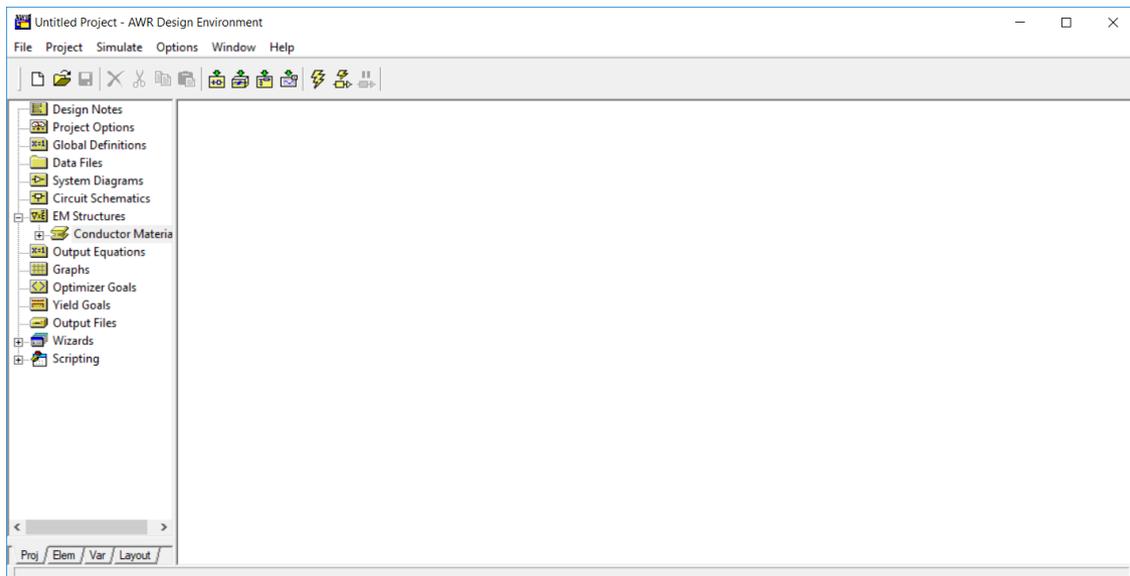


Figura 7 Visión general del AWR Microwave Office

### 2.2.2.1. Modos de simulación

Dentro del programa AWR Microwave Office hay varios modos de simulación y van a hacerse uso los siguientes:

- **Analyze:** se utiliza para comenzar la simulación del circuito. La simulación se ejecuta automáticamente en todo el proyecto, utilizando el simulador apropiado (por ejemplo, simulador lineal, simulador no lineal de equilibrio armónico o simulador EM 3D-planar) para los diferentes documentos del proyecto.
- **Tune:** El sintonizador en tiempo real le permite ver el efecto en la simulación mientras sintoniza.

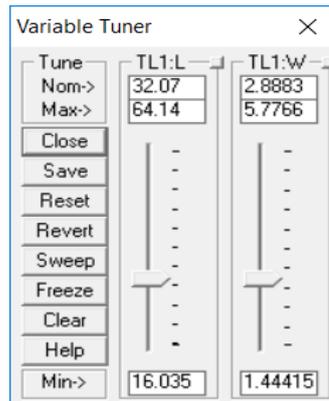


Figura 8 Modo de simulación Tuner

- **Optimize:** este modo te permite ver los valores de los parámetros del circuito y las variables cambiar en tiempo real, ya que funciona para cumplir con los objetivos de optimización que ha especificado. Estas características se muestran en detalle en el capítulo del simulador lineal.

También puede hacer clic en el botón *Tune Tool* en la barra de herramientas. Seleccione los parámetros que desea sintonizar y luego haga clic en el botón *Tune* para sintonizar los valores. Mientras sintoniza u optimiza, los esquemas y los diseños asociados se actualizan automáticamente. Cuando vuelve a ejecutar la simulación, solo se recalculan las partes modificadas del proyecto.

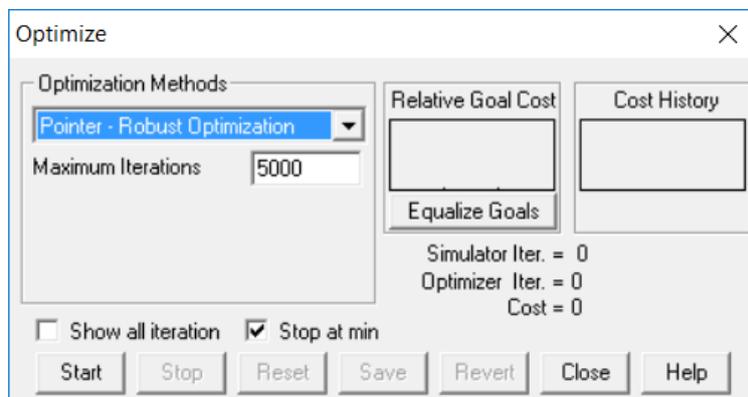


Figura 9 Modo de simulación Optimize

### 2.2.2.2.Herramientas AWR

El programa AWR Microwave Office te ofrece múltiples herramientas para el correcto cálculo del diseño de nuestro circuito. Pese a este gran número de herramientas, solo se han usado unas pocas que te ayudan a llegar a un diseño de circuito que iba a cumplir con nuestras expectativas.

- **TX-LINE:** es una calculadora de línea de transmisión interactiva basada en Windows, para el análisis y síntesis de estructuras de líneas de transmisión. El software TX-LINE permite a los usuarios ingresar características físicas o eléctricas para medios de transmisión comunes: Microstrip, Stripline, Guía de onda Coplanar (WG), Grupo de trabajo Coplanar conectado a tierra y Slotline.

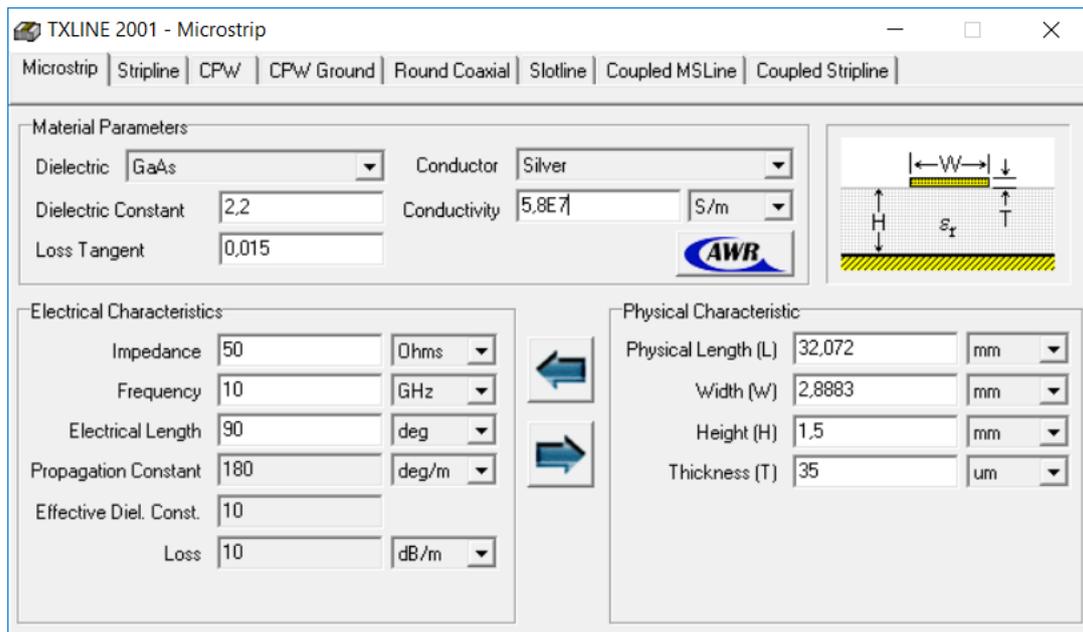


Figura 10 Herramienta TXLine

# CAPÍTULO 3

## PROCESO DE DISEÑO

### 3.1. Especificaciones y objetivos buscados en el proyecto

Para la realización de este proyecto se han establecido una serie de criterios que deben ser cumplidos por los circuitos diseñados. Se partirá de un coeficiente de onda estacionaria de  $S=2$  para el cálculo del ancho de banda de la antenna original. Este ancho de banda buscaremos aumentarlo hasta un valor de 200 MHz mediante el diseño de la red de adaptación a la entrada de la antenna. Se ha establecido una frecuencia de 2,45 GHz como frecuencia de resonancia de la antenna original. La razón de haber escogido esta frecuencia es porque se trata de la banda ISM la cual usan gran cantidad de aplicaciones. Estas bandas ISM son bandas de frecuencias para uso comercial y sin licencia (son las utilizadas por los teléfonos inalámbricos domésticos DECT, los microondas, o los dispositivos BlueTooth, por ejemplo).

### 3.2. Creación del circuito

Como anteriormente se ha comentado, uno de los grandes problemas de las antenas de parche es la limitación de su ancho de banda. Existen varias técnicas para poder conseguirlo ya que para la mayoría de las aplicaciones es necesario tener un ancho de banda lo suficientemente ancho.

Una de las técnicas que se pueden utilizar es la de aumentar el grosor de sustrato utilizado aunque esto introduce problemas como el de la radiación espúrea.

Otra posible técnica es la de introducir un segundo parche que radie a una frecuencia cercana a la frecuencia del parche original, lo que se utiliza normalmente cuando el parche está alimentado por líneas microstrip o por sonda coaxial. Lo más habitual es separar ambos parches simplemente por aire.

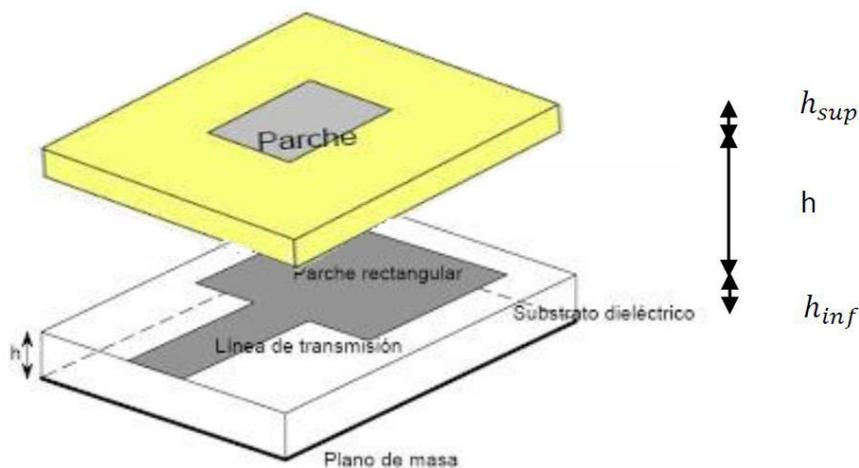


Figura 11 Aumento del ancho de banda de antena tipo parche introduciendo otro parche

El uso de las técnicas anteriormente mencionadas resulta bastante complicado para el aumento del ancho de banda de una antena de parche y te dejan muy pocos grados de libertad.

Por ello, para conseguir aumentar el ancho de banda de la antena de parche se ha utilizado la técnica de introducir una red de adaptación a la entrada de esta. En este caso el diseño elegido es una red de adaptación de líneas de transmisión formada por stubs de media longitud de onda acabados en circuito abierto y por líneas de transmisión de conexión de un cuarto de longitud de onda.

La razón de elegir este tipo de circuito es que tiene los suficientes grados de libertad para poder asegurar una realización practica ya sea en tecnología microstrip o en stripline.

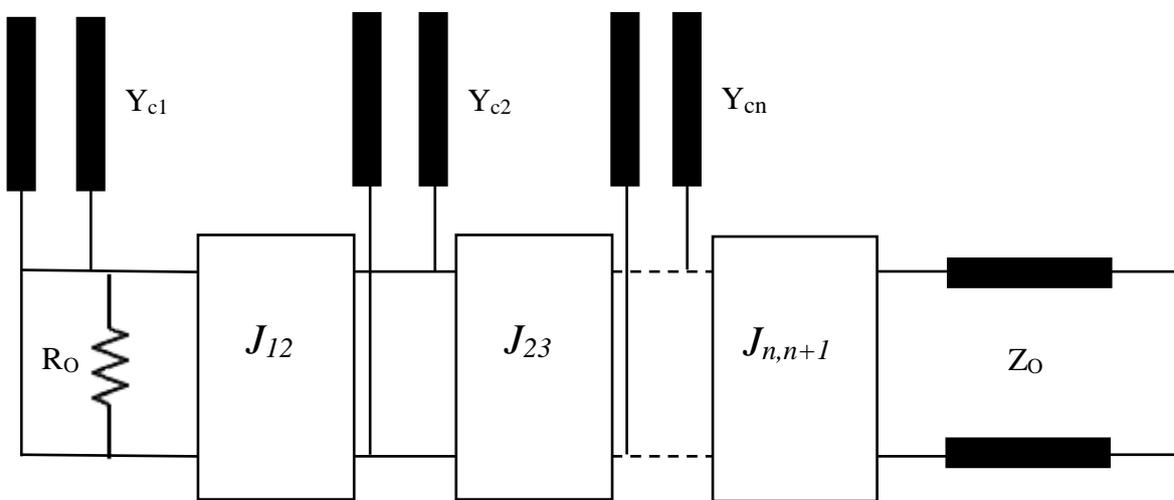


Figura 12 Prototipo de red de adaptación intermedia (parallel-resonant case)

Con respecto a la figura anterior se puede observar como  $R_0$  es la resistencia de la antena resonante,  $Y_{ci}$  es la admittancia característica de la línea de transmisión resonante  $i$ -ésima,  $J_{i,i+1}$  es la admittancia del inversor de impedancias situado entre los resonadores  $i$  e  $i+1$ ,  $J_{n,n+1}$  es inversor de admittancias final y  $Z_0$  es la impedancia del sistema (que en nuestro caso será  $50 \Omega$ ). En este caso pese a que solo tenemos dos stubs, el orden del circuito es  $n=3$  ya que tenemos 3 resonadores, dos colocados en paralelo y el otro pertenece al modelo de la antena en sí misma.

Para obtener un prototipo que sea realizable, los inversores de impedancia son sustituidos por las líneas de un cuarto de longitud de onda anteriormente mencionadas. Además los stubs de media longitud de onda son divididos en dos secciones de un cuarto de longitud de onda cada una.

### 3.3. Métodos de análisis

Cuando se trata de antenas de parche se pueden encontrar una gran variedad de métodos a partir de los cuales se pueden llevar a cabo el análisis de estas. La diferencia entre estos y la razón por la cual se va a escoger uno u otro es la precisión y grado de sencillez que se busque.

En este proyecto los dos métodos que se van a utilizar son el análisis circuital, el cual es más rápido pero menos preciso, y el análisis de onda completa, que es más lento pero a su vez es más preciso.

#### 3.3.1. Método de análisis circuital

Aunque no sea el modelo de análisis más preciso ofrece una interpretación intuitiva y un sentido físico a los fenómenos que se producen en una antena microstrip. Por el contrario, resulta más complicado de modelar el acoplamiento electromagnético.

#### 3.3.2. Método de momentos

Este método permite generar un sistema de ecuaciones lineales, el cual se soluciona simultáneamente usando técnicas matriciales para determinar los coeficientes desconocidos de las funciones base de corriente. Es un método muy preciso a la hora de diseñar circuitos planares o 2D, como es en el caso de este TFG, sin embargo es bastante complicado y requiere de herramientas computacionales avanzadas para poder llevarlo a cabo.

Para llevarlo a cabo se ha utilizado la herramienta *Momentum* de ADS. Para poder utilizarla primero se ha hecho uso de la parte circuital (esquemático) para luego generar el Layout puesto que trabajar directamente con este implica crear rectángulos y cambiar estas dimensiones gráficamente, lo que produciría una mayor probabilidad de error.

La simulación EM precisa permite a los diseñadores de RF / MMIC, RF / diseñadores de placas de alta velocidad, diseñadores de módulos de RF / SiP y diseñadores de antenas mejorar el rendimiento del diseño y aumentar la confianza de que el producto fabricado cumplirá con las especificaciones.

### 3.4. Diseño de la antena original

La primera parte del diseño de todo el circuito es la de diseñar una antena de parche que pueda radiar a la frecuencia deseada, en este caso 2.45 GHz. Este diseño se ha realizado a través del programa Advanced Design System y su herramienta para el cálculo de líneas de transmisión *LineCalc*. Otra opción para realizar el cálculo de la antena es usando el otro programa que se ha utilizado para este proyecto, el AWR Microwave Office a través de su herramienta *TXLine*.

Primero se va a intentar realizar el diseño con el programa AWR para ver que se obtiene y así después poder comparar los resultados obtenidos con los que se obtienen con el ADS.

Para abrir la herramienta, hay que ir a la pestaña *Window* del programa y ahí se selecciona la opción del *TXLine*. Una vez se abre el *TXLine*, hay que ver que datos son necesarios para el cálculo de las dimensiones de la antena. Los datos necesarios son los siguientes:

- Constante dieléctrica
- Tangente de pérdidas
- Conductividad
- Impedancia de la antena
- Frecuencia de trabajo
- Longitud eléctrica
- Altura
- Espesor

Todos estos datos dependen del sustrato que se ha utilizado para fabricar la antena. En este caso el sustrato utilizado ha sido el FR4 (ver en el Anexo I) obtenido a través de la empresa LPKF cuyas especificaciones son las siguientes:

- Constante dieléctrica  $\rightarrow$  4.7
- Tangente de pérdidas : 0.027
- Conductividad :  $4.1e7$  S/m
- Altura : 1.5 mm
- Espesor :  $35 \mu\text{m}$

A su vez la impedancia de la antena es de  $50 \Omega$  y la frecuencia de trabajo, de la que ya se ha hablado, es 2.45 GHz. Otro dato necesario es la longitud eléctrica de la misma que se ha fijado a que debe de ser la mitad de la longitud de onda ( $\lambda/2$ ), lo que se traduce en una longitud eléctrica de 180 grados.

Una vez se han introducido todos los datos dentro del *TXLine*, lo siguiente es calcular la longitud física (L) y la anchura (W) de la línea de transmisión que va a actuar de antena.

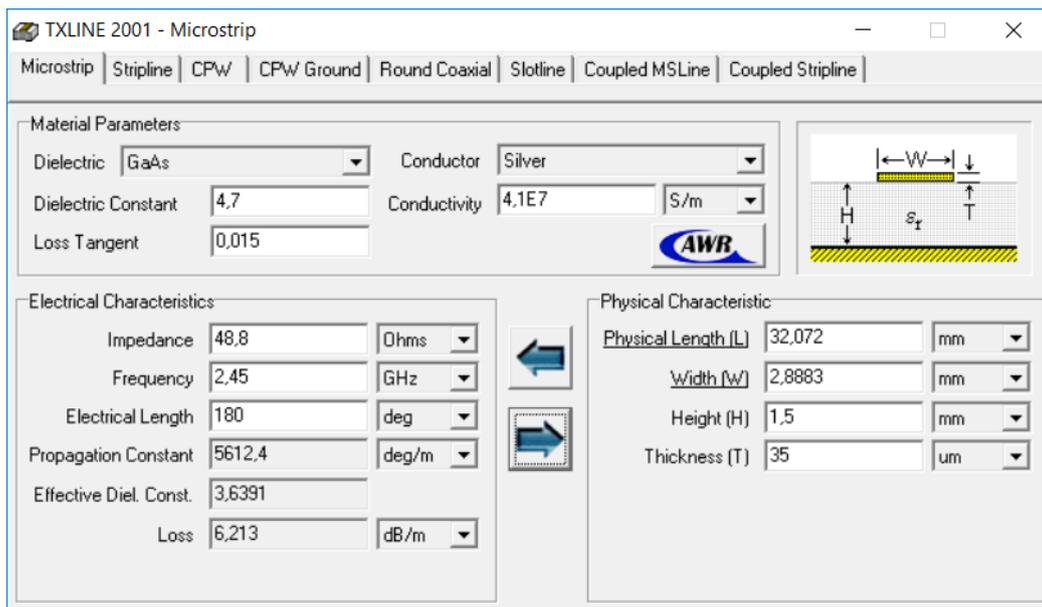


Figura 13 Valores obtenidos con el TXLine para la antena original

En este caso los valores obtenidos han sido los siguientes:

Longitud física (L)	32.072 mm
Anchura (W)	2.8883 mm

### 3.4.1. Antena original sin línea de transmisión

A continuación se va a realizar el diseño del circuito de la antena original pero sin línea de transmisión a la entrada de la antena, el cuál va a estar compuesto de un puerto de 50  $\Omega$  y la propia línea de transmisión que va a actuar de elemento radiante.

La razón de hacer primeramente el diseño sin la línea de transmisión en la entrada es que como se va a poder comprobar a continuación, con el programa AWR no vamos a poder obtener unos resultados que cumplan con las especificaciones establecidas al inicio del proyecto por lo que se va a tener que calcular las dimensiones de la antena con el programa ADS y después introducir los resultados en el programa AWR.

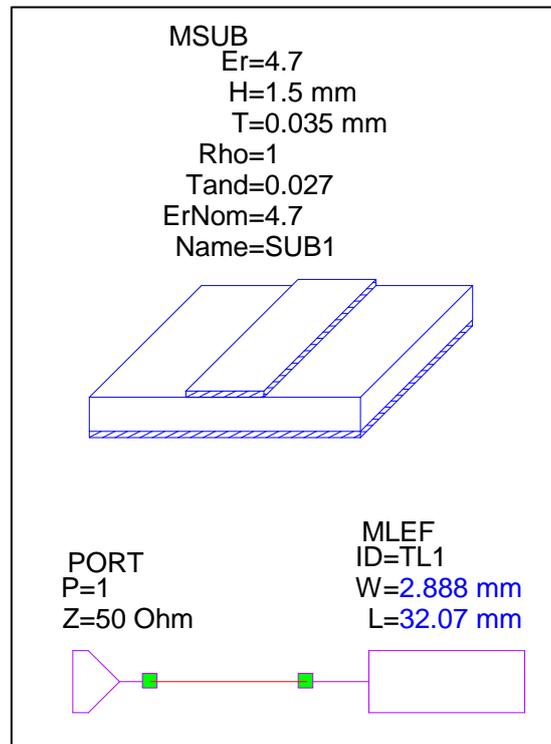


Figura 14 Circuito de una línea de transmisión con los valores obtenidos en el TXLine

Con estas especificaciones se han obtenido los siguientes resultados:

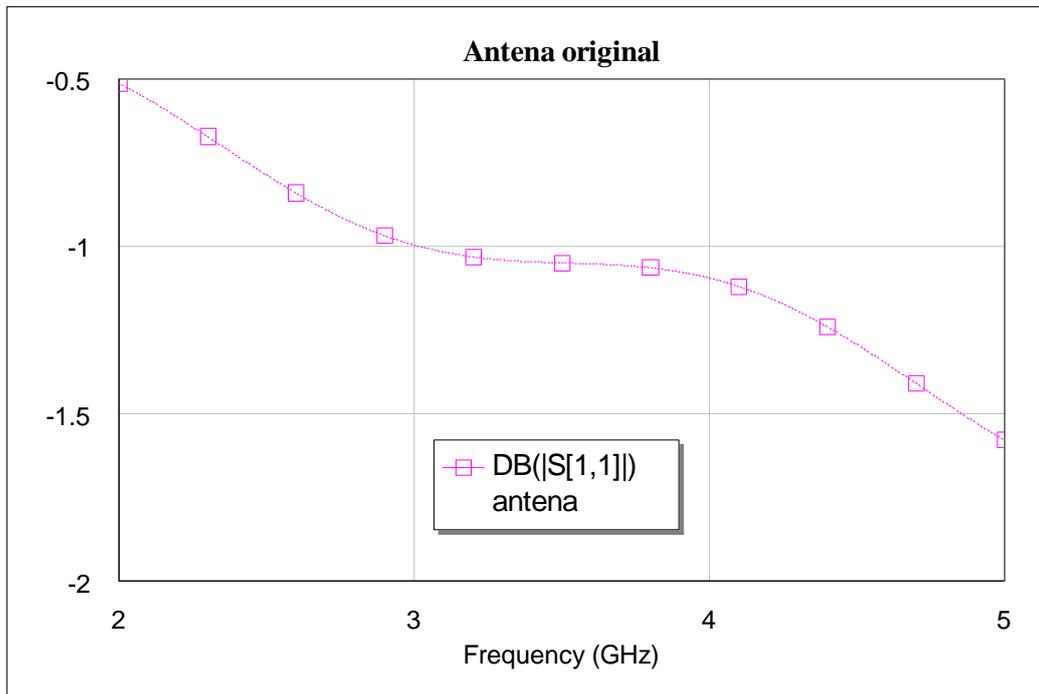


Figura 15 Resultados obtenidos en AWR de la línea de transmisión con los valores obtenidos en el TXLine

Se puede ver como los resultados obtenidos no se corresponden con los que se estaban buscando. Para intentar conseguir algo que se asemejase a los resultados que se querían obtener, se ha intentado aumentar la anchura de la antena pero el propio programa te dice que no se recomienda que el cociente entre la anchura de la línea y la altura del sustrato no supere el valor de 20. Esto se debe a que el modelo circuital que tiene el programa para simular una línea de transmisión microstrip tiene validez para un rango de valores de W/H comprendido entre 0,02 y 20.

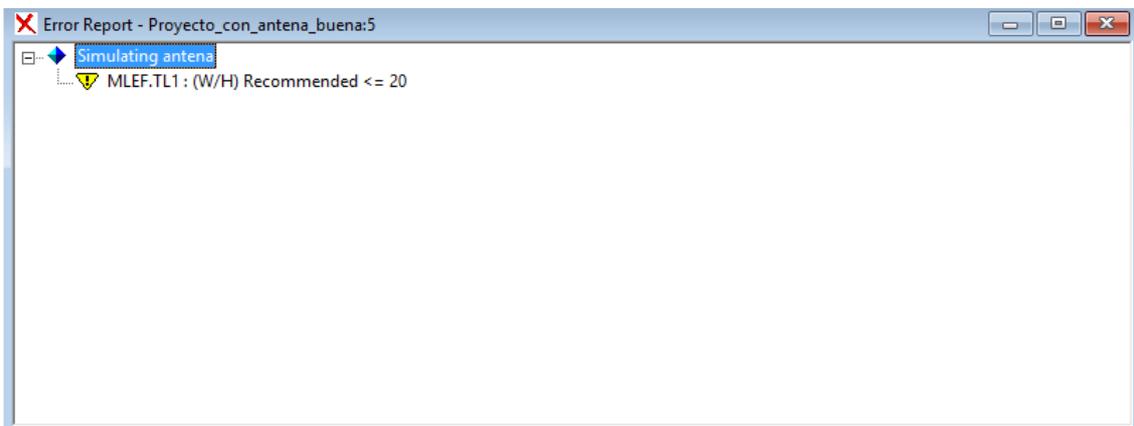


Figura 16 Error producido al aumentar el valor de la anchura de la antena.

Debido a este aviso que nos salta del programa, se van a comprobar los resultados que se obtienen con usando el simulador de onda completa (momentum) del programa ADS para comprobar si obtenemos lo mismo. Si se obtiene algo muy parecido en ambos, el diseño se realizaría con ADS debido a que el análisis con método de momentos es más preciso que el análisis circuital, el cual puede que no sea fiable a la hora de obtener los resultados si nos aparece el error anteriormente comentado.

En el caso del ADS se abre la ventana *Tools* y ahí se selecciona la herramienta *LineCalc*. Una vez se abre la herramienta se ven que parámetros son los que se necesitan para el cálculo de la línea de transmisión.

Los parámetros son los mismos que en el caso anterior:

- Constante dieléctrica
- Tangente de pérdidas
- Conductividad
- Impedancia de la antena
- Frecuencia de trabajo
- Longitud eléctrica
- Altura
- Espesor

Se han introducido los valores dentro del *LineCalc* y de esta manera se obtienen los siguientes resultados:

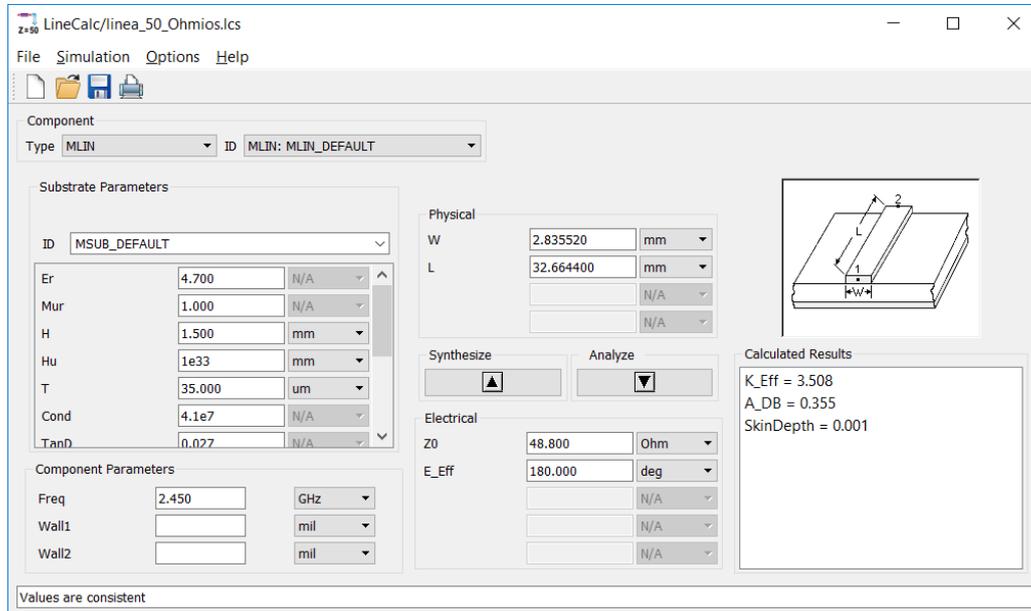


Figura 17 Valores obtenidos con el LineCalc para la línea de transmisión inicial

Longitud física (L)	32.664 mm
Anchura (W)	2.83552 mm

El segundo paso será introducir todos esos valores que se han obtenido con el *LineCalc* en el esquemático que se quiere realizar. El diseño del circuito está formado por los mismos elementos que en el AWR:

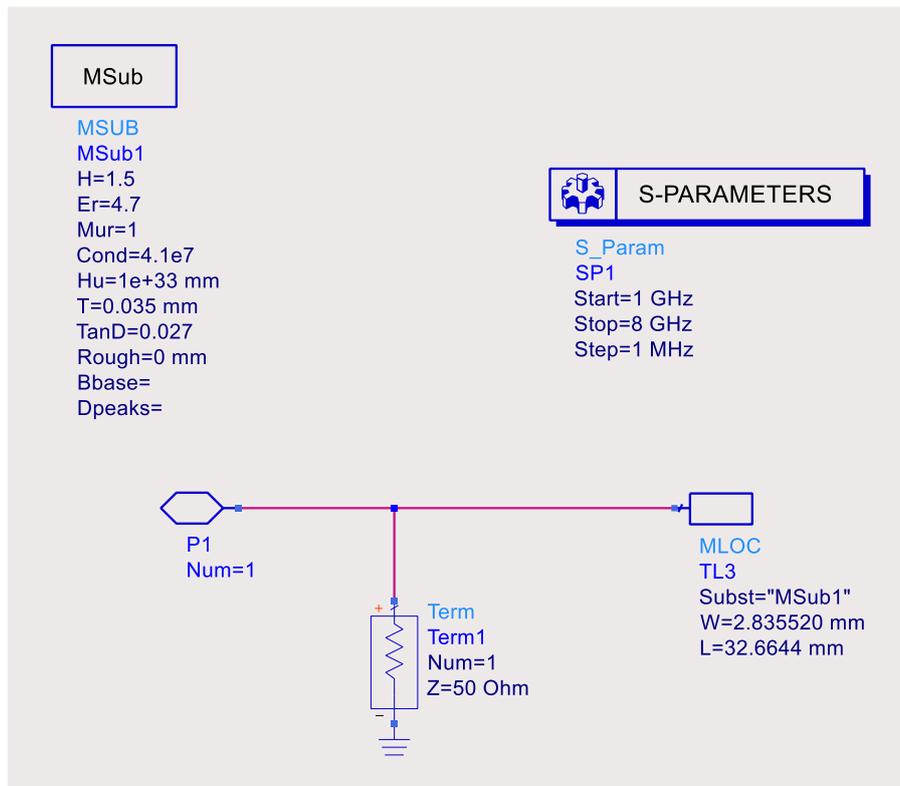


Figura 18 Circuito de la línea de transmisión de impedancia 50  $\Omega$  con los valores obtenidos del *LineCalc*

El siguiente paso una vez se ha creado el esquemático deseado será generar el Layout y una vez creado, se realizará la simulación a partir de aquí.

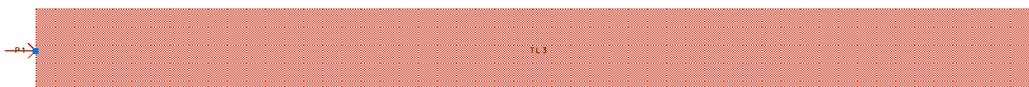


Figura 19 Layout de la línea de transmisión de impedancia 50  $\Omega$  con los valores obtenidos del *LineCalc* y sin mallado

Para poder obtener los resultados primero se tendrá que establecer las distintas opciones del *EM setup*, que es básicamente las opciones para poder realizar el análisis o simulación con el método de momentos.

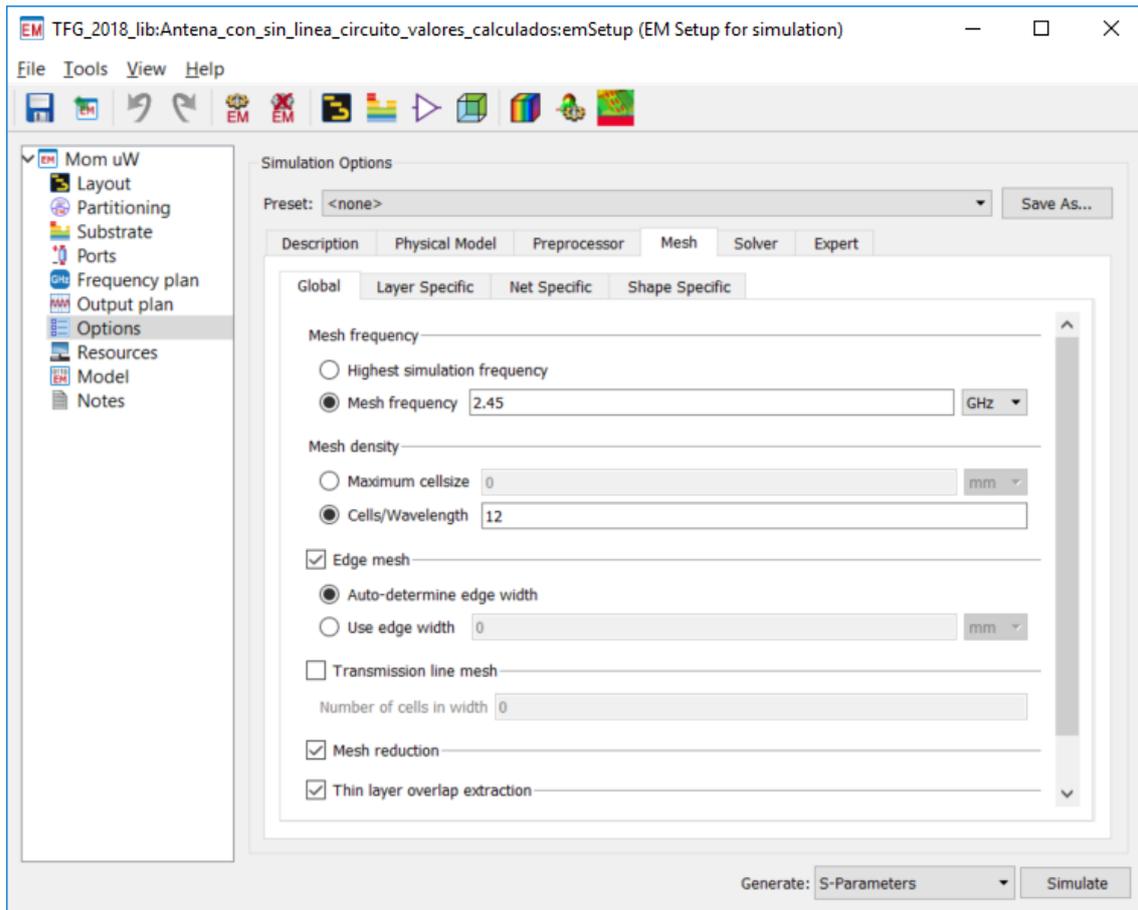


Figura 20 Herramienta EM Setup del ADS

Una de las opciones que se ha modificado del *EM Setup* es el *Frequency plan*, en el cual especificas el rango de frecuencias que quieres abarcar y el paso de frecuencia entre cada punto de estas. Otra opción bastante importante que se ha modificado ha sido el mallado, donde se ha tenido que introducir la frecuencia a la que se quiere realizar el mallado y además, también se ha cambiado el número de células por longitud de onda. En este caso se ha empezado con un valor de 12 células/ $\lambda$  para poder realizar las simulaciones con algo de rapidez.

Con todo ello se consigue mallar el *Layout* del circuito y obtener los valores que este nos produce.

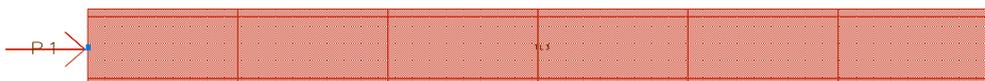


Figura 21 Layout de la línea de transmisión de impedancia  $50 \Omega$  con los valores obtenidos del LineCalc y con mallado

Los resultados obtenidos son los siguientes:

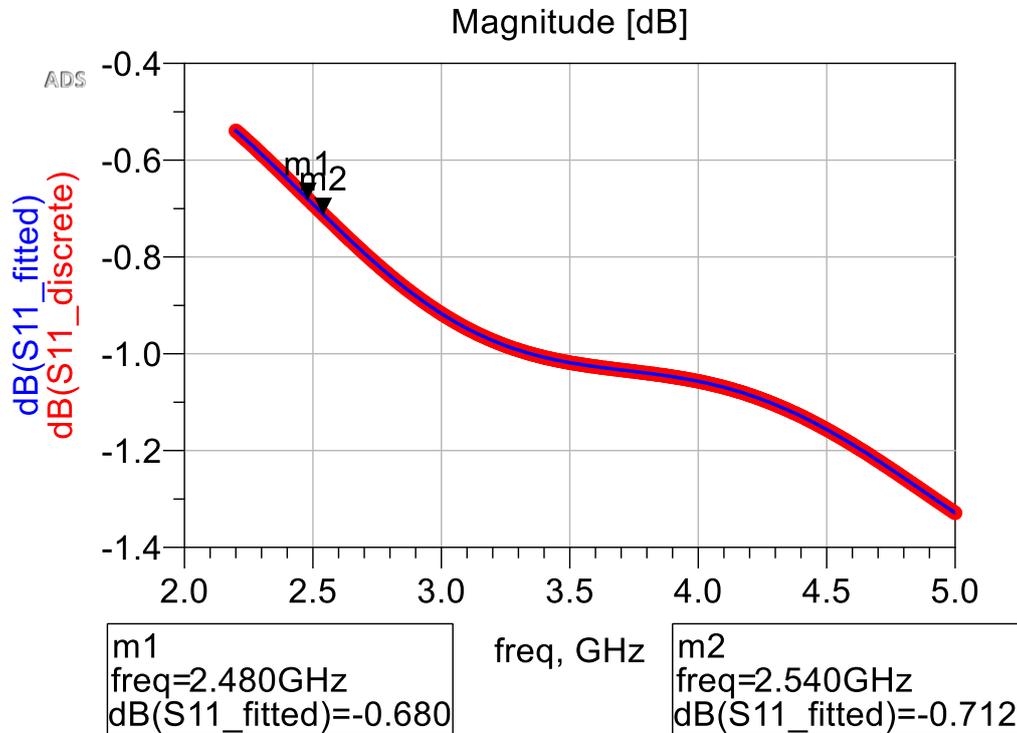


Figura 22 Resultados obtenidos en ADS de la antena original sin línea de transmisión con valores calculados

Como se puede ver, los resultados obtenidos no se corresponden a la respuesta en frecuencia que se está buscando la cual tiene que tener un mínimo en el de  $S_{11}$  a la frecuencia de resonancia que hemos establecido al inicio del proyecto, pero si se han obtenido unos resultados que se asemejan bastante a los obtenidos a través del análisis circuital. Por ello como se ha mencionado antes, se va a proceder a realizar el diseño de la antena original con el programa ADS.

El siguiente paso será iniciar una búsqueda de valores que nos proporcionen la frecuencia de radiación y el nivel de  $S_{11}$  deseado. Este proceso se hará a base de iteraciones en las que hay que ir buscando esa frecuencia de 2.45 GHz que se quiere y a su vez que el nivel de  $S_{11}$  sea lo suficientemente bajo a esa frecuencia.

Este proceso se ha realizado en varias iteraciones en las que buscábamos un valor de anchura que produjese que el valor de  $S_{11}$  en el mínimo de frecuencia fuese lo más negativo posible debido a que la escala que se ha utilizado está en dB. Lo siguiente será buscar el valor de longitud de la antena que nos devolviese el mínimo de frecuencia en la que estábamos buscando.

Tras varias iteraciones en las que se ha ido modificando la longitud de la antenna cada vez menos, los valores de anchura y longitud obtenidos han sido los siguientes:

<b>Anchura (W)</b>	80 mm
<b>Longitud (L)</b>	26.9 mm

Como se puede visualizar en el esquemático de la figura 23 la simulación se realiza con un puerto concentrado de 50  $\Omega$ , el cual está conectado a la antenna directamente sin ninguna línea de transmisión.

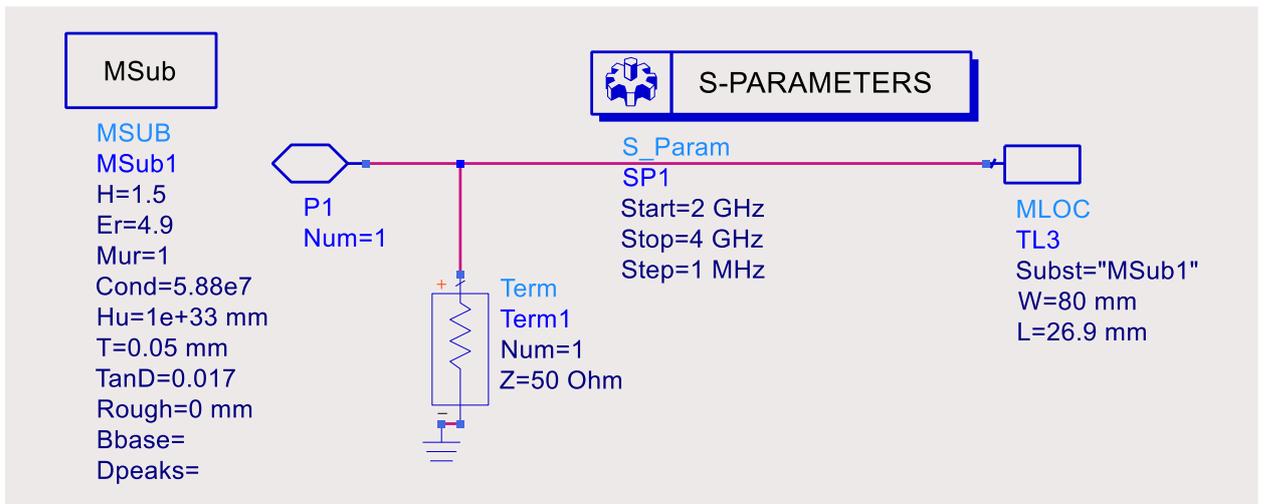


Figura 23 Circuito de la antenna original sin línea de transmisión en ADS

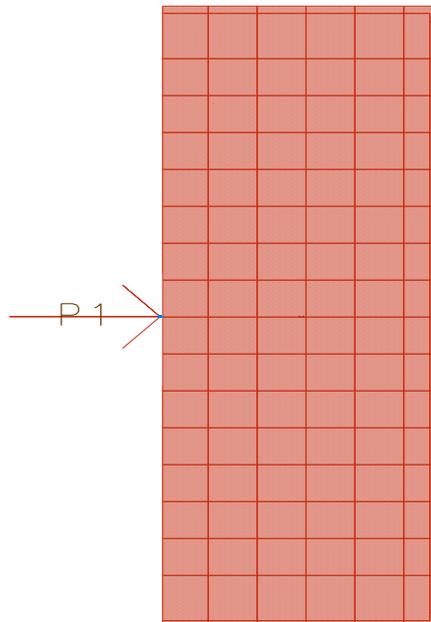


Figura 24 Layout de la antenna original sin línea de transmisión

Finalmente conseguimos los valores de la antena para que radie a nuestra frecuencia de 2.45 GHz con unos valores decentes de  $S_{11}$ .

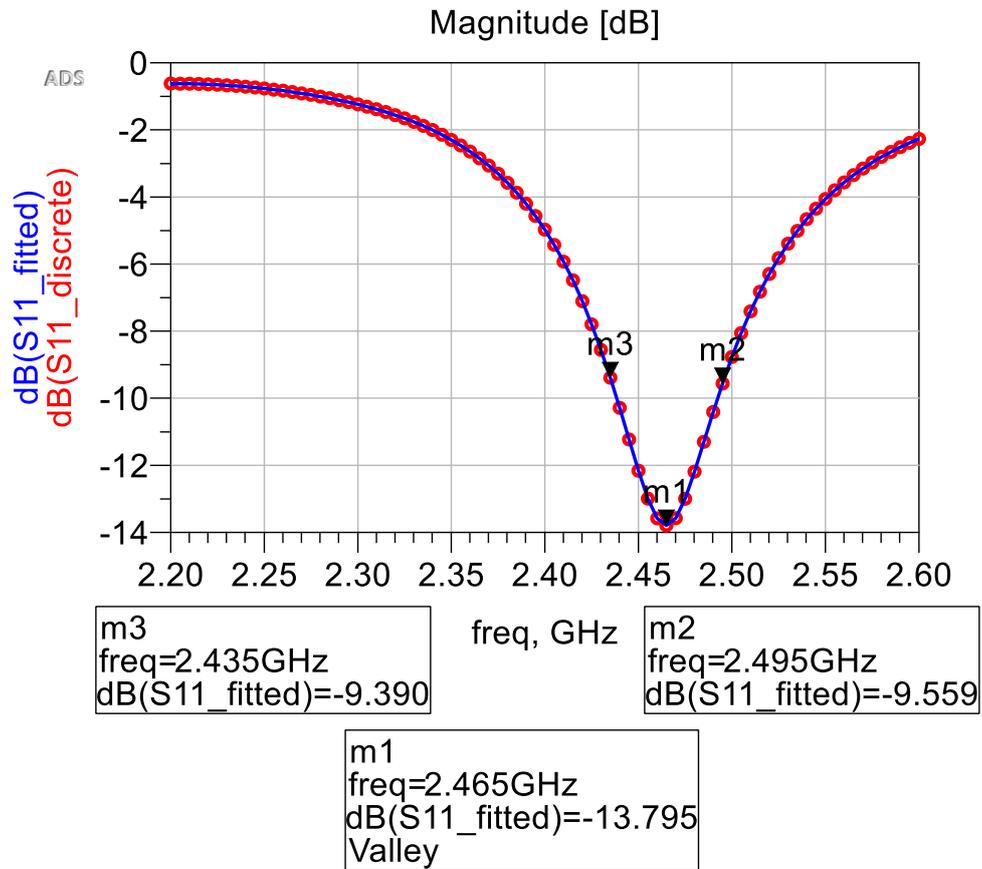


Figura 25 Resultados obtenidos en ADS con la antena original sin línea de transmisión

Debido a que con el análisis circuital no se han podido conseguir unos resultados que cumpliesen con los requisitos impuestos, para poder hacer uso del programa AWR lo que se ha hecho ha sido exportar los resultados obtenidos con el ADS para así poder introducirlos en el AWR Microwave Office.

Lo primero de todo ha sido visualizar en que formato se exportan los datos en el programa AWR puesto que de la misma manera que exportan, también se importan. Haciendo clic con el botón derecho sobre la opción de *Output Files* dentro de la ventana *Project*, aparece la pestaña *Add Port Parameter Files*.

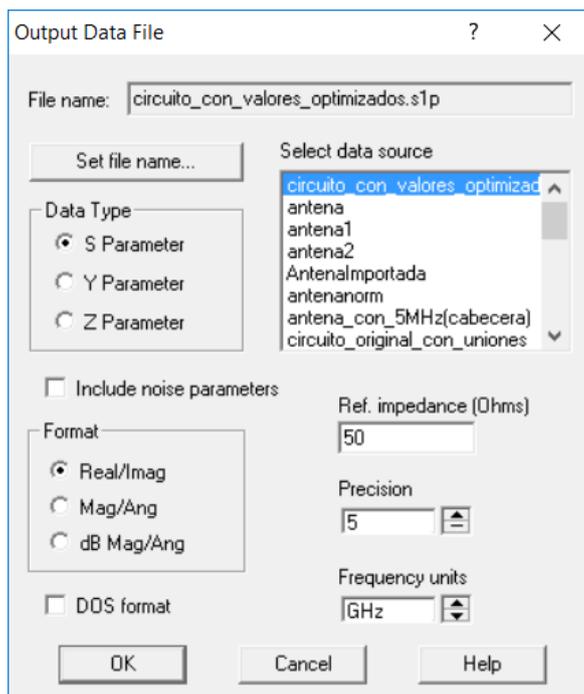


Figura 26 Pestaña Output Files del AWR

Se puede ver como el formato en el que se exporta el archivo es .s1p y es 1 debido a que el circuito solo cuenta con un puerto. Dentro de esta ventana se elegirá el tipo de datos y el formato en el que se quieren exportar. En este caso se quieren exportar los Parámetros S y en el formato Real/Imaginario.

Lo que interesa de este archivo es la estructura que sigue el mismo para así poder modificar el archivo que se va a exportar con el Advanced Design System.

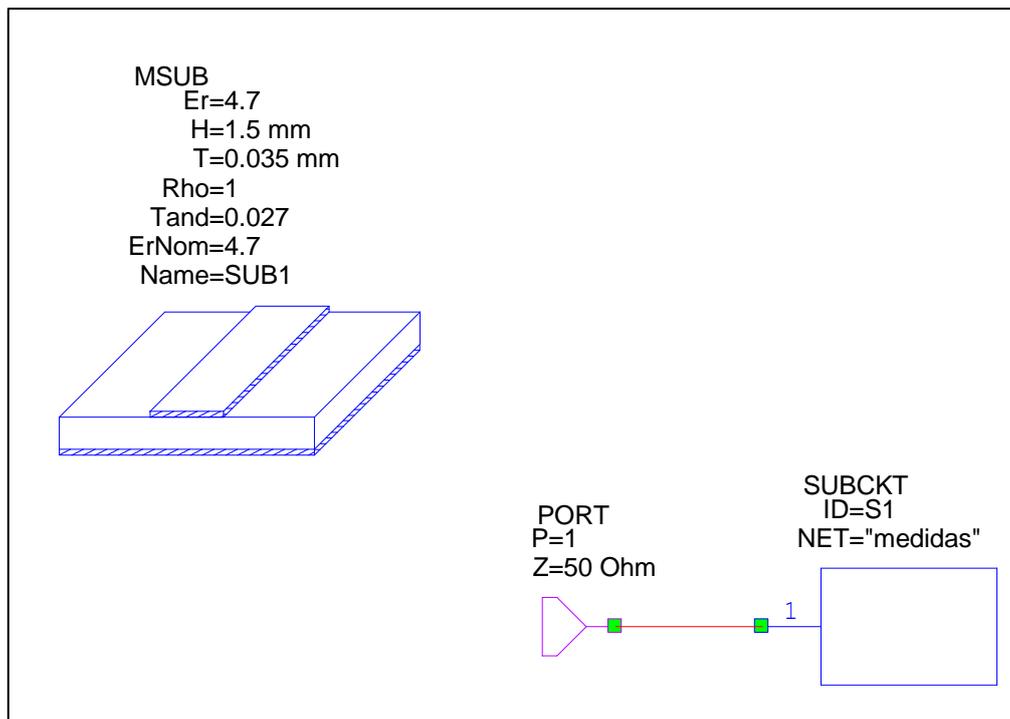
!freq-unit	param-type	data-format	keyword	impedance-ohms
# GHz	S	RI	R	50
!Freq	ReS11	ImS11		
2.2	0.5293	-0.84199		
2.205	0.52072	-0.84731		
2.21	0.51206	-0.85256		
2.215	0.50334	-0.85772		
2.22	0.49455	-0.86281		
2.225	0.4857	-0.86781		

Figura 27 Archivo importado del AWR

Lo que se necesita va a ser la cabecera del archivo para poder copiarla en el archivo exportado con ADS. El siguiente paso es exportar la gráfica con los resultados obtenidos a un documento del formato txt. A continuación lo que hay que hacer es combinar ambos archivos de manera que se tenga un archivo con el formato del exportado con AWR pero con los resultados obtenidos con el ADS. Una vez se tiene creado el archivo, lo siguiente que hay que hacer será cambiar su formato a .s1p para así poder introducir este archivo en el programa AWR.

Para importar el archivo al programa AWR, hay que meterse en la ventana Project y ahí haciendo clic derecho en la opción Data Files, se selecciona la herramienta Import Data File para poder introducir el archivo en el programa. Una vez introducido el archivo, hay que ir a la pestaña Elements y ahí introducir mediante la opción Subcircuits, el circuito requerido en el esquemático.

De esta manera el esquemático quedaría de la siguiente forma:



*Figura 28 Circuito de la antena original sin línea de transmisión con el subcircuito del archivo importado*

En la figura 28 se puede observar como simplemente se ha añadido un puerto de entrada al subcircuito que actuará como antena. Con todo esto, los resultados que se van a poder sacar de este circuito van a ser exactamente los mismos que los obtenidos con el ADS puesto que se han exportado los datos de ahí.

Vamos a comprobar lo dicho anteriormente con una gráfica de este último circuito:

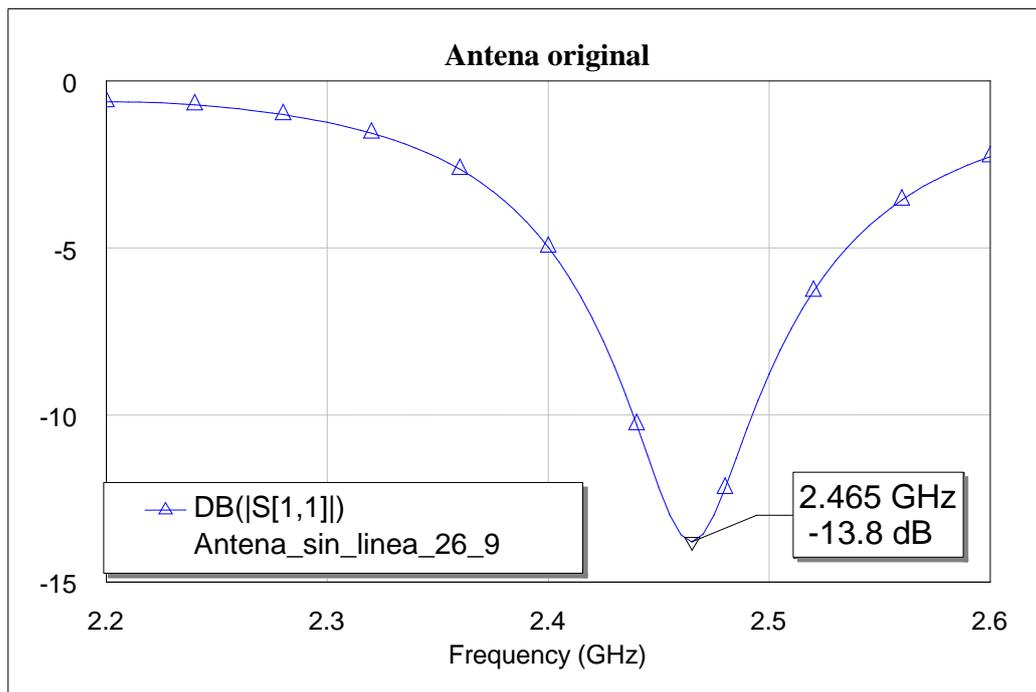


Figura 29 Resultados en AWR de la antena original definitiva

### 3.4.2. Antena original con línea de transmisión

Una vez se ha conseguido obtener la antena que radie a la frecuencia deseada y después de haberse exportado para ser utilizada en el programa AWR, vamos a añadirle la línea de transmisión a la entrada de la antena que será de impedancia  $50 \Omega$  puesto que será a través de ahí por donde alimentaremos la antena de parche.

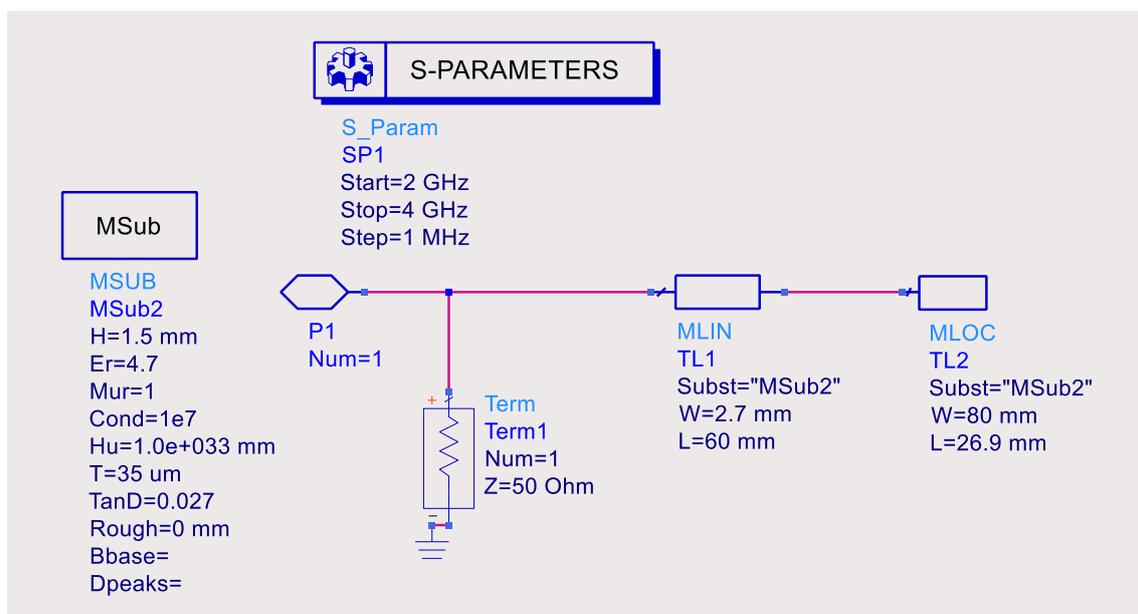


Figura 30 Circuito de la antena original con línea de transmisión

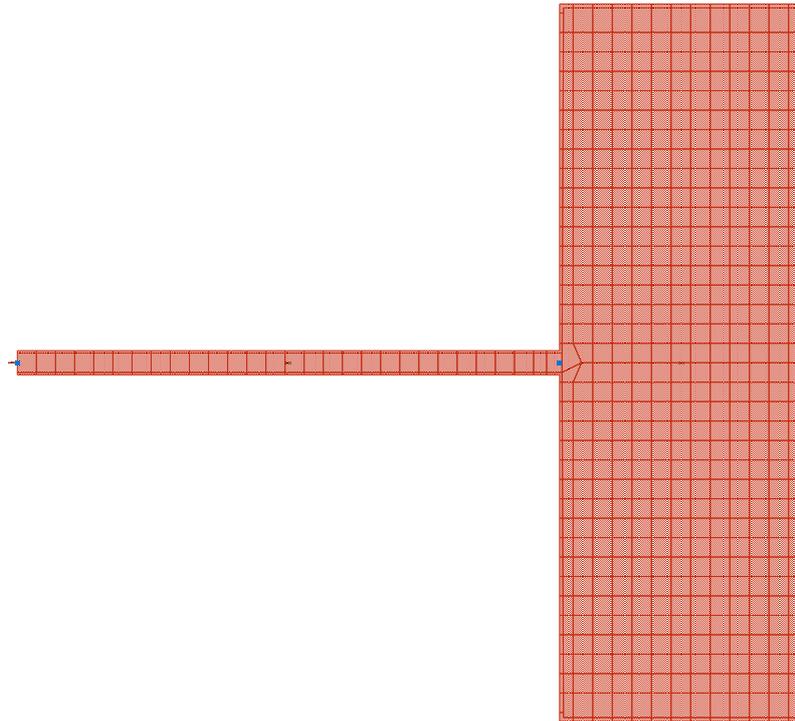


Figura 31 Layout de la antena original con línea de transmisión

Lo siguiente una vez se tiene el diseño final de la antena es obtener los resultados producidos por este circuito.

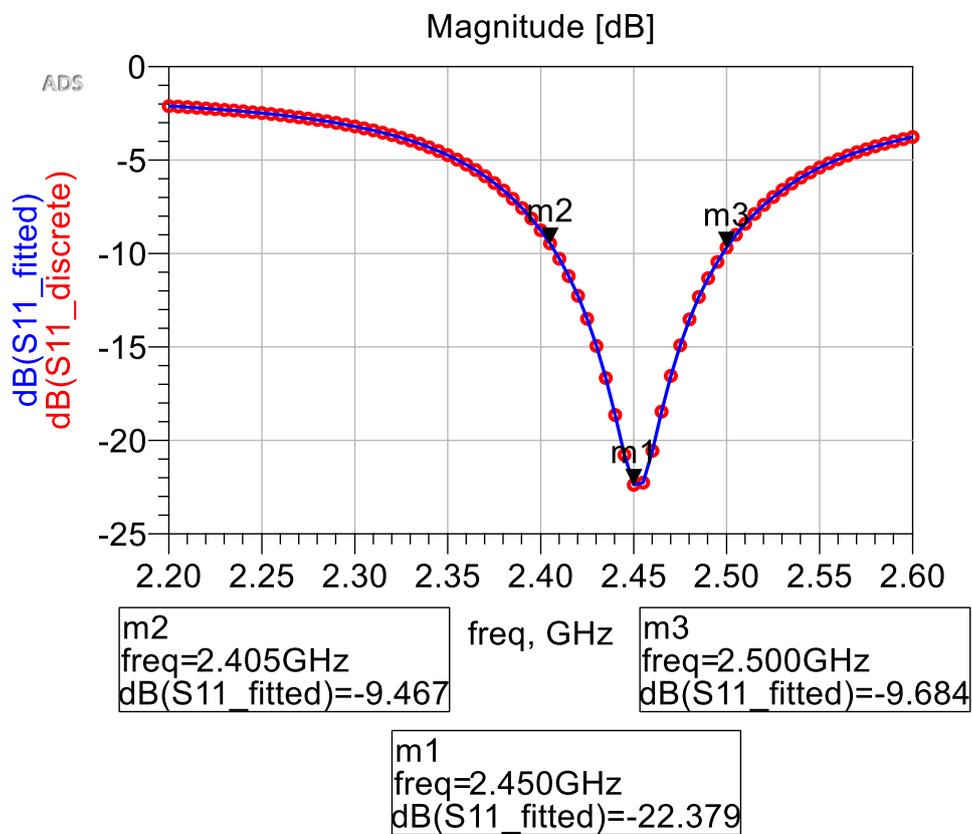


Figura 32 Resultados obtenidos en ADS con la antena original con línea de transmisión

A simple vista se puede observar como el mínimo de frecuencia se ha desplazado a 2.45 GHz, lo que es beneficioso puesto que era la frecuencia que estábamos buscando idealmente. Además la línea de transmisión ha hecho que la reflexión a la frecuencia de resonancia baje aún más.

Una vez que se tiene el diseño de la antena, se pueden obtener los valores de los parámetros de ganancia y eficiencia de radiación para una posible comparación con el diseño final que obtengamos.

Lo primero es confirmar cual la frecuencia de radiación a la que se tiene la máxima ganancia ya que se ha visto como el mínimo de frecuencia se ha movido a 2.45 GHz. Esto se ha podido visualizar gracias a la pestaña *Far Field* de la ventana *Layout*, donde hemos podido realizar una representación de la ganancia en función de la frecuencia.

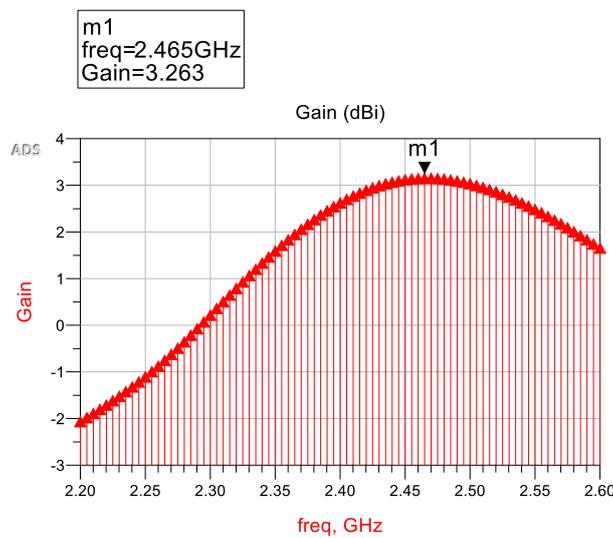


Figura 33 Gráfica de la ganancia de la antena original con línea de transmisión

Se puede observar como la frecuencia a la que obtenemos la máxima ganancia sigue siendo 2.465 GHz. Una vez se ha confirmado esto, hay que obtener los valores de los parámetros gracias al programa ADS que te permite ver el valor de estos para todas las frecuencias analizadas.

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.465
Input power (Watts)	0.00246439
Radiated power (Watts)	0.000868084
Directivity(dBi)	7.79481
Gain (dBi)	3.26334
Radiation efficiency (%)	35.2252

Figura 34 Parámetros de la antena original con línea de transmisión

Para la frecuencia deseada, el valor de ganancia es 3.26 dBi y la eficiencia de radiación es 35.23%. Con respecto al diseño final que vamos a realizar vamos a establecer unos objetivos a cumplir por estos parámetros por lo que la ganancia no debería bajar a más de la mitad y la eficiencia de radiación debería reducirse aproximadamente en un 10% como máximo.

Aparte de visualizar los valores de ganancia y eficiencia de radiación, también es necesario visualizar el diagrama de radiación de la antena puesto que no queremos que esto varíe con respecto al diagrama de radiación de la antena adaptada. Se visualizará una representación 3D del diagrama de radiación y dos cortes en 2D de este, el corte XZ ( $\Phi=0^\circ$ . Y variación en  $\Theta$ ) y el corte YZ ( $\Phi=90^\circ$  y variación en  $\Theta$ ). Estos dos cortes en 2D corresponden al plano E y el plano H respectivamente.

Para obtener estos cortes se ha tenido que seleccionar en la ventana del Layout de ADS la pestaña EM, y dentro de esta se ha seleccionado la opción *Post-Processing* y ahí la de *Far Field*. Una vez nos seleccionamos la opción *Far Field*, hay que dirigirse a la pestaña *Far Field Cut* donde habrá que fijar el valor de  $\Phi$  al valor deseado y dejar libre  $\Theta$  para que la variación se produzca con respecto a esta variable.

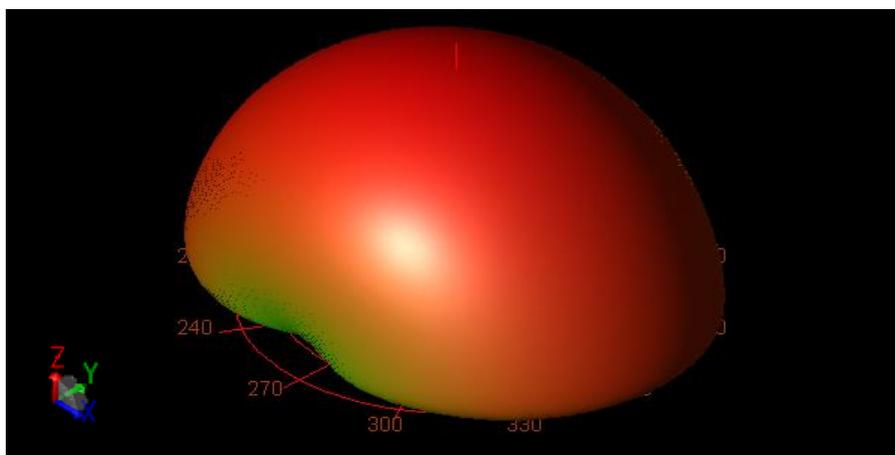


Figura 35 Diagrama de radiación 3D de la antena original con línea de transmisión

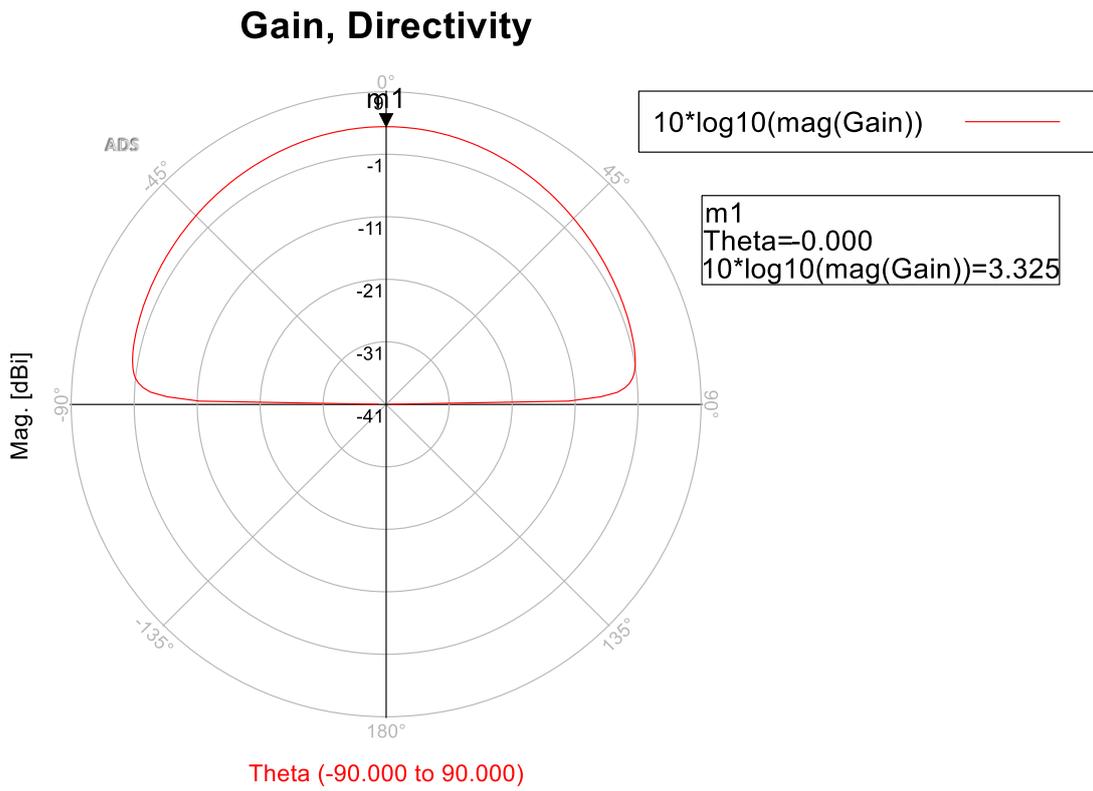


Figura 36 Corte XZ del diagrama de radiación de la antena original con línea de transmisión

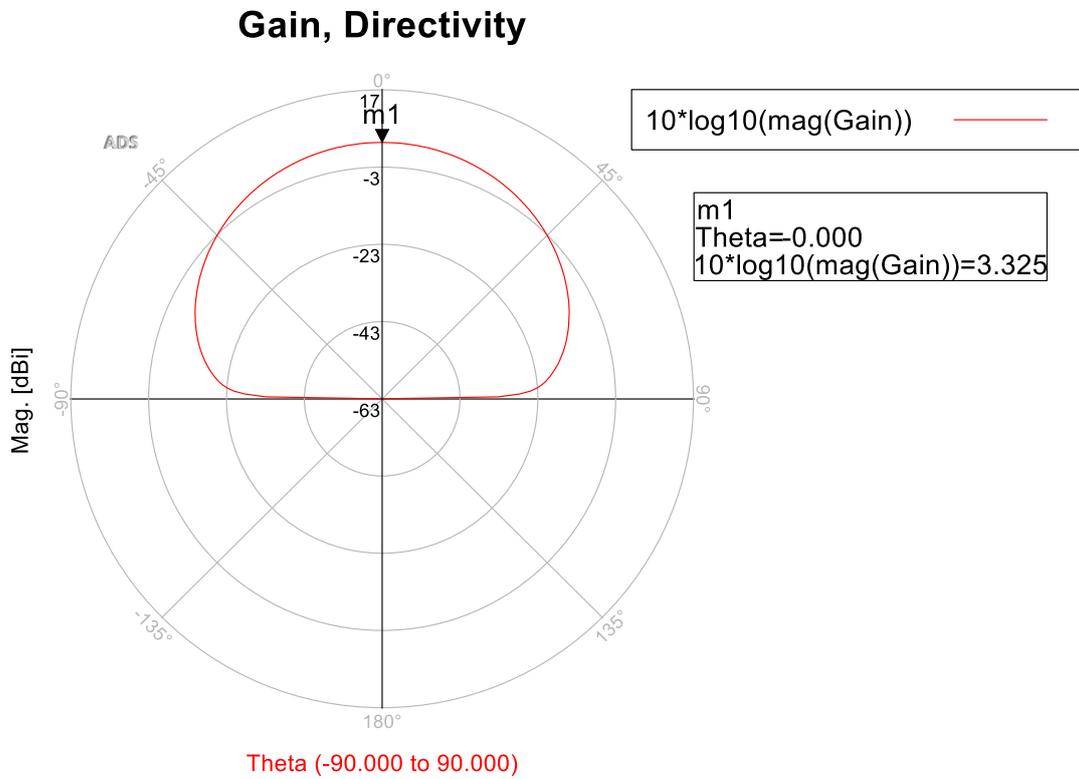


Figura 37 Corte YZ del diagrama de radiación de la antena original con línea de transmisión

### 3.5. Cálculo de valores de impedancias de las líneas

A continuación se muestran los pasos que se han seguido para el cálculo de las impedancias que componen el circuito de adaptación:

El requisito que se establecía para el circuito es que el valor del coeficiente de onda estacionaria fuese  $S=2$ . Esto se traduce a que ese ancho de banda buscado se establece a unos -9,54 dB en la respuesta en frecuencia de la antena. Este último valor se ha calculado de la siguiente manera:

$$\boxed{\rho = \frac{1 - S}{1 + S} \quad (1)} \quad \text{-----} \rightarrow \quad \boxed{\rho_{dB} = 20 * \log_{10} |\rho| \quad (2)}$$

Como uno de los datos necesarios para el cálculo del factor de calidad es el ancho de banda, habrá que ir a la gráfica del  $S_{11}$  de la antena y ahí buscar el valor del coeficiente de reflexión obtenido. De esta manera se pueden observar dos valores de frecuencia que proporcionan un ancho de banda  $BW_{ant}$ .

Una vez se tiene este ancho de banda, el siguiente paso es calcular el valor del factor de calidad  $Q$ .

$$Q = \frac{1}{B_{ant}} * \frac{S - 1}{\sqrt{S}} \quad (3)$$

Como se puede observar en la fórmula anterior,  $Q$  depende del ancho de banda relativo,  $B_{ant}$ , y de  $S$ . En este caso  $B_{ant}$  no es exactamente  $BW_{ant}$ , sino que es este valor dividido por el valor de la frecuencia central de la antena, que en nuestro caso es 2.45 GHz. Por todo esto se consigue un valor de  $Q$  de 28.87.

Una vez obtenido el valor de  $Q$ , el siguiente paso es hallar el valor del decremento  $\delta$  debido a que con este valor y gracias a [6], se puede obtener el valor de los coeficientes  $g_i$ .

$$\delta = \frac{\pi}{2 * \Delta * Q} \quad (4)$$

$$\text{donde} \quad \Delta = \tan\left(\frac{\pi * B}{2}\right) \quad (5)$$

En este caso el valor de B se calculará dividiendo el valor del ancho de banda que se quiere conseguir con la red de adaptación por el valor de la frecuencia central de la antenna original. Inicialmente se está buscando un valor de ancho de banda de 200 MHz por lo que  $B=0.082$ . Con todo esto se ha obtenido un valor de  $\delta$  de 0.67 y gracias a [6] se pueden hallar unos valores para los parámetros  $g_i$ :

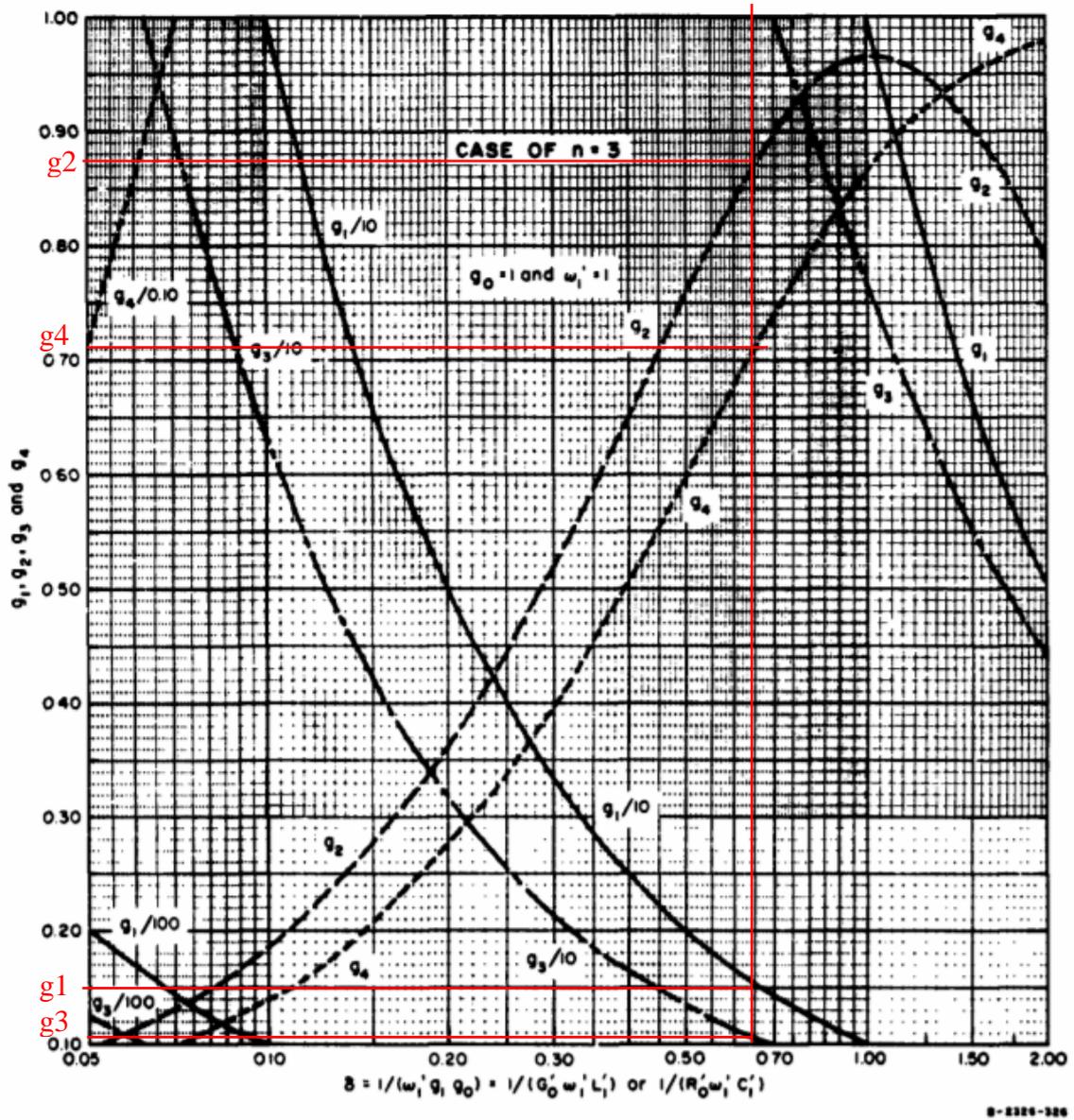


Figura 38 Figura obtenida de [6]

$g_0$	1
$g_1$	1.5
$g_2$	0.87
$g_3$	1.05
$g_4$	0.71

Los diferentes parámetros  $Y_{ci}$  y  $J_{i,i+1}$  deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$J_{12} = \sqrt{\frac{\Delta * Y_{c2}}{R_0 * g_2}} \quad (6)$$

$$J_{i,i+1} = \Delta * \sqrt{\frac{Y_{ci} * Y_{c,i+1}}{g_i * g_{i+1}}} \quad i = 2, 3, \dots, n - 1 \quad (7)$$

$$J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{\Delta * Y_{cn}}{g_n * g_{n+1} * Z_0}} \quad (8)$$

A su vez para obtener el valor de impedancias de las líneas en el caso del caso paralelo resonante se calcularán a través de las siguientes fórmulas, para valores de  $i=2,3,\dots,n$  (En el caso del paralelo resonante también se aplica para  $i=1$ ) :

$$Y_c^{i,i+1} = J_{i,i+1} * \cos\left(\frac{\pi * B}{4}\right) \quad (9)$$

$$Y'_{ci} = \frac{[Y_{ci}\Delta - (Y_c^{i-1,i} + Y_c^{i,i+1})\Gamma](a_i - \Gamma^2)}{(1 + a_i)\Gamma} \quad (10)$$

$$Y''_{ci} = a_i * Y'_{ci} \quad (11)$$

Donde

$$\Gamma = \tan\left(\frac{\pi * B}{4}\right) \quad (12)$$

En nuestro diseño como hay dos resonadores se tiene un orden de  $n=3$  puesto que el primer resonador se encuentra en la antena. Debido a esto, de las fórmulas anteriores se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$J_{12} = \sqrt{\frac{\Delta * Y_{c2}}{R_0 * g_2}} \quad (13)$$

$$J_{23} = \Delta * \sqrt{\frac{Y_{c2} * Y_{c3}}{g_3 * g_4}} \quad (14)$$

$$J_{34} = \sqrt{\frac{\Delta * Y_{c2}}{g_3 * g_4 * Z_0}} \quad (15)$$

$$Y'_{c2} = \frac{[Y_{c2}\Delta - (Y_c^{1,2} + Y_c^{23})\Gamma](a_2 - \Gamma^2)}{(1 + a_2)\Gamma} \quad (16)$$

$$Y'_{c3} = \frac{[Y_{c3}\Delta - (Y_c^{23} + Y_c^{34})\Gamma](a_3 - \Gamma^2)}{(1 + a_3)\Gamma} \quad (17)$$

Como se puede ver, estos no son los valores de las impedancias sino que se llega a ellos a través de las fórmulas anteriormente descritas y a otra más que se muestra a continuación, la cual te va a permitir pasar de los parámetros  $J_{i,i+1}$  a la admitancia de las líneas  $Y_c^{i,i+1}$ . Para obtener las impedancias de las líneas  $Z_c^{i,i+1}$ , solo se tiene que hacer la inversa de la admitancia.

$$Y_c^{i,i+1} = J_{i,i+1} * \cos\left(\frac{\pi}{4} * B\right) \quad (18)$$

Nos falta el valor de  $Y_{c2}$  y para ello se ha tenido que suponer el valor de la impedancia de la línea que va entre los dos stubs,  $Z_c^{23}$ . Se ha supuesto muy alta para que así el ancho de esa línea sea lo más pequeño posible y para que sea posible la fabricación con los medios de los que se dispone en el laboratorio. La razón de tener que haber supuesto el valor de esa impedancia es que realmente la fórmula para el cálculo de  $Y_c^2$  solo es aplicable para el caso resonante serie.

El procedimiento para el cálculo de  $Y_{c2}$  es el siguiente:

- Primero se pasa de  $Z_c^{23}$  a  $Y_c^{23}$  mediante la inversa.
- A continuación gracias a la ecuación 18 hallas el valor de  $J_{23}$ .
- Una vez se tiene  $J_{23}$ , mediante la ecuación 14 se calcula  $Y_{c2}$  puesto como criterio de diseño está establecido que  $Y_{c2}$  e  $Y_{c3}$  son iguales.

Para hacer los cálculos más precisos, he implementado un pequeño script de Matlab del cuál he obtenido todos los valores:

```

format long
B=200e6/2.45e9;
Bant=95e6/2.45e9;
S=2;
Q=(1/Bant)*((S-
1)/2*sqrt(S));
A=tan(pi/2*B)
decremento=pi/(2*A*Q)
g0=1;
g1=1/decremento;
g2=0.87;
g3=1.05;
g4=0.71;
Ro=48.8;
Zo=50;
a3 = 1;
a2 = a3;
Zc23=120;

Yc23=1/Zc23;
J23=Yc23/(cos(pi*B/4));
Yc2=sqrt((J23/A)^2*g2*g3);
Yc3=Yc2;
J12=sqrt((A*Yc2)/(Ro*g2));
Yc12=J12*cos(pi/4*B);
Zc12=1/Yc12;
J34=sqrt((A*Yc3)/(g3*g4*Zo));
Yc34=J34*cos(pi/4*B);
Zc34=1/Yc34;

gamma=tan(pi/4*B);
Yc2_stub=(Yc2*A-(Yc12+Yc23)*gamma)*((a2-gamma^2)/((1+a2)*gamma));
Yc3_stub=(Yc3*A-(Yc34+Yc23)*gamma)*((a3-gamma^2)/((1+a3)*gamma));
Zc2_stub=1/Yc2_stub;
Zc3_stub=1/Yc3_stub;

```

Los valores que se han obtenido con el programa son los siguientes:

$Z_c^{12}$	73,0852 $\Omega$
$Z_c^{23}$	120 $\Omega$
$Z_c^{34}$	68,4808 $\Omega$
$Z_{c2}^{stub}$	19,6318 $\Omega$
$Z_{c3}^{stub}$	19,81 $\Omega$

Una vez tienes el valor de las impedancias de las líneas hay que calcular el valor de las amplitudes y longitudes de estas. Para ello, se ha usado la opción *TXLine* del programa AWR Microwave Office, programa con el cuál se ha realizado el análisis circuital de la red de adaptación. Con todo ello, los resultados de anchura y longitud obtenidos son los siguientes:

	$Z_c^{12}$	$Z_c^{23}$	$Z_c^{34}$	$Z_{c2}^{stub}$	$Z_{c3}^{stub}$
<b>Anchura (W)</b>	1,3041 mm	0,312793 mm	1,501 mm	10,3428 mm	10,2265 mm
<b>Longitud (L)</b>	16,908 mm	17,6258 mm	16,814 mm	30,5502 mm	30,5672 mm

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

## OBTENIDOS

En este apartado se van a exponer los resultados obtenidos mediante en el análisis circuital y mediante el análisis del método de momentos con los distintos valores obtenidos a lo largo del presente proyecto. En este caso se expondrán los resultados de 4 casos distintos los cuales son: resultados obtenidos con los valores calculados inicialmente, los obtenidos después del proceso de optimización sin restricciones, los obtenidos después del proceso de optimización con restricciones y finalmente, los resultados obtenidos con los valores finales a los que se ha llegado.

#### 4.1. Resultados obtenidos con los valores calculados

##### 4.1.1. Análisis circuital

Una vez se han obtenido los valores de las anchuras y longitudes de las líneas, lo siguiente es pasar a la implementación del circuito. Para ello hay que introducir esos valores para así poder realizar el análisis circuital y ver lo que se han obtenido.

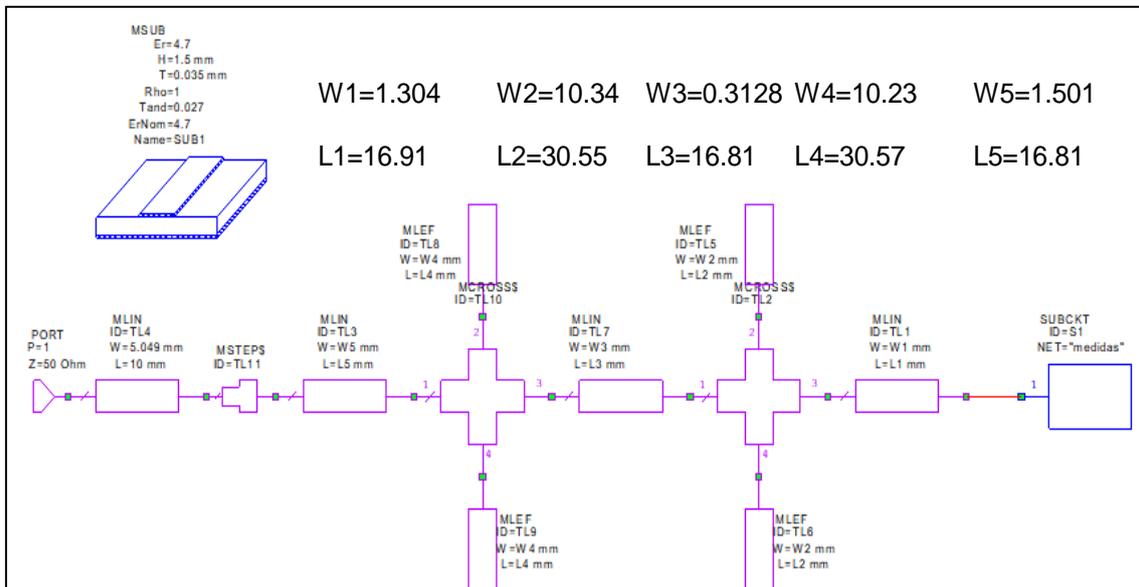


Figura 39 Circuito completo en AWR con los valores calculados

Los valores obtenidos con el circuito implementado con los valores calculados han sido:

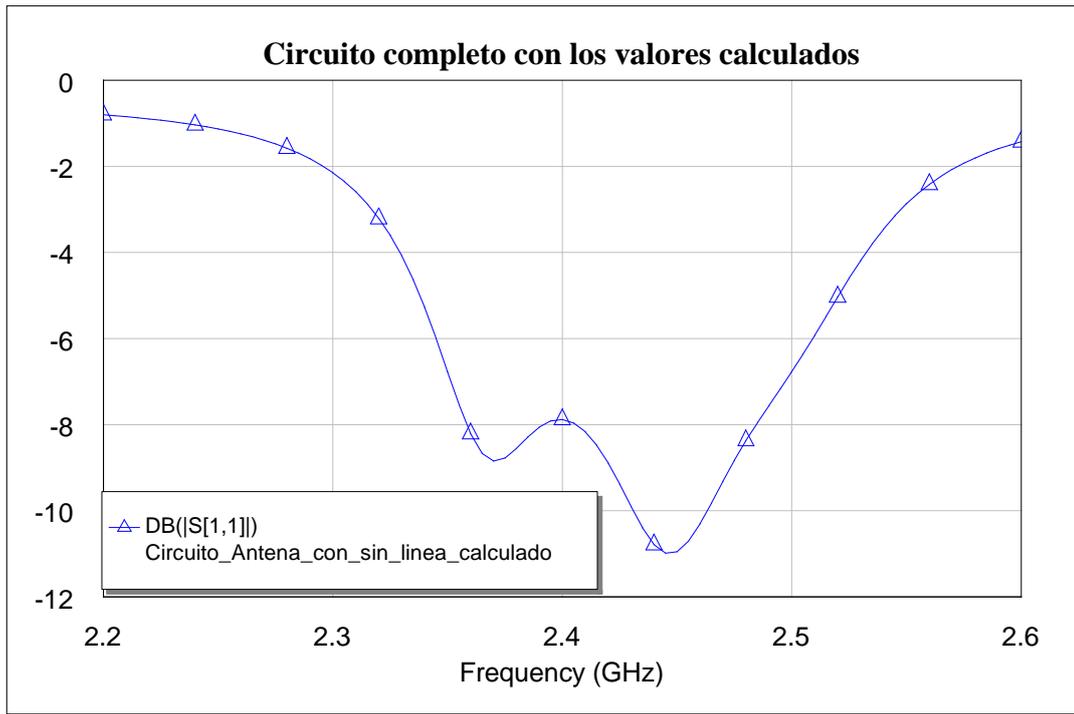


Figura 40 Resultados obtenidos en AWR con los valores calculados

Como se puede observar, los valores obtenidos no cumplen con las especificaciones iniciales pues el ancho de banda con el criterio de  $S_{11}$  menor que -9.54 dB no está cumplido.

Es normal que con los valores teóricos no se obtenga un resultado válido por lo que habrá que realizar un proceso de optimización de estos valores para poder conseguir esos valores de diseño esperados.

#### 4.1.2. Análisis mediante método de momentos

Este Análisis de método de momentos se va a realizar con el programa Advanced Design System. Van a introducirse los valores calculados de manera teórica para ver que se obtiene ya que el método de resolución que usan ambos programas es bastante distinto.

Como se ha comentado en el proceso del análisis de momento para el cálculo de la antena principal, lo primero que habrá que hacer es crear el esquemático con los valores requeridos.

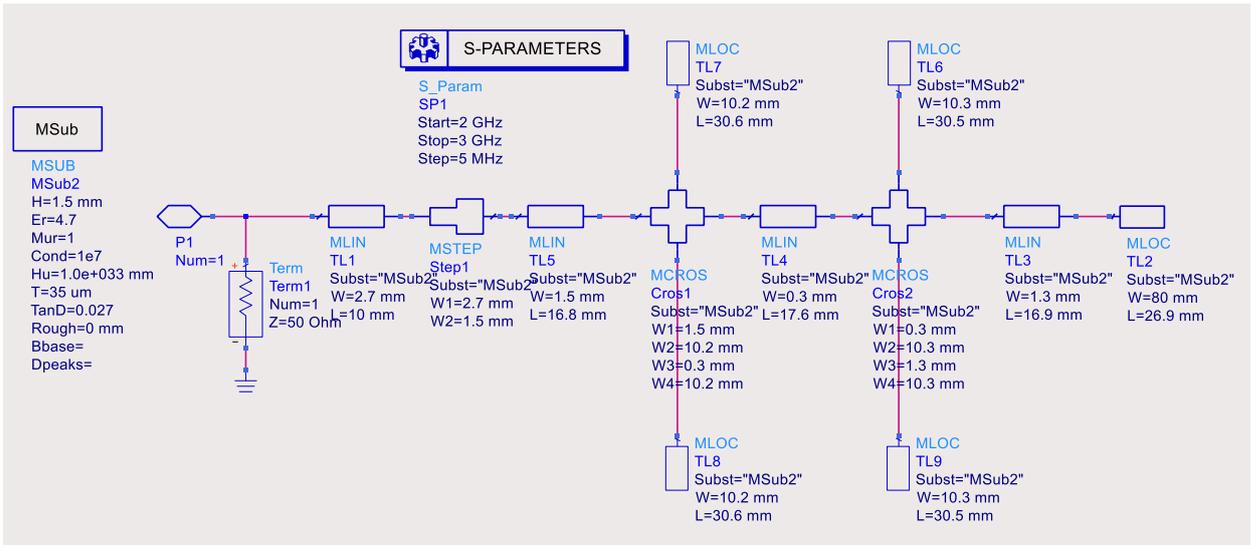


Figura 41 Circuito completo en ADS con los valores calculados

El siguiente paso es generar el Layout del circuito diseñado. Una vez se ha generado el Layout habrá que realizar la simulación y para ello lo primero que hay que hacer es mallar el circuito. En este caso se ha utilizado también el valor de 12 células/ $\lambda$  para poder realizar las simulaciones con una cierta velocidad ya que hay bastantes puntos de frecuencia y no se quiere que se alarguen demasiado.

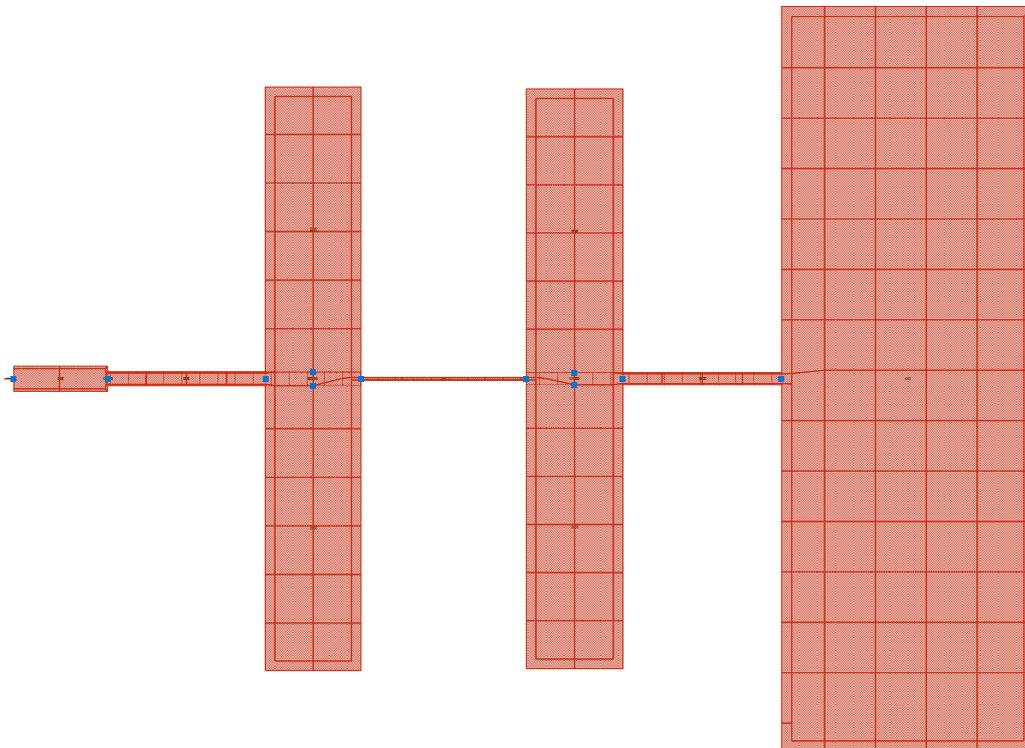


Figura 42 Layout con el mallado del circuito completo con los valores calculados

Una vez se ha realizado la simulación se obtienen los siguientes resultados:

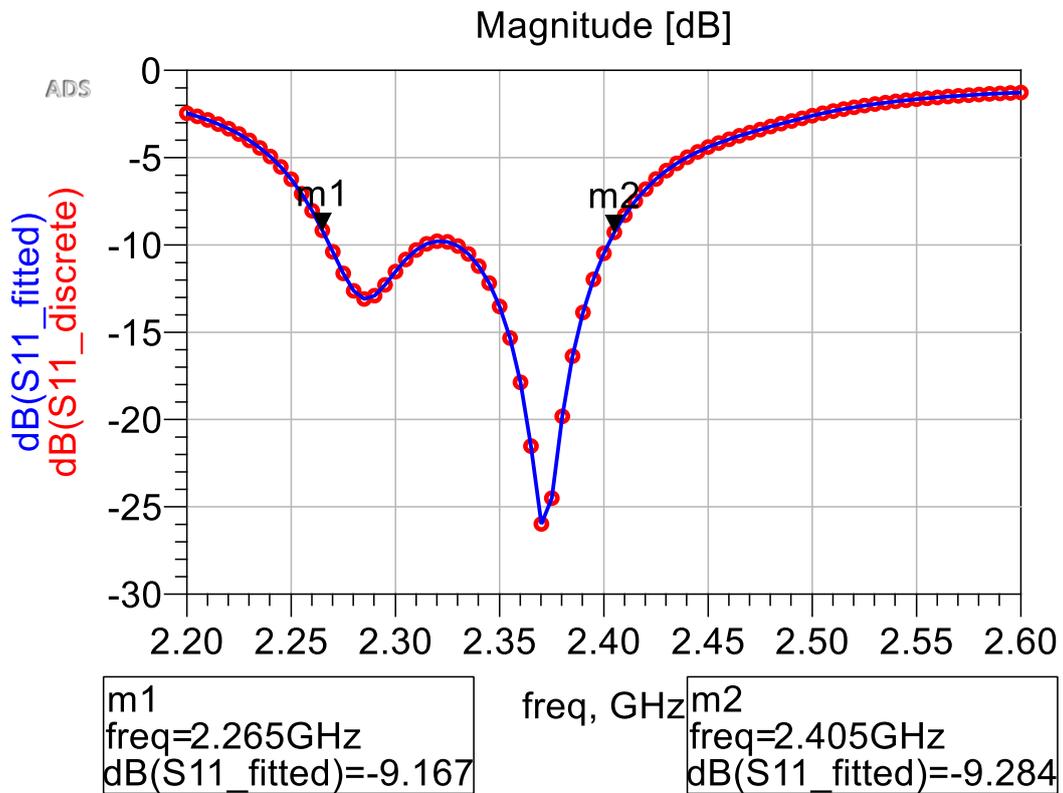


Figura 43 Resultados obtenidos en ADS con los valores calculados

En este caso con los valores teóricos se ha mejorado, pero sigue sin cumplir especificaciones puesto el ancho de banda a -9,54 dB está desplazado en frecuencia con respecto a los objetivos que se querían lograr con la red de adaptación y además, el ancho de banda obtenido no es suficiente.

Como no se han obtenido los resultados esperados, van a probarse también en el Análisis de método de momentos los valores obtenidos en el proceso de optimización con el programa AWR y así ver si se obtiene un resultado más cercano a lo que se está buscando.

## 4.2. Resultados con los valores optimizados sin restricciones

### 4.2.1. Análisis circuital

Este proceso de optimización se va a realizar con el programa AWR. Primero se ha realizado un proceso de optimización en la que se han dejado libres los valores de los stubs en paralelo.

Los pasos a seguir en el proceso de optimización son los siguientes:

- Establecer que variables se quieren optimizar. Para ello hay que introducirse en la pestaña *Variables* y seleccionando el circuito que se quiere optimizar, se marcará dentro de él las variables que se deseen.

T O C Ele...	Name	Value	Lower	Upper
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	W2	12.999	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	L2	31.594	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	W3	0.414...	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	L3	6.771	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	W1	1.9745	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	L1	14.05	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	W4	13.81	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	L4	31.24	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	W5	2.01	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Circ...	L5	27.06	0	0

Proj / Elem / Var / Layout

Figura 44 Pestaña Variables para seleccionar las variables optimizables

- El siguiente paso es abrir el modo de simulación *Optimize* en el que se seleccionará el método de optimización *Pointer-Robust Optimization*, y ya se inicia la simulación.

Los valores obtenidos en este proceso de optimización han sido los siguientes:

	$Z_c^{12}$	$Z_c^{23}$	$Z_c^{34}$	$Z_{c2}^{stub}$	$Z_{c3}^{stub}$
<b>Anchura (W)</b>	1,282 mm	0,3788 mm	2,038 mm	10,86 mm	1,16 mm
<b>Longitud (L)</b>	16,77 mm	19 mm	21,6 mm	30,3 mm	29,84 mm

Los resultados obtenidos introduciendo en el circuito los valores obtenidos en el proceso de optimización han sido los siguientes:

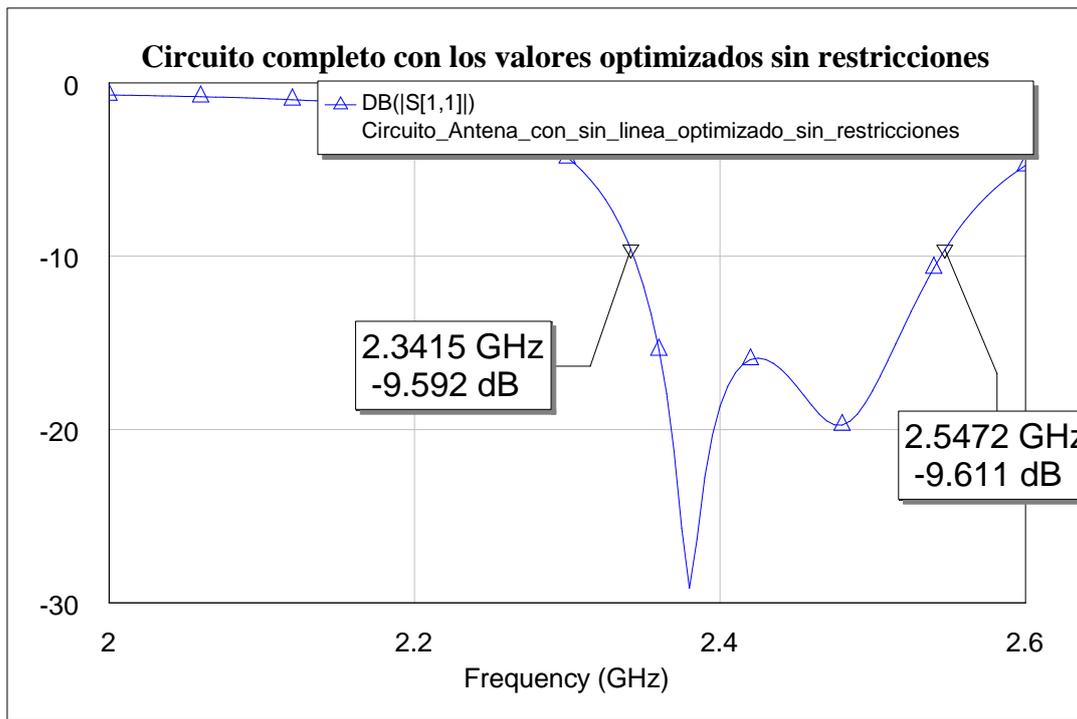


Figura 45 Resultados obtenidos en AWR con los valores optimizados sin restricciones

En este caso se puede ver como si se ha obtenido un resultado que si se corresponde con los resultados que se estaba buscando puesto que ya se tiene un ancho de banda que se corresponde con los criterios establecidos. Sin embargo primero se deberán introducir estos valores optimizados en el circuito del análisis mediante método de momentos puesto que es el más fiable. Además no solo hay que guiarse de la respuesta del  $S_{11}$ , sino que habrá que comprobar en el Layout del circuito si los valores de ganancia y eficiencia de radiación no han empeorado lo suficiente como para no considerar válida la opción debido a que no estaríamos mejorando el factor de mérito de la antena, ganancia por ancho de banda.

#### 4.2.2. Análisis de método de momentos

El siguiente paso es introducir en el circuito los valores optimizados que han sido calculado con restricciones para ver si, en el caso del Análisis de método de momentos, proporciona una respuesta parecida al análisis circuital y que cumpla con los objetivos requeridos.

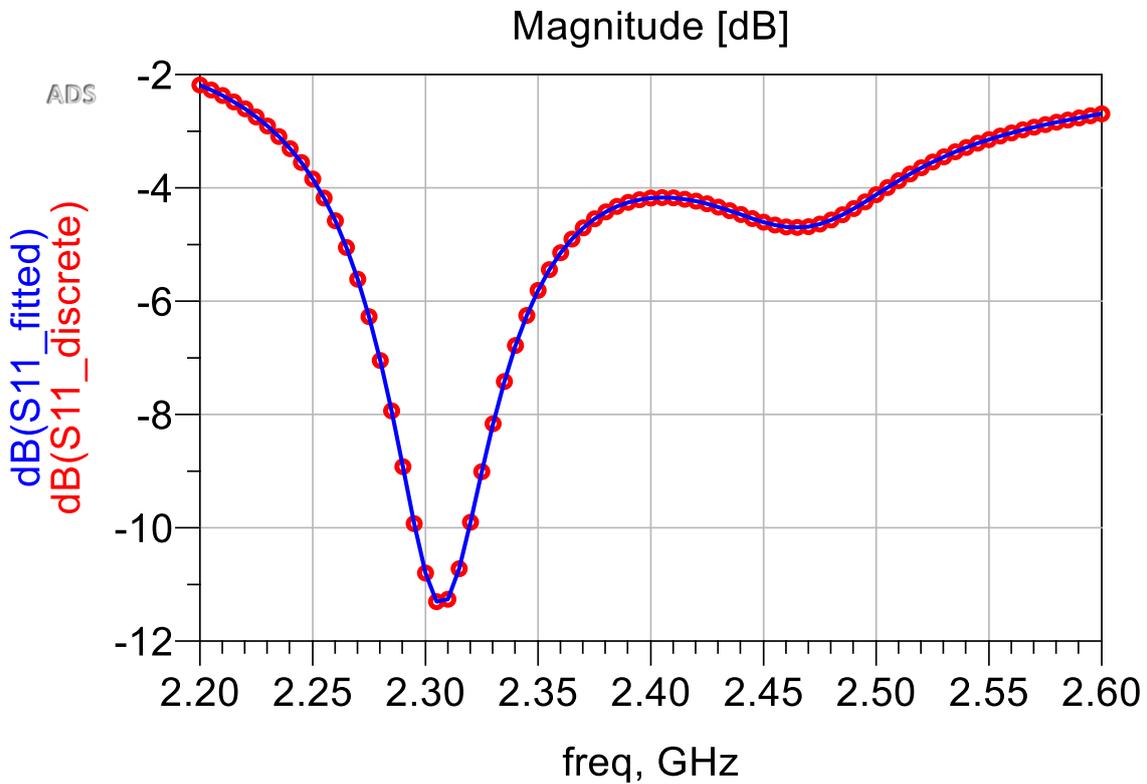


Figura 46 Resultados obtenidos en ADS con los valores optimizados sin restricciones

En este caso los resultados obtenidos con los valores calculados en el proceso de optimización han sido mucho peores, por lo que no se tomarán como válidos y por tanto habrá que descartarlos. Esto puede haber ocurrido debido a el primer stub tiene una anchura muy reducida en comparación con el segundo stub, que es casi 10 veces mayor que el primero. Lo que interesa es que el valor de la anchura de estos stubs sea lo más parecida posible para así poder obtener una respuesta en frecuencia, una ganancia y una eficiencia de radiación que cumplan con las especificaciones previamente establecidas.

El siguiente paso será realizar ese proceso de optimización pero imponiendo un valor máximo que pueden tomar los stubs que se encuentran en paralelo.

### 4.3. Resultados con los valores optimizados con restricciones

#### 4.3.1. Análisis circuital

Aquí se ha realizado el mismo proceso de optimización con la única diferencia de que se ha puesto la condición de que la anchura de los stubs no podía ser mayor de 6 mm en ambos casos. Esto se ha realizado para que las anchuras de los stubs obtenidas después del proceso de optimización no sean muy diferentes entre sí como ha ocurrido en el caso en el que no se ha establecido ninguna restricción de anchura.

Los valores de anchuras y longitudes de las distintas líneas de transmisión que componen la red de adaptación obtenidos a través del proceso de optimización al que se le han impuesto las restricciones anteriormente descritas son:

	$Z_c^{12}$	$Z_c^{23}$	$Z_c^{34}$	$Z_{c2}^{stub}$	$Z_{c3}^{stub}$
<b>Anchura (W)</b>	1,073 mm	0,4164 mm	1,4 mm	6 mm	5 mm
<b>Longitud (L)</b>	18 mm	18 mm	6,55 mm	30,6 mm	33,32 mm

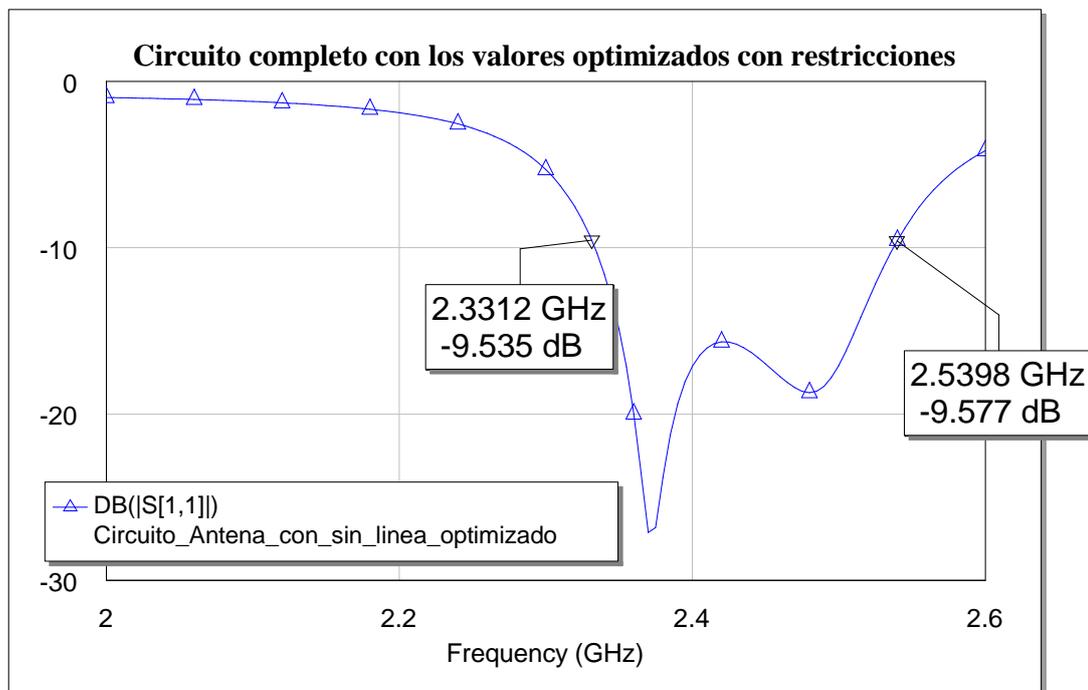


Figura 47 Resultados obtenidos en AWR con los valores optimizados con restricciones

Los resultados obtenidos son casi idénticos a los obtenidos con los valores optimizados sin restricciones, lo cual es beneficioso ya que en el caso anterior ya se habían obtenido unos resultados que cumplían con los requisitos del proyecto y por tanto, no se quería que estos variasen.

Lo importante en este proceso de optimización es que en el análisis mediante método de momentos se obtengan unos resultados que sean válidos y a su vez, que sean lo más parecidos posibles con los resultados obtenidos con el análisis circuital.

#### 4.3.2. Análisis de método de momentos

El Layout del circuito con los valores restricciones:

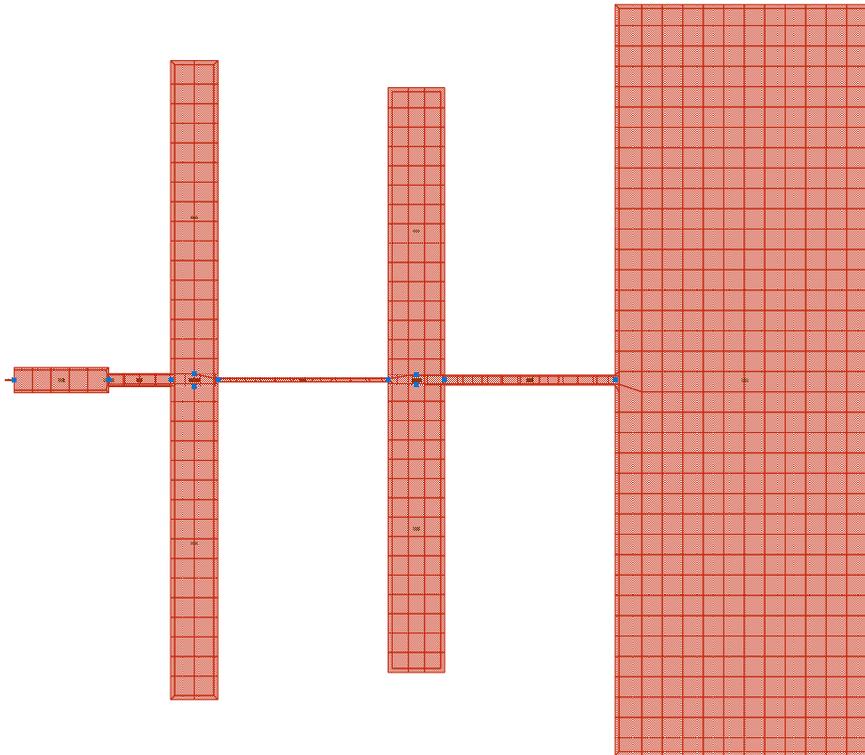


Figura 48 Layout del circuito completo con valores optimizados con restricciones

Con este Layout se obtienen los siguientes resultados:

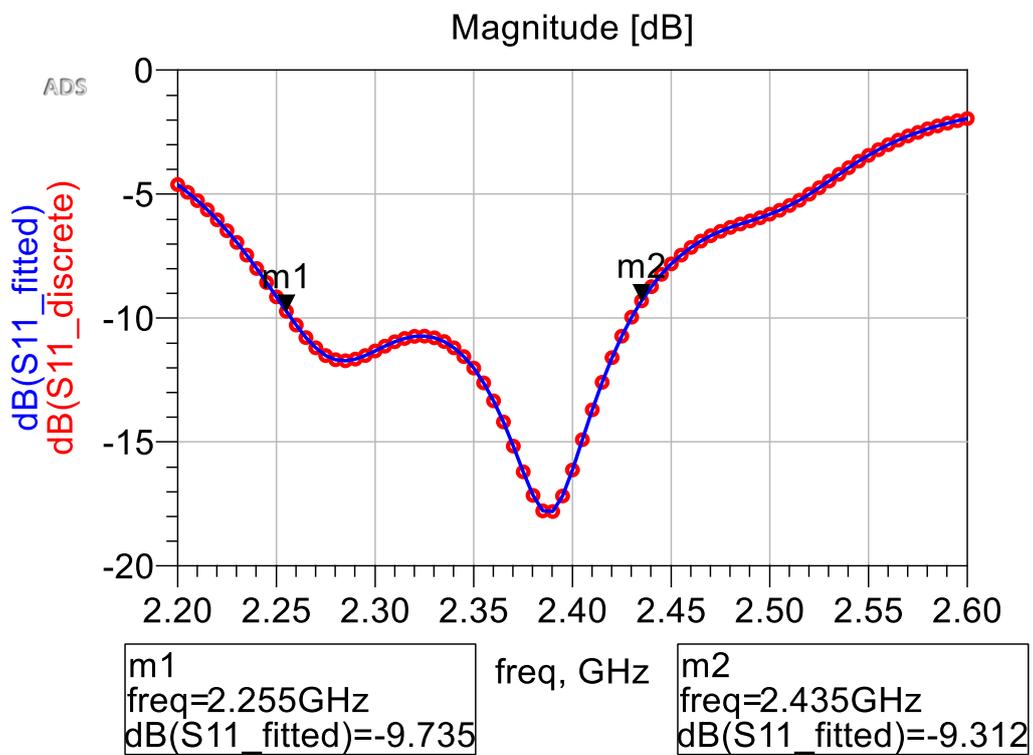


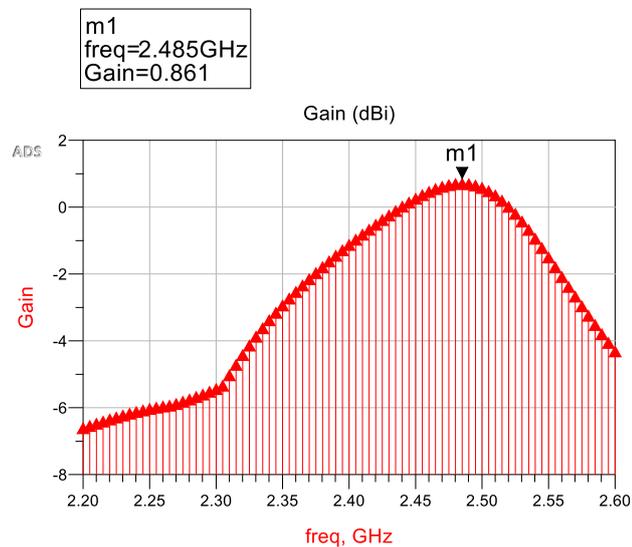
Figura 49 Resultados obtenidos en ADS con los valores obtenidos con restricciones

Se observa cómo se obtienen unos valores de  $S_{11}$  que no cumplen exactamente con nuestro objetivo debido a que sigue estando un poco desplazada a la derecha, aun así, ya se va obteniendo algo coherente. Sin embargo esto no quiere decir que la antena radie de una forma eficiente, lo que se podrá comprobar con el mismo programa que se acaba de utilizar.

Lo que va a interesar para poder valorar si el circuito radia de una manera eficiente será la eficiencia de radiación y la ganancia de la antena. Para poder obtener estos valores se hará a través de la ventana del Layout y usando la opción *Far Field* en la que se podrá observar la manera en la que va a radiar la antena.

El proceso para obtener la ganancia y la eficiencia de radiación es el siguiente

- Hay que buscar cual es la frecuencia de resonancia del circuito que será aquella que en la que se tenga la ganancia máxima. Esto se puede ver mediante la siguiente gráfica:



*Figura 50 Gráfica de la ganancia en función de la frecuencia del circuito con valores optimizados con restricciones*

En este caso se ve como la frecuencia de radiación es 2.485 GHz puesto que es esa frecuencia donde se obtiene ese valor de ganancia máxima que estábamos buscando.

- A continuación se seleccionará esa frecuencia para ver el resto de los parámetros que deben cumplir con las especificaciones. En este caso los valores que se obtienen son: 18.4113% de eficiencia de radiación y 0.86 dBi de ganancia.

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.485
Input power (Watts)	0.00190243
Radiated power (Watts)	0.000350262
Directivity(dBi)	8.20988
Gain (dBi)	0.860727
Radiation efficiency (%)	18.4113

Figura 51 Parámetros del circuito con los valores optimizados con restricciones

Para saber si estos valores son válidos o no, habrá que compararlos con los valores de eficiencia de radiación y que ganancia tiene la antena original.

Los valores no son lo suficientemente buenos debido a que se está tratando de aumentar el valor del factor de mérito con respecto a la antena original. En este caso el valor del factor de mérito (ganancia por ancho de banda de la antena) es 150,5 MHz mientras que en la antena original era de 201.24 MHz, por lo que habrá que reducir un poco más el ancho de los stubs que hay en paralelo para que así el circuito aparte de conseguirnos un ancho de banda suficiente con un nivel de dB decente, también radie de una manera eficiente y con una cierta ganancia. Lo que está pasando es que debido a la anchura de los stubs, sí que se está consiguiendo un parámetro  $S_{11}$  que cumple con nuestros objetivos pero realmente lo que está haciendo es que no deja pasar la señal por lo que si se obtiene una respuesta en frecuencia que se asemeja a los requisitos impuestos, pero debido a ello la señal no llega a la antena y acaba radiando poca energía

Este proceso se ha realizado buscando que valores de anchura de stubs proporcionaban los mejores resultados. Lógicamente se ha intentado reducir estos al máximo pero sin perder de vista los objetivos que hay que conseguir. Los valores a los que se ha llegado tras varias iteraciones de anchuras es que la anchura del stub de impedancia  $Z_{c2}^{stub}$  es de 4 mm y la anchura del stubs de impedancia  $Z_{c3}^{stub}$  es de 3 mm.

Con estos dos valores se puede obtener una conclusión y es que el stub que está más alejado de la antena es el que más vas a poder reducir su valor, como se ha podido observar en el proceso de optimización en el que no se ha puesto ninguna restricción.

#### 4.4. Resultados con los valores finales del circuito

Después de todo el proceso anteriormente descrito, se puede dar por válido el diseño del circuito puesto que se han obtenido unos resultados que concuerdan con nuestros objetivos tanto en el criterio del ancho de banda como en el criterio de ganancia y eficiencia de radiación.

Los valores definitivos del circuito y que son aquellos con los que se fabricará nuestra antena adaptada son los siguientes:

	$Z_c^{12}$	$Z_c^{23}$	$Z_c^{34}$	$Z_{c2}^{stub}$	$Z_{c3}^{stub}$
<b>Anchura (W)</b>	1,073 mm	0,4164 mm	1,4 mm	4 mm	3 mm
<b>Longitud (L)</b>	18 mm	18 mm	6,55 mm	30,6 mm	33,32 mm

##### 4.4.1. Análisis circuital

El circuito final que se ha diseñado con AWR Microwave Office en el que se han introducido esos valores finales de anchuras y longitudes es:

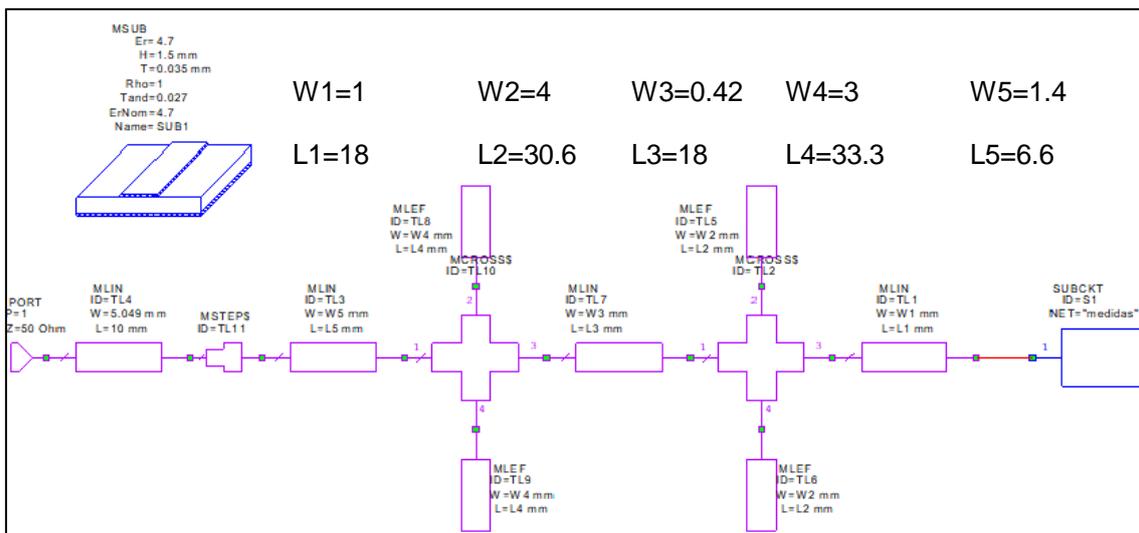


Figura 52 Circuito completo en AWR con los valores finales

Los resultados obtenidos mediante el análisis circuital de la antena adaptada final son los siguientes:

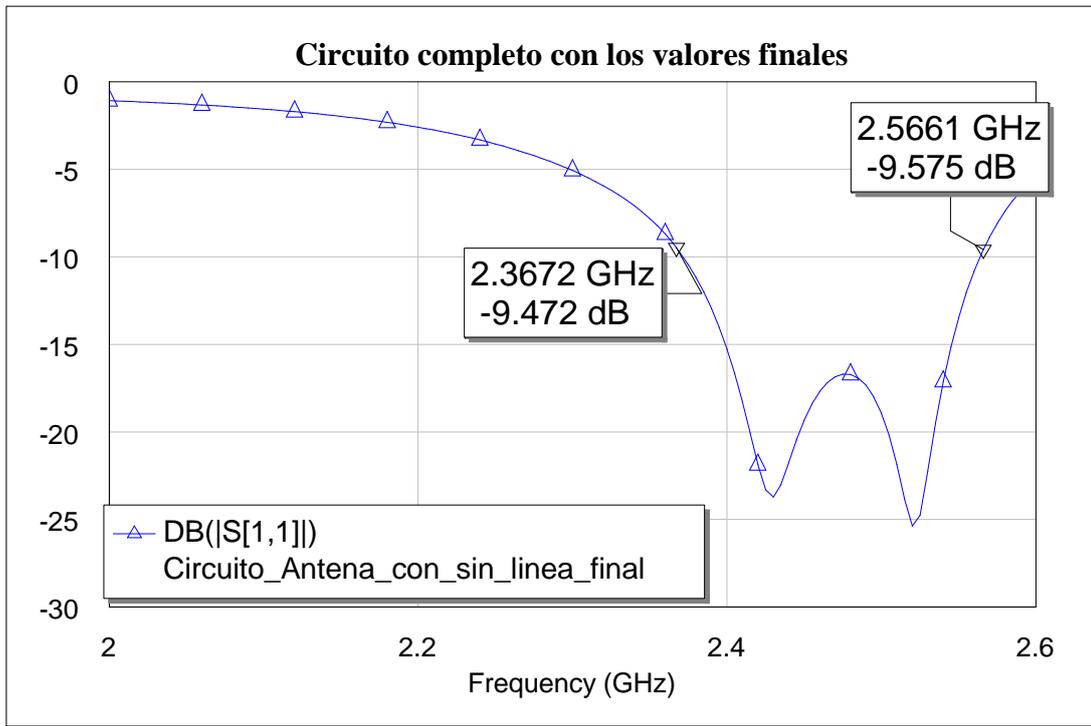


Figura 53 Resultados obtenidos en AWR con los valores finales

Los resultados obtenidos con los valores finales del circuito se asemejan a los obtenidos con los valores optimizados con restricciones en términos de ancho de banda puesto que como se puede comprobar, este ancho de banda es el mismo en ambos casos. La única diferencia obtenida es que este ancho de banda a 9,54 dB está ligeramente desplazado hacia frecuencias superiores con respecto al caso en el que simulábamos el circuito con los valores optimizados con restricciones, lo que no supondrá ninguna desventaja ya que el centro de la banda de frecuencias que nos proporciona este ancho de banda simplemente se desplaza ligeramente hacia frecuencias positivas con respecto a 2,45 GHz.

#### 4.4.2. Análisis de método de momentos

El circuito final diseñado con Advanced Design System es :

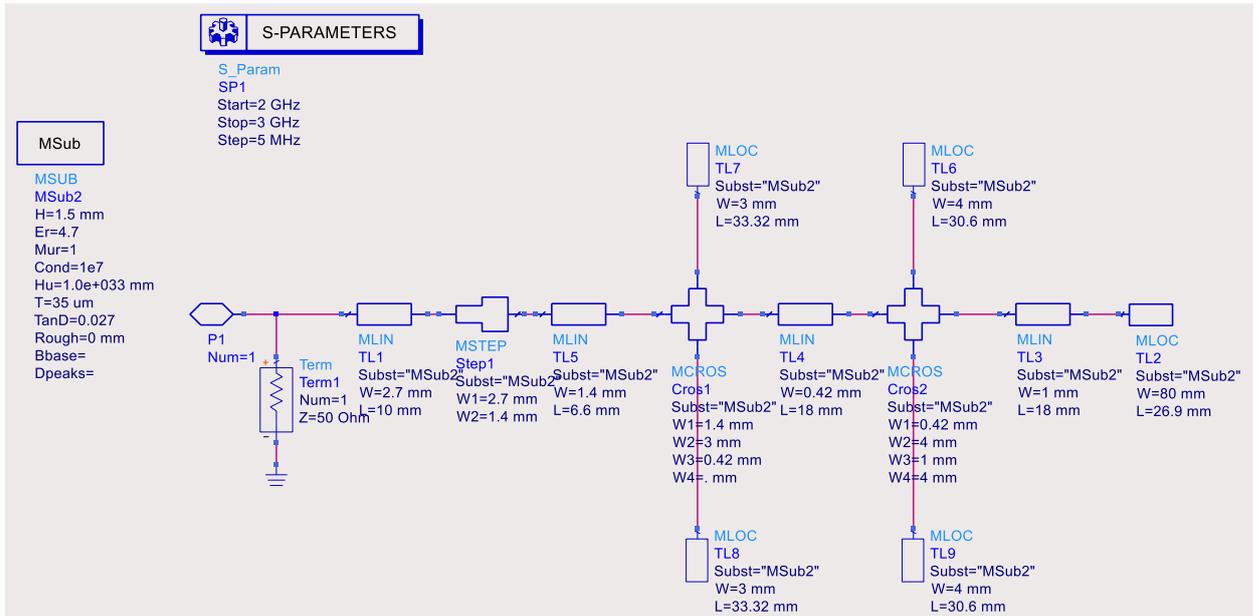


Figura 54 Circuito completo en ADS con los valores finales

A continuación se genera el Layout a partir del esquemático anterior.

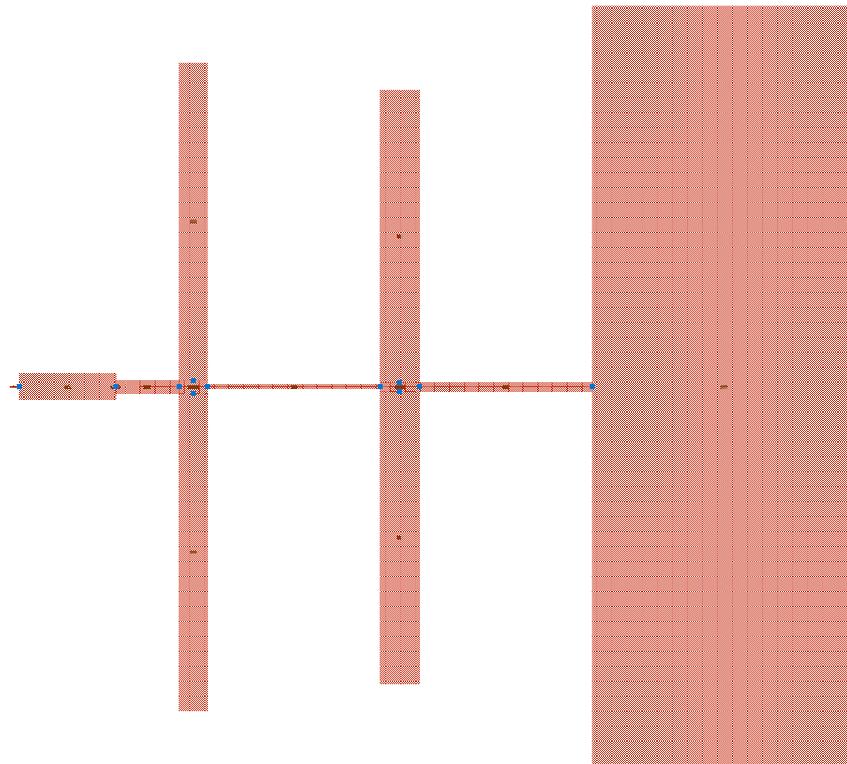


Figura 55 Layout del circuito con los valores finales

Una vez creado el Layout hay que mallarlo. En este caso como es el circuito final se van a realizar tres mallados distintos, en el que conforme se va aumentando el valor de células por longitud de onda, se van obteniendo unas medidas más precisas y fiables con respecto a los resultados que van a obtenerse cuando se fabrique la antena adaptada que hemos diseñado.

Los distintos mallados que se van a hacer van a ser de 12, 20 y 30 células/ $\lambda$  para ir obteniendo cada vez valores más precisos con lo que teóricamente debería obtenerse con el circuito una vez fabricado. El número de células que se recomienda usar es 20, aunque también es posible usar un mallado de 12 células y además incluir el mallado de bordes (Edge mesh) debido a que para estructuras resonantes como las líneas que se están utilizando es más preciso. Una vez se han obtenido los resultados para un mallado de 12 células por longitud de onda y a su vez estos cumplen con los parámetros establecidos, se debe aumentar el número de células por longitud de onda con los que se va a realizar el mallado hasta conseguir que los resultados obtenidos sean iguales para dos valores distintos de longitud de onda. En este diseño, tanto para el mallado de 20 células por longitud de onda como para 30 se obtienen los mismos valores por lo que se ha alcanzado la solución final.

#### 4.4.2.1. Resultados para un mallado de 12 células/ $\lambda$

Se realiza el mallado con este número de células por longitud de onda y los resultados obtenidos son los siguientes:

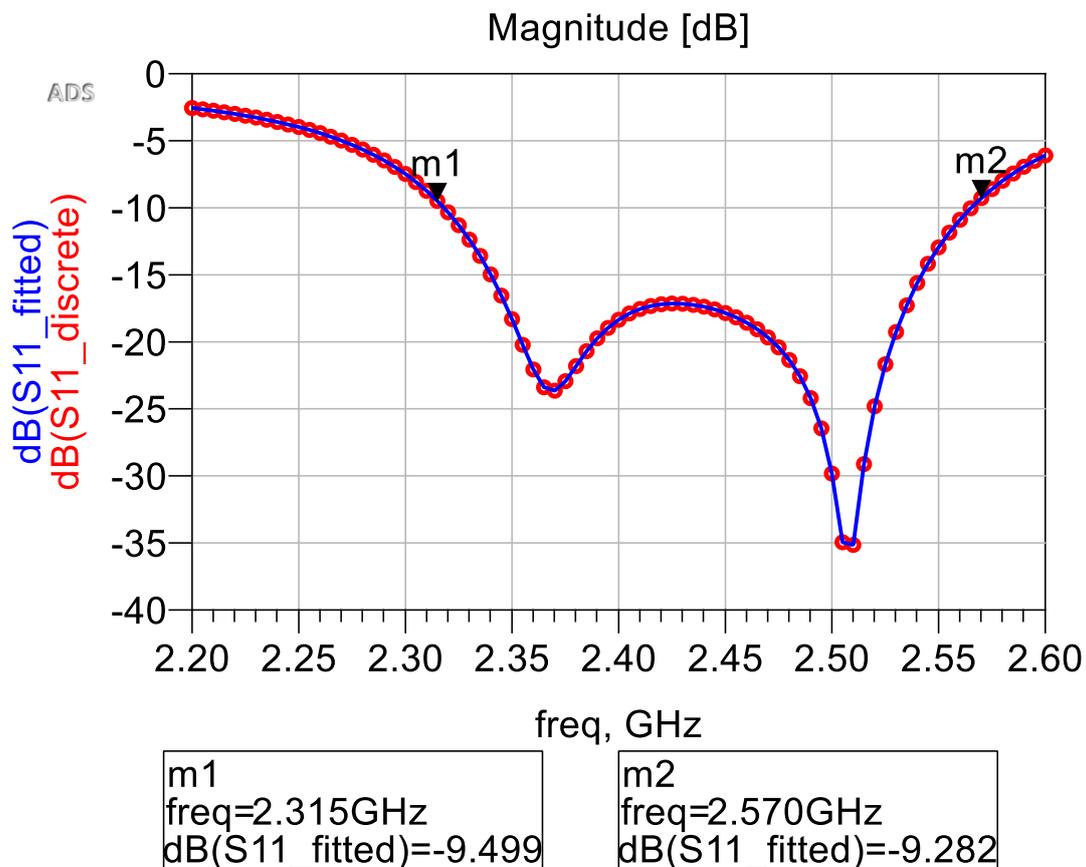


Figura 56 Resultados obtenidos en ADS con un mallado de 12 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Una vez se han conseguido los resultados cumplen las especificaciones con un cierto margen, hay que ver los valores de eficiencia de radiación y ganancia que se obtienen con el circuito. Además se puede ver como el ancho de banda ha aumentado y está en los valores que estábamos buscando, en este caso 245 MHz.

El procedimiento es el mismo que se ha comentado en el cálculo de resultados con valores optimizados con restricciones. Se obtiene la frecuencia de radiación y ahí se ven los parámetros que se están buscando.

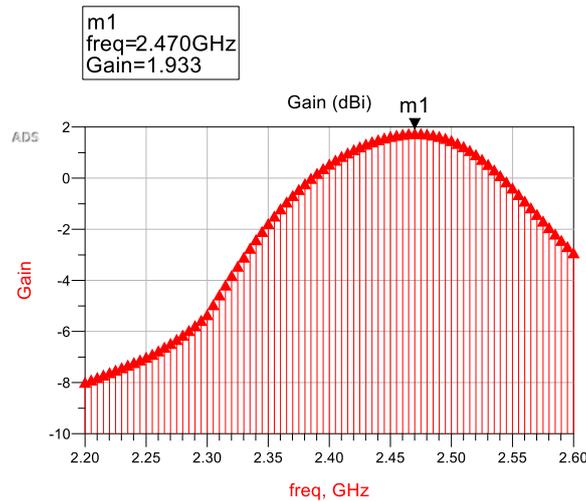


Figura 57 Gráfica de la ganancia con un mallado de 12 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Estos son los valores de ganancia y eficiencia de radiación que se han obtenido a la frecuencia de radiación.

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.47
Input power (Watts)	0.00247299
Radiated power (Watts)	0.000609883
Directivity(dBi)	8.01315
Gain (dBi)	1.93339
Radiation efficiency (%)	24.6618

Figura 58 Parámetros del circuito con un mallado de 12 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Se puede ver como se están obteniendo unos valores que están dentro de los objetivos que se quieren conseguir en términos de ganancia y eficiencia de radiación. Se seguirán realizando simulaciones con otros mallados para asegurarnos de que los valores que se vayan a obtener sean lo más parecidos al comportamiento del circuito fabricado.

#### 4.4.2.2. Resultados para un mallado de 20 células/ $\lambda$

Con este mallado se han conseguido los siguientes resultados:

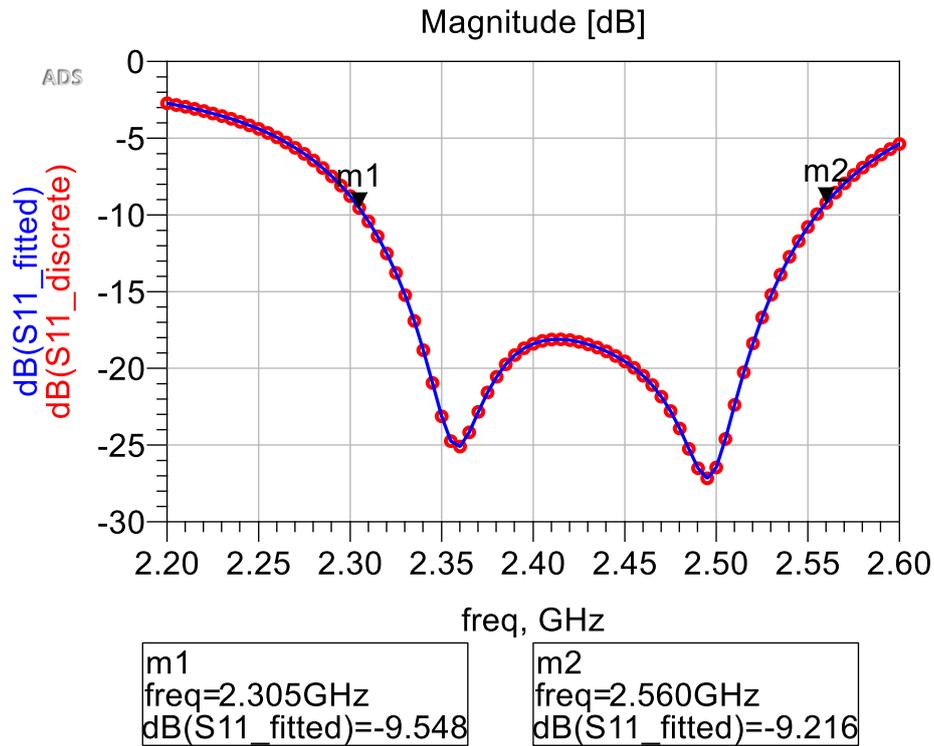


Figura 59 Resultados obtenidos en ADS con un mallado de 20 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Ahora hay que ver los valores de ganancia y eficiencia de radiación en la frecuencia de radiación. En este caso la frecuencia es 2.455 GHz como se puede ver en la siguiente gráfica.

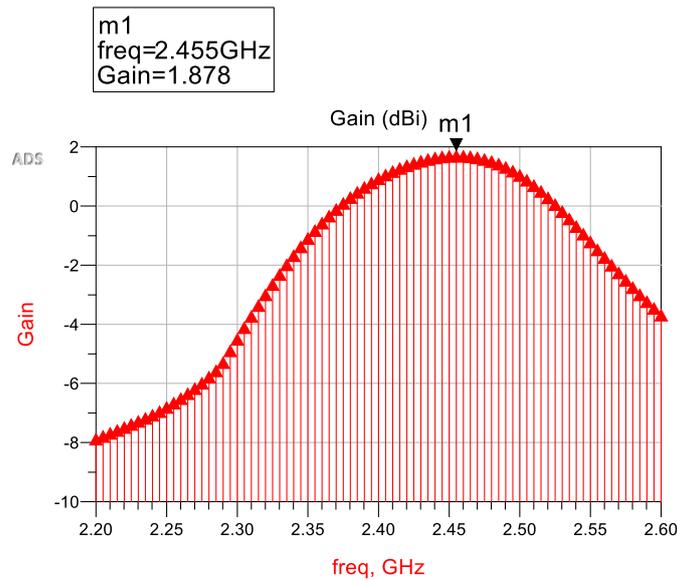


Figura 60 Gráfica de la ganancia con un mallado de 20 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Estos son los valores de ganancia y eficiencia de radiación que se han obtenido a la frecuencia de radiación.

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.455
Input power (Watts)	0.00247486
Radiated power (Watts)	0.000604548
Directivity(dBi)	7.99893
Gain (dBi)	1.87773
Radiation efficiency (%)	24.4275

Figura 61 Parámetros del circuito con un mallado de 20 células/ $\lambda$  y con los valores finales

#### 4.4.2.3. Resultados para 30 células/ $\lambda$

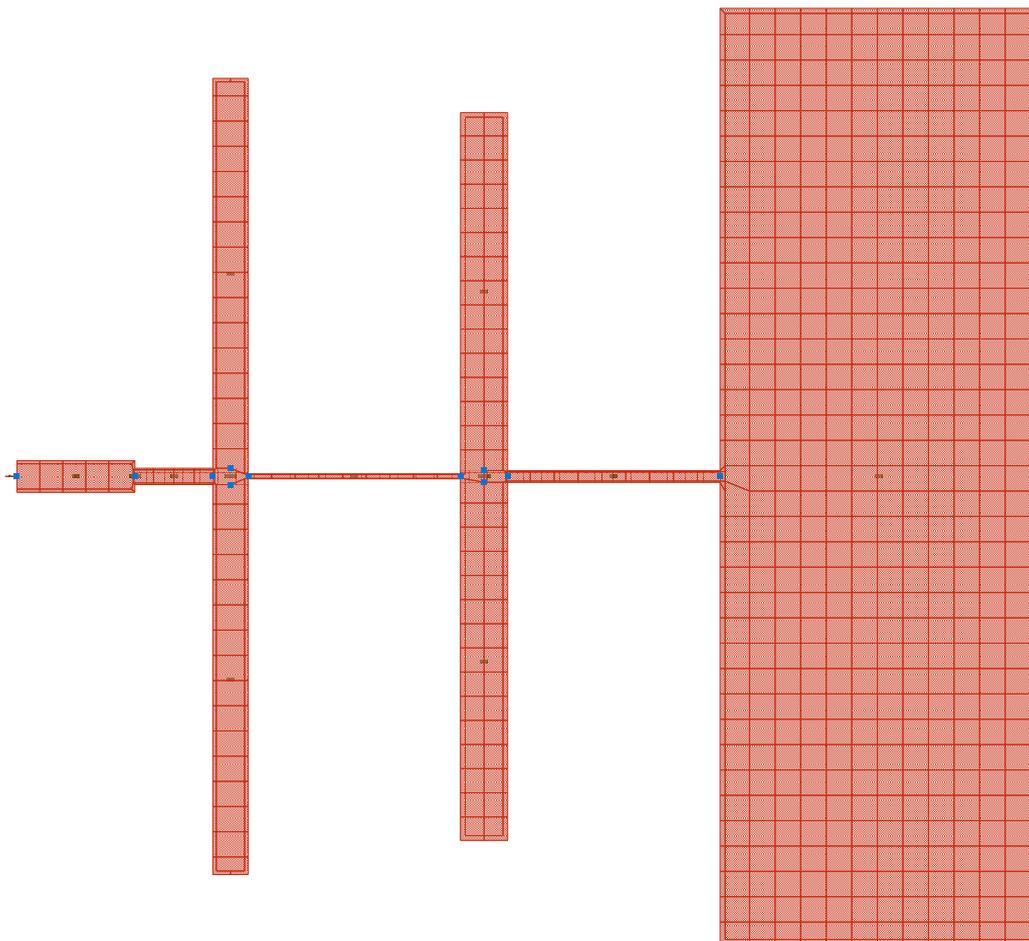


Figura 62 Layout con mallado de 30 células/ $\lambda$  del circuito con valores finales

Los resultados obtenidos con este tamaño de mallado son:

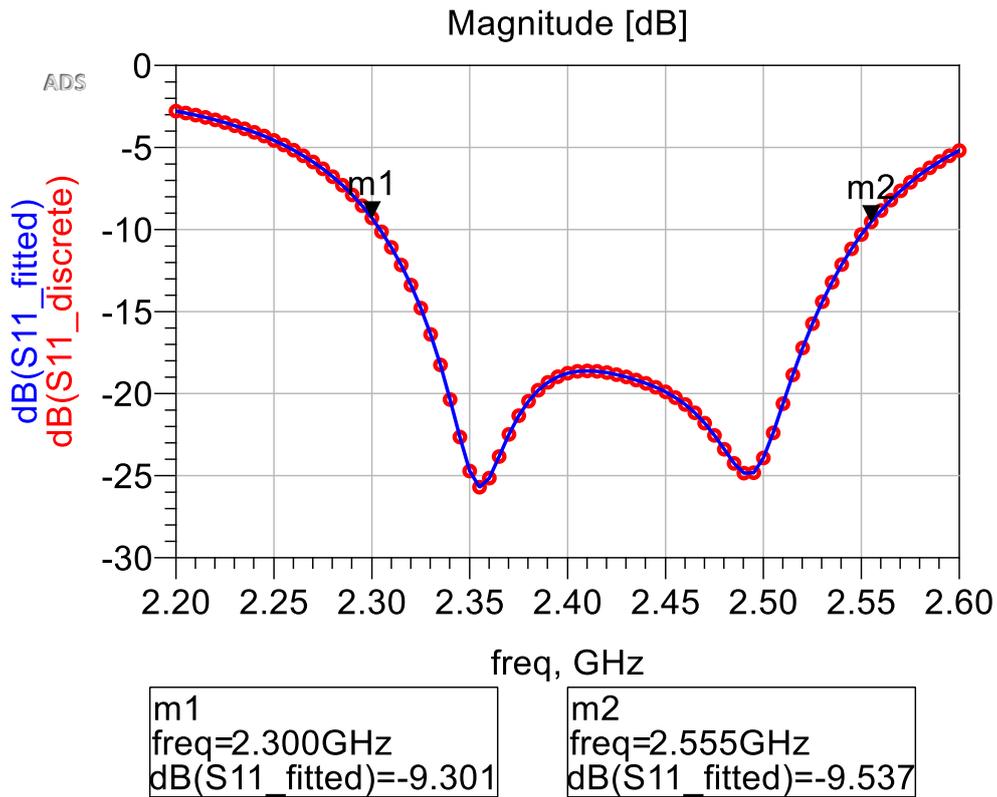


Figura 63 Resultados obtenidos en ADS con un mallado de 30 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Se puede ver como se ha conseguido el objetivo de aumentar el ancho de banda de una manera significativa ya que hemos pasado de 95 MHz (y un ancho de banda relativo de 3,7%) que tenía la antena original, 245 MHz (y un ancho de banda relativo de 10%) que ha conseguido a la que se le ha añadido la red de adaptación.

Por último hay que comprobar que los valores de eficiencia de radiación y ganancia se han mantenido con respecto a los mallados anteriores y que cumplen con nuestras especificaciones. En este caso la frecuencia de radiación ha variado a 2,45 GHz como podemos observar a continuación:

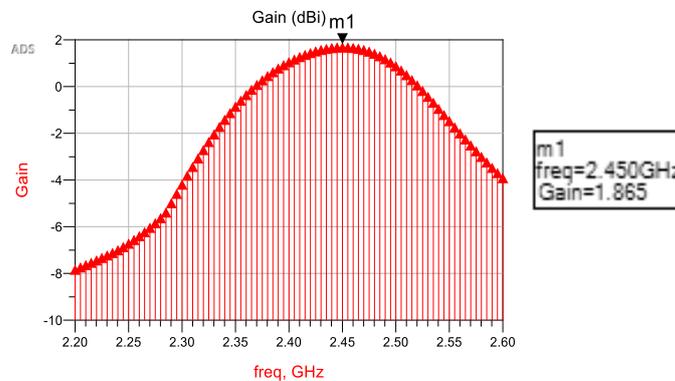


Figura 64 Gráfica de la ganancia con un mallado de 30 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Los parámetros obtenidos a esta frecuencia de radiación son:

Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	2.45
Input power (Watts)	0.00247442
Radiated power (Watts)	0.000602808
Directivity(dBi)	7.99749
Gain (dBi)	1.86454
Radiation efficiency (%)	24.3616

Figura 65 Parámetros del circuito con un mallado de 30 células/ $\lambda$  y con los valores finales

Pese a haber aumentado el número de células por longitud de onda del mallado, los parámetros obtenidos siguen cumpliendo las especificaciones que se habían impuesto al principio del proyecto.

<b>Eficiencia de radiación</b>	24.36%
<b>Ganancia</b>	1,86 dBi

Una comparación que se puede realizar para observar si hemos mejorado el diseño de la antena es la del factor de mérito mencionado en el segundo capítulo. Como se ha podido demostrar, al haberse querido aumentar el ancho de banda de la antena original se ha reducido la ganancia máxima de la antena. Sin embargo, esta reducción de ganancia hay que comprobar que no haya sido lo suficiente como para que el diseño no haya supuesto una mejora con respecto al diseño de la antena original.

En el primer caso, el de la antena original, tenía un ancho de banda de 95 MHz a un valor de  $S_{11}$  de -9,54 dB y una ganancia de 3,26 dBi. Para poder hacer cálculo del factor de mérito, primeramente hay que pasar el valor de ganancia en dBi a lineal para poder multiplicar la ganancia y el ancho de banda obtenidos. Esto supone un factor de mérito de 201.24 MHz.

En el segundo caso, el de la antena adaptada, tenemos una ganancia de 1,86 dBi y un ancho de banda de 245 GHz, lo que supone un factor de mérito de 378,98 MHz. Por tanto, hemos mejorado este parámetro en casi el doble por lo que el diseño que hemos desarrollado sí que ha supuesto una mejora con respecto a la antena original que teníamos.

Se va a incluir una tabla resumen con los valores de los parámetros obtenidos tanto para la antena original como para la antena adaptada con el fin de poder comparar ambos diseños con una mayor facilidad.

	Antena original	Antena adaptada
<b>Ganancia</b>	3,26 dBi	1,86 dBi
<b>Eficiencia de radiación</b>	35,23 %	24,36%
<b>Ancho de banda</b>	95 MHz	245 MHz
<b>Factor de mérito</b>	$201.24 \cdot 10^6$	$378,98 \cdot 10^6$

Además también es interesante visualizar el diagrama de radiación de la antena adaptada puesto que es importante que el diagrama de radiación de la antena original no haya cambiado con respecto al nuevo diseño que hemos realizado. En este caso se mostrarán dos cortes, uno con variación en  $\Theta$  y  $\Phi=90^\circ$  y otro con  $\Phi=0^\circ$  y variación en  $\Theta$ , y además se mostrará un diagrama de radiación 3D del circuito completo.

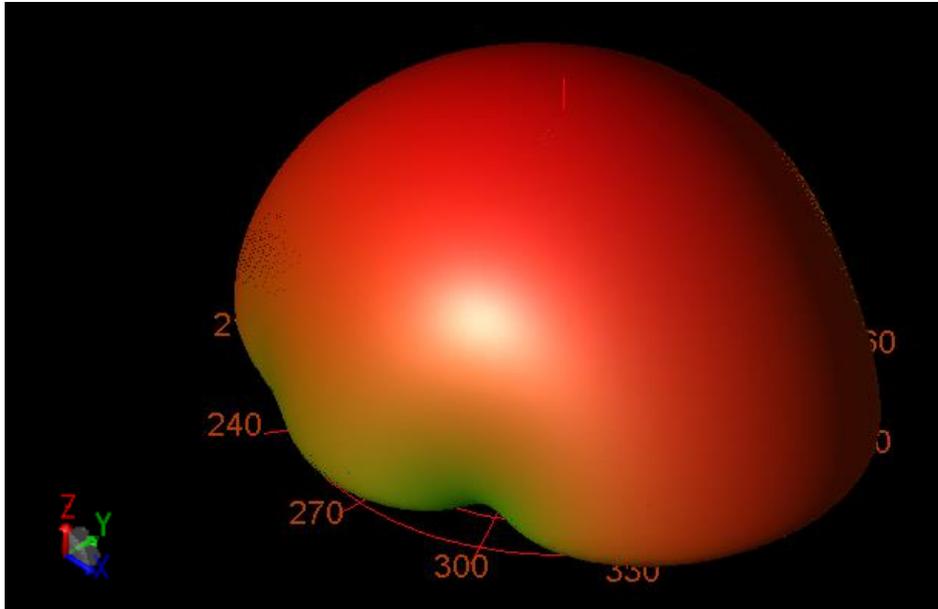


Figura 66 Diagrama de radiación 3D de la antena adaptada

**Corte YZ del diagrama de radiación de la antena adaptada**

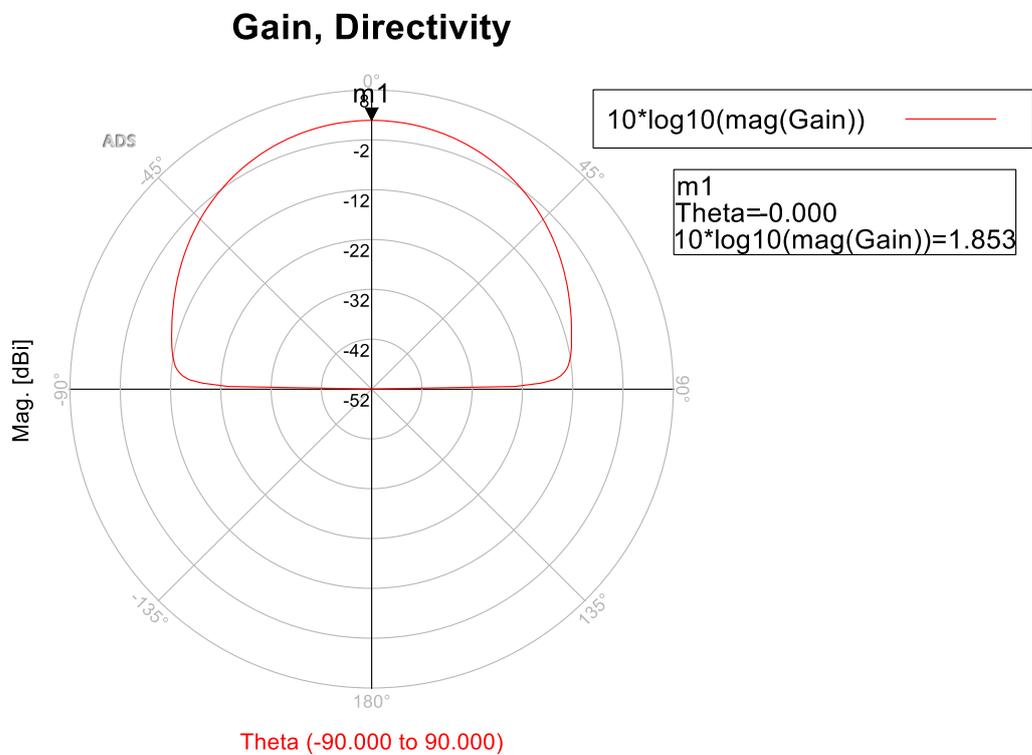
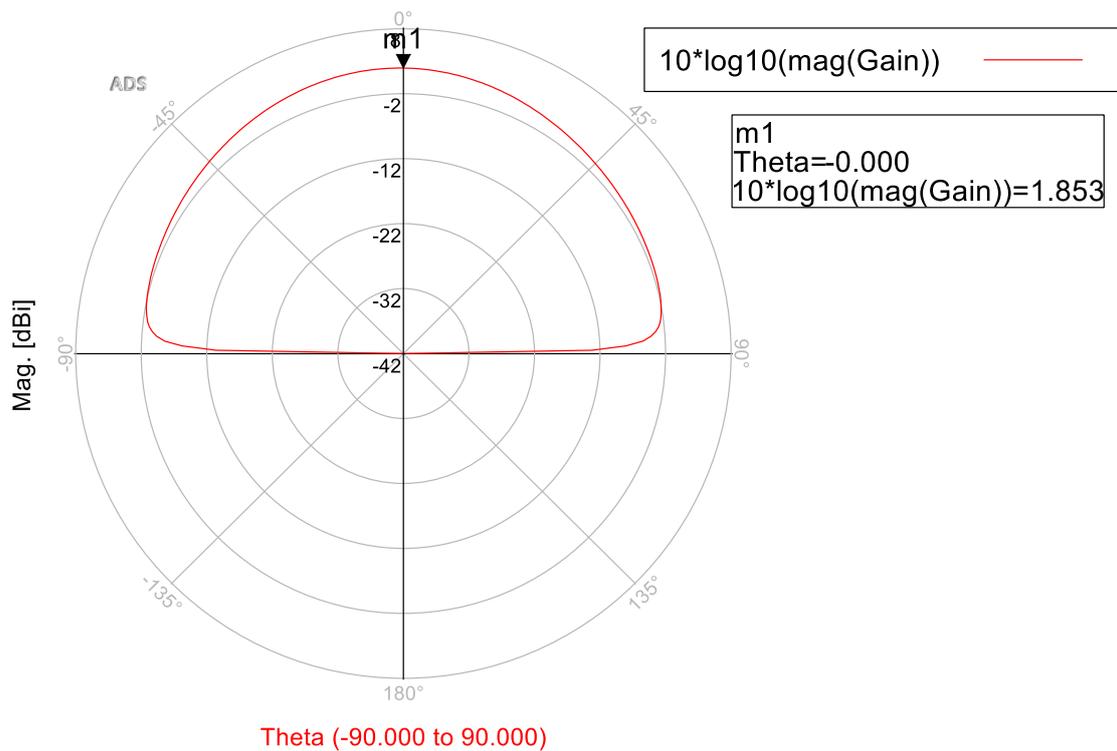


Figura 67 Diagrama de radiación de la antena adaptada en YZ

**Corte XZ del diagrama de radiación de la antena adaptada**  
**Gain, Directivity**



*Figura 68 Diagrama de radiación de la antena adaptada en XZ*

Una vez se han obtenido los diagramas de radiación de las antenas, lo siguiente es realizar una comparación para así poder comprobar si este ha cambiado con respecto al original debido a que no sería válido el diseño realizado si se obtuviese un diagrama de radiación muy diferente del de la antena original. La comparación se ha realizado con los valores normalizados de ambos diagramas de radiación para así poder realizar una mejor comparación de la forma de estos.

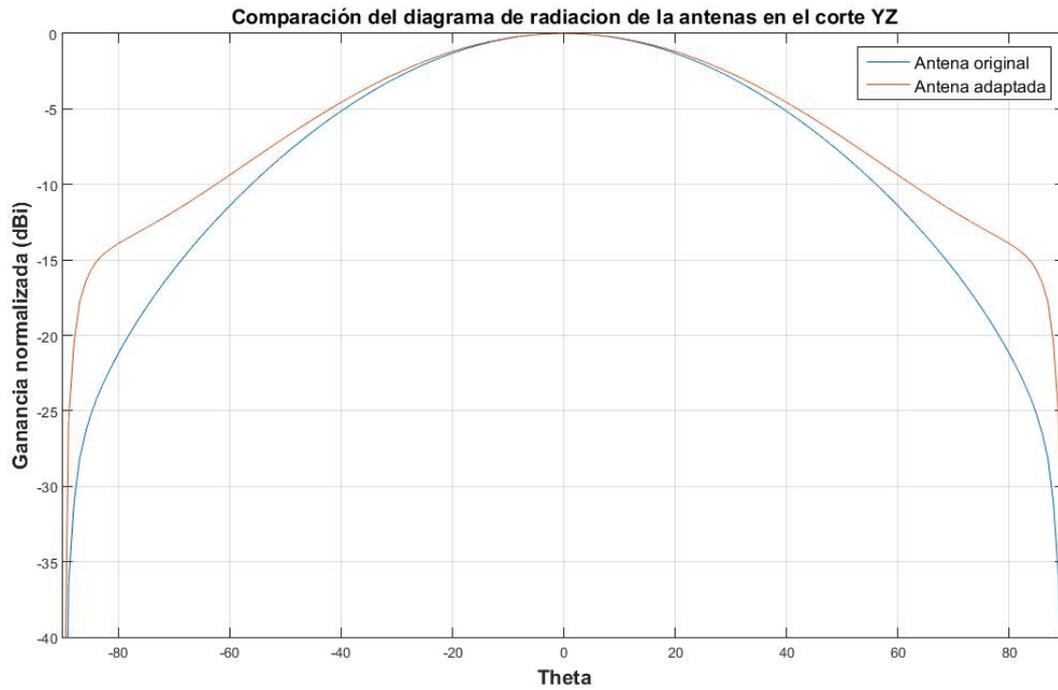


Figura 69 Comparación del diagrama de radiación normalizado de la antena original en el corte YZ

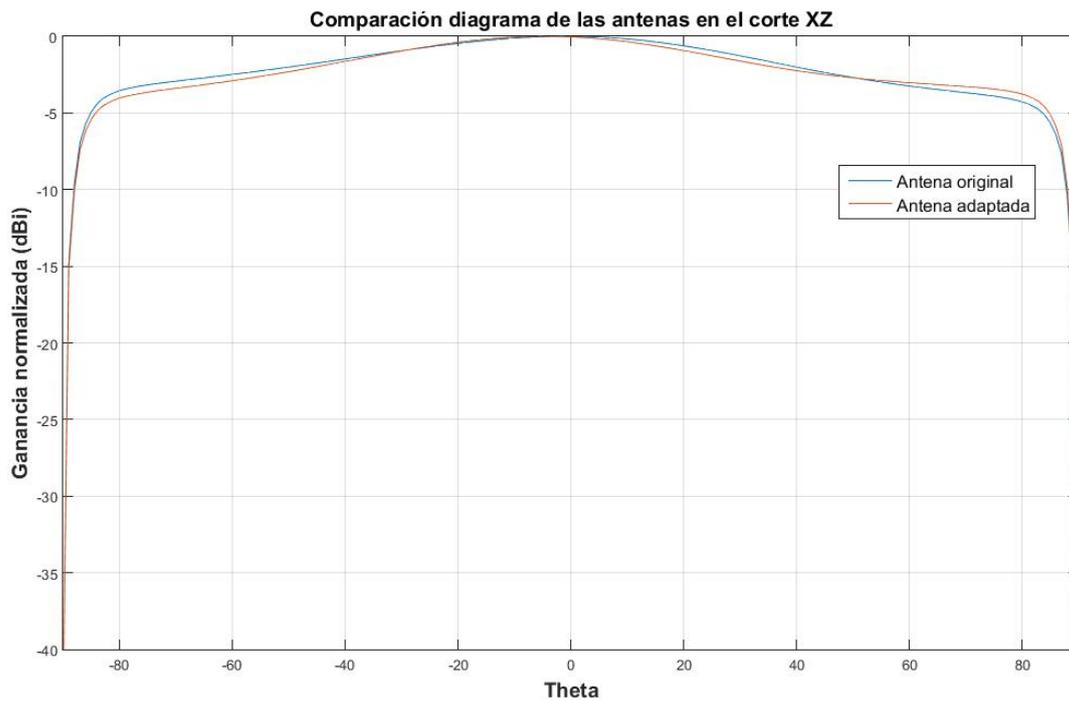


Figura 70 Comparación del diagrama de radiación normalizado original en el corte XZ

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que el diagrama de radiación de ambas antenas es muy similar y por tanto se puede validar el diseño realizado. En el caso del diagrama en el corte XZ ambas antenas producen prácticamente el mismo diagrama de radiación y en el caso del diagrama en el corte YZ, los resultados muestran una buena concordancia con las predicciones y por tanto se pueden dar como válidos.

# CAPÍTULO 5

## FABRICACIÓN Y

### MEDIDAS

A continuación se va a detallar el proceso que se ha seguido para pasar del diseño final obtenido con el Advanced Design System, a la propia placa de sustrato FR4.

### 5.1. Proceso de fabricación de ambos circuitos

Este proceso de fabricación se ha realizado en el taller electrónico del SAIT de la Universidad Politécnica de Cartagena.

- Lo primero que hay que realizar es mediante el programa ADS, exportar el Layout del circuito en el formato Gerber. Este formato lo que simplemente hace es que exporta el circuito en forma de polígonos.
- A continuación hay que dirigirse al programa CircuitCam con el que habrá que importar el archivo previamente generado. En este caso al darle a la opción de *Import*, hay que seleccionar el formato GerberX y escoger el archivo en cuestión. Con este programa lo que se consigue es decirle a la máquina de prototipado que parte de metal tiene que retirar y que parte tiene que dejar.

Primeramente utilizaremos el CircuitCam para realizar el borde de placa, proceso que se hará tanto para la antena original como para la antena adaptada.

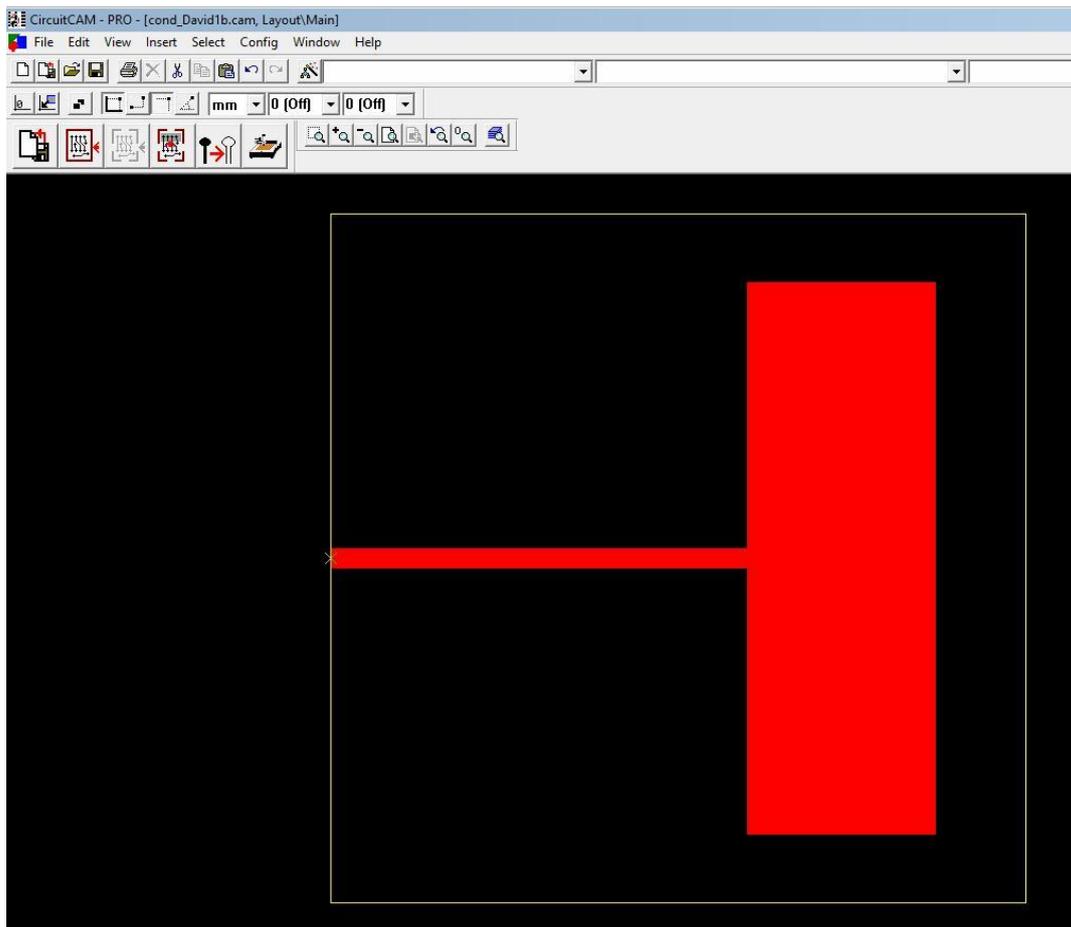
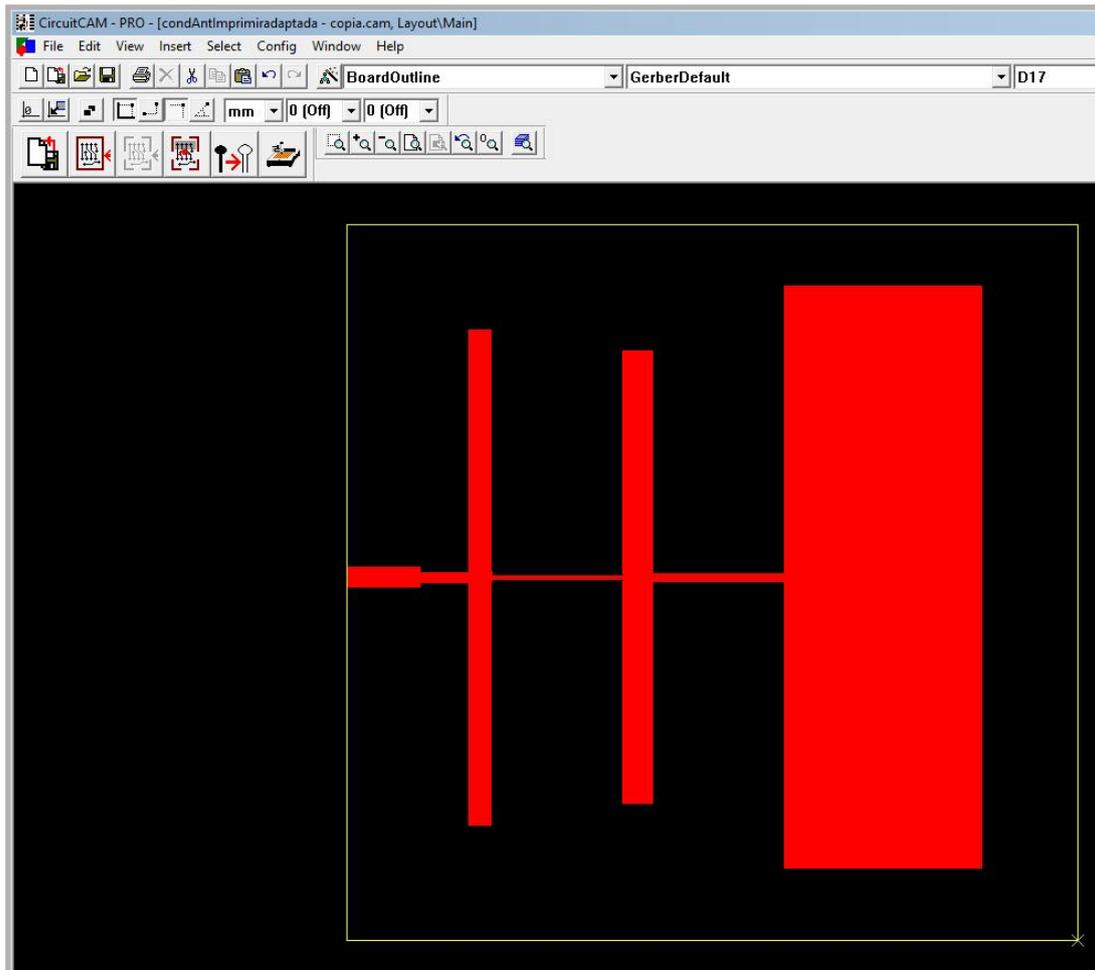
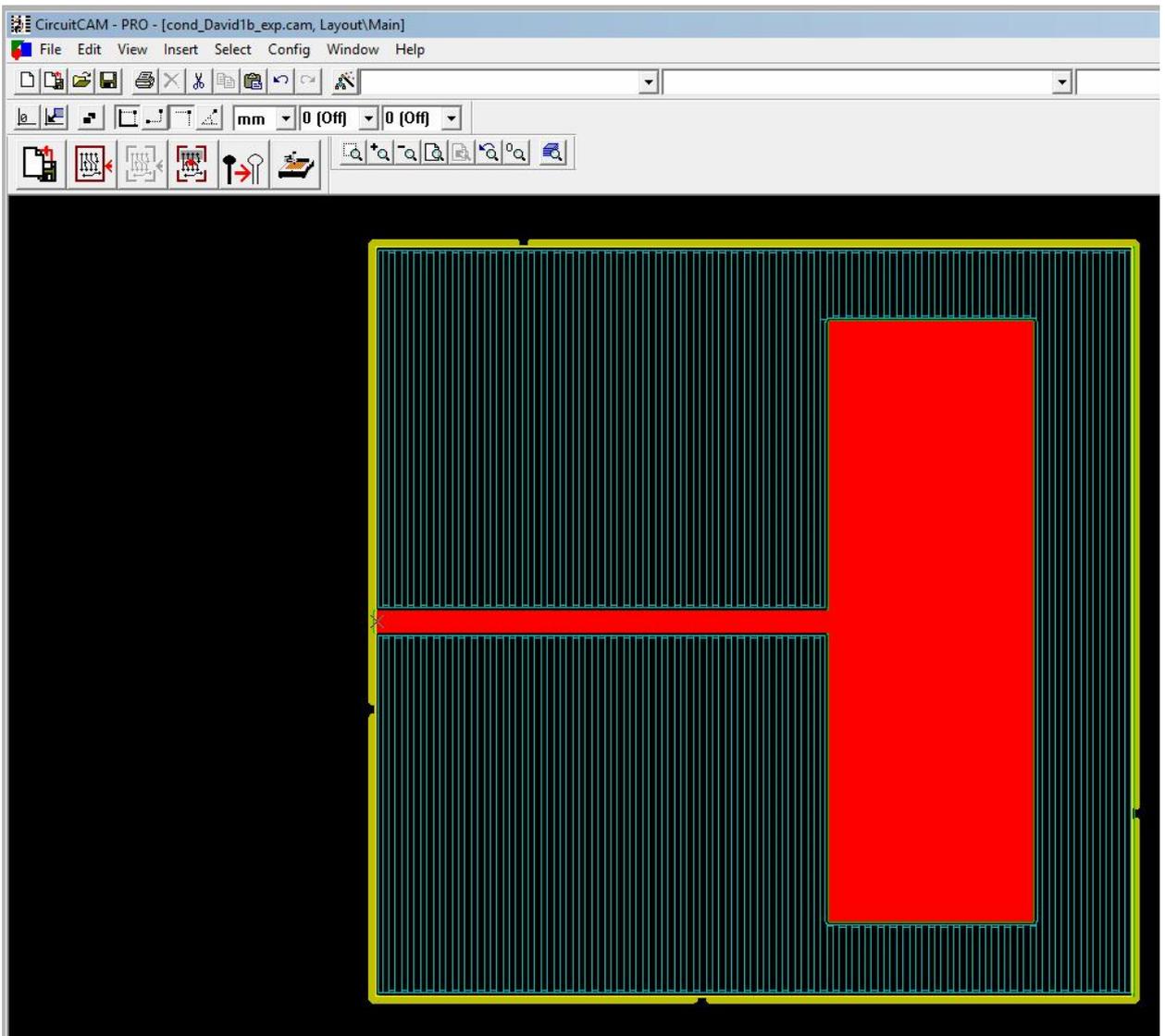


Figura 71 Establecimiento del borde Placa en la antena original

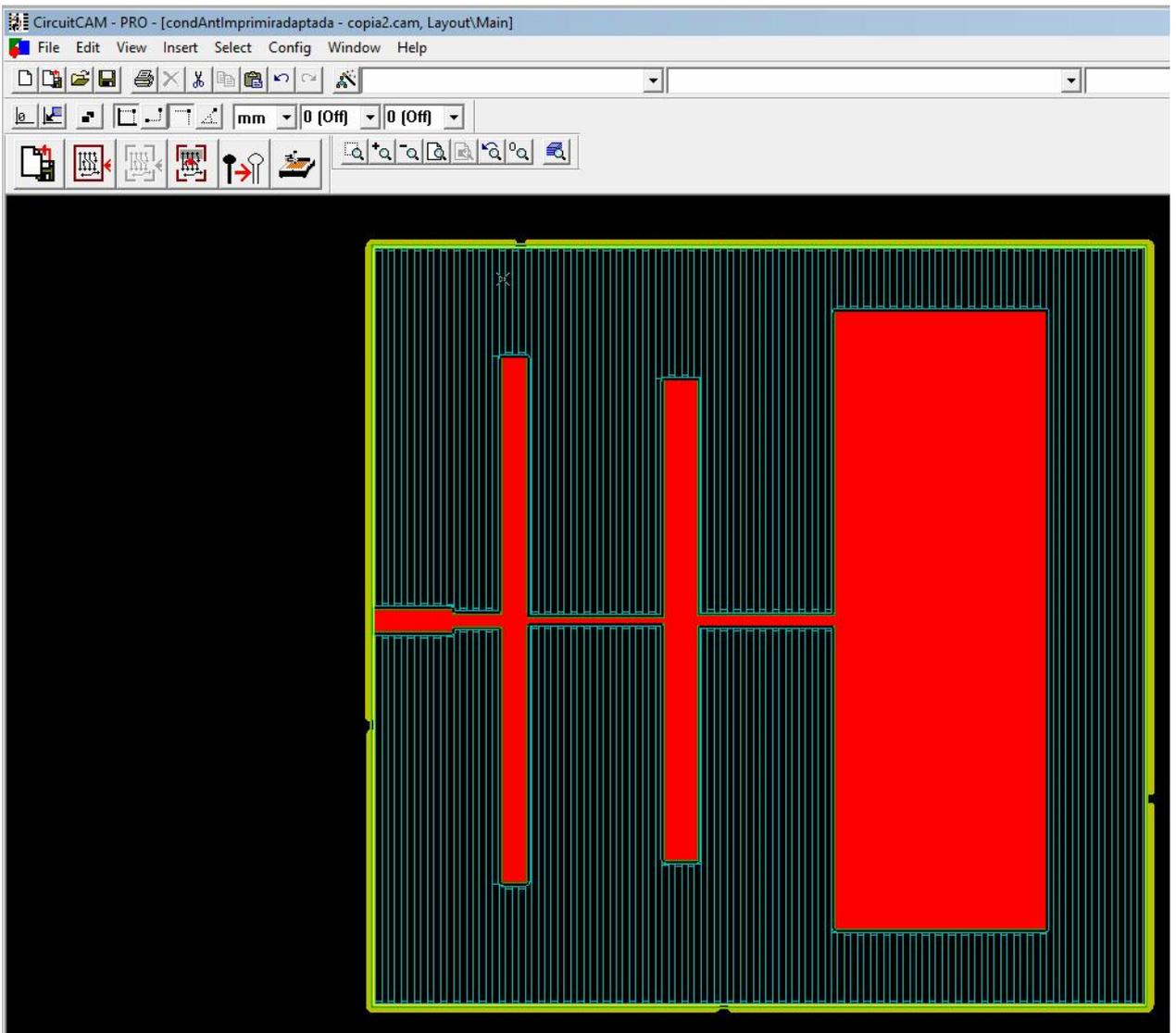


*Figura 72 Establecimiento del borde de placa en la antena adaptada.*

Una vez ya se ha establecido el borde de la placa, lo siguiente será establecer la parte de material que queremos que deje la máquina de prototipado, la cual se puede ver en las imágenes posteriores como la parte coloreada en rojo.



*Figura 73 Establecimiento de la parte de material que queremos que deje en la antena original la máquina de prototipado .*



*Figura 74 Establecimiento de la parte de material que queremos que deje en la antena adaptada la máquina de prototipado*

Cuando ya se ha establecido el borde de placa y la zona de material que debe quedarse, el siguiente paso es exportar el archivo creado al formato .LMD.

- Una vez se ha exportado el archivo, el siguiente paso, lo siguiente será dirigirse al programa Boardmaster el cual te permite controlar la máquina de prototipado que en este caso va a ser la LPK Protomat S62. A continuación se importará el archivo .LMD que se ha exportado previamente tanto de la antena original como de la antena adaptada.

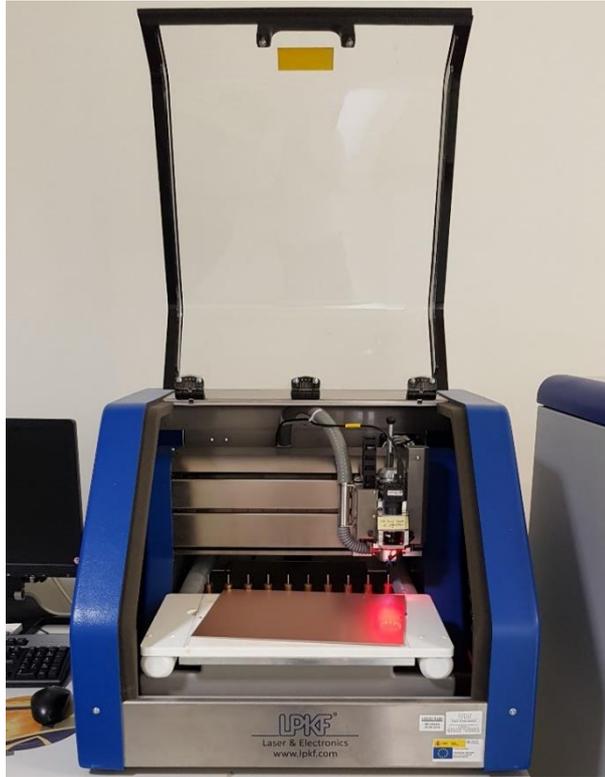


Figura 75 Máquina de prototipado LPKF Protomat S62

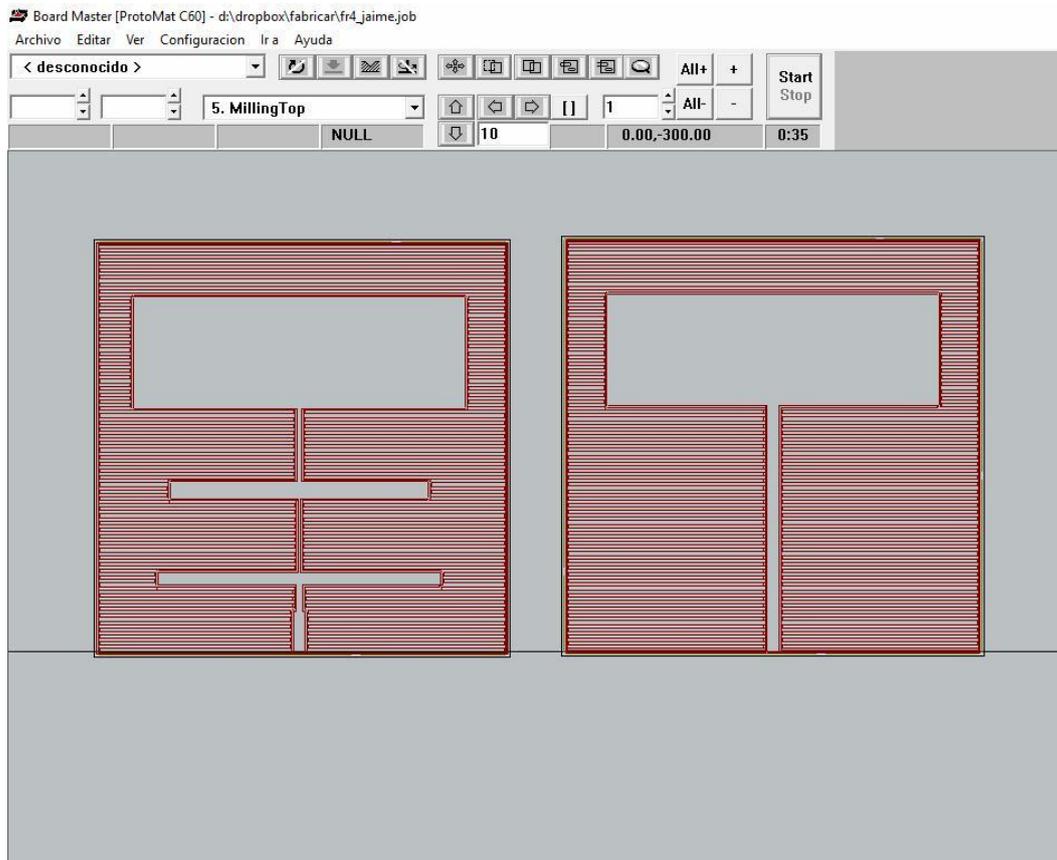
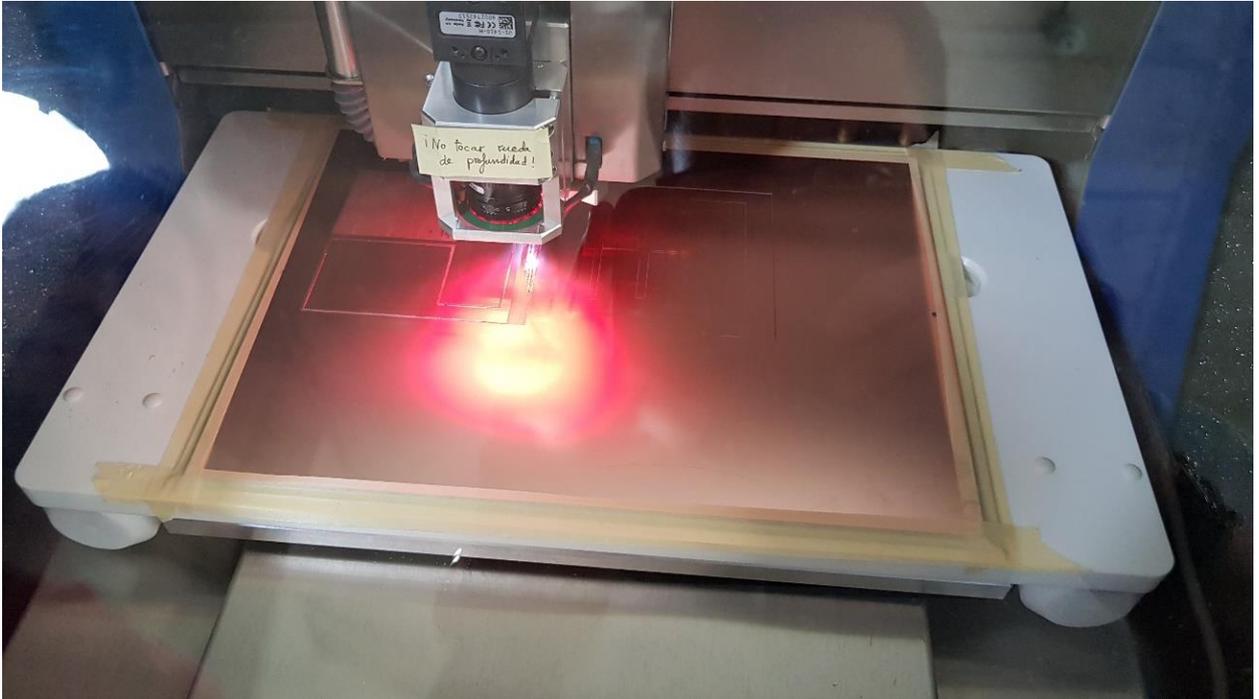


Figura 76 Archivo generado en el programa Boardmaster a través de los archivos generados en el CircuitCam

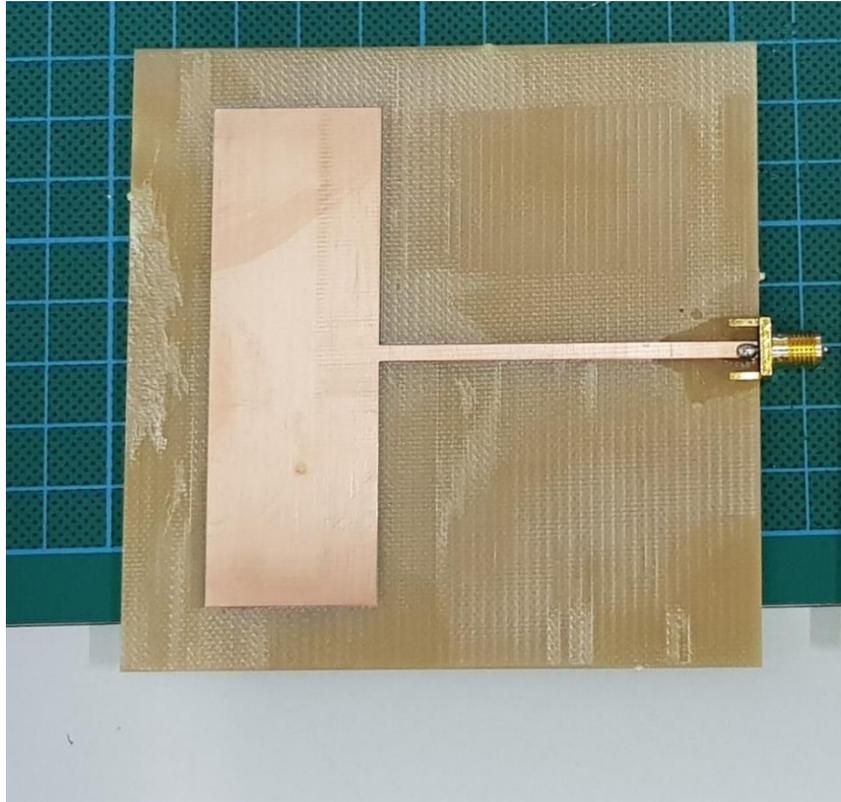
- El último paso será el de eliminar el sustrato sobrante y cortar el circuito completo. Lo primero que realiza la máquina es el marcado de todo del circuito y después se dispone a quitar todo el material sobrante, lo que se hará con el modo *Milling Top* del programa BoardMaster. Para poder cortar ambos circuitos hay que seleccionar el modo *Cutting Outside* y así poder separarlos del material sobrante.



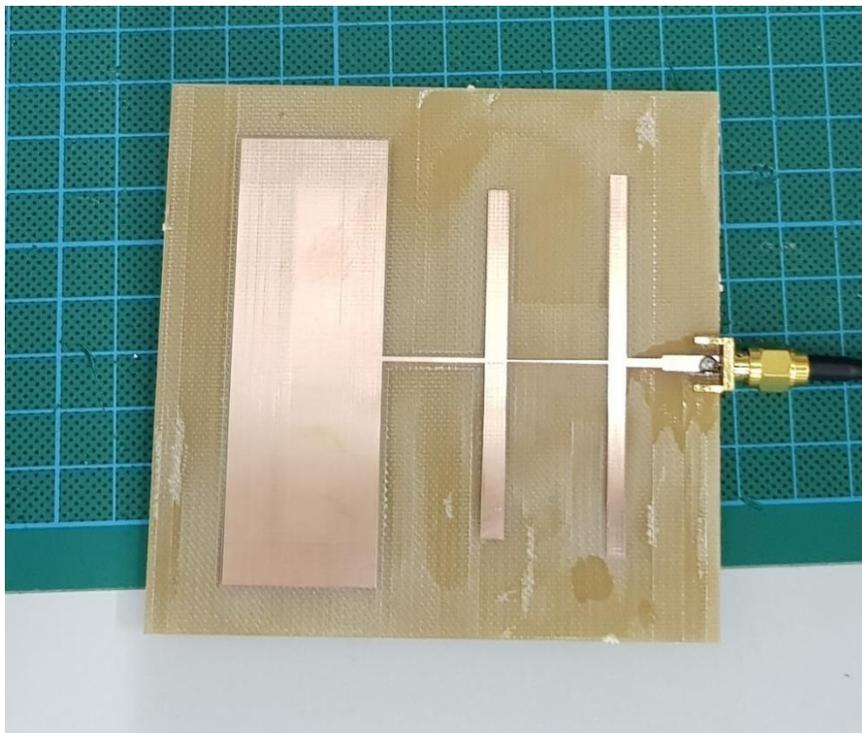
*Figura 77 Fabricación de la antena original y de la antena adaptada*

### 5.1.1. Circuitos finales impresos

Las medidas externas de cada placa han sido de 110x110 mm por lo que los circuitos fabricados han quedado de la siguiente manera:



*Figura 78 Circuito Antena original*



*Figura 79 Circuito Antena Adaptada*

## 5.2. Obtención de resultados de los circuitos fabricados

Lo primero que hay que hacer es realizar la calibración del equipo de medida que vamos a usar. En este caso el equipo de medida es un Analizador de Redes Rohde & Schwarz ZVL 6 y el kit de calibración que se ha usado es el Agilent 85052B.



Figura 80 Analizador de redes Rohde & Schwarz ZVL 6

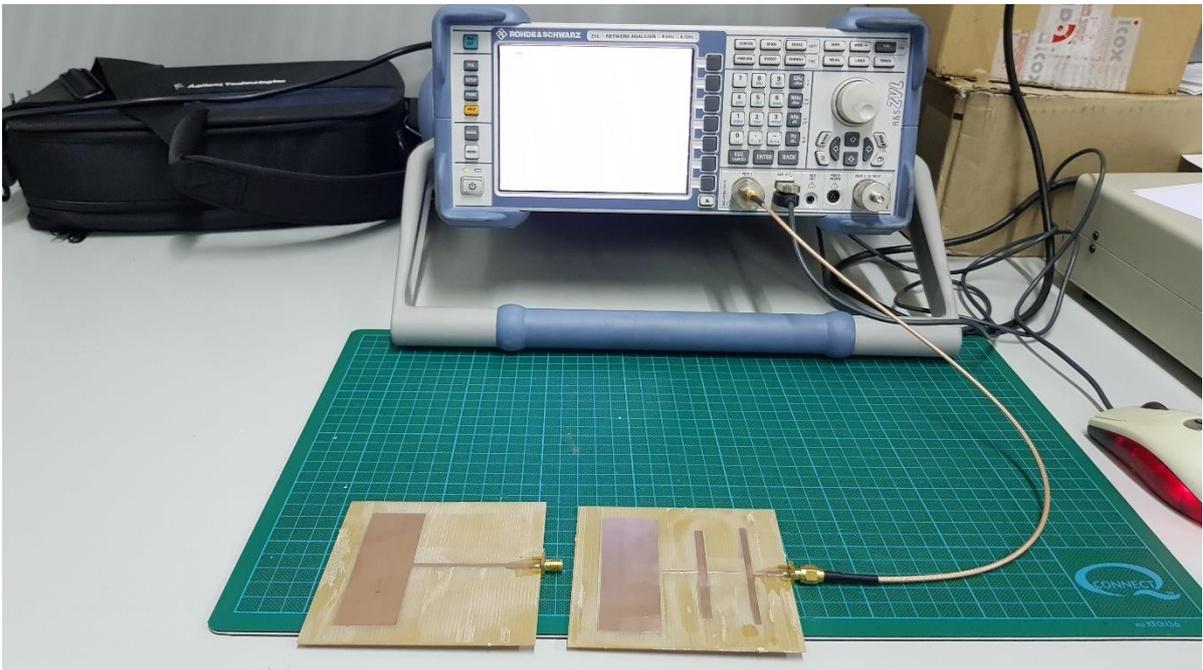


Figura 81 Kit de calibración Agilent 85052B

El método para poder calibrar el analizador de redes ha sido el Método SOL (Short, Open, Load). Este método se basa en usar tres tipos de cargas para poder los errores producidos por estándares conocidos y luego eliminarlos matemáticamente de las medidas. Esta calibración elimina el error de seguimiento de la reflexión de la respuesta de frecuencia, el error de directividad y el error de coincidencia de fuente de la configuración de la prueba en una prueba de reflexión utilizando ese puerto. Estas cargas son: un circuito abierto, un cortocircuito y una carga.

El proceso que se realiza no es de excesiva complejidad debido que los pasos que se realizan son los de conexión de uno de los tipos de carga al analizador de redes y a continuación, se selecciona en el analizador de redes el tipo de carga que se ha conectado a este. Esto es debido a que el propio analizador de redes al indicarle que tiene conectado en su extremo y sabiendo la medición que debería proporcionarle este tipo de carga, el mismo puede realizar una auto-calibración para poder conseguir esa respuesta deseada. Cuando se hayan conectado los tipos de cargas al analizador de redes, el instrumento de medida estará calibrado y se puede volver a conectar las mismas cargas y así poder comprobar que los resultados obtenidos se asemejan a lo que deberían producir.

Una vez tenemos calibrado el instrumento de medida, el siguiente paso será conectar los dos circuitos que hemos fabricado para poder calcular los resultados que proporcionan estos.

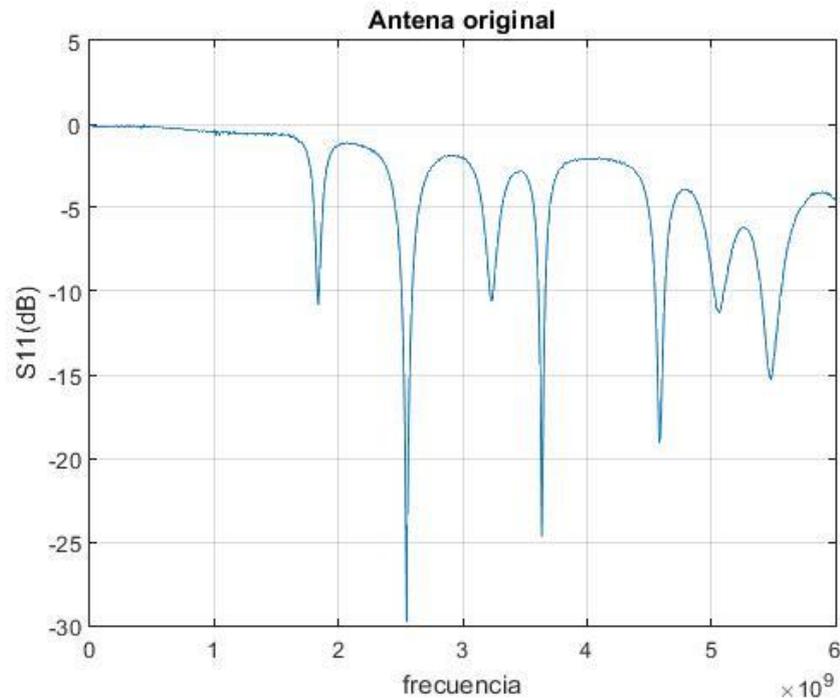


*Figura 82 Proceso de medición de los circuitos fabricados*

El analizador de redes una vez realiza la medición, exporta los archivos en formato .CSV. Por ello para poder visualizarlos hay que hacer uso de alguna herramienta que te permita cargar ficheros de datos y realizar una representación de estos. En este caso se ha utilizado el programa Matlab para poder visualizar estos resultados en una gráfica.

Se han obtenido los siguientes resultados de los dos circuitos fabricados:

#### 5.2.1. Antena original



*Figura 83 Resultados antena original impresa en un rango de frecuencias de 0 a 6 GHz*

Una vez que se ha visualizado el comportamiento completo de la antena en el rango de frecuencias que nos permitía el analizador de redes, se ha acotado ese rango de frecuencias para centrar la gráfica en aquellos valores de frecuencias que estábamos buscando.

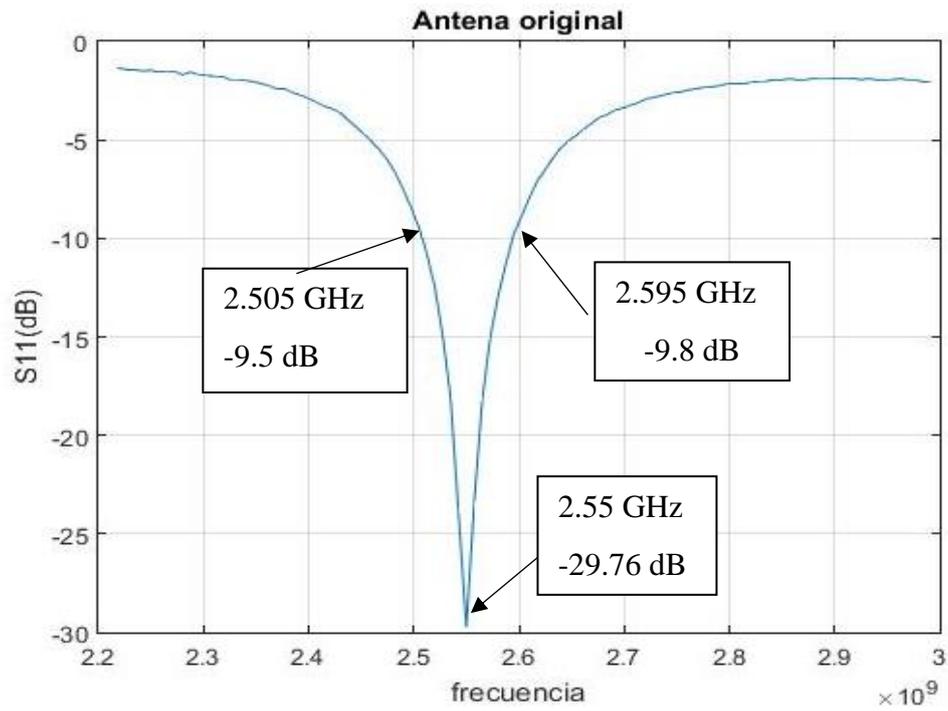


Figura 84 Resultados antena original impresa en un rango de frecuencias de 2.2 a 3 GHz

#### 5.2.2. Antena adaptada

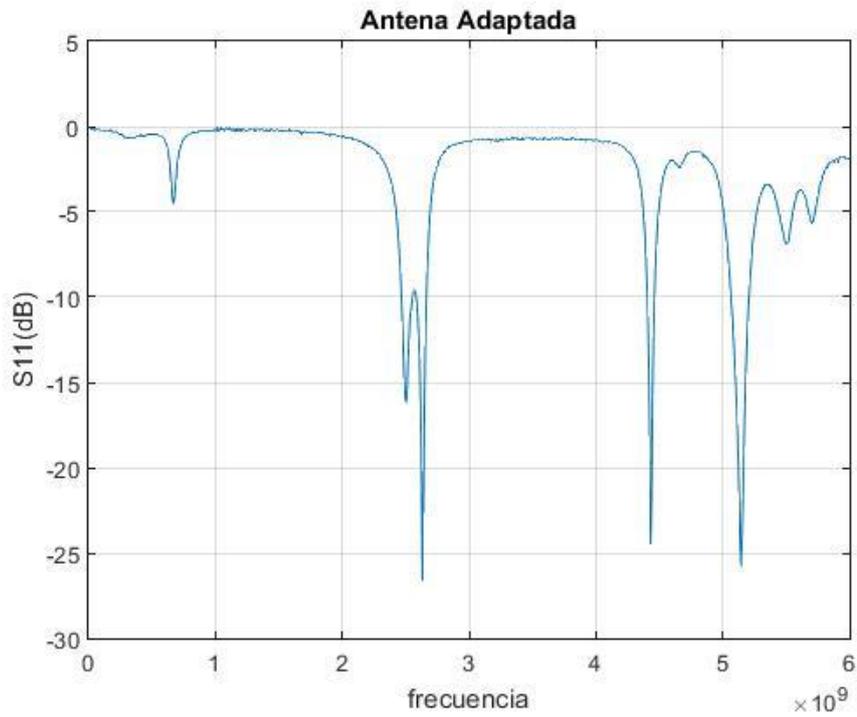


Figura 85 Resultados antena adaptada impresa en un rango de frecuencias de 0 a 6 GHz

Al igual que se ha realizado antes, se ha acotado el rango de frecuencias de los resultados visualizados para así tener una idea más aproximada de su comportamiento y tener mayor facilidad para poder comparar los resultados.

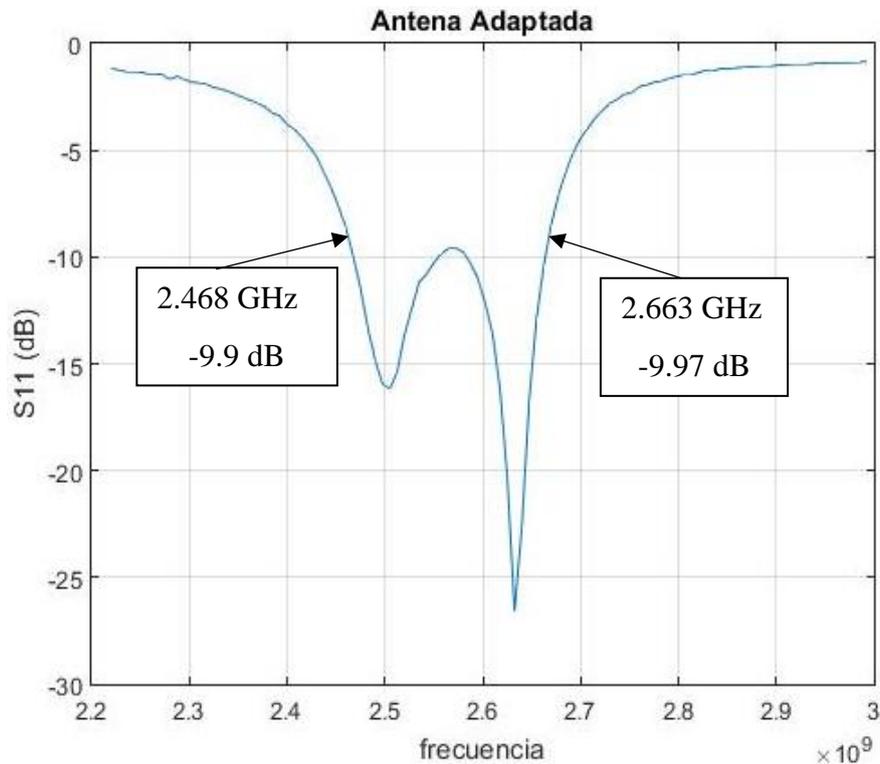


Figura 86 Resultados antena adaptada impresa en un rango de frecuencias de 2.2 a 3GHz

### 5.3. Comparación con los valores simulados

Después de una comparación entre los resultados obtenidos con la simulación y con la fabricación, se puede afirmar que estos no concuerdan puesto que se ha producido un desplazamiento de la respuesta en frecuencia hacia frecuencias superiores.

Hay varios motivos que han podido producir ese desplazamiento en frecuencia. Entre ellos se encuentran las posibles tolerancias en la fabricación, la soldadura de los conectores e incluso de los rangos de variación de los parámetros del sustrato. En este caso se va a intentar reproducir los resultados obtenidos durante la fabricación mediante un proceso de simulación haciendo uso del análisis del método de momentos. Para ello, la solución que se ha escogido para intentar conseguir los resultados deseados ha sido la de la variación de la constante dieléctrica del sustrato debido a que las otras dos causas de las diferencias de los resultados son más complicadas de solucionar.

El sustrato FR4 tiene una constante dieléctrica de valor 4.7 pero que puede variar entre un 5-10% hacia arriba o hacia abajo. En este caso como el desplazamiento ha sido hacia frecuencias superiores el valor de la constante dieléctrica se ha ido unas décimas hacia abajo.

Una vez se han realizado varias simulaciones con distintos valores de constante dieléctrica se ha llegado a que el valor de esta que proporciona unos resultados similares a los resultados obtenidos con las antenas fabricadas ha sido 4,4.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el programa ADS pero cambiando este valor de constante dieléctrica. También se hará una comparación con los valores de los circuitos fabricados para así quedarnos seguros de que el proceso de diseño que se ha seguido ha sido correcto.

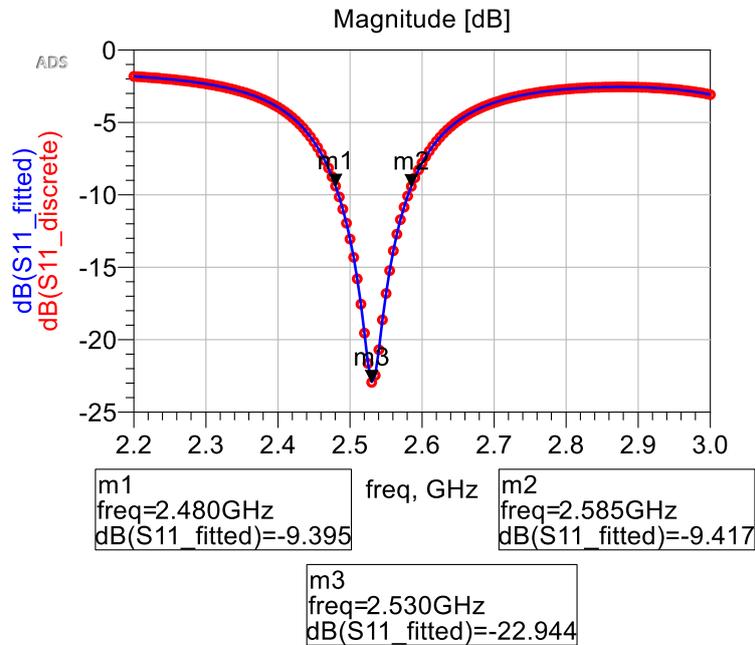


Figura 87 Resultados obtenidos en ADS con la antena original con línea de transmisión y constante dieléctrica 4.4

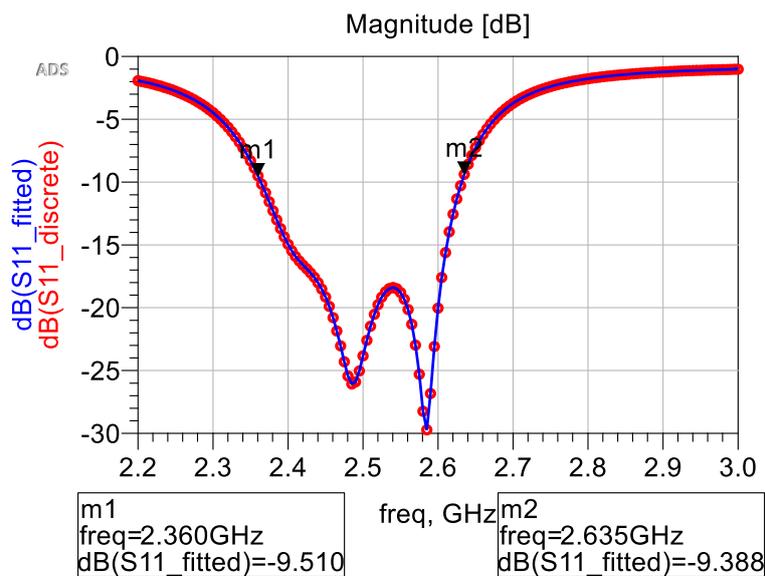


Figura 88 Resultados obtenidos en ADS con un mallado de 30 células/ $\lambda$ , con los valores finales y con constante dieléctrica 4.4

Para una mejor comprobación, se visualizará en una misma gráfica los valores teóricos obtenidos para un constante dieléctrica de 4.4, con los valores prácticos obtenidos de la medición de los circuitos fabricados.

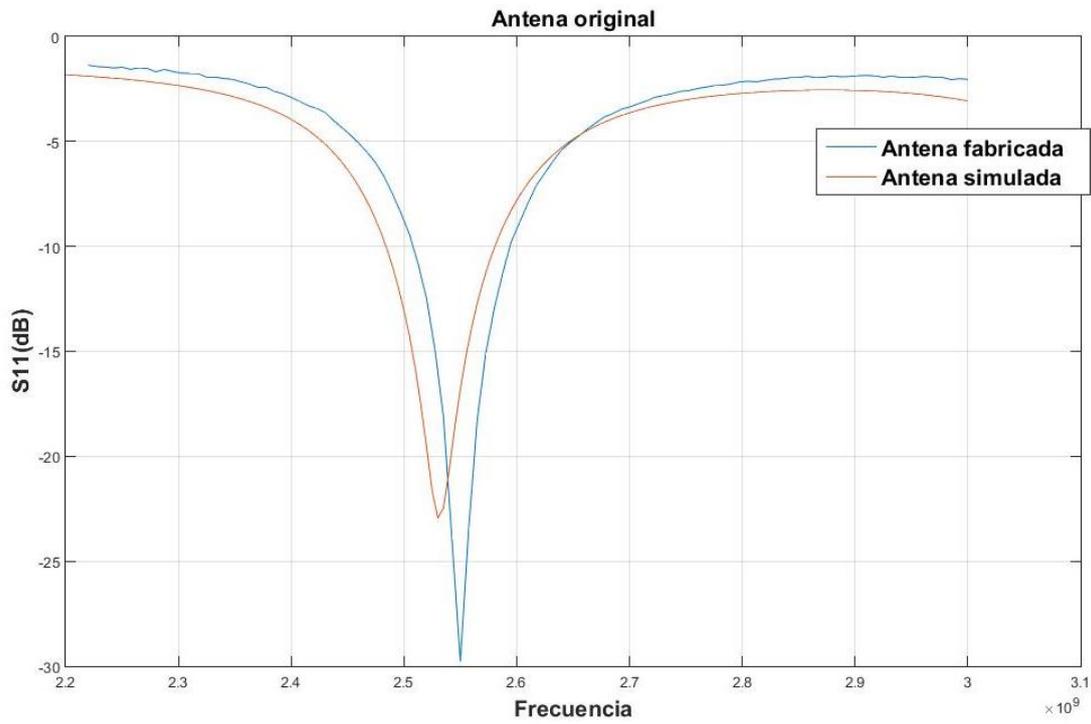


Figura 89 Comparación de los resultados obtenidos con la Antena original fabricada y con la simulada

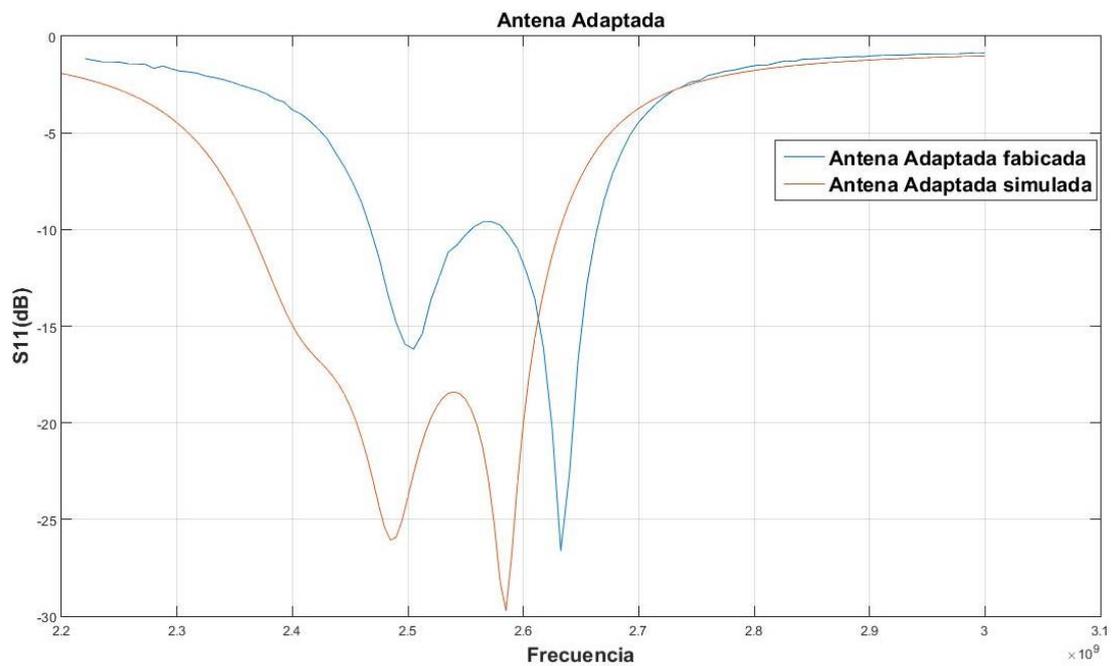


Figura 90 Comparación de los resultados obtenidos con la Antena adaptada fabricada y con la simulada

Gracias a la comparación de los resultados obtenidos en la fabricación con los resultados obtenidos en la simulación con una constante dieléctrica de 4,4 se ha podido observar como la diferencia original obtenida se podría haber debido a esta variación de la constante dieléctrica. Pese a no haberse obtenido los resultados exactos de la fabricación, si que se ha conseguido que el análisis del método de momentos nos proporciona unos resultados que se asemejan en términos de ancho de banda y de respuesta en frecuencia a los circuitos fabricados.

La diferencia que sigue existiendo entre ambas respuestas en frecuencia puede ser debida a las tolerancias en la fabricación y a la soldadura de los conectores como se ha comentado anteriormente.

#### 5.4. Simulación con el software HFSS

Una vez se ha realizado la fabricación, hemos decidido simular el circuito que se ha diseñado mediante el software Ansys Electronics HFSS. Este software es un simulador comercial para estructuras 3D basado en el método de elementos finitos (FEM en inglés) y es muy útil para el diseño de antenas.

En este proyecto, la antena fabricada es planar (2D) por lo que es más interesante la comparación con el simulador Momentum, ya que este es más rápido y como se ha podido comprobar, bastante preciso en el diseño de este circuito ya que los resultados obtenidos mediante el circuito fabricado han sido muy similares a los resultados de la simulación en términos de respuesta en frecuencia.

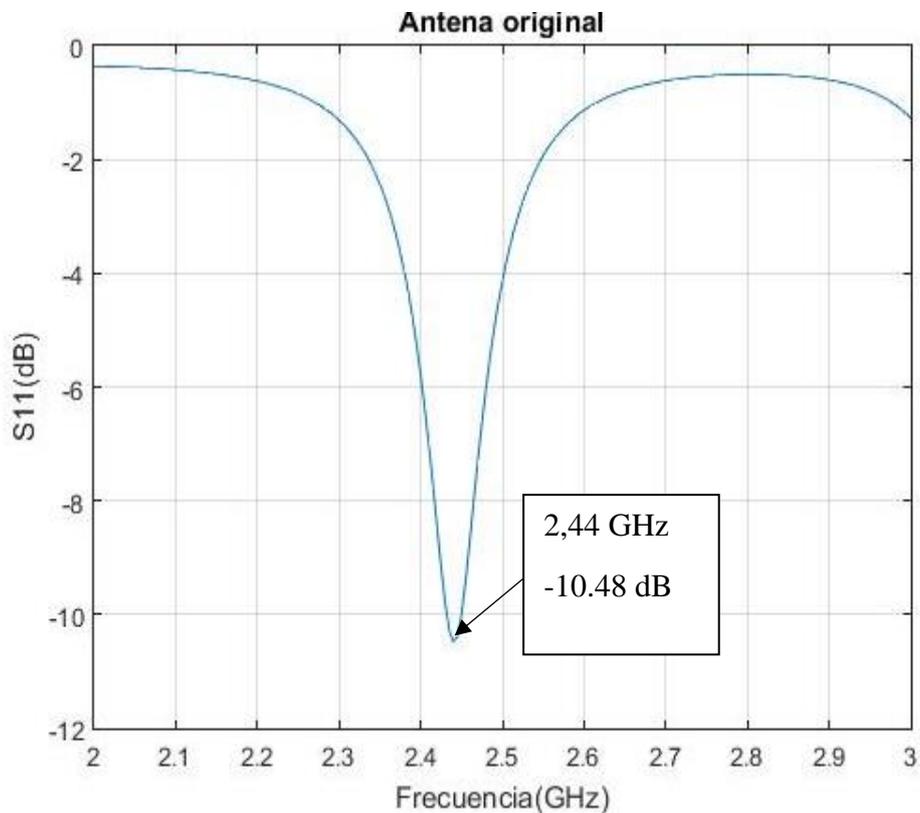
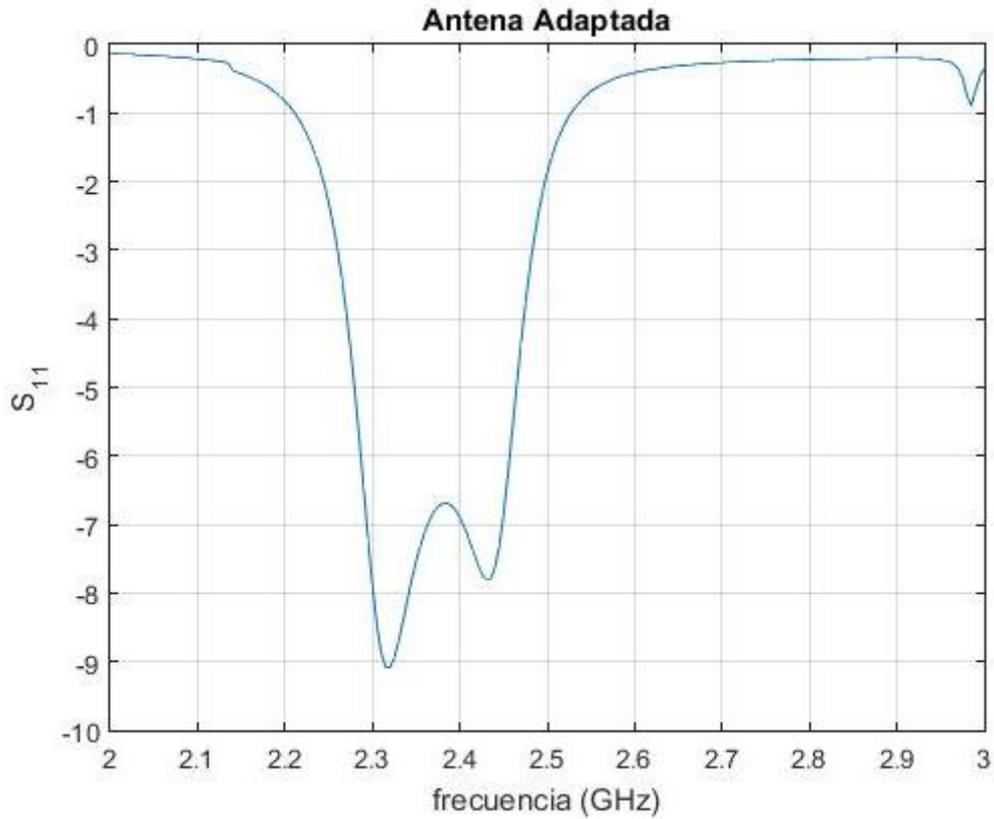


Figura 91 Antena original simulada con HFSS



*Figura 92 Antena adaptada simulada con HFSS*

Como se ha podido comprobar los resultados obtenidos con el software HFSS no se asemejan a los obtenidos con el proceso de fabricación ya que como se ha comentado anteriormente, este software está pensado para el diseño de antenas en 3D mientras que la antena diseñada en este proyecto es planar (2D).

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIÓN Y LÍNEAS DE MEJORA

## Conclusión

El objetivo principal y fundamental de este proyecto era el de conseguir que una antena de parche aumentase su ancho de banda manteniendo un valor de ganancia aceptable.

A la vista de los resultados obtenidos y gracias a la comparación en una misma grafica de los valores obtenidos tanto de manera teórica como de manera práctica a través del proceso de fabricación, se ha podido comprobar cómo se obtenían unos valores bastante similares entre ambos circuitos.

Si solo nos centrásemos en el diseño teórico, se ha visto como el ancho de banda ha aumentado notablemente sin producir eso un descenso excesivamente significativo tanto en la ganancia como en la eficiencia de radiación de la antena. Esto se ha podido comprobar a través del factor de mérito, ganancia por ancho de banda, el cual ha sido doblado con respecto a la antena original que habíamos diseñado.

Se ha podido realizar la fabricación de los dos circuitos que hemos diseñado obteniendo unos valores en términos de ancho de banda y respuesta en frecuencia muy similares a los obtenidos con los circuitos simulados. Sin embargo por falta de tiempo no se ha podido realizar la medición del diagrama de radiación dentro de la cámara anecoica por falta de tiempo.

## Líneas futuras

A partir de este proyecto se pueden definir varias líneas de futuro:

En primer lugar se podría realizar el diseño de una antena pero a otra frecuencia de radiación, para así poder trabajar con las antenas de parche en otras tecnologías que necesiten de un ancho de banda mayor y que además necesiten de otra frecuencia de radiación distinta a la vista en este proyecto. El uso de estas antenas es beneficioso debido a su facilidad de diseño, de fabricación y además de integración con otros circuitos.

En segundo lugar, una vez se ha podido comprobar cómo se han obtenido bastante satisfactorios con respecto al diseño original, se podría intentar realizar el diseño pero aumentando el orden del circuito. De esta manera se podría establecer a partir de que número de stubs empiezan a empeorar demasiado los parámetros de la antena pese a poder incrementar el ancho de banda de esta.

En tercer lugar, se podría realizar el mismo diseño que se ha realizado en este proyecto pero para un sustrato de una mayor calidad y así poder comprobar si las medidas que se obtienen son más similares a las obtenidas mediante la simulación.

En cuarto lugar, de este proyecto podría salir otro capítulo que fuese la medición del diagrama de radiación en cámara anecoica para así poder comprobar que este también se asemeja al diagrama de radiación simulado y además, que la ganancia medida concuerda con la obtenida mediante la simulación.

Por último, se podría investigar si existen otros métodos más efectivos para el aumento del ancho de banda de las antenas de parche, lo cual es muy necesario debido a que este es muy estrecho, para así poder aprovechar todas las ventajas que nos proporcionan estas antenas

# CAPÍTULO 7

## BIBLIOGRAFÍA

## Bibliografía

- [1] Balanis, Constantine A, “Antenna theory analysis and design”, 3ª edición, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Apuntes de clase de asignatura “Aplicaciones de las microondas”; de José Luis Gómez Tornero (UPCT).
- [3] H. F. Pues and A. R. Van de Capelle, "An impedance-matching technique for increasing the bandwidth of microstrip antennas," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 37, no. 11, pp. 1345-1354, Nov 1989. doi: 10.1109/8.43553
- [4] Manual Advanced Design System, ADS.
- [5] Manual Microwave Office AWR 2010.
- [6] Microwave Filters, Impedance-matching Networks and Coupling Structures (Microwave Library), capítulo 4, sección 4.9, página 128
- [7] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/hernandez\\_a\\_r/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo3.pdf)
- [8] <https://es.slideshare.net/lonely113/disco-de-antena-microstrip>

**DATA SHEET**

D\_1106

**Type FR-4 : IGAV FR 95**

IEC Specification	IEC 61249-2-7					
IEC Specification	IPC-4101/21	UL/ANSI Grade FR-4 (type L21)				
<b>DESCRIPTION</b>						
Glass epoxy. Rigid Laminates - PTH applications, supports standard double side lead free assembly processes.						
Reinforcement: Woven E-glass	Flame Retardant: Bromine Rohs compl.			Filler: Non		
Glass Transition T <sub>g</sub> : 135°C	Resin system (primary): Difunctional epoxy					
ROHS Compliance directive 2002/95/EC						
<b>CERTIFICATIONS AND HOMOLOGATIONS</b>	UL			E 47820		
<b>PROPERTIES (Cu 35µm, thickness 1.6mm)</b>	IPC 4101 Paragraph	IPC TM-650 Method	Laminate < 0.50mm Specification	Laminate < 0.50mm Typical values	Laminate ≥ 50.0mm Specification	Laminate ≥ 50.0mm Typical values
<b>SURFACE QUALITY</b> <sup>(1)</sup>	3.8.3	2.1.5	Grade A	Grade A	Grade A	Grade A
<b>THICKNESS</b> <sup>(1)</sup>	3.8.4.2	2.2.18	Class L	Class L	Class L	Class L
<b>PEEL STRENGTH (std Cu foil)</b>						
After thermal stress, 10' 288°C	3.9.1.1.1	2.4.8	1.5 N/mm	1.8 N/mm	1.4 N/mm	1.8 N/mm
At 125°C	3.9.1.1.2	2.4.8 / 2 / 3	1.3 N/mm	1.6 N/mm	1.3 N/mm	1.6 N/mm
After process solutions	3.9.1.1.3	2.4.8	1.3 N/mm	1.8 N/mm	1.3 N/mm	1.8 N/mm
<b>VOLUME RESISTIVITY</b>	3.11.1.3	2.5.17.1				
90% HR / 35 / 96h			10 <sup>8</sup> MΩ-cm	10 <sup>8</sup> MΩ-cm	n/a	n/a
After moisture			n/a	n/a	10 <sup>4</sup> MΩ-cm	10 <sup>7</sup> MΩ-cm
At elevated temp (E 24h / 125°C)			10 <sup>7</sup> MΩ-cm	10 <sup>7</sup> MΩ-cm	10 <sup>7</sup> MΩ-cm	10 <sup>7</sup> MΩ-cm
<b>SURFACE RESISTIVITY</b>	3.11.1.4	2.5.17.1				
90% HR / 35 / 96h			10 <sup>8</sup> MΩ	10 <sup>7</sup> MΩ	n/a	n/a
After moisture			n/a	n/a	10 <sup>4</sup> MΩ	10 <sup>6</sup> MΩ
At elevated temp (E 24h / 125°C)			10 <sup>5</sup> MΩ	10 <sup>5</sup> MΩ	10 <sup>5</sup> MΩ	10 <sup>5</sup> MΩ
<b>MOISTURE ABSORPTION</b>	3.12.1.1	2.6.2.1	n/a	n/a	0,35%	0.19 %
<b>DIELECTRIC BREAKDOWN</b>	3.11.1.6	2.5.6	n/a	n/a	42 kV	45 kV
<b>PERMITIVITY at 1MHz</b> <sup>(2)</sup>	3.11.1.1	2.5.5	4.8	4.8	4.8	4.8
<b>LOSS TANGENT at 1MHz</b>	3.11.1.2	2.5.5	0,027	0,027	0,027	0,027
<b>FLEXURAL STRENGTH</b>	3.9.1.3	2.4.4				
Length direction			n/a	n/a	415 N/mm <sup>2</sup>	550 N/mm <sup>2</sup>
Cross direction			n/a	n/a	345 N/mm <sup>2</sup>	450 N/mm <sup>2</sup>
<b>ARC RESISTANCE</b>	3.11.1.5	2.5.1	60 sec	120 sec	60 sec	120 sec
<b>THERMAL STRESS (10' at 288°C)</b>	3.10.1.2	2.4.13.1	Pass visual	60 sec	Pass visual	60 sec
<b>ELECTRIC STRENGTH</b> <sup>(2)</sup>	3.11.1.7	2.5.6.2	32kV/mm	36kV/mm	n/a	n/a
<b>FLAMMABILITY</b>	3.10.1.1	UL 94	V-0	V-0	V-0	V-0
<b>GLASS TRANSITION TEMP (T<sub>g</sub>)</b>	3.10.1.6	2.4.25 DSC	n/a	n/a	130°C	135°C
<b>DIMENSIONAL STABILITY</b> <sup>(1)</sup>	3.9.12	2.4.39	-	-	± 200ppms	± 100ppms
<b>COMPARATIVE TRACKING INDEX-CTI</b>	IEC60112	-	-	-	200 V	230 V

**AVAILABILITY**

<b>STANDARD SHEETS SIZES</b>	927 x 1232 mm and 1062 x 1232 mm	Tolerance +13/-0mm	Logo (red) <b>IGAV</b>
<b>SQUARENESS</b>	3 mm max., as differential between diagonal measurement		
<b>Copper thickness</b>	18, 35 and 70 mic (other copper thickness upon request)		

Specification column corresponds to guaranteed values. Typical values are average values of current production and are based on reliable analytical methods, they have to be used only as guideline and not give rise to any rights under warranty terms. Aismalibar reserves the right to future changes.

Notes: <sup>(1)</sup> Other level upon agreement

<sup>(2)</sup> Influenced by build-up (% of resin)

<sup>(3)</sup> As agreed upon between user and supplier

IEC Specifications (IEC 61249-2-7) and Test Methods (IEC 61189-2): IEC specifications and test methods are in most of cases equivalent to IPC standards. They can be used as reference upon specific agreement between customer and supplier.