

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**DISEÑO DE ANTENAS DE PARCHES SOBRE GUÍA RECTANGULAR
Y TORNILLOS DE SINTONÍA**

Autor: Raquel Villena Medina

Tutor: Pablo Sánchez Olivares

Ponente: José Luis Masa Campos

Julio 2015

DISEÑO DE ANTENAS DE PARCHES SOBRE GUÍA RECTANGULAR Y TORNILLOS DE SINTONÍA

Autor: Raquel Villena Medina

Tutor: Pablo Sánchez Olivares

Ponente: José Luis Masa Campos

**Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas
(RFCAS)**

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio 2015



RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo el diseño y la caracterización de una antena en guía de onda con control de alimentación mediante tornillos de sintonía. Se ha trabajado en la banda de frecuencias de 11-12 GHz (comienzo de la banda Ku).

En el diseño de arrays de antenas se requiere un control muy preciso de la cantidad de potencia que debe radiar cada elemento de forma individual. Para poder modificar de forma individual la cantidad de energía que radia cada elemento se ha diseñado un sistema por el cual se puede caracterizar la red de alimentación de forma independiente al elemento radiado. La manera de modificar la cantidad de energía radiada por cada elemento es mediante la introducción de unos tornillos a través de la base de guía de onda que actúa como red de alimentación.

En este proyecto se han llevado a cabo dos diseños de red de alimentación de un elemento unitario basado en guía de onda rectangular.

El primer diseño cuenta con una guía de onda rectangular rellena de aire y una vía de acoplo dispuesta en la parte superior de la guía, que es básicamente un conector de 50Ω que penetra una cierta longitud dentro de la guía. De esta forma se permite fijar el acoplo nominal de la red de alimentación y, mediante los tornillos, modificar de forma dinámica la cantidad de señal radiada por el elemento radiante.

El segundo diseño consta de una guía de onda rectangular rellena parcialmente de dieléctrico para permitir utilizar líneas de acoplo. En este caso, la línea de acoplo se sitúa en la parte interior superior de la guía de onda y es la que marca el valor nominal de acoplo. Con los tornillos situados en la parte inferior de la guía se modifica a tiempo real la cantidad de señal enviada hacia el elemento radiante.

El diseño de ambos elementos se ha realizado en las instalaciones del RFCAS de la Escuela Politécnica Superior. La construcción del primer diseño se llevó a cabo en un taller externo y la medida de este elemento se realizó en las instalaciones del laboratorio RFCAS.

PALABRAS CLAVE

Antena, guía de onda, acoplo, parámetros S, adaptación, sintonía, tornillo, red de alimentación, elemento unitario, transmisión, fase, sustrato, línea de acoplo, vía, modos híbridos, parches, microstrip, constante dieléctrica.

ABSTRACT

In this project it has been carried out the design and characterization of a waveguide antenna with power control by tuning screws. It has worked in the frequency band 11-12 GHz (beginning of the Ku band).

In the design of antenna arrays it is required to specify the amount of power that will be radiated by each element individually. It has been designed a system by which you can characterize the element independently of the radiation element and change the amount of energy in each element. The way to change this radiated energy by each element is by introducing screws through the waveguide base which acting as power supply.

The first design has a rectangular waveguide filled with air and a coupling via set on the top of the guide, and it is basically a 50Ω connector which penetrates a certain length inside the guide. This way you are allowed to set the nominal coupling of the supply network and, using screws, dynamically change the amount of signal radiated by the radiating element.

The second design consists of a rectangular waveguide partially filled with dielectric to allow use coupling lines. In this case, the coupling line is at the top inside of the waveguide and is giving the nominal value of coupling. With the screws on the bottom of the guide you can modify in real time the amount of signal sent to the radiating element.

The design of both elements has been carried out on the facilities of RFCAS of the Escuela Politécnica Superior. Construction of the first design was carried out in an external workshop and the measure of this element was performed in the laboratory of RFCAS.

KEYWORDS

Antenna, waveguide, coupling, S parameters, adaptation, tuning, screw, feeding network, unitary element, reflection, phase, substrate, coupling line, via, hybrid modes, patches, microstrip, dielectric constant.

AGRADECIMIENTOS

No puedo comenzar este documento sin darle las gracias a José Luis por permitirme trabajar en este laboratorio y realizar este proyecto. A Pablo Sánchez, mi tutor, por esas correcciones a horas intempestivas, esa velocidad a la hora de contestar dudas y su dedicación y apoyo a mí y a este proyecto.

Gracias a todo el grupo de RFcas, esos valientes que nos quedamos hasta las mil acabando proyectos y memorias y que tan grandes y buenos momentos hemos pasado. Pili, mi compañera tornillera, Guly y sus pintadas pizarriles, Manu y Cobos con sus tonterías, Edu con sus canciones aleatorias, Gustavo con sus enseñanzas CSTeras y Paula con sus tonterías, tropiezos y risas. Habéis aportado alegría a este grupo, y os lo agradezco mil. Esas horas de café nos han salvado a más de uno de la destrucción mental absoluta.

Por supuesto debo agradecer a mis chanchulleros Miriam, Ester, María, Carlos, Rubén, David y Álvaro. Por soportar mis tonterías sobre tornillos y guías de onda que ni yo misma entendía al principio y por todos estos años compartiendo risas, comidas, apuntes y prácticas.

Agradecer el buen rollo y ambiente que ha habido en la carrera durante todos estos años. Mención especial a Miriam, fiel compañera de prácticas y estudio en la salud y en la enfermedad, en los amaneceres y en los anocheceres, en la biblioteca y en el laboratorio. Gracias a Paula por acogerme en su casa, noches absurdas y un pedazo concierto. Aún guardo tus dibujos "photoshoperos" en mi portátil. Gracias Ana por esas quedadas en tu vaquería y esas barbacoas tan necesarias para desconectar de la Universidad. Gracias Álvaro, Álex, Antonio, Carlos, Lucas y el desertor de Miguel. Por muchas más quedadas. A los que no os nombro, porque no tengo suficiente espacio, que sepáis que me acuerdo de vosotros.

No me olvido de vosotras, Ovejas, que aunque ya no estemos juntas en la carrera nos seguimos viendo y riendo como siempre. Entre nosotras no pasa el tiempo.

Debo mencionar, bajo amenaza de muerte, a mis amigos camineros. Esos que, a pesar de no tener ni idea de lo que iba mi proyecto o de lo que es una onda, han puesto todo su empeño en tratar de entenderlo y, si no, de consolarme y darme su más sentido pésame. Juan, no pienso escribir lo que tú ya sabes.

No puede faltar dar las gracias a mi familia, sobre todo a mi padre, que no comprende ningún circuito más allá de una bobina o un condensador, pero que me ha apoyado en todo momento y ha tratado de entender la naturaleza de este proyecto.

Y por supuesto, gracias a Carlos. Sin ti no habría sido posible acabar este proyecto (ya sabes tú por qué), ni posiblemente haber acabado la carrera. Gracias por tu apoyo incondicional durante estos tres años.

Raquel Villena, 2015

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organización de la memoria	2
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1 Conceptos básicos de antenas	3
2.1.1 ¿Qué es una antena?	3
2.1.2 Parámetros de dispersión	3
2.1.3 Tipos de antenas.....	5
2.2 Teoría de Guías de onda	5
2.2.1 Modos de propagación	6
2.2.2 Guía de onda rectangular	7
2.2.3 Alimentación en guía de onda	8
2.3 Teoría Microstrip	9
2.3.1 Parches.....	9
2.3.2 Alimentación microstrip.....	10
2.4 Iris en guía de onda	10
3. CARACTERIZACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO	13
3.1 Introducción	13
3.2 Elemento unitario previo	13
3.3 Modelo de análisis de tres puertos	16
4. GUÍA RELLENA DE AIRE	17
4.1 Introducción	17
4.2 Carta de Modos	18
4.3 Posición de los tornillos	18
4.4 Elemento unitario final.....	27
4.4.1 Elemento unitario con vía de 3.0mm.....	27
4.4.2 Elemento unitario con vía de 3.5mm sin sustrato	29
4.4.3 Elemento unitario con vía de 4.0mm sin sustrato	32
4.4.4 Elemento unitario con vía de 4.5mm sin sustrato	35
4.4.5 Consideraciones finales del diseño del elemento unitario con vía	37
4.5 Construcción y medida	40
4.5.1 Integración	40

4.5.2 Prototipo.....	40
4.5.3 Medidas.....	42
4.6 Comparativa entre simulación y medidas.....	52
5. GUÍA RELLENA PARCIALMENTE DE DIELECTRICO.....	55
5.1 Introducción.....	55
5.2 Carta de modos.....	56
5.3 Posiciones de los tornillos.....	57
5.4 Elemento unitario con línea de acoplo.....	63
5.4.1 Línea de acoplo equivalente a vía 3.0mm.....	63
5.4.2 Línea de acoplo equivalente a vía 3.5mm.....	65
5.4.3 Línea de acoplo equivalente a vía 4.0mm.....	68
5.4.4 Línea de acoplo equivalente a vía 4.5mm.....	71
5.5.5 Consideraciones finales del diseño del elemento unitario con línea de acoplo.....	73
5.6 Construcción.....	76
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	79
6.1. Conclusiones.....	79
6.2. Trabajo Futuro.....	79
REFERENCIAS.....	81
ANEXO A: PLANOS PROTOTIPO 1.....	I
ANEXO B: CALIBRACIÓN PARA GUÍA DE ONDA TRL.....	V
Motivación e introducción a la calibración.....	V
Proceso de calibración.....	VI
1. Importar los datos del kit de calibración.....	VI
2. Calibración TRL.....	VI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de Red de dos puertos	4
Figura 2.2: Guía de onda rectangular	5
Figura 2.3: Ancho de banda monomodo en una guía.....	7
Figura 2.4: Guía de onda rectangular	8
Figura 2.5: conector coaxial.....	8
Figura 2.6: Alimentación de parche rectangular mediante microstrip (izquierda) o coaxial (derecha)	9
Figura 2.7: Alimentación por sonda coaxial vertical (izquierda) y horizontal (derecha).....	10
Figura 2.8: Iris en guía de onda	10
Figura 3.1: Estructura del elemento unitario previo	14
Figura 3.2: Estructura final del elemento radiante completo.....	15
Figura 3.3: Estructura de elemento unitario con tres puertos	16
Figura 4.1: Estructura del elemento unitario sin sustrato.....	17
Figura 4.2: Estructura de la guía WR-90 rellena de aire.....	18
Figura 4.3: Carta de modos monomodo para la WR-90 con $\epsilon_r=1$	18
Figura 4.4: Estructura del estudio de posición de los tornillos dentro de la guía y ejes.....	19
Figura 4.5: Movimiento en Carta del tornillo para la posición $z=7\text{mm}$	19
Figura 4.6: Rango de acoplo del tornillo para la posición $z=7\text{mm}$	20
Figura 4.7: Movimiento en Carta del tornillo para la posición $z=0\text{mm}$	20
Figura 4.8: Rango de acoplo del tornillo para la posición $z=0\text{mm}$	21
Figura 4.9: Movimiento en Carta del tornillo para la posición $z=-7\text{mm}$	21
Figura 4.10: Rango de acoplo del tornillo para la posición $z=-7\text{mm}$	22
Figura 4.11: Desfase de todos los tornillos para guía rellena de aire.....	22
Figura 4.12: Movimiento en carta que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo.....	23
Figura 4.13: Valores de adaptación que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo.....	23
Figura 4.14: Valores de acoplo que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo	24
Figura 4.15: Valores de fase que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo	24
Figura 4.16: Movimiento en carta que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo	25
Figura 4.17: Valores de adaptación que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo	25
Figura 4.18: Valores de acoplo que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo.....	26

Figura 4.19: Valores de fase que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo	26
Figura 4.20: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 3.0mm.....	27
Figura 4.21: Adaptación de los tornillos combinados para vía 3.0mm	28
Figura 4.22: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 3.0mm	28
Figura 4.23: Desfase para los tornillos combinados para vía 3.0mm.....	29
Figura 4.24: movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 3.5mm.....	30
Figura 4.25: Adaptación de los tornillos combinados para vía 3.5mm	30
Figura 4.26: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 3.5mm	31
Figura 4.27: Desfase para los tornillos combinados para vía 3.5mm.....	31
Figura 4.28: movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 4.0mm.....	32
Figura 4.29: Adaptación de los tornillos combinados para vía 4.0mm	33
Figura 4.30: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 4.0mm	33
Figura 4.31: Desfase para los tornillos combinados para vía 4.0mm.....	34
Figura 4.32: movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 4.5mm.....	35
Figura 4.33: Adaptación de los tornillos combinados para vía 4.5mm	35
Figura 4.34: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 4.5mm	36
Figura 4.35: Desfase para los tornillos combinados para vía 4.5mm.....	36
Figura 4.36a: Fotografía lateral del prototipo Figura 4.36.b: Fotografía frontal del prototipo ..	40
Figura 4.37: Base de la guía de onda.....	41
Figura 4.38: Parte superior del flange	41
Figura 4.39: Tapa metálica.....	41
Figura 4.40: Corte del alma del conector Figura 4.41: Limado del alma del conector	42
Figura 4.42: Medidas de la anecoica del movimiento de las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.0mm.....	43
Figura 4.43: Valor de adaptación para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 3.0mm	43
Figura 4.44: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.0mm	44
Figura 4.45: Valores de fase para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.0mm	44
Figura 4.46: Medidas del movimiento de los tornillos combinados para vía 3.5mm	45
Figura 4.47: Adaptación para las posiciones de los tornillos escogidas para 3.5mm	46

Figura 4.48: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.5mm	46
Figura 4.49: Fases para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 3.5mm	47
Figura 4.50: Medidas del movimiento de los tornillos combinados para vía 4.0 mm	48
Figura 4.51: Adaptación para las posiciones de los tornillos escogidas para 4.0 mm.....	48
Figura 4.52: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 4.0 mm.....	49
Figura 4.53: Fases para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 4.0mm	49
Figura 4.54: Medidas del movimiento de los tornillos combinados para vía 4.5mm	50
Figura 4.55: Adaptación para las posiciones de los tornillos escogidas para 4.5 mm.....	51
Figura 4.56: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 4.5mm	51
Figura 4.57: Fases para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 4.5mm	52
Figura 5.1: Estructura del elemento unitario con línea de acoplo	55
Figura 5.2: Vista frontal de la línea de acoplo	55
Figura 5.3: Guía WR90 rellena de aire y dieléctrico	56
Figura 5.4: Carta de modos monomodo para la WR-90 con $\epsilon_{reff}=1,17$	57
Figura 5.5: Elemento con vía hasta la línea de acoplo atravesando el sustrato	57
Figura 5.6: Esquema de la posición óptima de los tornillos.....	58
Figura 5.7: Movimiento en Carta de Smith del tornillo para la posición $z=-5\text{mm}$	58
Figura 5.8: Rango de acoplo para el tornillo situado en la posición $z=-5\text{mm}$	59
Figura 5.9: Movimiento en Carta de Smith del tornillo para la posición $z=3\text{mm}$	59
Figura 5.10: Rango de acoplo para el tornillo situado en la posición $z=3\text{mm}$	60
Figura 5.11: Desfase de todos los tornillos para guía rellena parcialmente de dieléctrico	60
Figura 5.12: Efecto que produce el tornillo central sobre el tornillo 1 para guía rellena parcialmente de dieléctrico.....	61
Figura 5.13: Valor de adaptación en magnitud que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en línea de acoplo.....	61
Figura 5.14: Valor de acoplo en magnitud que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en la línea de acoplo	62
Figura 5.15: Valores de fase producidos por el tornillo central sobre el tornillo de entrada en la línea de acoplo	62
Figura 5.16: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 3.0 mm.....	63
Figura 5.17: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 3.0mm	64
Figura 5.18: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.0mm	64
Figura 5.19: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 3.0mm.....	65
Figura 5.20: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 3.5 mm.....	66

Figura 5.21: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 3.5mm	66
Figura 5.22: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.5mm	67
Figura 5.23: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 3.5mm	67
Figura 5.24: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 4.0 mm	68
Figura 5.25: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 4.0mm	69
Figura 5.26: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.0 mm	69
Figura 5.27: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 4.0mm	70
Figura 5.28: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 4.5 mm	71
Figura 5.29: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 4.5mm	71
Figura 5.30: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.5 mm	72
Figura 5.31: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 4.5mm	72
Figura 5.32: Estructura SIW para la construcción del prototipo 2	76
Figura 5.33: Planta superior de la estructura pseudo-SIW con la línea de acoplo	77
Figura B.1: Ecuaciones de calibración con Through-Reflect-Line	VI
Figura B.2: Conexión Thru	VII
Figura B.3: Short del kit de calibración	VII
Figura B.4: Conexión del short en cada puerto para medir el Reflect	VIII
Figura B.5: Guía de longitud $\lambda/4$ del kit de calibración	VIII
Figura B.6: Conexión de la guía de longitud $\lambda/4$ para Line	IX

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Nombres y frecuencias de las bandas de las ondas microondas	3
Tabla 4.1: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 3.0mm	29
Tabla 4.2: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 3.5mm	32
Tabla 4.3: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 4.0mm	34
Tabla 4.4: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 4.5mm	37
Tabla 4.5: Posiciones de los tornillos para cada valor de acoplo y fase para las vías bajo estudio	39
Tabla 4.6: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 3.0mm	45
Tabla 4.7: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 3.5mm	47
Tabla 4.8: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 4.0mm	50
Tabla 4.9: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 4mm.....	52
Tabla 4.10: Comparativa entre valores simulados y medidos para los distintos conectores.....	53
Tabla 5.1: Tamaños de las líneas de acoplo.....	63
Tabla 5.2: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.0mm.....	65
Tabla 5.3: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.5mm.....	68
Tabla 5.4: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.0mm.....	70
Tabla 5.5: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.5mm.....	73
Tabla 5.6: Valores de rango de acoplo y máximo y mínimo para combinación de tornillos.....	73
Tabla 5.7: Valor de acoplo y fase para cada posición de tornillos adaptada en las líneas de acoplo	75

1. INTRODUCCIÓN

Este documento describe el proceso de caracterización, diseño, construcción y medida de una antena (elemento unitario) con capacidad para modificar su coeficiente de acoplo mediante tornillos de sintonía. La alimentación de la antena se lleva a cabo mediante una guía de onda rectangular diseñada para trabajar en la banda de frecuencias de 11 a 12 GHz (banda X).

1.1 Motivación

Las guías de onda son el método más utilizado a la hora de transportar señales de alta frecuencia debido a sus bajas pérdidas. A dichas frecuencias, las líneas de transmisión normales como los cables coaxiales presentan una gran atenuación.

Existen otras alternativas como la alimentación microstrip, pero las guías de onda presentan menores pérdidas en esta banda de frecuencia. Además, al ser un medio cerrado, se evita la existencia de interferencias en el campo debido a otros elementos u objetos, al contrario de lo que ocurre en los sistemas de transmisión abiertos. Debido a ello son utilizadas ampliamente para la agrupación de los sistemas de alimentación con sus antenas.

Con esta idea en mente, en el grupo RFCAS se han desarrollado diversos proyectos en los que se ha utilizado una guía de onda para alimentar una agrupación de ranuras o de parches impresos para sistemas de comunicaciones en 12 GHz (televisión digital por satélite DBS) o en 17 GHz (sistemas de tele-emergencia).

Las ranuras y los parches son útiles en la creación de antenas de array, ya que presentan un tamaño reducido. Un array está formado por múltiples antenas (elementos radiantes) cada uno con su propio diagrama de radiación. Todos combinados forman el diagrama de radiación del array, cuya configuración se realiza mediante la posición y número de elementos radiantes, la cantidad de potencia con la que se alimentan y el desfase de señal existente entre dichos elementos.

1.2 Objetivos

Con el objetivo de dotar de una mayor versatilidad a estos sistemas de antenas, se propone la utilización de elementos de ajuste en la red de alimentación de la guía de onda que permitan hacer modificaciones en las prestaciones y características de la antena de forma sencilla, sin tener que realizar un rediseño completo de la antena.

Uno de estos elementos de ajuste consiste en la utilización de tornillos que se introducen dentro de la guía de forma variable, de tal forma que la señal transmitida en el interior de la guía de onda puede ser acoplada a los elementos radiantes situados en el exterior de la guía. Este tipo de elementos pueden ser utilizados tanto en ranuras como en parches microstrip, pudiendo dotar a este tipo de elementos radiantes la capacidad de reajuste y la versatilidad en sus prestaciones como modificar la dirección de apuntamiento reajustando los tornillos. Una opción es variar tanto la distribución de alimentación con los tornillos que dé lugar a un diagrama de radiación totalmente ajustable para acoplarse mejor al funcionamiento deseado. Otra opción es utilizar

estos tornillos para realizar ajustes finos en la red de alimentación para, de esta forma, subsanar pequeños errores en la fabricación y obtener un funcionamiento mejor de la antena.

El objetivo, por tanto, de este proyecto, es realizar el estudio del efecto que ejercen los tornillos en un elemento unitario formado por guía de onda rectangular y elemento radiante microstrip (parche).

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Se presenta la motivación y los objetivos del TFG.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Descripción del estado actual de la tecnología y teoría de antenas, guías de onda y circuitos impresos.
- **Capítulo 3: Caracterización del elemento unitario.** Presentación y descripción del elemento unitario y modelo de análisis para su simulación.
- **Capítulo 4: Guía rellena de aire.** Estudio del efecto de los tornillos de sintonía sobre una guía de onda rellena de aire con vía de acoplo. Simulaciones, construcción del prototipo, medida y comparativa entre simulación y medidas.
- **Capítulo 5: Guía rellena parcialmente de dieléctrico.** Estudio del efecto de los tornillos de sintonía sobre una guía de onda rellena parcialmente de dieléctrico y con línea de acoplo. Simulaciones y prototipo de construcción.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.** Recopilación del conocimiento conseguido a lo largo del TFG y descripción de las líneas de investigación pendientes.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Conceptos básicos de antenas

2.1.1 ¿Qué es una antena?

Una antena se define como un dispositivo metálico diseñado para emitir y recibir ondas de radio electromagnéticas, y además adapta la salida del transmisor o a la entrada del receptor al medio. Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones físicas y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia que es transmitida o recibida.

Las antenas vienen caracterizadas por su diagrama de radiación, directividad, ganancia, polarización, impedancia y ancho de banda.

Una buena antena se caracteriza por tener un buen rendimiento de radiación, por estar bien adaptada a la línea de transmisión a la que se conecta y por poseer un diagrama de radiación adecuado.

Las antenas se diseñan de tal forma que trabajen en un ancho de banda de frecuencia específico. Las bandas más comunes con las microondas, que abarcan desde los 300 MHz hasta los 300 GHz. Esta banda, a su vez, está subdividida en bandas menores:

Banda	frec. mínima	frec. máxima	λ mínima	λ máxima
L	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
S	2 GHz	4 GHz	15 cm	7.5 cm
C	4 GHz	8 GHz	7.5 cm	3.75 cm
X	8 GHz	12.4 GHz	3.75 cm	2.42 cm
Ku	12.4 GHz	18 GHz	2.42 cm	1.66 cm
K	18 GHz	26.5 GHz	1.66 cm	1.11 cm
Ka	26.5 GHz	40 GHz	1.11 cm	7.5 mm
mm	40 GHz	300 GHz	7.5 mm	1 mm

Tabla 2.1: Nombres y frecuencias de las bandas de las ondas microondas

2.1.2 Parámetros de dispersión

En el estándar IEEE 145-1973 define una serie de parámetros que caracterizan a una antena. Existen parámetros de carácter circuital, como el coeficiente de reflexión o la impedancia, parámetros de carácter direccional, como pueden ser el diagrama de radiación o la directividad. Este proyecto se centrará en los parámetros de dispersión o parámetros S.

2.1.2.1 Parámetros de dispersión (Parámetros S)

Los circuitos de microondas se pueden caracterizar como una red de dos puertos, donde uno de ellos es el puerto físico de la entrada (típicamente de valor de 50Ω) y el otro un puerto físico de radiación.

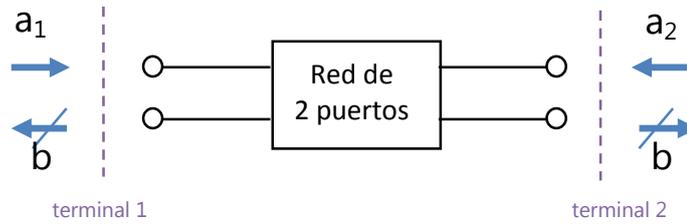


Figura 2.1: Esquema de Red de dos puertos

Pueden caracterizarse mediante matrices de impedancia [Z] o matrices de admitancia [Y]. Estos parámetros relacionan las tensiones y las corrientes de ambos puertos. Para poder calcularlas se deben considerar los puertos abiertos o cortocircuitados. Esto es difícil de conseguir a altas frecuencias.

Debido a esto se suele utilizar la matriz de parámetros S, que no dependen de la frecuencia de trabajo. Los parámetros S se basan en los niveles de potencia percibidos en ambos terminales según las ondas incidentes (a_i) y reflejadas (b_i) normalizadas.

Como se refleja en la Figura [2.1], las ondas incidentes son las entrantes a la red, y las ondas reflejadas son las salientes de la red. Están definidas de la siguiente forma:

$$a_k = \frac{v_k + i_k Z_{ok}}{\sqrt{8Z_{ok}}} \quad (2.1)$$

$$b_k = \frac{v_k - i_k Z_{ok}}{\sqrt{8Z_{ok}}} \quad (2.2)$$

donde v_k es la tensión en la puerta k , i_k la corriente entrante al circuito en la puerta k , y Z_{ok} la impedancia de referencia de la puerta k .

En el caso de este tipo de redes de parámetros S, las ecuaciones que lo definen son:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

de donde podemos deducir que:

$$S_{ij} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_k=0, k \neq i} \quad (2.4)$$

Para hacer que las ondas incidentes $a_k = 0$, $k \neq i$ sean nulas, hay que cargar cada una de las puertas con su impedancia característica Z_{ok} .

Hecha esta suposición, se puede asociar un significado físico a los parámetros S:

$$|S_{ii}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } i}{\text{Potencia disponible del generador en la puerta } i}$$

$$|S_{ji}|^2 = \frac{\text{Potencia reflejada en la puerta } j}{\text{Potencia disponible del generador en la puerta } i}, i \neq j$$

De esta forma se denomina coeficiente de reflexión a los S_{ii} y los coeficientes de transmisión a los S_{ji} . Estos dos parámetros están directamente relacionados con las pérdidas de retorno y las pérdidas de inserción, respectivamente.

Se debe tener presente, de igual forma, que el tener máxima transferencia de potencia no significa que no exista onda reflejada en el circuito. De la misma forma el tener reflexión nula no supone tener adaptación de impedancias.

2.1.3 Tipos de antenas

Se pueden clasificar las antenas en tres grandes grupos:

- Antenas lineales: su estructura es un hilo de material conductor. Según cómo esté dispuesta esta estructura de hilo se obtienen antenas de dipolo, de lazo circular o cuadrado, de hélice, entre otras.
- Antenas impresas: están basadas en la tecnología de sustrato impreso. Dentro de este grupo se encuentran los parches, un polígono de cobre dispuesto encima de un sustrato dieléctrico.
- Antenas de apertura: la radiación de este tipo de antenas se produce a través de una ranura o embocadura. Este grupo se puede subdividir en dos categorías:
 - Aperturas delimitadas por paredes metálicas: ranuras, guía de onda y bocinas.
 - Aperturas definidas como una superficie plana donde se analiza el campo colimado por la antena: reflectores y lentes.

Estas antenas pueden combinarse formando un grupo o array de antenas. De esta forma se puede obtener más control sobre diagramas de radiación, apuntamiento o fase. Para poder realizar dicho array es necesario crear una estructura llamada red de alimentación que permita precisamente alimentar nuestro array. Esta red de alimentación debe estar perfectamente diseñada para poder cumplir las especificaciones deseadas en el array de antenas.

2.2 Teoría de Guías de onda

Una guía de onda es un elemento físico que propaga ondas electromagnéticas. Está formada por un único conductor cerrado metálico con un dieléctrico en su interior, usualmente aire.

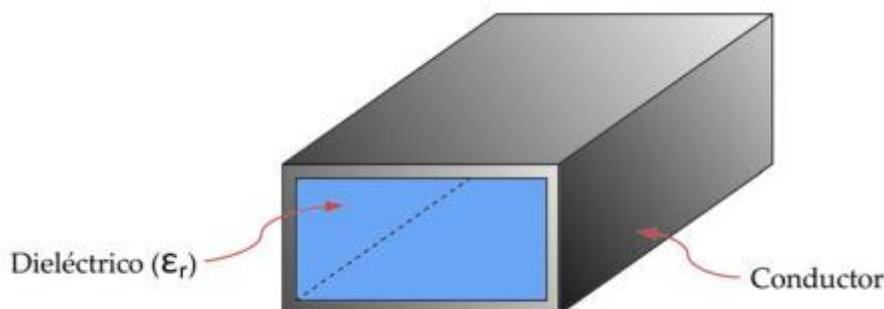


Figura 2.2: Guía de onda rectangular.

Este tipo de antenas, debido a su estructura, reduce la disipación de energía, lo que las hace apropiadas para aplicaciones en altas frecuencias y, en concreto, para el rango de las microondas.

Una guía de onda es un elemento físico que se encarga de la propagación de una onda mediante el confinamiento de esta dentro ella. La transmisión de señales por guías de onda reduce la disipación de energía, lo que las hace apropiadas para aplicaciones en altas frecuencias y, en concreto, para el rango de las microondas.

2.2.1 Modos de propagación

Existen diferentes modos por los que una onda electromagnética puede propagarse a través de un medio de transmisión como una guía de onda. Las ecuaciones de Maxwell en forma fasorial se pueden escribir como:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.5) \qquad \nabla \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.7) \qquad \nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.8)$$

donde: ω es la frecuencia; μ la permeabilidad magnética real, que se puede descomponer en $\mu = \mu_0 \mu_r$, donde μ_0 es la permeabilidad en el vacío y μ_r la permeabilidad relativa al medio; y ε la permitividad o constante dieléctrica real, que se puede descomponer como $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, donde ε_0 es la permitividad en el vacío y ε_r la permitividad relativa del medio.

En este punto se tienen dos ecuaciones, (2.5) y (2.6), y dos incógnitas, \vec{E} y \vec{H} . Por consiguiente se pueden resolver las ecuaciones tanto para \vec{E} como para \vec{H} . De esta solución del sistema se extrae lo que se conoce como la ecuación de ondas o ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.9) \qquad \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (2.10)$$

donde $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$ es la constante de propagación.

Cada solución de las ecuaciones de onda (2.9) y (2.10) en una línea de transmisión se denomina modo de propagación.

Una onda electromagnética que se propaga por una línea puede generar distintos modos simultáneamente.

Se llama componente transversal de un campo a la componente del mismo perpendicular a la dirección de propagación (E_x, E_y, H_x y H_y en una guía de onda). Así mismo se llama componente longitudinal a la componente contenida en la dirección de propagación de la onda (E_z y H_z).

Los modos se clasifican según las componentes vectoriales de los campos eléctrico y magnético, de tal forma que aparecen cuatro tipos:

- Modos Transversales Eléctricos (TE): no contienen ninguna componente longitudinal eléctrica ($E_z = 0, H_z \neq 0$)
- Modos Transversales Magnéticos (TM): no contienen ninguna componente longitudinal magnética ($E_z \neq 0, H_z = 0$)

- Modos Transversales Electromagnéticos (TEM): no tiene ninguna componente longitudinal ($E_z = 0, H_z = 0$). Este tipo aparece cuando la línea de transmisión tiene dos conductores diferenciados.
- Modos híbridos: tienen tanto componente longitudinal tanto eléctrica como magnética ($E_z \neq 0, H_z \neq 0$). Estos modos se dan en fibras ópticas.

En una guía de onda, al haber en un principio un único conductor cerrado, se dan los modos TE y TM.

Un modo se propagará por la guía si su frecuencia de corte f_c es mayor que la frecuencia de operación de la guía f_o . Los modos con frecuencias de corte superiores llamados evanescentes se atenúan tan velozmente que se puede considerar que no se propagan dentro de la guía. De tal forma se llama modo fundamental al primer modo que se propaga por la guía de onda, es decir, el modo con menor frecuencia de corte. El primer modo superior es aquel siguiente que no se propaga por la misma.

Dependiendo del rango de frecuencias en el que trabaje la guía de onda se obtiene guía monomodo (solo se propaga un único modo, el fundamental) o guía multimodo (se propagan varios modos). De acuerdo a esto, se define el ancho de banda monomodo de una guía de onda ($BW_{monomodo}$) como el rango de frecuencias en el que solo se propaga el modo fundamental.

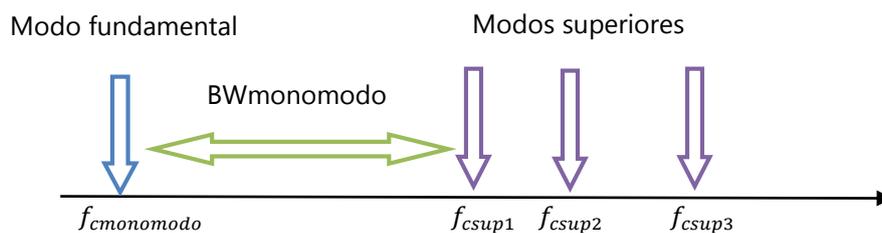


Figura 2.3: Ancho de banda monomodo en una guía

Este Trabajo de Fin de Grado se centrará en el modo fundamental de una guía de onda rectangular TE_{10} para el caso de guía sin línea de acoplo, y un modo híbrido para el caso de línea de acoplo, ya que el uso de dieléctrico dentro de la estructura provoca este modo híbrido.

2.2.2 Guía de onda rectangular

Existen dos tipos fundamentales de guías de onda, rectangular y circular. Este proyecto ha sido desarrollado sobre guía rectangular.

En este tipo de guías, el lado mayor del conductor se denomina a y el lado menor del mismo b , donde se asume que $a > b$.

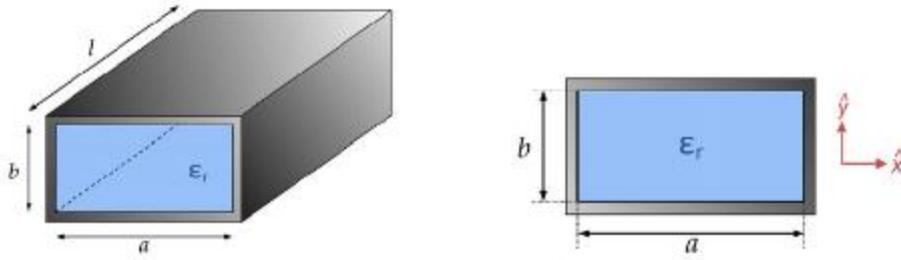


Figura 2.4: Guía de onda rectangular

En este tipo de guías se propagan los modos TE_{mn} y TM_{mn} , donde los índices m, n corresponden a la identificación del modo. Las frecuencias de corte de estos modos se calculan siguiendo la siguiente ecuación:

$$f_{cmn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.11)$$

con $c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$, donde c_0 es la velocidad de luz en el vacío y c la velocidad en el medio.

La longitud de la guía de onda para cada modo se calcula:

$$\lambda_{mn} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{cmn}}{f_0}\right)^2}} \quad (2.12) \quad \text{donde } \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

2.2.3 Alimentación en guía de onda

La forma más común de alimentar una guía de onda es alimentándola a través de un coaxial que se inserta en el interior de la guía por una de sus caras. El conductor exterior se une al conductor de la guía, constituyendo el plano de masa del coaxial. El conductor interior o alma del conector se introduce en el interior de la guía alimentándola a modo de antena monopolo.



Figura 2.5: conector coaxial

Hay que tener en cuenta los factores de la longitud del alma del conector y su posición dentro de la guía, ya que pueden afectar al nivel de máxima adaptación a la frecuencia de trabajo y la máxima transferencia de potencia entre ambas líneas de transmisión.

La longitud del alma debe ser de $\lambda_0/4$ para que actúe como un monopolo. Sin embargo, al estar dentro de la guía, el alma radiará a la longitud de onda de la guía λ_g . Por otra parte, el alma debe conectarse a una distancia de $\lambda_g/4$ del principio de la guía de onda, de tal forma que la onda

producida por el monopolo hacia atrás llegue a la pared inicial con amplitud cero y así se refleje totalmente. El valor de reflexión es $\rho = -1$ que implica un desfase de 180 grados o $\lambda_g/2$. Así, la onda propagada sufre un desfase de $\lambda_g/4$ en la ida, un desfase de $\lambda_g/2$ al reflejarse y por último otro desfase de $\lambda_g/4$ de vuelta hasta el alma del conector. Sumando todos estos desfases obtenemos una longitud de onda completa λ_g .

2.3 Teoría Microstrip

La línea microstrip es un tipo de línea de transmisión fabricada en tecnología impresa que se utiliza para transmitir señales de microondas. Está constituida por una fina lámina (strip) de material conductor de espesor t y anchura W , que es separada del plano de masa por una fina capa de material dieléctrico de altura h y constante dieléctrica ϵ_r .

Esta tecnología tiene tanto ventajas como inconvenientes:

- Ventajas: puede ser fabricado utilizando placas y maquinaria de circuitos impresos o PCBs. Es más barato, ligero y compacto que la tecnología tradicional de guía de onda.
- Inconvenientes: tiene baja capacidad de manejo de energía y mayores pérdidas que la guía de onda. Además, por no estar cerrada es susceptible de captar más ruido.

En este tipo de líneas tenemos dos elementos diferenciados: la línea superior y el plano de masa. Los campos se generan tanto en el sustrato, donde se concentra la mayor parte, como en el aire. Por esto se dice que el modo propagado por las líneas microstrip no es puramente TEM, sino un quasi-TEM.

2.3.1 Parches

Este tipo de antenas se construyen con tecnología de sustrato impreso, como es el caso de la microstrip. Las formas más comunes para los parches son rectangulares o circulares. El modo de alimentar los parches suele ser por línea de transmisión microstrip o por sonda coaxial, aunque también puede usarse alimentación a través de líneas por proximidad o con una ranura intermedia entre la línea y el parche.

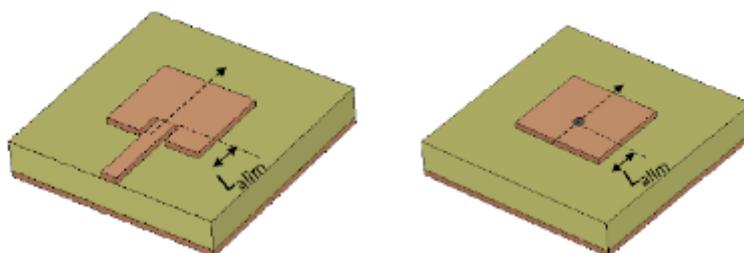


Figura 2.6: Alimentación de parche rectangular mediante microstrip (izquierda) o coaxial (derecha)

Como se ha comentado en el apartado anterior, su coste es menor pero su ancho de banda es bastante pequeño con un nivel de potencia limitado. Para poder mejorar el ancho de banda se

utilizan técnicas como la de parche apilado, que consiste en utilizar varios parches a frecuencias de resonancia muy cercanas para aumentar el ancho de banda de la antena total.

2.3.2 Alimentación microstrip

La línea microstrip se alimenta a través de coaxiales, ya sea de forma horizontal o vertical.

- Sonda coaxial horizontal: se conecta el conductor exterior del coaxial al plano de masa y el alma sobre la línea de microstrip. Este tipo de conexión puede causar problemas en alta frecuencia debido a que el alma está desprotegida y se pueden producir pérdidas de radiación hacia el exterior.
- Sonda coaxial vertical: el conductor exterior se une al plano de masa y el alma pasa a través del sustrato hasta la pista. Usando la posición del conector respecto al final de la pista podemos controlar la adaptación.



Figura 2.7: Alimentación por sonda coaxial vertical (izquierda) y horizontal (derecha)

2.4 Iris en guía de onda

Un iris es una variación de una de las dimensiones de la guía en un segmento de la misma. Un iris que reduzca el ancho de una guía de onda rectangular es equivalente a añadir una inductancia que modifique la impedancia vista a lo largo de la guía. También existen otros iris que modifican el circuito equivalente de la siguiente forma:

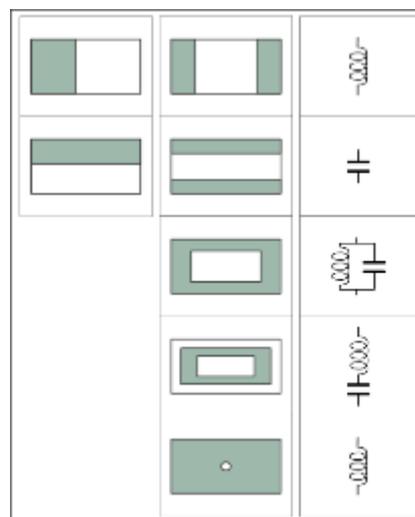


Figura 2.8: Iris en guía de onda

Los valores de las inductancias y capacitancias que introducen los iris son directamente proporcionales al tamaño de los mismos. El distinto comportamiento de un iris en una u otra dimensión es debido a que unos se oponen al paso del campo eléctrico y los otros al del magnético. Hay que prestar especial atención al usar estas estructuras ya que al concentrar el campo eléctrico y/o magnético, la potencia que se puede transportar por la guía sin llegar a una situación de ruptura es menor que en una guía normal.

Gracias a la introducción de estos elementos dentro de la guía de onda puede conseguirse una modificación de las impedancias que se ven desde los distintos puntos de la misma y por lo tanto mejorar la adaptación. Otra función de los iris es la realización de filtros en guía de onda, ya que si se conocen sus circuitos equivalentes pueden diseñarse redes LC con valores determinados. También puede favorecerse la propagación de unos modos frente a otros utilizando determinadas geometrías.

En la realización de este Trabajo de Fin de Grado se buscará mejorar la adaptación y el acoplo de un elemento unitario basado en guía de onda rectangular mediante el uso de tornillos de sintonía, que serán estructuras con un efecto presuntamente similar al de los iris a la hora de modificar las impedancias y las frecuencias de resonancia del elemento radiante.

3. CARACTERIZACIÓN DEL ELEMENTO UNITARIO

3.1 Introducción

La Idea de este Trabajo de fin de Grado surge a raíz del proyecto de Pablo Sánchez Olivares [1] donde se presenta un array lineal de ranuras radiantes mediante guía de onda en SIW en el que, como peculiaridad, se introdujeron una serie de vías metálicas que permiten mejorar las características de adaptación cortocircuitando la cara superior e inferior de la guía de onda cerca de los elementos radiantes. Basándose en esta teoría, se realizó un estudio para comprobar que el efecto capacitivo que introducen estas vías (denominadas vías de sintonía) compensan los efectos inductivos de los elementos radiantes.

Sin embargo, estas vías de sintonía o irises comentados en el [2.4] son elementos fijos unidos a la estructura y al sustrato, por lo que no introducen una variabilidad dinámica en el comportamiento de los elementos radiantes.

De esta forma, se presenta en este documento una idea que sí permite introducir componentes sintonizables sobre el elemento radiante. Estos serán tornillos convencionales. Los tornillos son ampliamente utilizados en filtros de microondas para realizar la sintonización de los canales de banda estrecha y como método para compensar los errores en fabricación. Sin embargo, en el estado de arte actual no existe constancia de aplicación de este concepto a las antenas.

Este proyecto se basará en el estudio del comportamiento de los tornillos de sintonía que permita modificar las características de adaptación y radiación. El Proyecto de Fin de Carrera realizado por Javier Hernández Ortega [3] presenta un array lineal en guía de onda rectangular con ranuras radiantes que implementa estos tornillos de sintonía dispuestos verticalmente. En este trabajo se realizará un estudio similar pero con un elemento radiante diferente, en este caso, un doble parche apilado, desarrollado por Sergio Casas Olmedo [2]. Dicho elemento radiante que está unido a un coaxial, se alimenta por guía de onda rectangular y contará, como novedad, con tornillos de sintonía verticales.

Este Trabajo de fin de Grado se centra en la banda de frecuencia de 11 a 12 GHz (banda X), siendo su frecuencia central de 11,5 GHz y con polarización lineal.

3.2 Elemento unitario previo

En este TFG se ha querido comprobar el efecto del concepto de los tornillos de sintonía, que tan buenos resultados proporcionó sobre los elementos tipo ranura [3] sobre un elemento unitario formado por doble parche apilado y una estructura de alimentación tipo guía de onda rectangular con acoplo coaxial. Este elemento ha sido ampliamente utilizado en el departamento RFCAS y fue introducido en el PFC de Sergio Casas Olmedo [2]. En su proyecto, se partía de un elemento unitario de dimensiones de guía de onda $a=18.25\text{mm}$ y $b=6.6\text{mm}$ apreciables en la Figura 3.1, además de una capa de sustrato de TLX-90 de 1.575mm de anchura y $\epsilon_r=2,5$ situado en la parte superior de la guía. Además se añade una sonda coaxial en la parte superior de la guía que consiste en una vía que se introduce dentro de la guía de onda para permitir acoplar señal de forma vertical fuera de la guía de onda de alimentación.

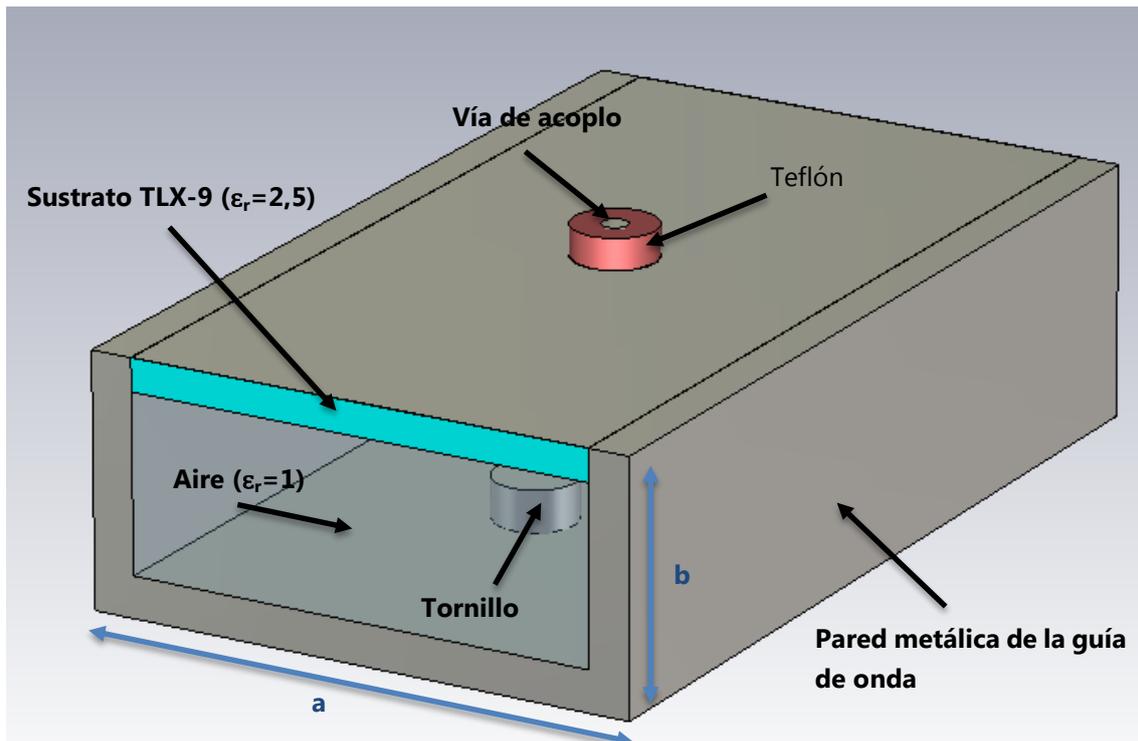


Figura 3.1: Estructura del elemento unitario previo

En el caso de este Trabajo de Fin de Grado se ha decidido trabajar finalmente con las dimensiones de una WR90 debido a que el laboratorio RFCAS posee el kit de calibración de guía de onda para WR90, entre otras razones que se procederá a explicar en puntos posteriores de este documento. Las dimensiones de una WR-90 son de $a = 22,86\text{mm}$ y $b = 10,16\text{mm}$, siendo a la anchura y b la altura respectivamente.

Finalmente en la parte superior, unido al coaxial, se colocará un elemento radiante, en este caso un parche apilado.

La estructura final del elemento radiante completo (Figura 3.2) quedaría formado, por tanto, por los siguientes elementos:

- Una estructura de alimentación. En este caso, guía de onda rectangular. Sobre la pared metálica superior de la guía se hace una abertura por la que se introduce un coaxial dentro de la guía. En función de la penetración del conductor interior del coaxial dentro de la guía (como se describirá en el capítulo 4) o de las dimensiones de la línea de acoplo (como se comentará en el capítulo 5), se acopla mayor cantidad de señal a través del coaxial hacia el exterior de la guía.
- Elemento radiante. Formado por un doble parche apilado. El parche inferior se alimenta mediante la sonda coaxial vertical introducida dentro de la guía y el parche superior actúa como parásito para aumentar el ancho de banda de la estructura.

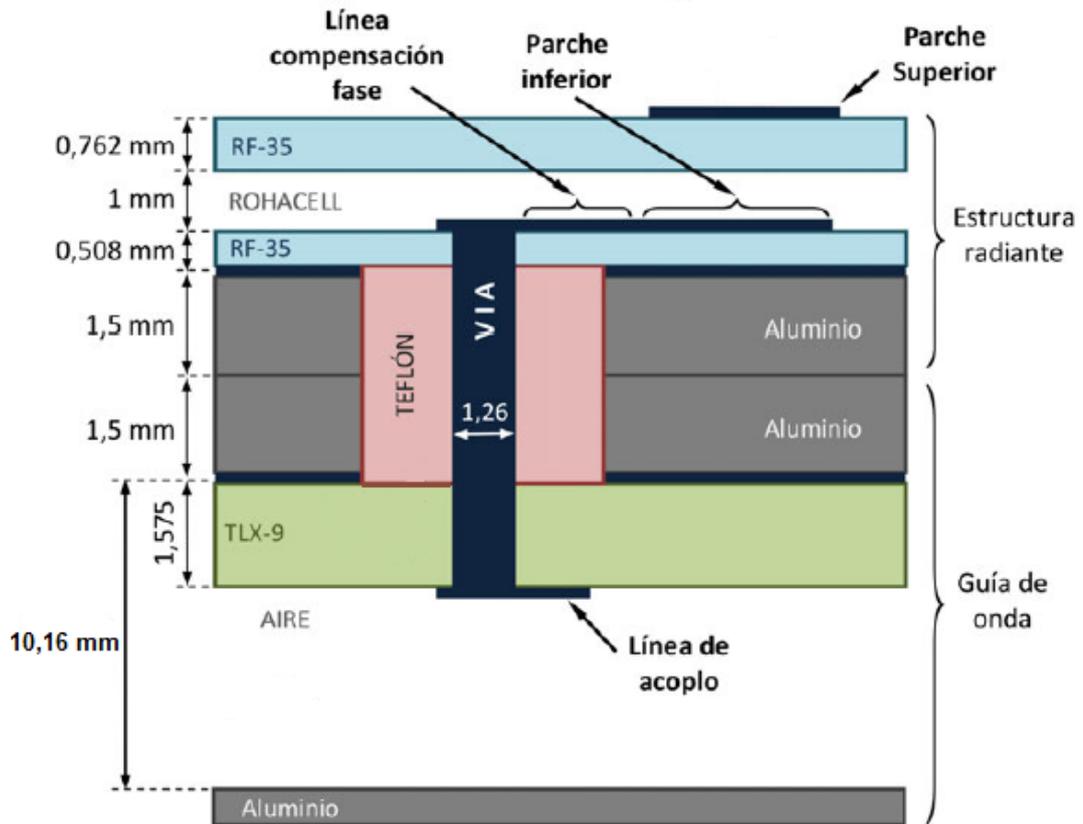


Figura 3.2: Estructura final del elemento radiante completo

Cabe mencionar que existen dos diferencias fundamentales entre los elementos radiantes tipo ranura y los elementos tipo parche.

1. Las ranuras son de más bajo perfil que los parches, es decir, que ocupan menos espacio desde esa perspectiva, ya que se integran directamente sobre la cara superior de la guía de onda de alimentación.
2. Los parches son mucho más versátiles que las ranuras ya que, al no estar integrados sobre la propia guía de alimentación, tanto la estructura de alimentación (guía con sonda coaxial) como la estructura radiante (doble parche apilado con sonda coaxial) se pueden diseñar de manera independiente.

Debido a esta independencia sólo se va a estudiar la estructura de alimentación. En el elemento unitario utilizado en este TFG basta con modificar el coeficiente de acoplo de señal que recoge la estructura de alimentación para modificar la cantidad de señal radiada por el parche. Una vez queda diseñada la configuración de guía de onda de alimentación con acoplo por sonda coaxial vertical con los tornillos de sintonía sólo sería necesario conectarla a la estructura de parches presentada en el PFC de Sergio Casas Olmedo [2] para conseguir el elemento radiante completo descrito anteriormente.

3.3 Modelo de análisis de tres puertos

En la estructura de diseño unitario se han colocado tres puertos, dos a la entrada (puerto 1) y a la salida de la guía (puerto 2) y uno en la vía de acoplo (puerto 3). En el caso de este diseño, el puerto 3 será el que de la información sobre la cantidad de señal acoplada hacia el elemento radiante superior. De esta forma se puede caracterizar independientemente cada elemento en un posible trabajo futuro de diseño de un array.

Debido al uso de estos tres puertos, es posible calcular el valor del parámetro de adaptación ($S_{1,1}$), el parámetro de reflexión ($S_{2,1}$) y el parámetro de acoplo ($S_{3,1}$).

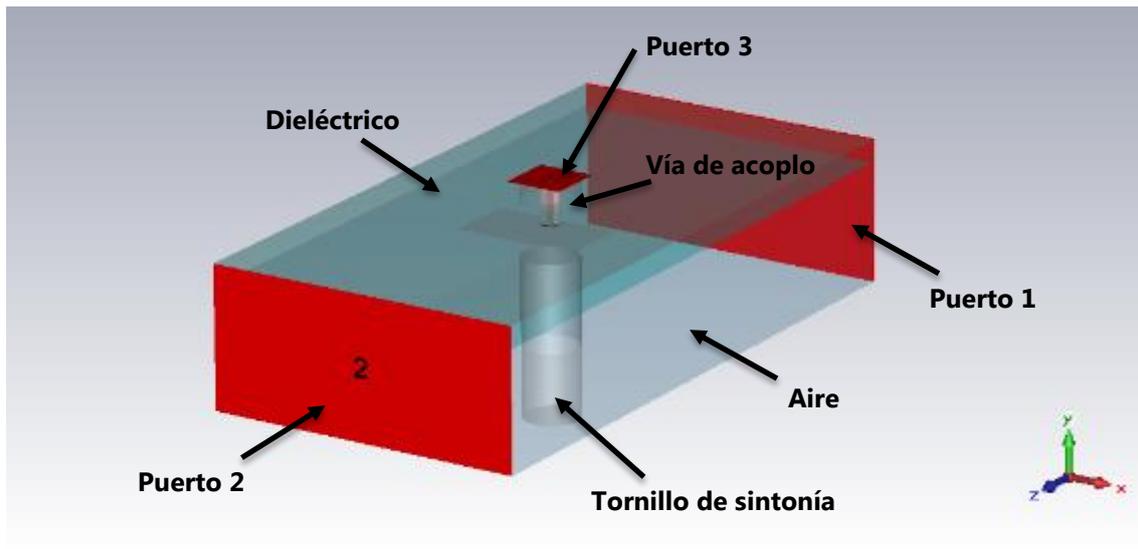


Figura 3.3: Estructura de elemento unitario con tres puertos

A continuación se procederá estudiar los efectos provocados por la introducción de tornillos en dos tipos de prototipos: uno de guía de onda relleno de aire y otro de guía de onda relleno parcialmente de dieléctrico para estudiar los efectos provocados por la introducción de los mismos dentro de la estructura presentada.

4. GUÍA RELLENA DE AIRE

4.1 Introducción

En esta sección se presenta una guía de onda WR-90 rellena únicamente de aire, por lo que sólo se propagará el modo fundamental. En esta estructura se introducirá desde la parte superior una vía fija cubierta por teflón en la parte superior que permitirá aumentar o disminuir el acoplo en el elemento de forma estática, y unos tornillos de sintonía de medida M4 (es decir, 4mm de diámetro) inferiores que permitirán modificar las características de adaptación y acoplamiento de forma dinámica en el elemento unitario, tal y como se comentó en el apartado [3]. Finalmente se coloca una tapa metálica de muy poco grosor para que simule la pared superior de la guía de onda y así poder analizar de una forma un poco más precisa el efecto de la vía y el teflón sobre la guía. En la siguiente imagen se puede apreciar cómo resulta la estructura completa, en la cual la vía de acoplo penetra dentro de la guía:

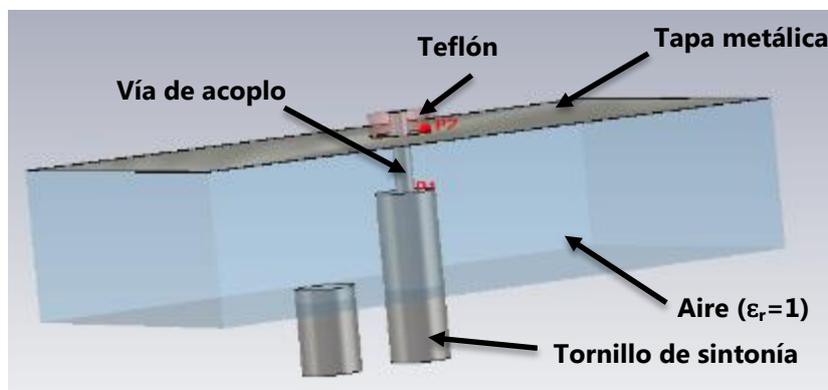


Figura 4.1: Estructura del elemento unitario sin sustrato

4.2 Carta de Modos

Tras los resultados del estudio inicial, como se ha comentado en el apartado [3], se decidió pasar a una WR-90. Las dimensiones de esta guía son $a=22.86\text{mm}$ y $b=10.16\text{mm}$, siendo a el ancho de la guía y b la altura Figura 4.3.

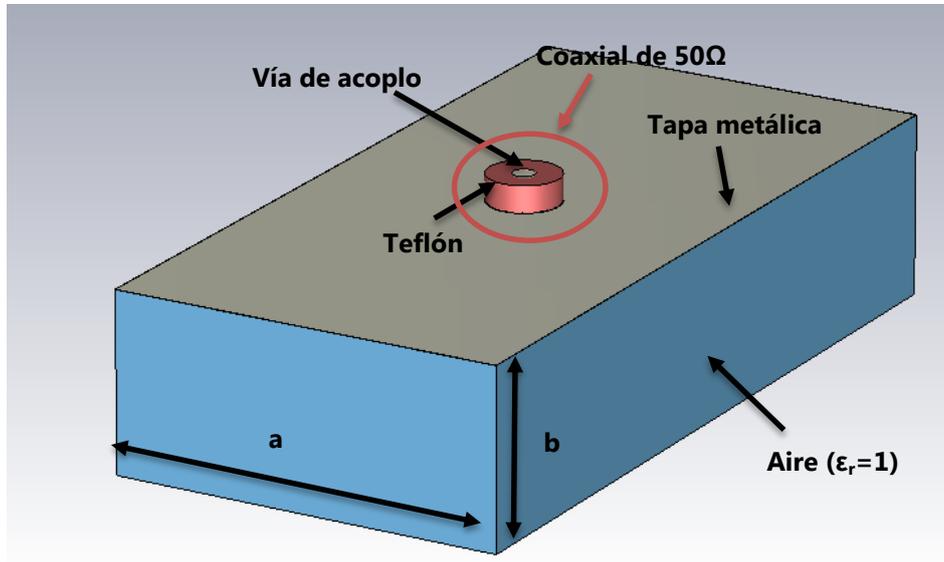


Figura 4.2: Estructura de la guía WR-90 rellena de aire

Considerando que la guía está rellena únicamente de aire, aplicando la fórmula (3.1) se obtiene una frecuencia de modo fundamental TE_{10} de **6.557 GHz**, quedando la carta de modos de la siguiente manera:

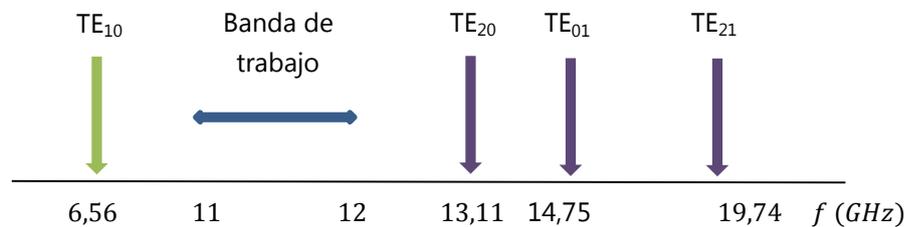


Figura 4.3: Carta de modos monomodo para la WR-90 con $\epsilon_r=1$

Como se puede ver, los modos superiores quedan separados de la banda de trabajo más de 1GHz, siendo la banda de trabajo entre 11 y 12 GHz (banda X) en polarización lineal.

4.3 Posición de los tornillos

Una vez habiendo introducido la estructura a utilizar y el procedimiento para el estudio de los tornillos de sintonía se procederá a estudiar más en profundidad este elemento unitario.

En este apartado se utilizó una vía de acoplo de 3,86mm de longitud y 1,26mm de diámetro. La longitud de 3,86 mm fue elegida para que la posición máxima final del tornillo dentro de la guía coincidiese con el final de vía de acoplo, creando así un cortocircuito. Al no tener dieléctrico, el modo propagado es el TE_{10} con frecuencia de corte 6,557 GHz.

Para la búsqueda de la posición óptima de los tornillos se realizó un estudio en el cual la variable z , que coincide con la dirección de propagación de la sección, se iba desplazando desde el puerto 2 hacia el puerto 1, para así poder estudiar el efecto que producían los tornillos dentro de la estructura. La posición de los tornillos se modificó desde 7mm a -7mm en intervalos de 1mm, siendo el esquema:

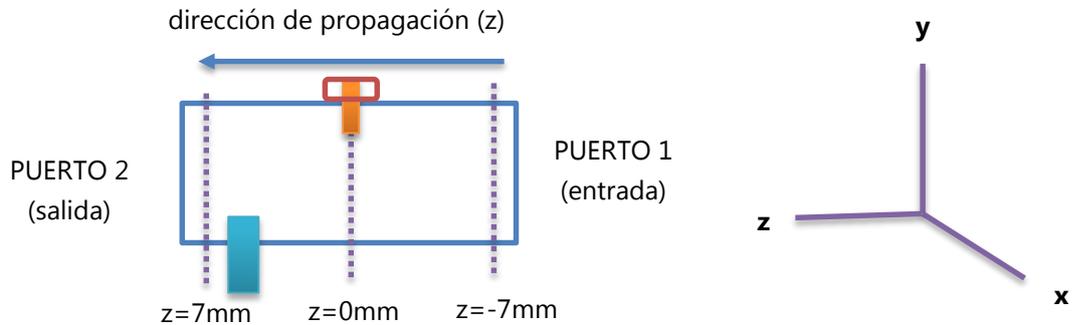


Figura 4.4: Estructura del estudio de posición de los tornillos dentro de la guía y ejes

Después de estudiar los valores nominales de cada caso y, habiendo escogido este último, se buscó la posición óptima de los tornillos que pudieran dar mayor rango de acoplo.

En este caso, se decidió que los tornillos que mejor interactuaban entre ellos fueron los de las posiciones extremas (7mm, -7mm) y la posición central (0mm) justo debajo de la vía. Sabiendo que el parámetro $S_{1,1}$ da el valor de la adaptación dentro de la guía mientras que se introduce el tornillo y que el parámetro $S_{3,1}$ refleja el valor de señal acoplado. Se pueden los siguientes resultados para cada posición de tornillo:

- $Z=7\text{mm}$ (tornillo de salida)

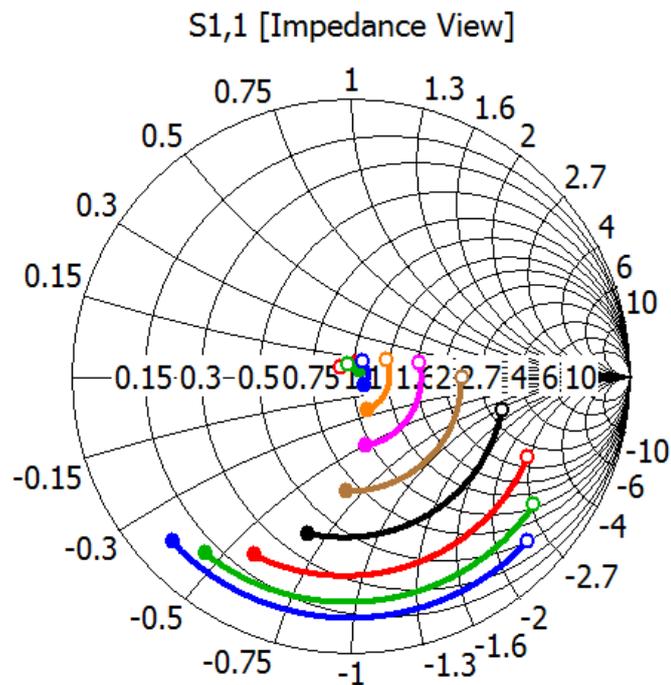


Figura 4.5: Movimiento en Carta del tornillo para la posición $z=7\text{mm}$

En este caso se puede apreciar que, conforme se va introduciendo el tornillo, la impedancia se modifica hacia valores de impedancia imaginaria menores. Es decir, la impedancia de entrada del conjunto adquiere un comportamiento capacitivo. Esto provoca un pequeño reajuste de la adaptación del elemento en banda. Cuando el tornillo alcanza una posición extremo (ya que el tornillo utilizado terminará estando al mismo nivel que la vía introducida) la desadaptación es muy acusada.

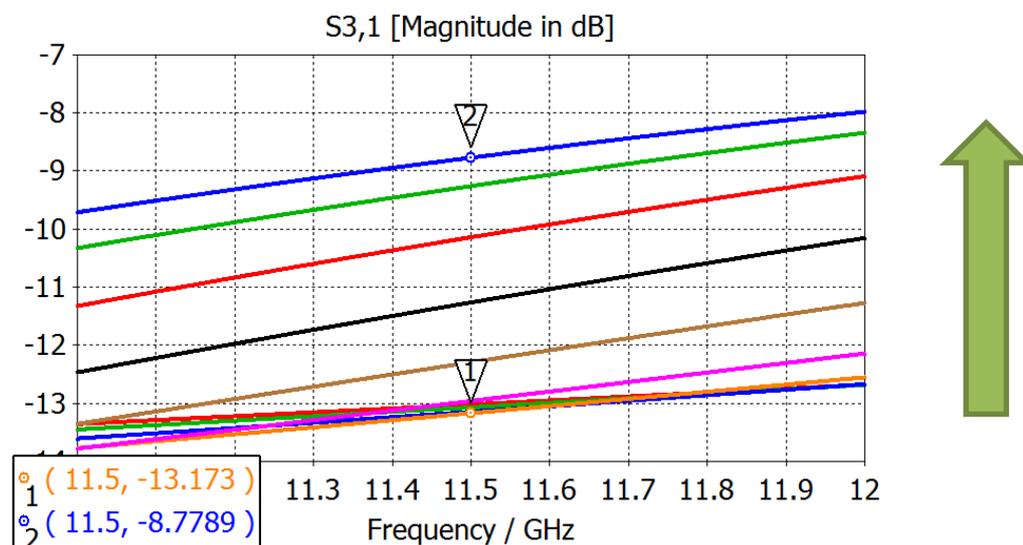


Figura 4.6: Rango de acoplo del tornillo para la posición $z=7\text{mm}$

En este caso en el que el tornillo se sitúa cerca del puerto de salida de la estructura se puede apreciar que el acoplo según se va introduciendo el tornillo dentro de la estructura va variando hacia valores mayores de acoplo. Sin embargo, la fuerte desadaptación introducida por el tornillo hace necesario encontrar una posición que compense la desadaptación sin modificar el acoplo. En el caso de esta vía de acoplo, el valor nominal conseguido es de $-7,03\text{dB}$.

- $Z=0\text{mm}$ (tornillo central)

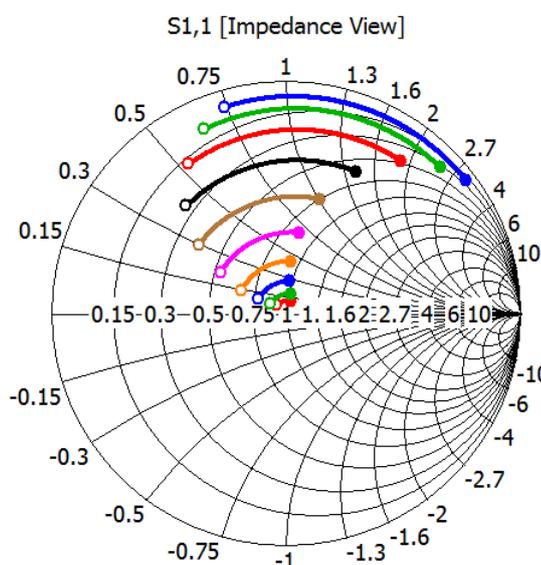


Figura 4.7: Movimiento en Carta del tornillo para la posición $z=0\text{mm}$

En este caso del tornillo central podemos apreciar que el movimiento que realiza el tornillo conforme se va introduciendo dentro de la guía es que el valor de la impedancia se modifica hacia valores de impedancia en parte imaginaria mayores por lo que, al contrario que en el caso anterior, este tornillo central introduce un comportamiento inductivo sobre la impedancia de entrada de la estructura. Esto provoca un reajuste de la adaptación en el elemento en banda. En este caso se consigue un movimiento de carácter inductivo, lo cual tiende a compensar el movimiento capacitivo de los tornillos en los extremos.

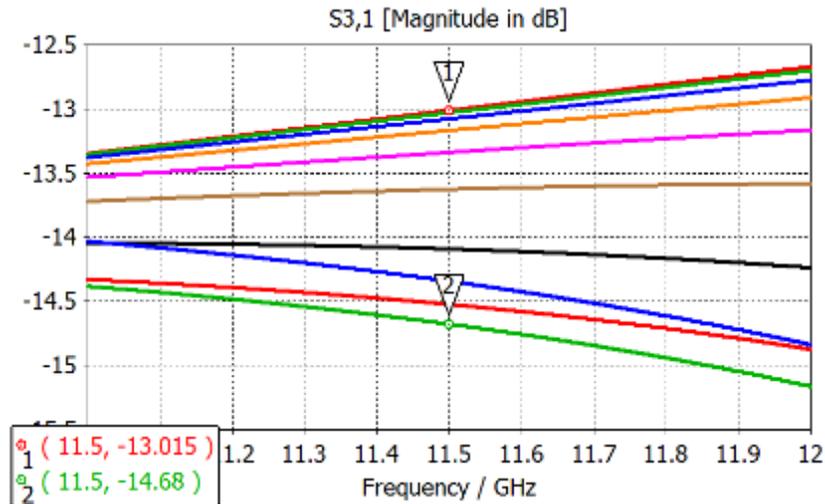


Figura 4.8: Rango de acoplo del tornillo para la posición z=0mm

En el caso del tornillo central se puede apreciar que el valor del acoplo apenas varía, en contraposición a los tornillos en los extremos en los cuales el valor del acoplo sí varía. Por lo tanto, este tornillo podría ser utilizado para compensar la desadaptación generada por el tornillo cercano al puerto de salida sin afectar al nuevo nivel de acoplo sintonizado por el mismo.

- Z=-7mm (tornillo de entrada)

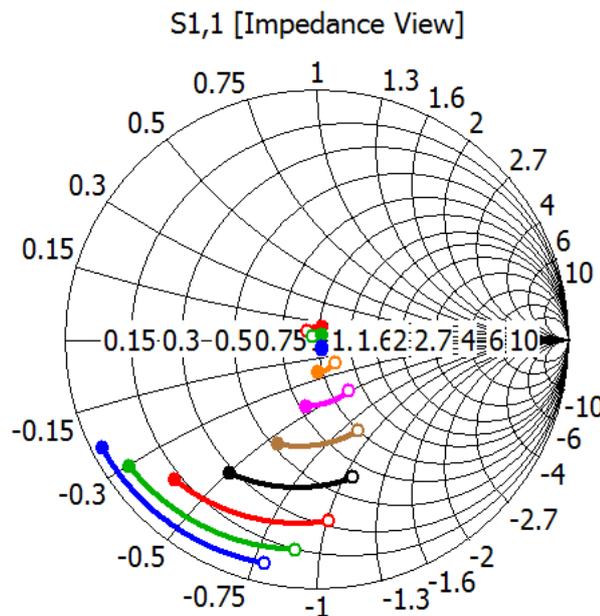


Figura 4.9: Movimiento en Carta del tornillo para la posición z=-7mm

Igual que en el caso para $z=7\text{mm}$, aparece un movimiento hacia impedancias imaginarias menores conforme se introduce el tornillo dentro de la guía. Esto provoca, de nuevo, un movimiento capacitivo similar que en el caso $z=7\text{mm}$ que puede ser compensado con el movimiento inductivo que realiza el tornillo central.

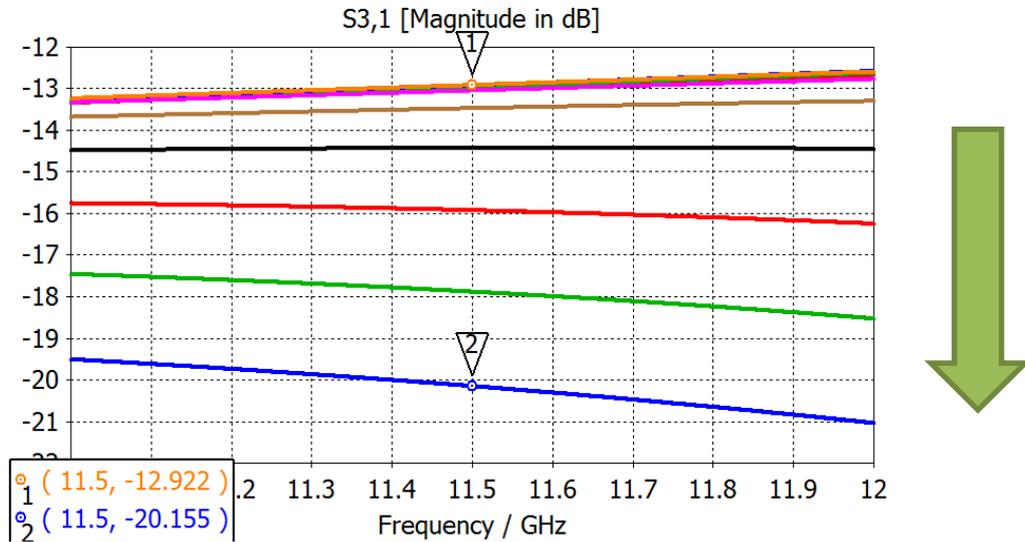


Figura 4.10: Rango de acoplo del tornillo para la posición $z=-7\text{mm}$

Como se puede apreciar en este caso también se produce un comportamiento similar al del tornillo en la otra posición extrema ($z=7\text{mm}$), aunque en este caso el valor del acoplo tiende a disminuir en contraposición a su posición totalmente opuesta, en la cual se tiende a aumentar dicho valor de acoplo.

A parte del estudio de la adaptación y el acoplo se observó que en el caso del parámetro de reflexión se producía, para todos los tornillos, un gran desfase. Tanto para los tornillos de entrada y salida (naranja) como para el tornillo central (azul), para posiciones de longitud de tornillo dentro de la guía menores aparece fase negativa, y para longitudes mayores dentro de la guía la fase es positiva en la frecuencia central (11GHz). En la siguiente gráfica se puede apreciar el efecto para todos los tornillos:

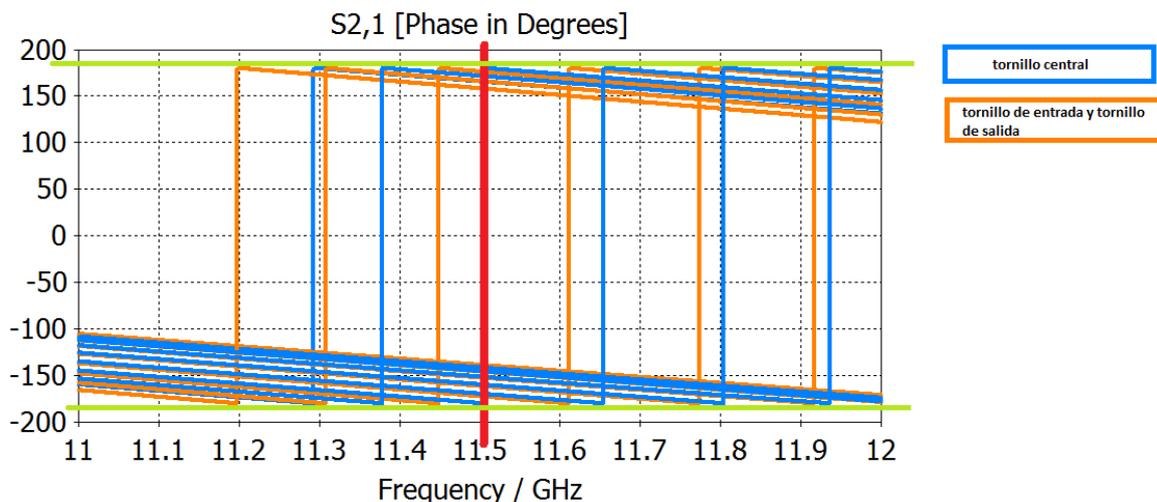


Figura 4.11: Desfase de todos los tornillos para guía rellena de aire

Una vez realizado el estudio del efecto de los tornillos de forma individual y como uno podría compensar el efecto de otro se procedió a un estudio más exhaustivo de estos tornillos y la combinación entre ellos para los distintos tamaños de vías. La comparativa se realizó entre el tornillo central y el tornillo de entrada, y el tornillo central y el tornillo de salida.

Para ilustrar cada uno de los casos de comparativa nombrados anteriormente, se escogió una posición fija para los tornillos de entrada y de salida (en este caso, 1.4mm de longitud de penetración del tornillo dentro de la guía) y se varió la posición del tornillo central.

- Tornillo de salida a 2.8mm y tornillo central variable

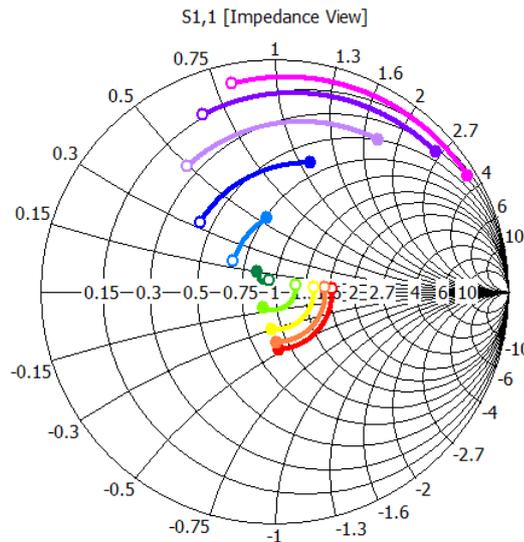


Figura 4:12: Movimiento en carta que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo

Como se puede ver el efecto producido por el tornillo central provoca un movimiento en carta hacia impedancias imaginarias mayores a partir de cierta posición de introducción del tornillo (en este caso el giro cambia para la posición 2.8mm), tal y como marcaba el tornillo central en solitario.

Como se observa en la siguiente figura, conforme se introduce el tornillo el valor de adaptación disminuye hasta estar completamente desadaptado.

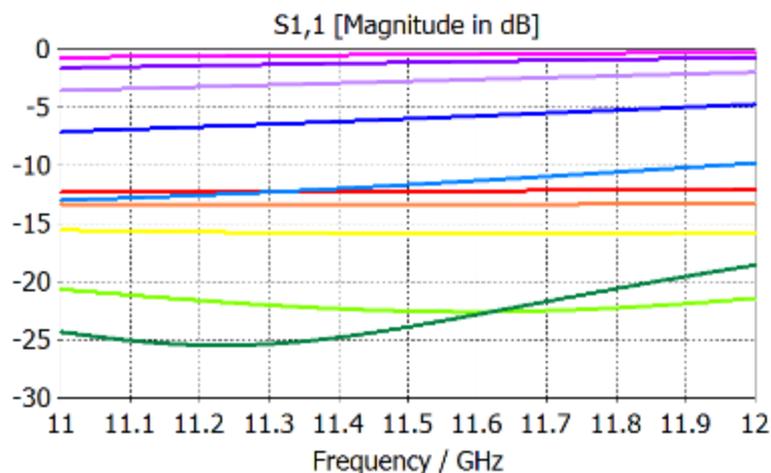


Figura 4:13: Valores de adaptación que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo

Como se puede ver en la siguiente imagen, el acoplo sube para valores de longitud de penetración menores (hasta 4.2mm). A partir de esta posición los valores de acoplo disminuyen ya que la estructura está demasiado desadaptada.

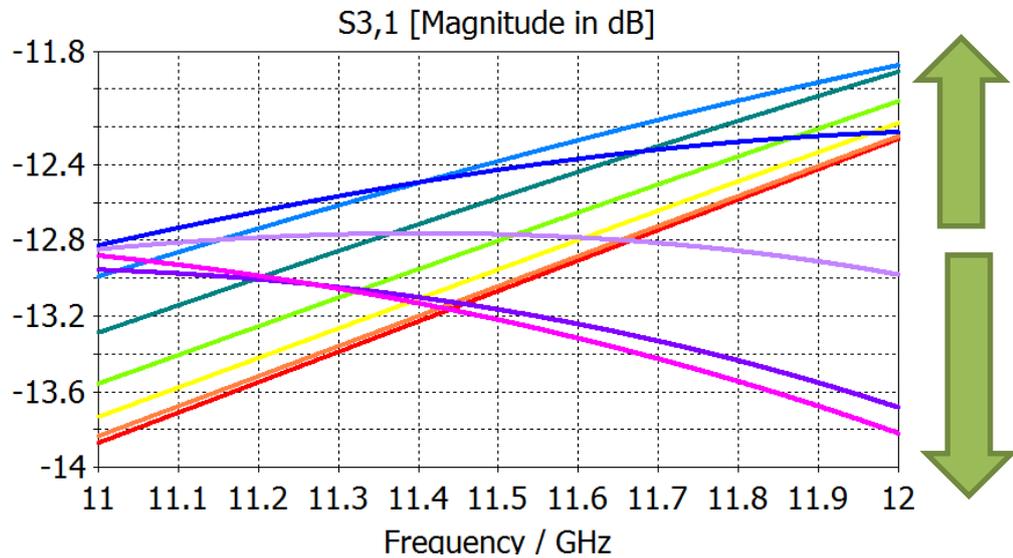


Figura 4:14: Valores de acoplo que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo

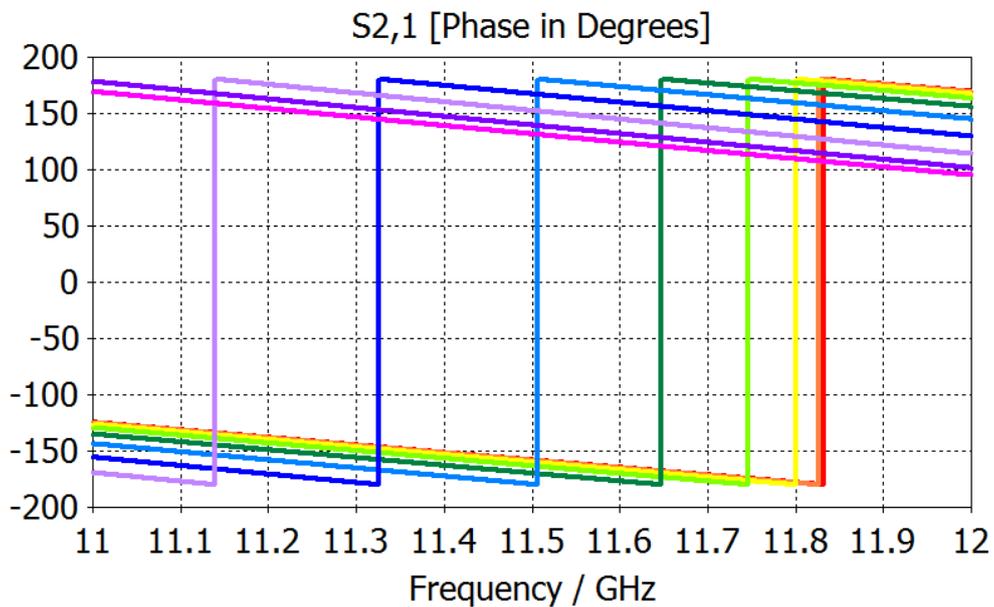


Figura 4:15: Valores de fase que produce el tornillo central sobre el tornillo de salida en vía de acoplo

Como se puede observar en la imagen anterior, para penetraciones de longitud menor de tornillo dentro de la guía el valor de fase es negativo, produciendo un desfase de unos 30 grados en la frecuencia central (11.5 GHz). Para posiciones de tornillo a partir de longitudes de introducción de 4.9mm la fase se hace positiva, produciendo un desfase entre las últimas posiciones de penetración de unos 25 grados en la frecuencia central.

- Tornillo de entrada a 2.8mm y tornillo central variable

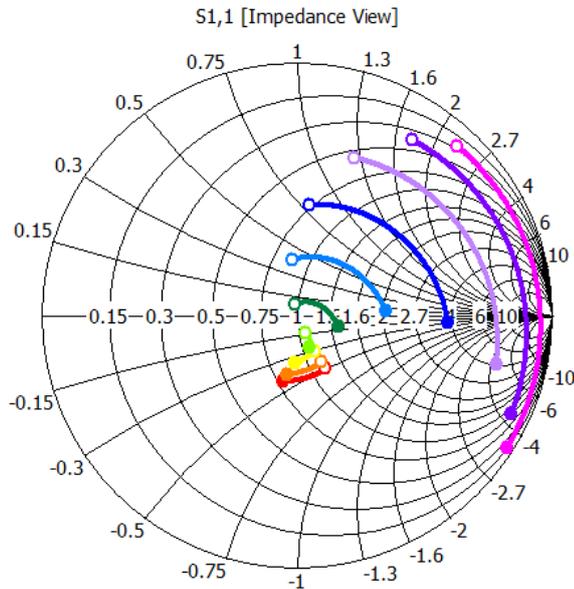


Figura 4:16: Movimiento en carta que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el tornillo central produce un movimiento hacia impedancias reales mayores, marcado dicho movimiento por el tornillo central. En este caso el movimiento es más acusado llegando a dar lugar a impedancias imaginarias grandes al final de la banda de trabajo.

En la siguiente figura se pueden observar los valores de adaptación:

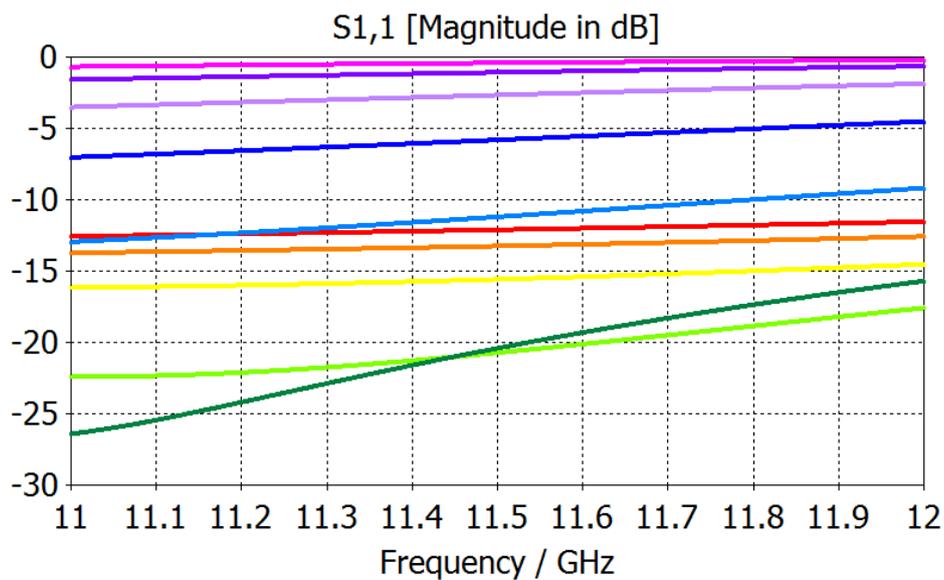


Figura 4:17: Valores de adaptación que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo

Esto indica que, para valores de penetración demasiado altos se produce una gran desadaptación.

En la siguiente figura se puede ver el valor de acoplo producido por el tornillo central combinado con esta posición del tornillo de entrada.

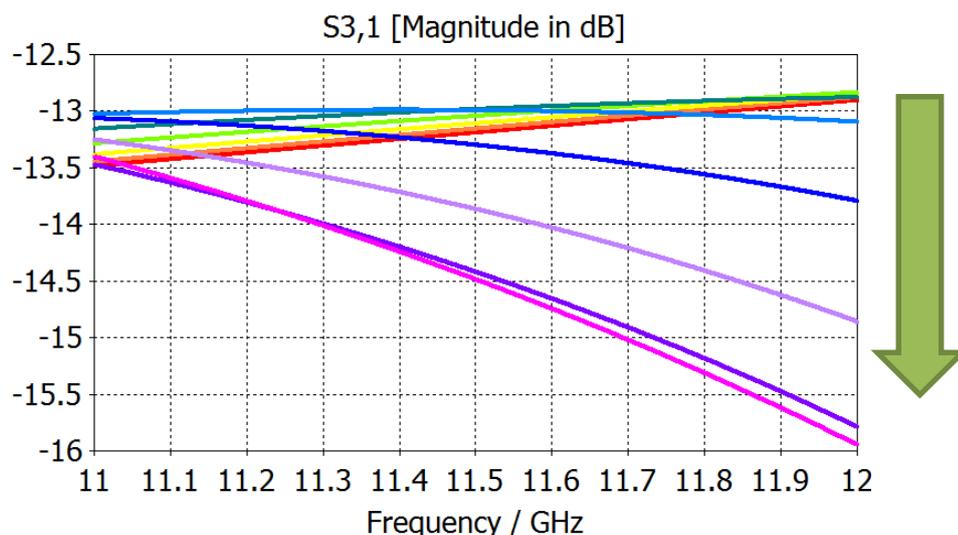


Figura 4:18: Valores de acoplo que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo

Debido a los resultados obtenidos en valores de acoplo según el estudio de tornillos individuales, se pensaba que el tornillo de entrada iba a bajar el acoplo mientras que el tornillo central iba a mejorar la adaptación. Sin embargo, los resultados de la combinación de ambos indican que apenas se modifica el acoplo dentro del rango de adaptación a -10dB (las longitudes de penetración que corresponden a las primeras posiciones, en este caso hasta 3.5mm) apenas modifican 0.1dB el acoplo. Por lo tanto, se decidió no utilizar este tornillo de entrada en los estudios de los apartados [4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4].

En la siguiente imagen se puede apreciar el valor de fase producido por el tornillo central en combinación con el tornillo de entrada, produciéndose el mismo efecto que con la combinación del tornillo de salida con el tornillo central:

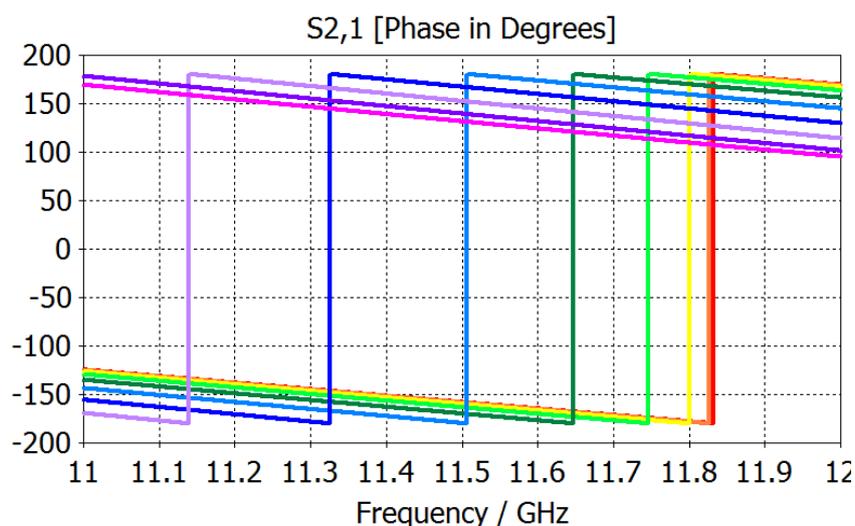


Figura 4:19: Valores de fase que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en vía de acoplo

4.4 Elemento unitario final

Tal y como se ha visto en el análisis de los efectos que pueden introducir los tornillos propuestos sobre la estructura de alimentación parece que el rango de acoplo de señal que proporcionan en torno al valor de acoplo nominal del elemento es limitado. Por este motivo, tras este estudio se consideró implementar vías de distintos tamaños que fueran fácilmente fabricables para su construcción con los elementos del laboratorio, y además, ser capaz de cubrir el mayor rango de acoplo posible con todos los tamaños. Los tamaños decididos fueron 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm y 4.5mm tal y como se expuso en el apartado [4.3]. A continuación se entrará en detalle para cada tamaño de vía, comentado los efectos encontrados en la combinación de tornillos. La posición de los tornillos son $z=7\text{mm}$, $z=0\text{mm}$ y $z=-7\text{mm}$, tal y como se explicó en el apartado [4.3]. A partir de ahora los tornillos se llamarán tornillo de salida (tornillo a 7mm), tornillo central (tornillo a 0mm) y tornillo de entrada (tornillo a -7mm).

En este apartado del proyecto se tienen en cuenta los tres puertos, ya que se observan el parámetro de adaptación ($S_{1,1}$) en carta de Smith y en magnitud, el parámetro de transmisión ($S_{2,1}$) en fase y el parámetro de acoplo ($S_{3,1}$) en magnitud. Para el estudio del rango de acoplo de los tornillos se considera como mínimo de adaptación -10dB.

4.4.1 Elemento unitario con vía de 3.0mm

En este caso, el valor normal de acoplo conseguido, es decir, sin introducir tornillos dentro de la guía, es de **-9.96dB**.

Como se puede apreciar en la siguiente gráfica, el movimiento en carta para la combinación de tornillos dentro del rango de acoplo, es decir, por debajo de -10dB, es el siguiente:

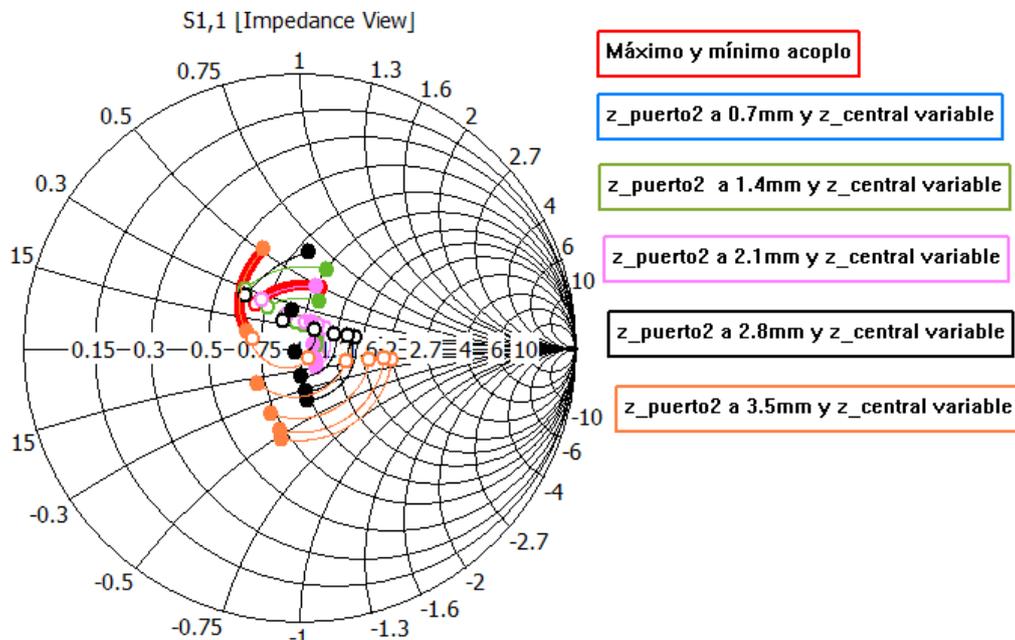


Figura 4.20: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 3.0mm

Como se puede apreciar se realiza un movimiento en carta primero hacia impedancias de valores reales mayores y, conforme se introducen los tornillos, un movimiento hacia impedancias imaginarias mayores (efecto inductivo).

A continuación se pueden ver los valores de adaptación:

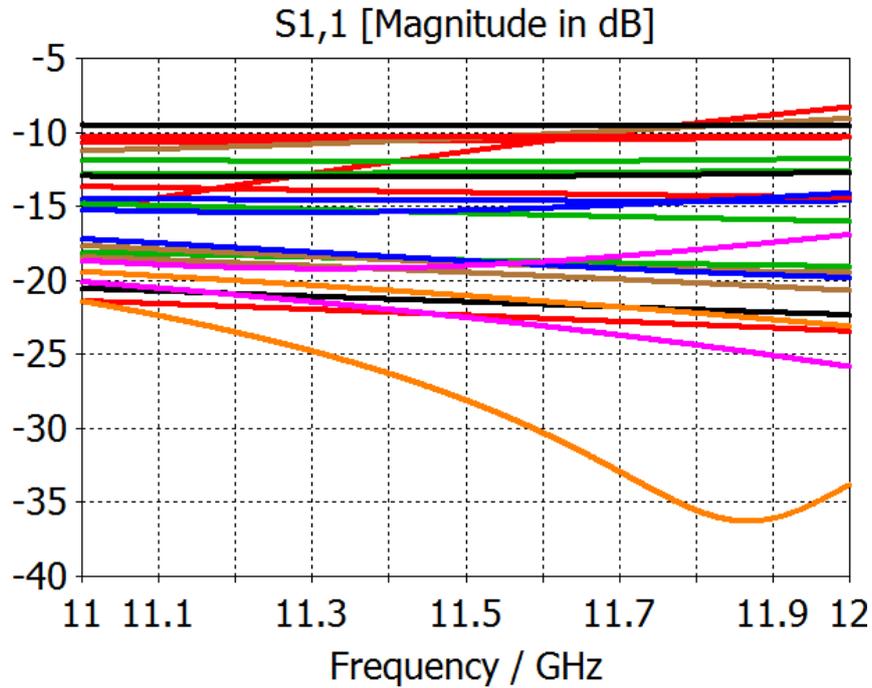


Figura 4.21: Adaptación de los tornillos combinados para vía 3.0mm

En la siguiente gráfica se puede apreciar el rango de acoplo conseguido entre el máximo y el mínimo expuesto en la tabla 4.1:

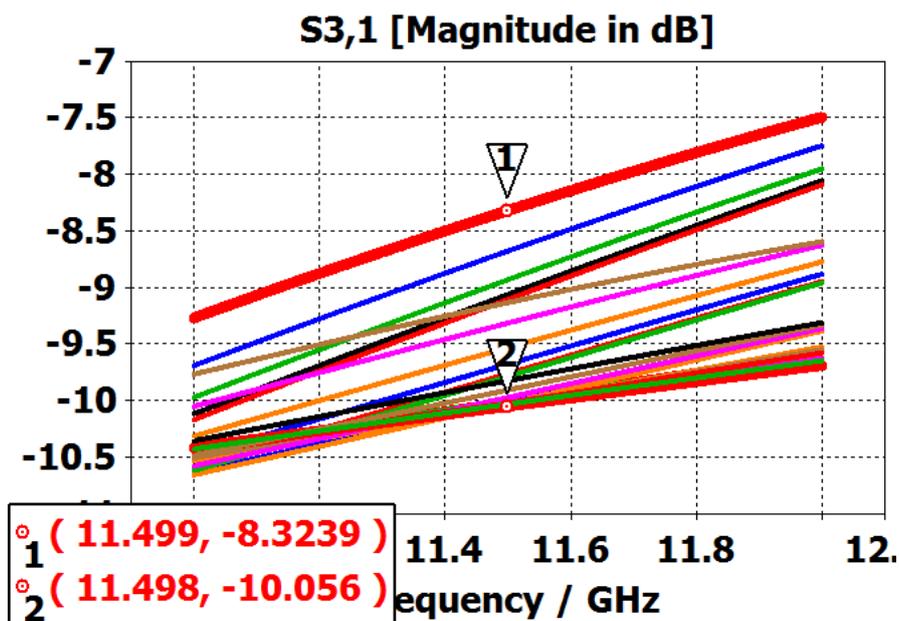


Figura 4.22: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 3.0mm

En el caso de esta vía, el desfase para las posiciones de los tornillos bajo el umbral de adaptación es la siguiente:

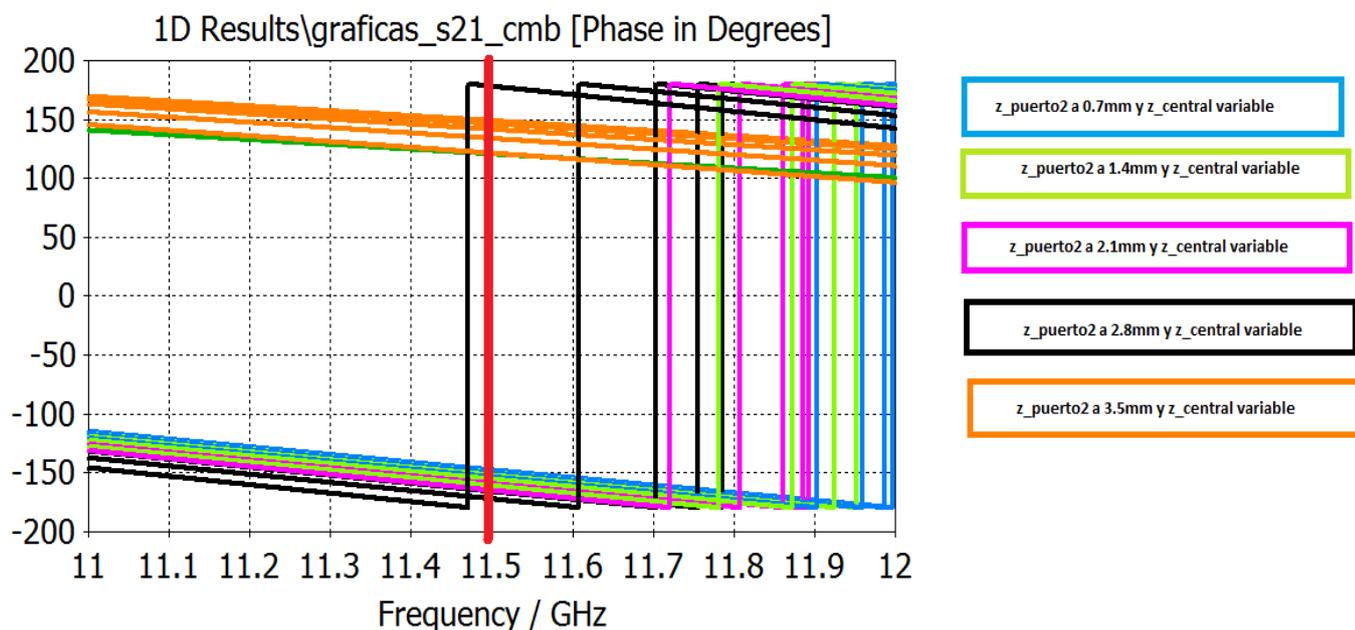


Figura 4.23: Desfase para los tornillos combinados para vía 3.0mm

Como se puede apreciar, la introducción del tornillo central dentro de la guía introduce una pequeña variabilidad en el parámetro de transmisión en fase. Dicha variabilidad no parece excesivamente destacable ya que ronda los 10 grados (curvas de un mismo color en la Figura 4.13). Sin embargo, la introducción del tornillo de salida (tornillo cercano al puerto 2) parece que genera una variabilidad de la fase transmitida algo más acusada. Hasta los 2.8 mm de penetración dicho rango de fase alcanza los 30 grados aproximadamente (desde -150 a -180 grados a 11.5 GHz). Sin embargo, hacerlo penetrar 3.5 mm (longitud correspondiente a otra vuelta del tornillo respecto a la situación anterior) produce rangos máximos de desfase de hasta 80 grados.

A modo resumen en este apartado, se ha realizado esta tabla que recoge el rango de acoplo, las posiciones de los tornillos y la fase en las posiciones extremas para dicho rango.

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-10.05 dB	-153.94 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 2.1mm
Valor máximo de acoplo	-7.99 dB	121.05 grados	Tornillo de salida a 3.5mm y tornillo central a 3.5mm
Rango de variación	2.06 dB	32.89 grados	-

Tabla 4.1: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 3.0mm

4.4.2 Elemento unitario con vía de 3.5mm sin sustrato

En este caso el tamaño elegido para la vía introducida dentro de la guía fue de 3,5mm, consiguiéndose un valor nominal de acoplo de **-8.11dB**.

En esta imagen se puede apreciar el movimiento que genera la introducción de los tornillos en la carta en los valores por debajo de -10dB:

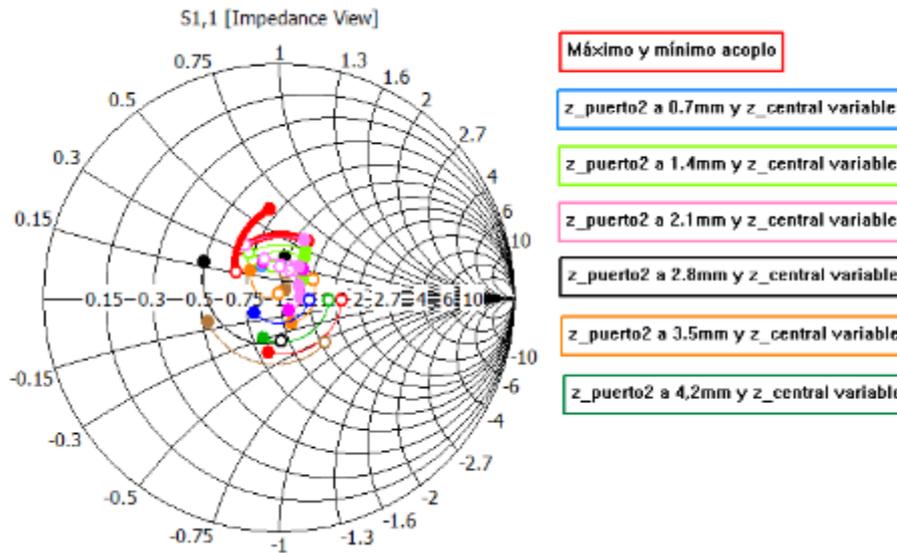


Figura 4.24: movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 3.5mm

Como se puede ver en este caso, el movimiento se genera alrededor del centro de la carta. Para posiciones de tornillos menores dentro de la guía se aprecia un movimiento hacia impedancias de valor real mayor, mientras que para posiciones mayores dentro de la guía se aprecia como el movimiento tiende hacia impedancias imaginarias menores (capacitivo).

A continuación se pueden ver los valores de adaptación en dB:

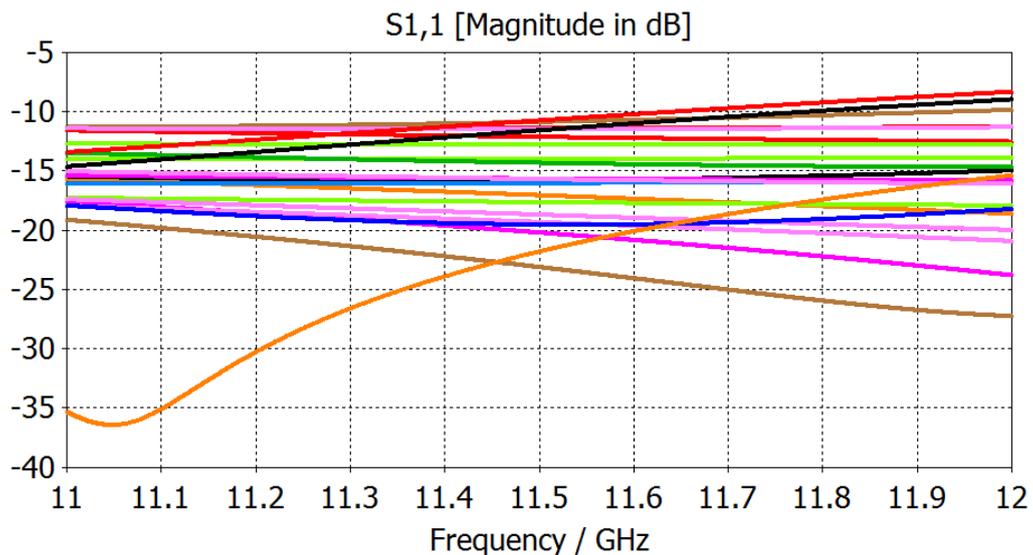


Figura 4.25: Adaptación de los tornillos combinados para vía 3.5mm

En la siguiente gráfica se puede apreciar el rango de acoplo conseguido con estas posiciones:

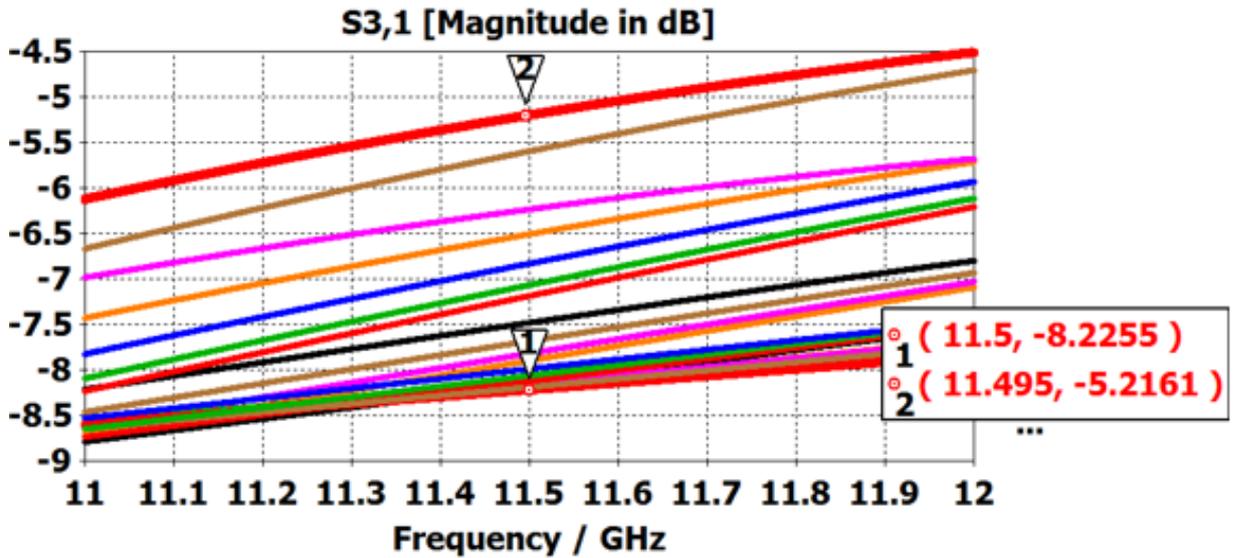


Figura 4.26: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 3.5mm

La siguiente imagen muestra el desfase que se produce con los tornillos:

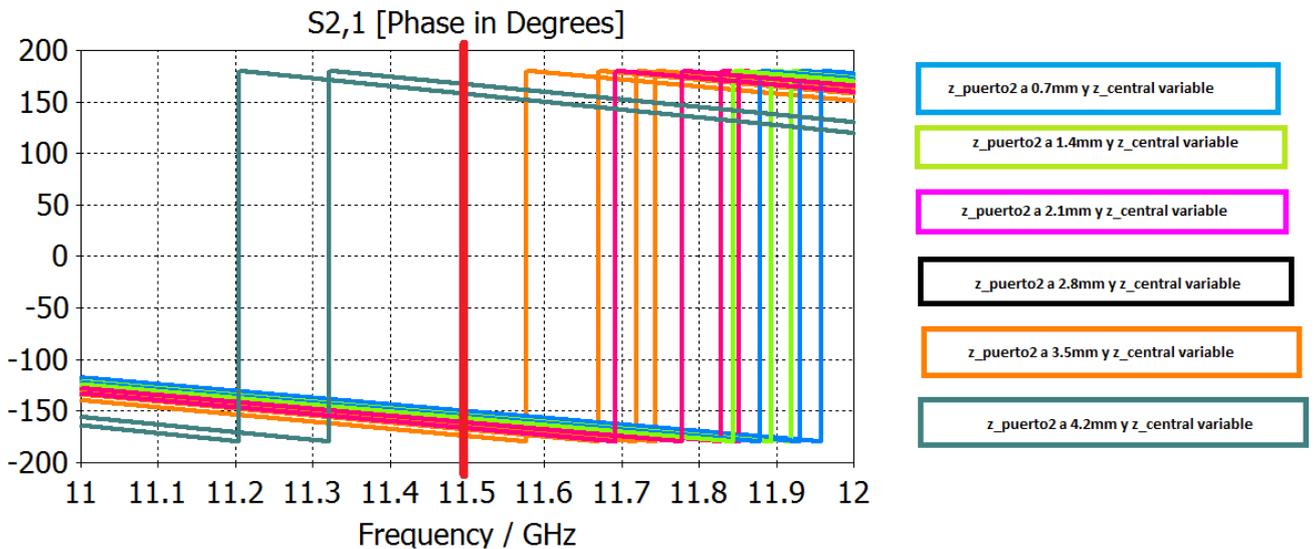


Figura 4.27: Desfase para los tornillos combinados para vía 3.5mm

Como ocurría en el caso anterior, la penetración del tornillo central dentro de la guía introduce una pequeña variabilidad en el parámetro de transmisión en fase. Dicha variabilidad no parece excesivamente destacable ya que ronda los 10 grados (curvas de un mismo color en la Figura 4.17). Igual que en el [4.4.1], la introducción del tornillo de salida (tornillo cercano al puerto 2) parece que genera una variabilidad de la fase transmitida más acusada. En este caso, hasta los 3.5 mm de penetración dicho rango de fase alcanza los 30 grados aproximadamente (desde -150 a -180 grados a la frecuencia central de 11.5 GHz). En este caso, hacerlo penetrar 4.2 mm (longitud correspondiente a otra vuelta del tornillo respecto a la situación anterior) produce rangos de desfase de unos 10 grados, ya que solo hay dos posiciones de combinación de tornillos válidas (es decir, dentro del rango de acoplo).

El rango de acoplo conseguido para la combinación de tornillos en este caso de 3,2 dB. En la siguiente tabla se expone un resumen sobre el rango de acoplo, posiciones y desfase:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-8.22 dB	-168.57 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 2.1mm
Valor máximo de acoplo	-7.99 dB	157.16 grados	Tornillo de salida a 4.2 mm y tornillo central a 2.8 mm
Rango de variación	3.2 dB	11.41 grados	-

Tabla 4.2: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 3.5mm

4.4.3 Elemento unitario con vía de 4.0mm sin sustrato

Se realizó el mismo estudio para el valor de vía de 4mm, consiguiendo un valor nominal de acoplo de **-6.54 dB**.

En esta imagen se puede apreciar el movimiento que genera la introducción de los tornillos en la carta en los valores por debajo de -10dB:

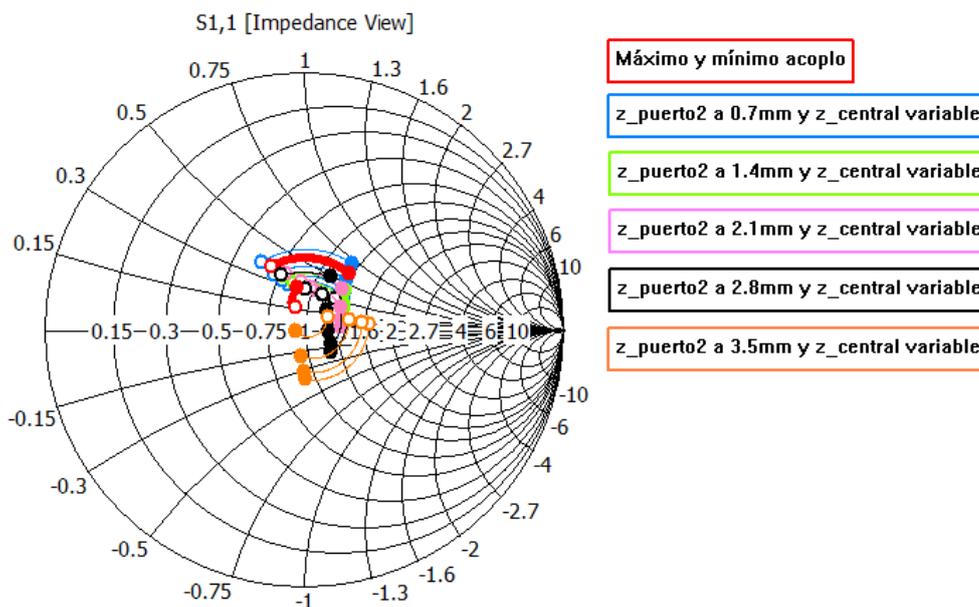


Figura 4.28: movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 4.0mm

En este caso se realiza igualmente movimiento alrededor del centro de la carta como en [4.4.2]. Para posiciones de tornillo en los cuales la longitud de tornillo introducida dentro de la guía es menor, se realiza un movimiento hacia impedancias reales mayores. Sin embargo, conforme se introduce el tornillo el movimiento tiende hacia impedancias imaginarias menores (capacitivo).

A continuación se puede ver el valor de adaptación de las posiciones de los tornillos combinados bajo el umbral de adaptación de -10dB:

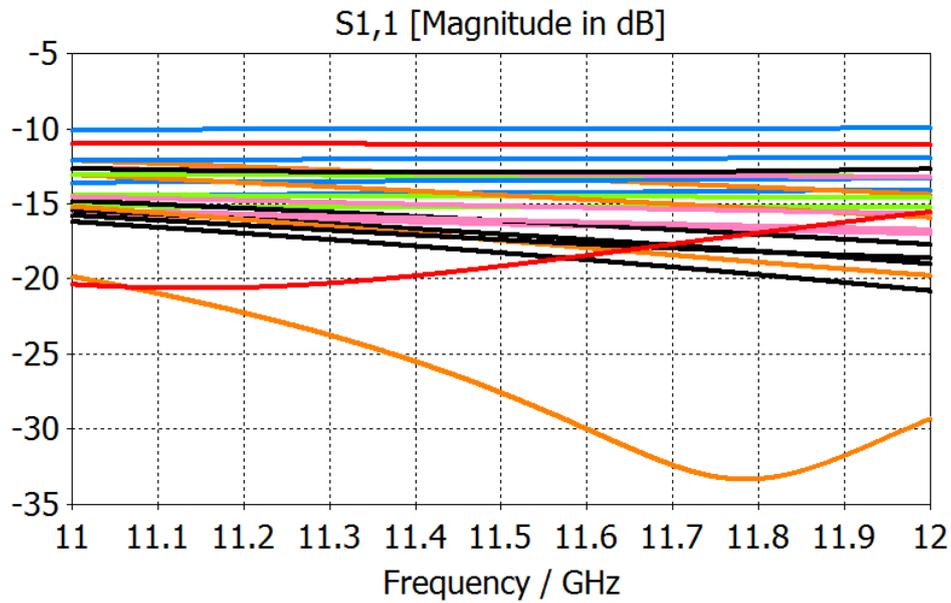


Figura 4.29: Adaptación de los tornillos combinados para vía 4.0mm

En la siguiente gráfica se puede apreciar el rango de acoplo y los valores máximo y mínimo de acoplo para la combinación de tornillos en el caso de la vía de 4mm:

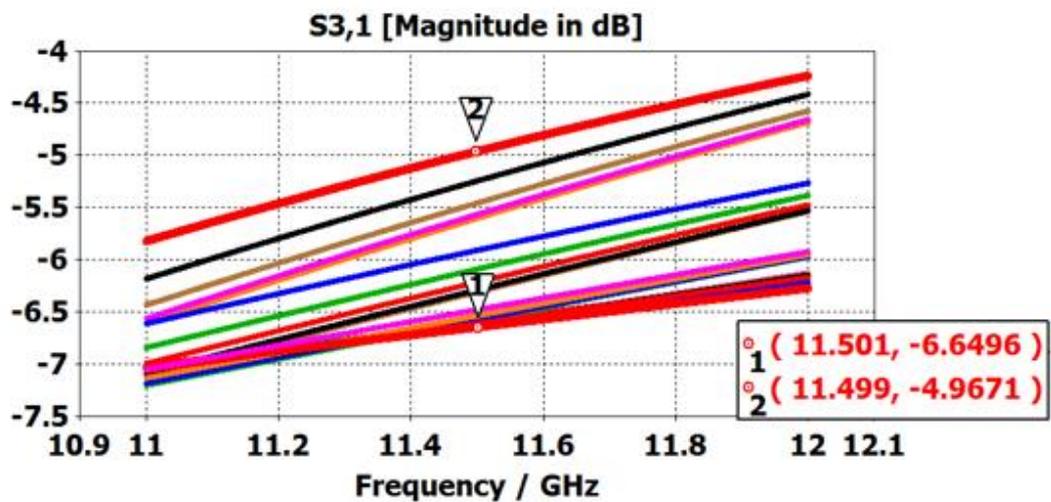


Figura 4.30: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 4.0mm

En la siguiente imagen se puede ver el desfase que produce la introducción de los tornillos dentro de la guía:

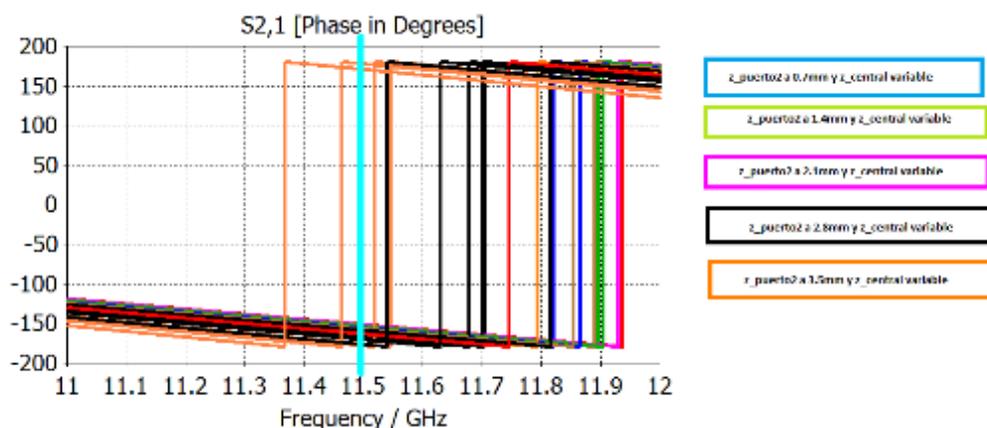


Figura 4.31: Desfase para los tornillos combinados para vía 4.0mm

Como en los casos anteriores, la penetración del tornillo central dentro de la guía introduce una pequeña variabilidad en el parámetro de transmisión en fase. Dicha variabilidad no parece excesivamente destacable ya que ronda los 10 grados (curvas de un mismo color en la Figura 4.22). Igual que en el [4.4.1], la introducción del tornillo de salida (tornillo cercano al puerto 2) parece que genera una variabilidad de la fase transmitida más acusada. En este caso, hasta los 3.5 mm de penetración dicho rango de fase alcanza los 30 grados aproximadamente (desde -150 a -180 grados a la frecuencia central de 11.5 GHz, como en el [4.4.2]). En este caso, hacerlo penetrar 3.5 mm (longitud correspondiente a otra vuelta del tornillo respecto a la situación anterior) se produce, para las posiciones del tornillo central de mayor longitud, un desfase de unos 10 grados.

El rango de acoplo para esta combinación de tornillos es de 1.69dB. A continuación se puede ver una tabla resumiendo estos valores y las posiciones de los tornillos:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-6.65 dB	-157.30 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 2.8mm
Valor máximo de acoplo	-4.96 dB	170.32 grados	Tornillo de salida a 3.5mm y tornillo central a 3.5mm
Rango de variación	1.69 dB	13.02 grados	-

Tabla 4.3: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 4.0mm

4.4.4 Elemento unitario con vía de 4.5mm sin sustrato

En el caso de este tamaño de vía introducida dentro de la guía se consiguió un valor nominal de acoplo de **-5.40dB**.

En esta imagen se puede apreciar el movimiento que genera la introducción de los tornillos en la carta en los valores por debajo de -10dB:

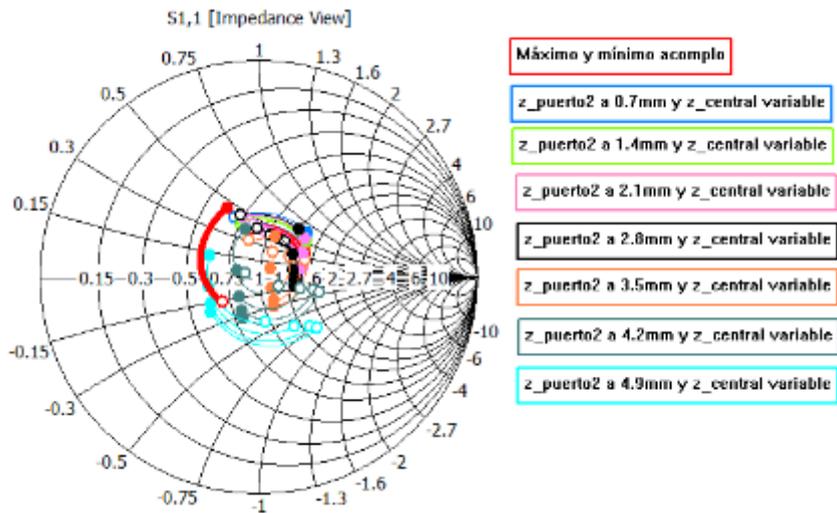


Figura 4.32: movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de salida para vía 4.5mm

En este caso se consigue, al igual que los casos [4.4.2 y 4.4.3], un movimiento alrededor del centro de la carta. Conforme introducimos el tornillo se pasa desde movimientos hacia impedancias reales mayores hacia impedancias imaginarias mayores (inductivo), a diferencia de en los apartados anteriormente citados, y finalmente pasando de impedancias imaginarias menores (capacitivo) a valores reales.

A continuación se puede apreciar el valor de adaptación:

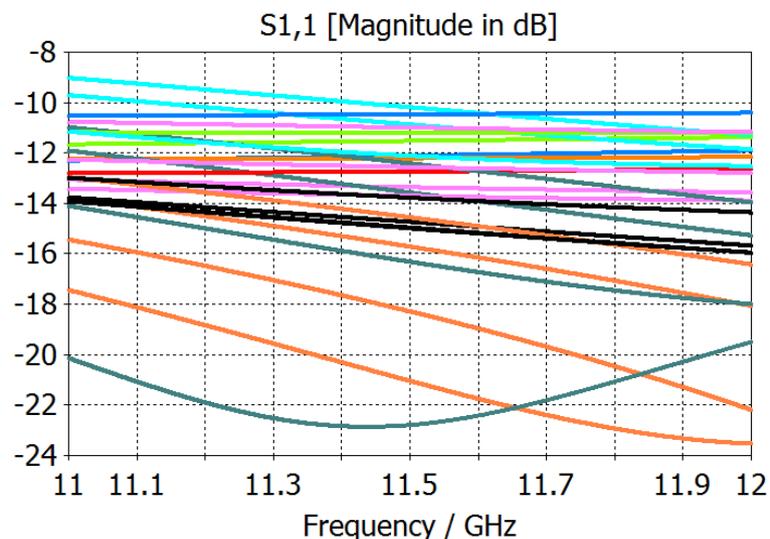


Figura 4.33: Adaptación de los tornillos combinados para vía 4.5mm

En la siguiente imagen se puede apreciar el rango de acoplo y los valores máximo y mínimo de acoplo para la combinación de tornillos en el caso de la vía de 4.5mm:

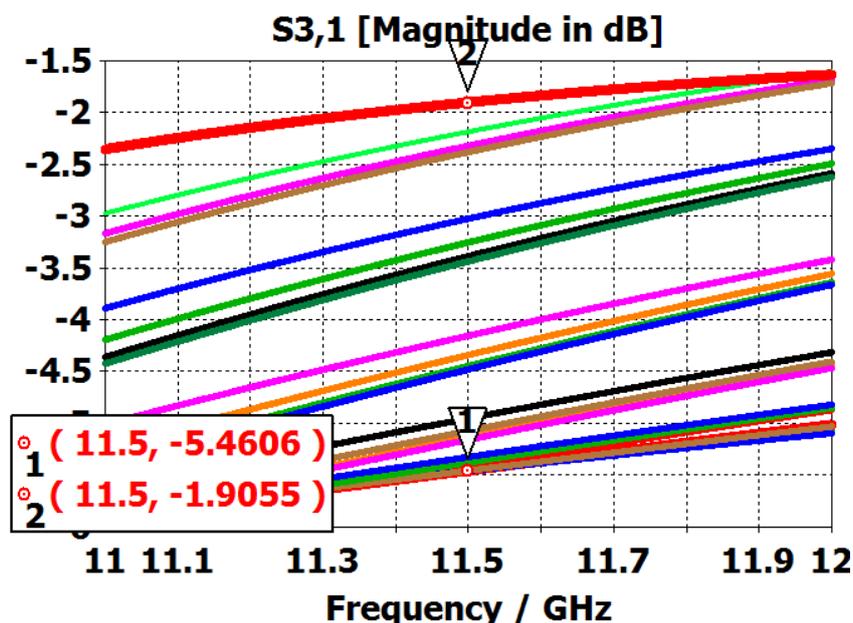


Figura 4.34: Valores de acoplo de tornillos combinados dentro del rango del máximo y mínimo acoplo (rojo) con vía 4.5mm

En la siguiente figura se puede observar el valor de desfase producido por los tornillos:

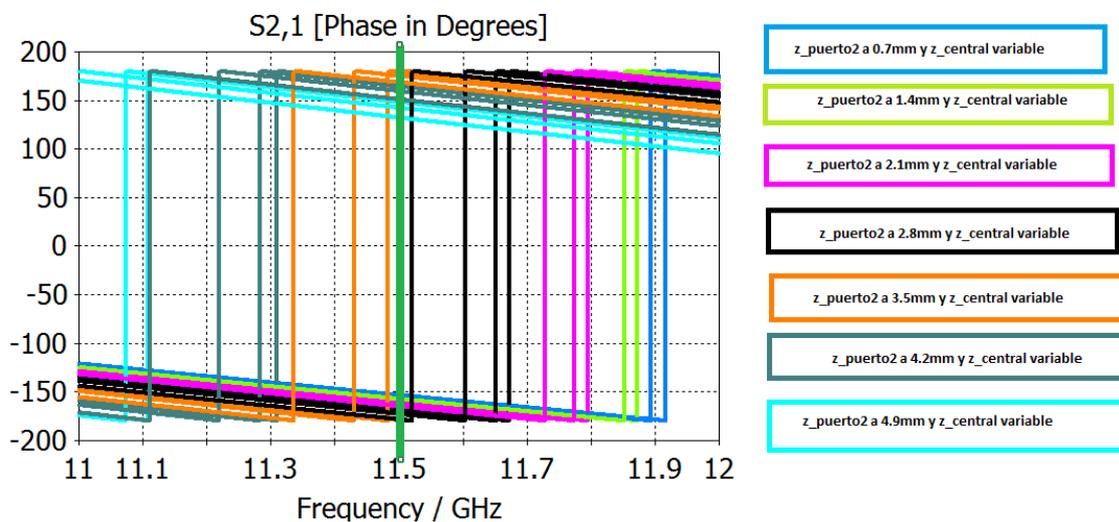


Figura 4.35: Desfase para los tornillos combinados para vía 4.5mm

Este caso es bastante diferente a los tres anteriores [4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3]. En esta gráfica se puede apreciar que para posiciones de longitud de penetración menor del tornillo de salida (cercano al puerto 2), que comprenden desde la posición de penetración inicial hasta los 2,8 mm, se produce un rango de fase de unos 30 grados (de -150 a -180 grados en la frecuencia central de 11.5 GHz). En este caso, hacerlo penetrar desde 3.5 mm hasta 4.9 mm produce un rango de fase de unos 55 grados a la frecuencia central.

El rango de acoplo para esta combinación de tornillos es de 3,59dB. En la siguiente tabla se pueden observar los datos y las posiciones de los tornillos:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-5.49 dB	-158.08 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 2.1mm
Valor máximo de acoplo	-1.9 dB	132.05 grados	Tornillo de salida a 4.9mm y tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	3.59 dB	26.03 grados	-

Tabla 4.4: Valores máximo y mínimo de acoplo y rango para la combinación de tornillos con vía 4.5mm

4.4.5 Consideraciones finales del diseño del elemento unitario con vía

Según las simulaciones realizadas en los apartados [4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4] se ha conseguido un rango de acoplo que va desde los -10,95 dB hasta los -1.9 dB, cubriéndose este rango con tres tamaños de vías:

- 3.0mm: desde -10.05 hasta -8dBs.
- 3.5mm: desde -8 hasta -5.5dBs
- 4.5mm: desde -5.5 hasta -1.8dBs.

En la página siguiente se presenta una tabla completa con valores de acoplo, fase y posiciones de los tornillos en cada vía:

Vía 3.0 mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-10	-148,69	0,7
	-10,02	-150,48	1,4
	-10,05	-153,94	2,1
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-10,04	-150,81	0,7
	-10,04	-152,54	1,4
	-10,02	-155,85	2,1
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-10,01	-154,83	0,7
	-9,97	-156,39	1,4
	-9,91	-159,39	2,1
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-9,76	-161,28	0,7
	-9,68	-162,9	1,4
	-9,53	-166,2	2,1
tornillo de salida a 3.5mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-9,06	-170,77	0,7
	-8,93	-172,45	1,4
	-8,68	-176,4	2,1
tornillo de salida a 4.2mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,32	176,33	2,8
	-7,99	164,1	3,5

Vía 3.5 mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,14	-150,62	0,7
	-8,16	-152,33	1,4
	-8,22	-155,62	2,1
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,17	-152,86	0,7
	-8,16	-154,52	1,4
	-8,2	-157,65	2,1
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,16	-156,99	0,7
	-8,13	-158,49	1,4
	-8,06	-161,7	2,1
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-7,9	-163,72	0,7
	-7,82	-165,29	1,4
	-7,68	-168,54	2,1
tornillo de salida a 3.5mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-7,48	-174,77	2,8
	-7,19	-173,63	0,7
	-7,07	-175,29	1,4
tornillo de salida a 4.2mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,83	-179,21	2,1
	-6,51	173,58	2,8
	-6,24	161,75	3,5
tornillo de salida a 4.2mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
			0,7
			1,4
	-5,6	166,75	2,1
		2,8	
		2,8	

Vía 4.0 mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,59	-152,03	0,7
	-6,6	-152,54	1,4
	-6,62	-154,13	2,1
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,62	-154,52	0,7
	-6,62	-154,92	1,4
	-6,61	-156,47	2,1
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,58	-159,02	0,7
	-6,57	-159,38	1,4
	-6,54	-160,79	2,1
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,29	-166,55	0,7
	-6,22	-168,05	1,4
	-6,09	-171,21	2,1
tornillo de salida a 3.5mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-5,6	-176,81	0,7
	-5,57	-177,12	1,4
	-5,46	-178,73	2,1
	-5,24	177,4	2,8
	-4,96	170,32	3,5

Vía 4,5 mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-5,44	-153.67	0,7
	-5,46	-155.15	1,4
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-5,46	-155.87	0,7
	-5,46	-156.23	1,4
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-5,41	-160.93	0,7
	-5,38	-162.26	1,4
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-5,19	-168.56	0,7
	-5,13	-169.89	1,4
tornillo de salida a 3.5mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-4,44	-179.60	0,7
	-4,34	178.77	1,4
	-4,15	175.06	2,1
	-3,92	168.27	2,8

Tabla 4.5: Posiciones de los tornillos para cada valor de acoplo y fase para las vías bajo estudio

4.5 Construcción y medida

En este capítulo se tratará la construcción del elemento unitario con vía y su posterior medida con el analizador de redes de la Escuela Politécnica Superior (UAM). Se expondrán los planos utilizados para la construcción de la pieza (Anexo [A]: Planos prototipo 1) y los elementos necesarios para realizar las medidas, siendo estos los tornillos M4 y las vías de los distintos tamaños, así como el material necesario para realizar las mismas.

4.5.1 Integración

En los capítulos 3 y 4 se ha presentado el elemento unitario y los distintos tamaños de las vías, así como los resultados obtenidos en simulación. Esta antena consta de los siguientes elementos:

- **Piezas metálicas:** forman el esqueleto de la antena, es decir, la guía de onda, la tapa metálica superior y los flanges necesarios para la transición de la alimentación.
- **Vías y tornillería:** vías o conectores de 50Ω . Estos conectores han sido después cortados para que dentro de la guía se introduzca una longitud igual a los apartados [4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4]. Tornillos metálicos M4 para unir las distintas piezas de la antena (flange). Tornillos metálicos M2 para unir la tapa al resto de la estructura y para sujetar la vía a la tapa. Tornillos M4 para realizar las distintas medidas de acoplos.

4.5.2 Prototipo

En este apartado se describirá el proceso de la fabricación del prototipo de elemento unitario diseñado, para así poder comprobar de forma empírica los resultados obtenidos en la simulación.

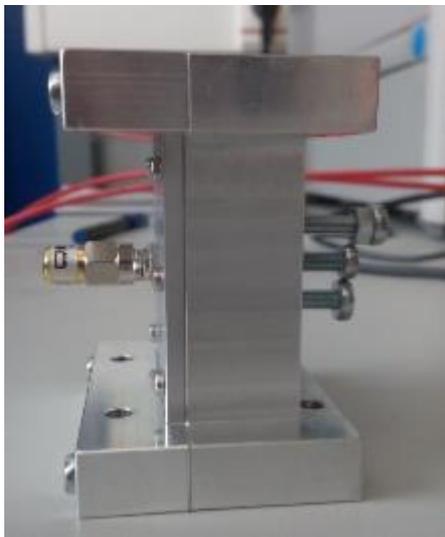


Figura 4.36a: Fotografía lateral del prototipo

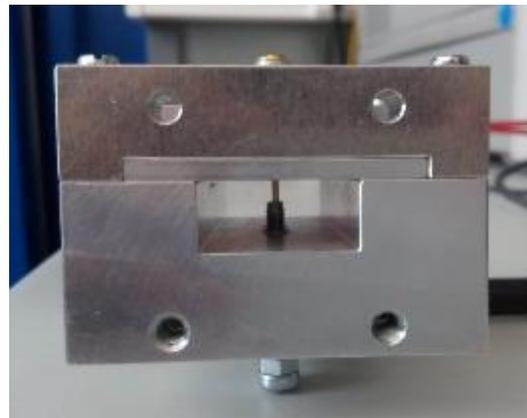


Figura 4.36.b: Fotografía frontal del prototipo

4.5.2.1 Piezas metálicas

Los planos de las metálicas de aluminio construidas por mecanizados Felper son las presentes en el Anexo [A]: Planos prototipo 1. Las piezas realizadas son:

- Base de la guía de onda: paredes inferior y laterales con la transición en la parte inferior del flange integrada, con agujeros de medida M2 a lo largo de los laterales para sujetar la estructura, y tres agujeros inferiores de medida M4 para los tornillos de sintonía.



Figura 4.37: Base de la guía de onda

- Parte superior del flange: dos partes idénticas para poder sujetar la tapa superior de la guía con la inferior y con la tapa metálica.



Figura 4.38: Parte superior del flange

- Tapa metálica: tapa superior que sirve para cubrir la guía de onda, con agujeros de medida M2 para sujetar la pieza a la base inferior de la guía, agujero para situar el conector y dos agujeros para sujetar el conector a la tapa.

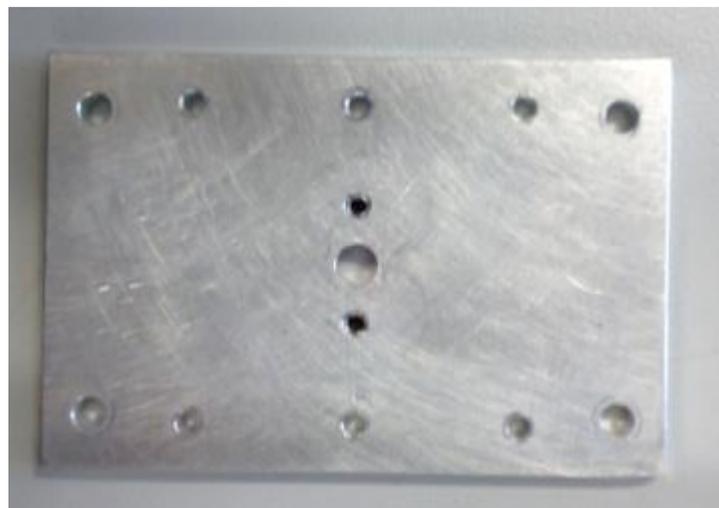


Figura 4.39: Tapa metálica

4.5.2.2 Conectores

Se utilizaron conectores SMA de 50Ω para poder realizar las vías de los distintos tamaños tratados en el capítulo 4. La forma de proceder a su construcción fue retirar el teflón de la parte del conector que entra dentro de la guía, en este caso 3mm, ya que es el grosor de la tapa metálica y, seguidamente, cortar el conector hasta conseguir el tamaño deseado (Figura 4.30). Finalmente, se lima la punta del conector de 50Ω (Figura 4.31) hasta conseguir mayor precisión en el tamaño de la vía y más uniformidad en el extremo. Debido a la fabricación manual de estos conectores es muy posible que la longitud de conector introducida dentro de la guía no se corresponda exactamente con la longitud simulada en los apartados [4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4], por eso aparecerán diferencias de acoplo entre las simulaciones y las medidas.



Figura 4.40: Corte del alma del conector



Figura 4.41: Limado del alma del conector

4.5.3 Medidas

Para realizar las medidas se colocó en la parte superior de la guía el conector SMA del tamaño deseado (3.0mm, 3.5mm, 4.0mm y 4.5mm) y se tomaron datos de los parámetros S de la estructura con el analizador de redes en función de la penetración de cada uno de los tornillos. Posteriormente, esas medidas fueron analizadas con la herramienta ADS. La forma de proceder fue realizar primero las medidas de los tornillos individuales y después las medidas de la combinación de tornillos. Estas medidas se realizaron a con el kit de guía de onda disponible en el laboratorio y con dos sondas conectadas a los puertos 1 y 2 de la guía. En el puerto 3 (conector) se situó una carga de 50Ω . En este tipo de estructuras, lo más lógico es conectar el puerto 3 del dispositivo al puerto 2 del analizador de redes y, de esta forma, monitorizar directamente la señal acoplada fuera de la guía de onda en función de la de entrada. Sin embargo, debido a que en esa situación uno de los puertos es coaxial y, por tanto, eso puede introducir errores destacables sobre las medidas (por el hecho de realizar una calibración en guía de onda) se ha preferido utilizar la primera configuración de medida descrita. Por este motivo, en todos los casos para obtener el valor del $S_{3,1}$ se ha recurrido a la ecuación (3.2) descrita en el capítulo 3.

A continuación se pasará a diferenciar un apartado para cada tamaño de conector. En todos los casos se podrá apreciar un giro en carta respecto a los resultados simulados presentados en el apartado [4.4] debido a que no se tuvo en cuenta en la simulación del prototipo la transición a guía de onda.

Cabe añadir que para la representación de los valores obtenidos en cada apartado [4.5.3.1, 4.5.3.2, 4.5.3.3 y 4.5.3.4] han sido escogidos los valores de mayor y menor acoplo y ciertos valores intermedios.

4.5.3.1 Medidas del conector de 3.0mm

Para realizar este apartado y los cuatro siguientes se procedió como en los apartados [4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4], en el cual se realizó un estudio de funcionamiento de la combinación entre tornillos.

A continuación se puede ver en la gráfica el movimiento en carta de los valores representativos de máximo y mínimo acoplo y unos valores intermedios:

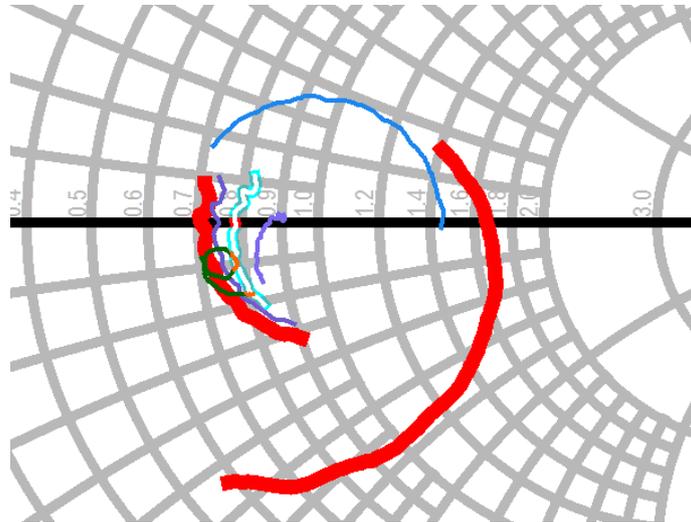


Figura 4.42: Medidas de la anecoica del movimiento de las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.0mm

En este caso los valores correspondientes a máximo y menor acoplo son los resaltados en rojo. En este caso el movimiento tiende hacia impedancias de valor imaginario menor (capacitivo) para el menor acoplo y hacia impedancias imaginarias mayores (inductivo) en el caso de mayor acoplo.

A continuación se puede ver el valor en magnitud de las posiciones escogidas para ilustrar este apartado:

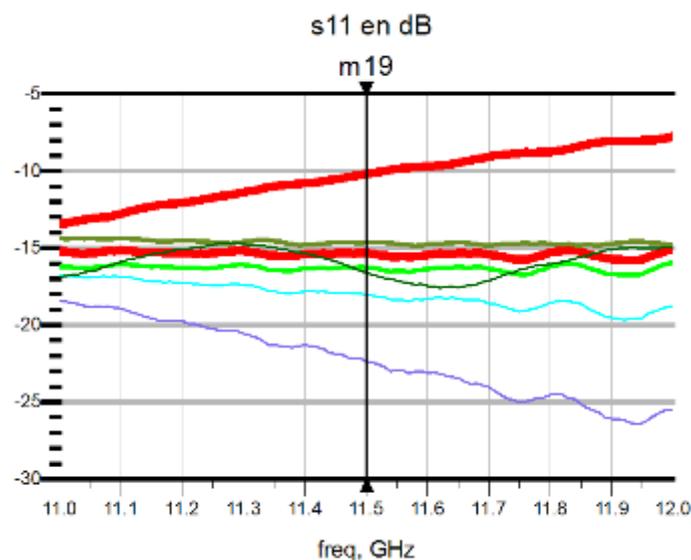


Figura 4.43: Valor de adaptación para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 3.0mm

El rango de acoplo obtenido con la combinación de tornillos adaptada es la siguiente:

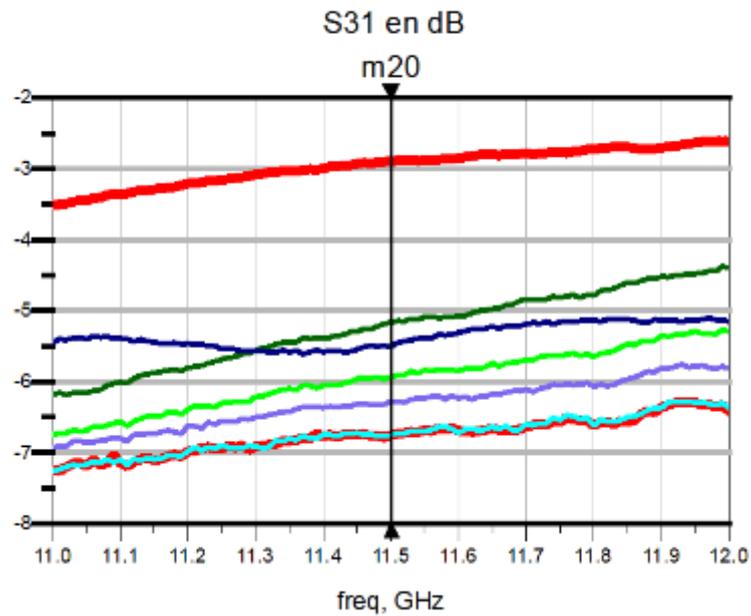


Figura 4.44: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.0mm

En la figura anterior los valores resaltados en rojo corresponden al mayor y menor acoplo recogidos en la tabla anterior y luego unos valores intermedios conseguidos mediante la interacción de tornillo de salida y tornillo central.

La fase en transmisión de las posiciones escogidas para este apartado es:

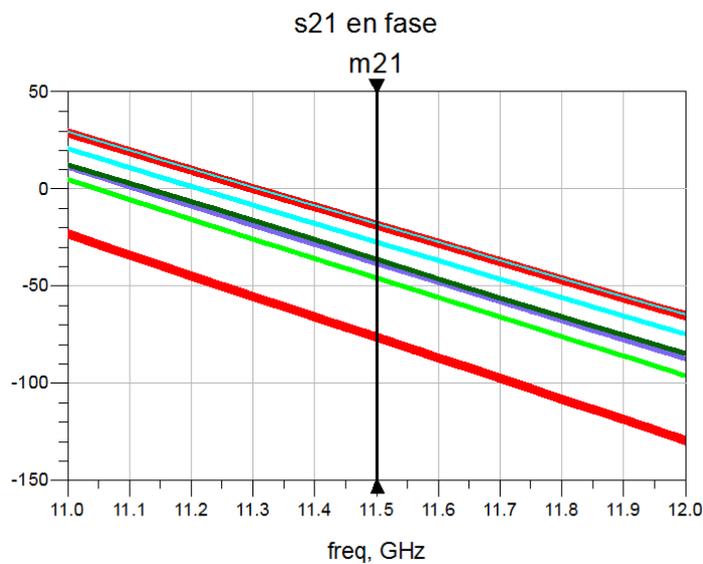


Figura 4.45: Valores de fase para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.0mm

A diferencia de lo que ocurría en simulación [4.4.1], entre los valores máximo y mínimo de acoplo hay un desfase de 80 grados. Para longitudes menores del tornillo introducidas dentro de la guía

se aprecian valores menores de fase, mientras que conforme penetra el tornillo en la estructura la fase tiende a ser más negativa.

Para los tornillos combinados se consiguen unos valores de acoplo de:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-6.76 dB	-18.66 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 1.4mm
Valor máximo de acoplo	-2.89 dB	-76.35 grados	Tornillo de salida a 3.5mm y tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	3.87 dB	57.69 grados	-

Tabla 4.6: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 3.0mm

4.5.3.2 Medidas del conector de 3.5mm

Para el conector de 3,5mm se procedió igual que en el apartado [4.5.3.1], realizando un estudio del movimiento de los tornillos tanto en carta como en magnitud, el rango de acoplo en magnitud y la fase de las posiciones elegidas.

El movimiento generado por los tornillos dentro de la guía de onda en este caso es el apreciable en la figura, estando en rojo el máximo y mínimo valor de acoplo:

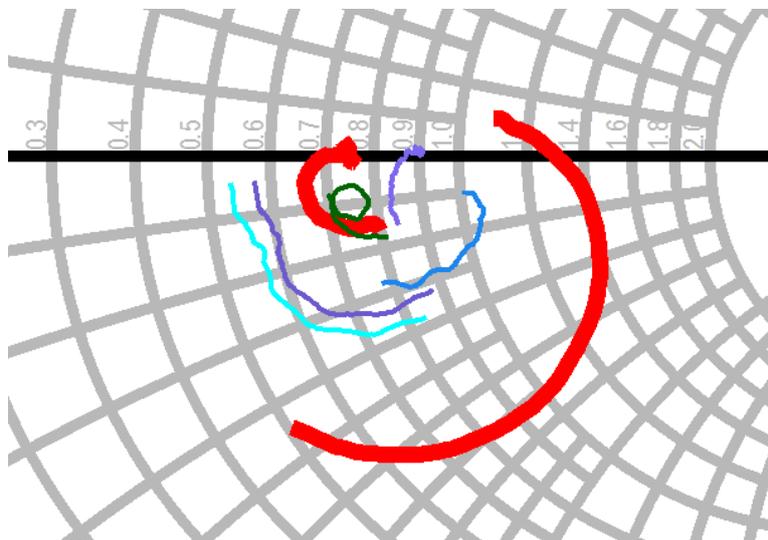


Figura 4.46: Medidas del movimiento de los tornillos combinados para vía 3.5mm

Como ocurría en el caso anterior [4.5.3.1] para el valor menor de acoplo se tiende a impedancias imaginarias menores (capacitivo) y para el valor mayor de acoplo a impedancias imaginarias mayores (inductivo).

Los valores de adaptación de las posiciones de tornillos escogidas para mostrar en este caso con los siguientes, destacando en rojo los que corresponden a los valores de mayor y menor acoplo:

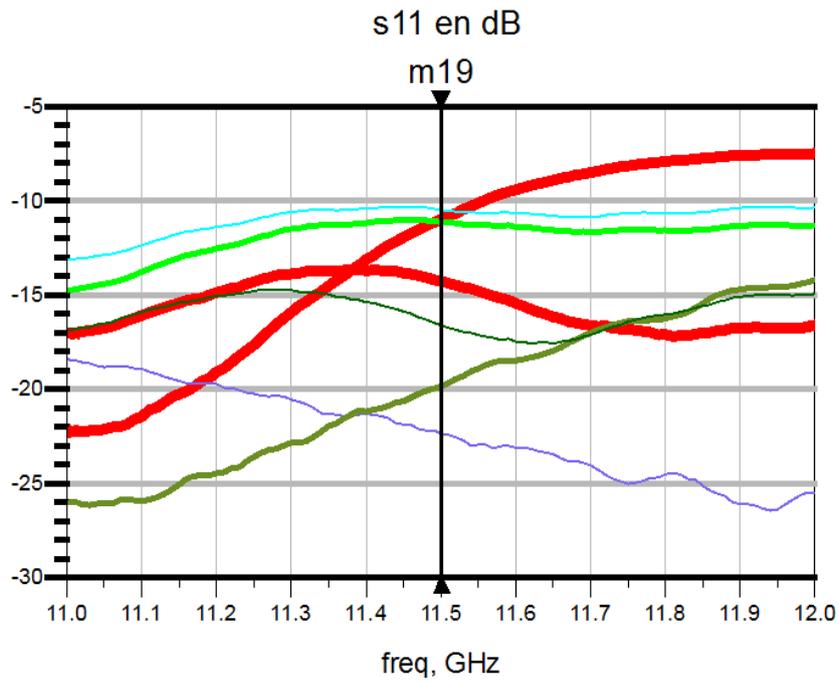


Figura 4.47: Adaptación para las posiciones de los tornillos escogidas para 3.5mm

Los valores de acoplo para estas combinaciones de tornillos son los apreciables en la siguiente imagen:

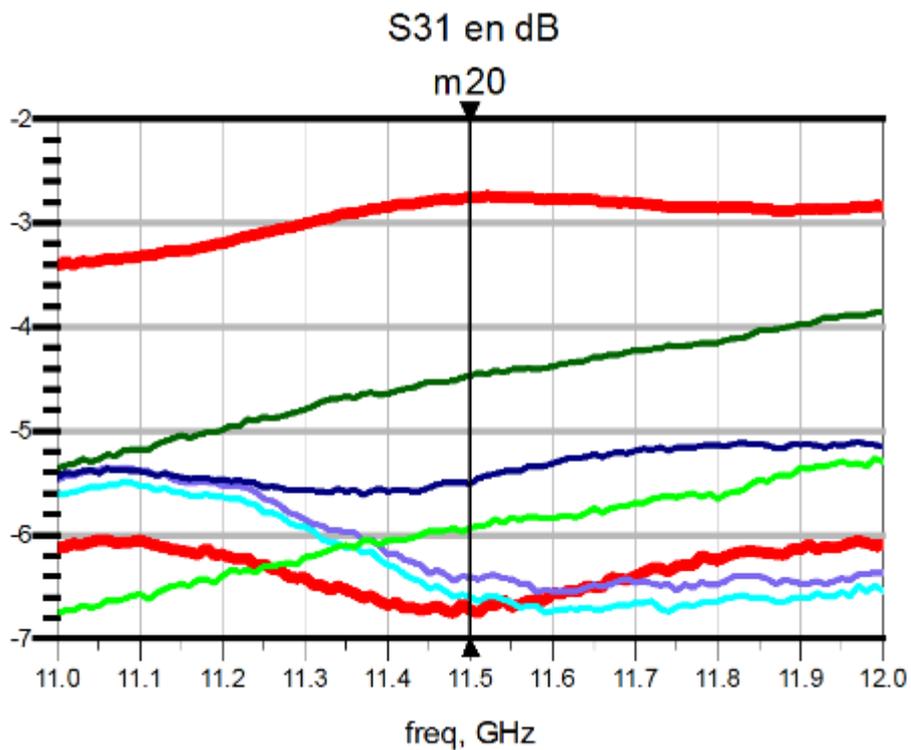


Figura 4.48: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 3.5mm

En el caso de este conector de 3.5mm se han obtenido las siguientes fases:

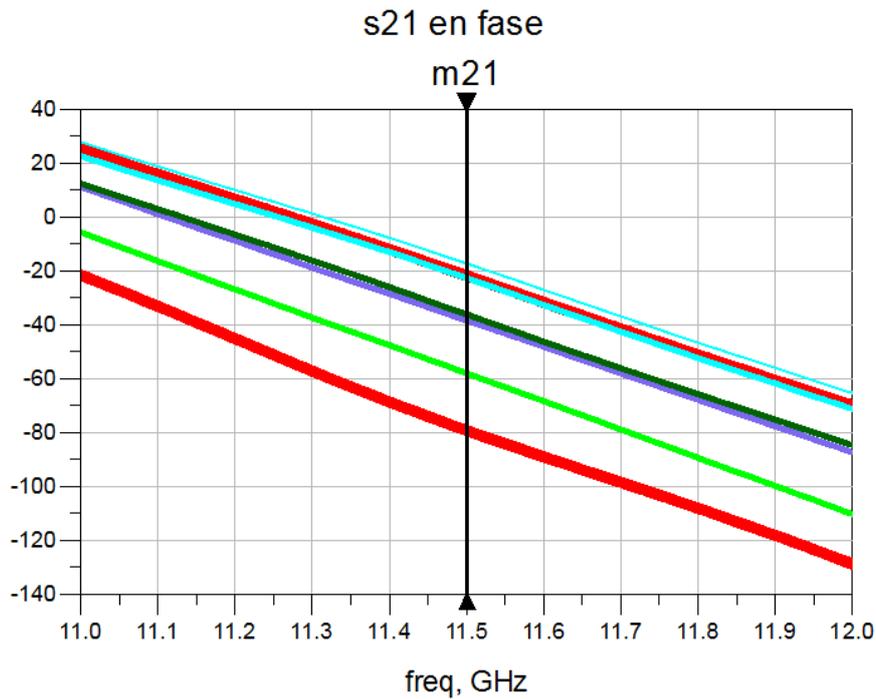


Figura 4.49: Fases para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 3.5mm

Como se puede apreciar, en este caso el desfase producido por los tornillos en las posiciones que ofrecen mayor y menor acoplo es de 70 grados.

En el caso de los tornillos combinados los valores de menor y mayor acoplo y el rango correspondiente bajo el umbral de adaptación de -10dB son los siguientes:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-6.73 dB	-21,84 grados	Tornillo de salida a 2.1mm y tornillo central a 0.7mm
Valor máximo de acoplo	- 2.76 dB	-79,27 grados	Tornillo de salida a 4.2mm y tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	3.97 dB	57.43 grados	-

Tabla 4.7: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 3.5mm

4.5.3.3 Medidas del conector de 4mm

El movimiento en carta de la combinación de tornillos dentro del umbral de -10dB con los valores correspondientes al máximo y mínimo acoplo es:

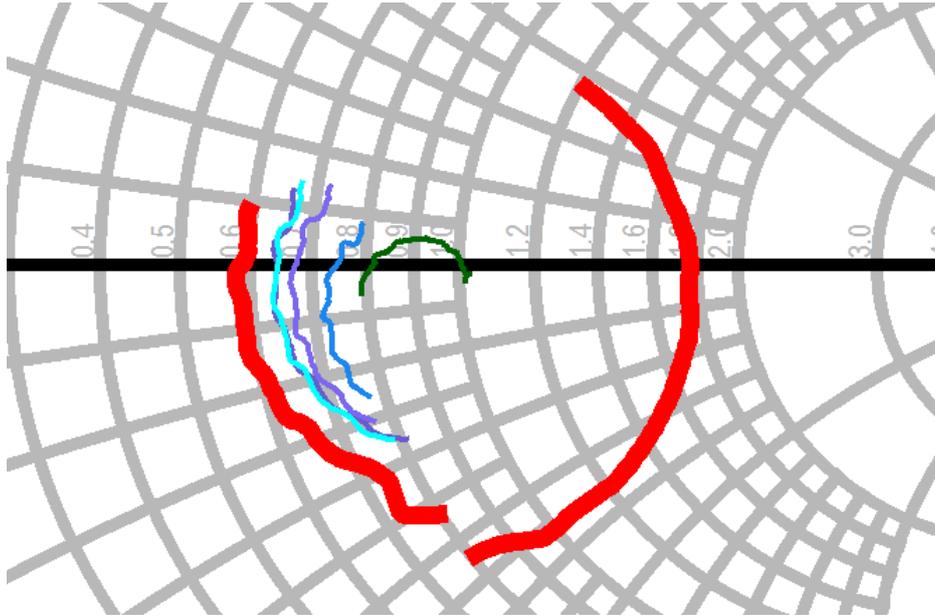


Figura 4.50: Medidas del movimiento de los tornillos combinados para vía 4.0 mm

En este caso, a diferencia de en [4.5.3.1 y 4.5.3.2] el movimiento de carácter inductivo lo produce la posición de tornillos que da lugar al menor acoplo y el efecto capacitivo lo produce la posición de tornillos que da el mayor acoplo.

El rango de adaptación de las posiciones escogidas aparece en la siguiente figura:

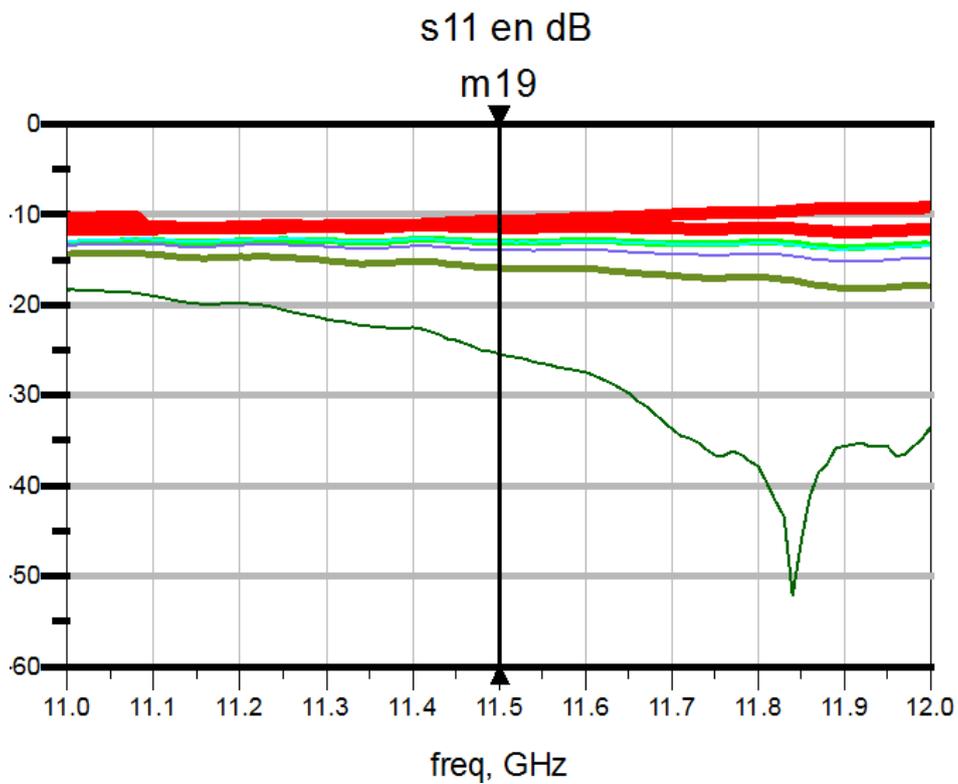


Figura 4.51: Adaptación para las posiciones de los tornillos escogidas para 4.0 mm

El rango de acoplo conseguido es el que aparece en la siguiente figura, marcados en rojo el máximo y mínimo acoplo:

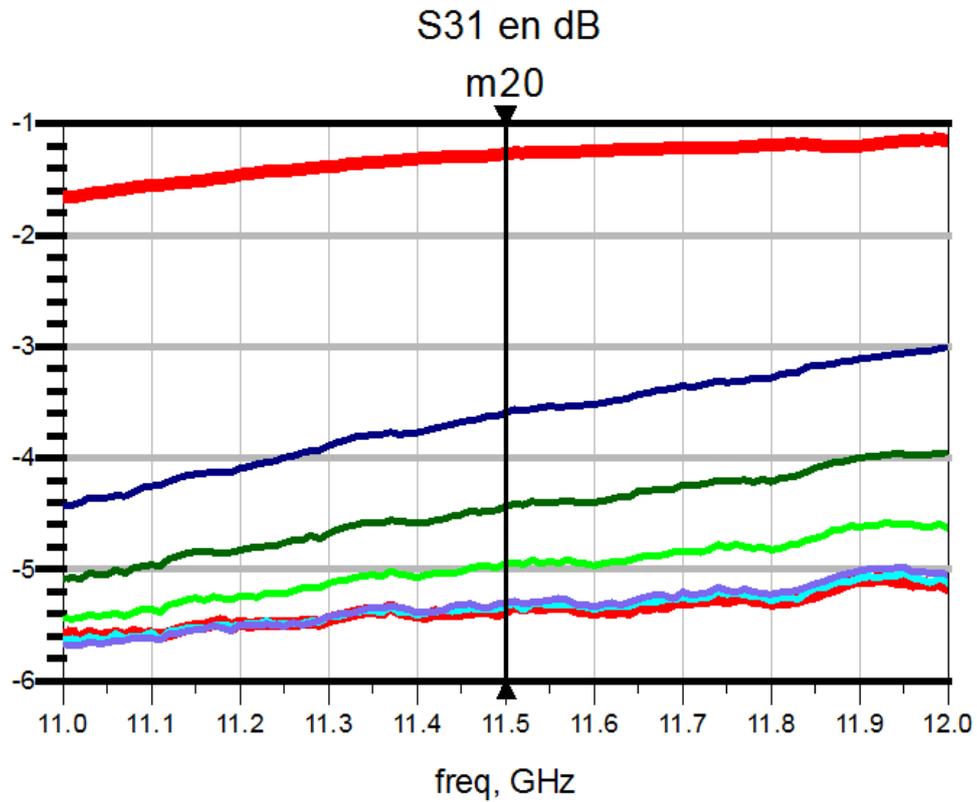


Figura 4.52: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 4.0 mm

Las fases de las posiciones de tornillos escogidas para ilustrar este apartado aparecen en la figura siguiente:

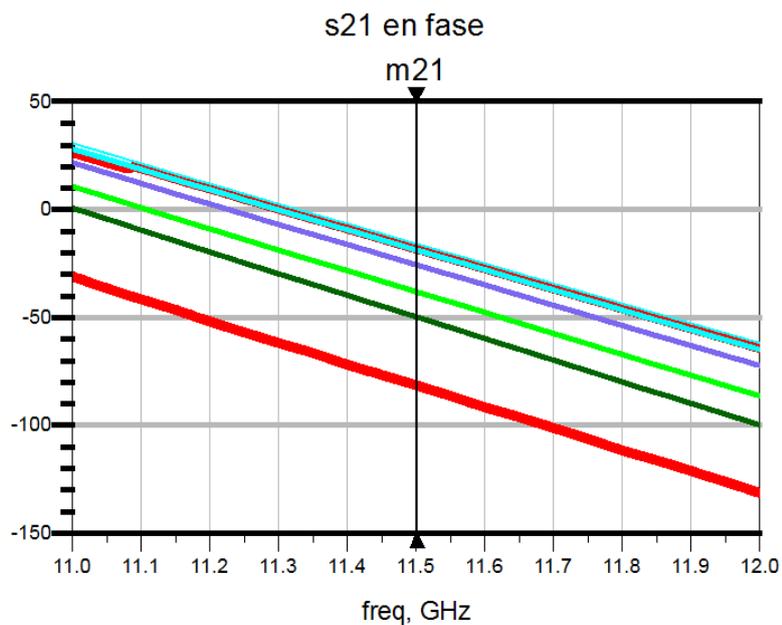


Figura 4.53: Fases para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 4.0mm

En este caso el desfase total producido entre las posiciones que proporcionan mayor acoplo y menor acoplo es de unos 60 grados.

En la siguiente tabla se recogen los valores más significativos (mayor y menor acoplo), rango total y fase de dichas posiciones:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-5.37 dB	-18.13 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 2.1mm
Valor máximo de acoplo	-1.27 dB	-81.5 grados	Tornillo de salida a 4.9mm y tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	4.1 dB	63.77 grados	-

Tabla 4.8: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 4.0mm

4.5.3.4 Medidas del conector de 4.5mm

El movimiento en carta de los tornillos combinados puede apreciarse en la siguiente imagen:

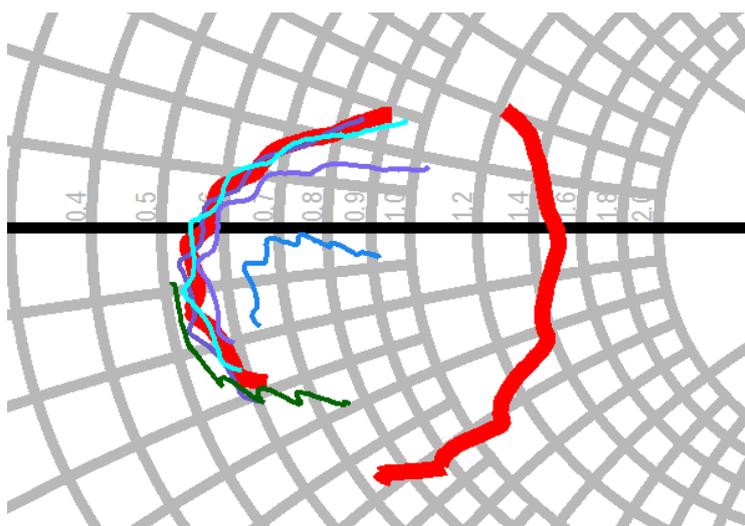


Figura 4.54: Medidas del movimiento de los tornillos combinados para vía 4.5mm

En este caso, la posición de tornillos que produce menor acoplo realiza un movimiento hacia impedancias imaginarias mayores (inductivo) es el de mayor acoplo crea un efecto capacitivo, tal y como ocurre en el apartadp [4.5.3.3].

Los valores de adaptación para las posiciones elegidas para ilustrar este apartado son los siguientes:

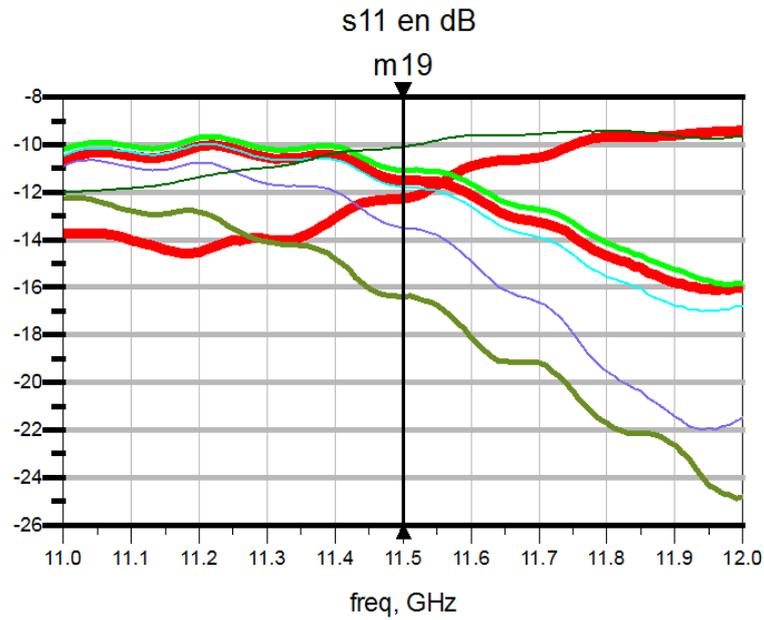


Figura 4.55: Adaptación para las posiciones de los tornillos escogidas para 4.5 mm

En la siguiente gráfica se puede apreciar el rango de acoplo obtenido para este conector, señalando en rojo el máximo y mínimo acoplo conseguido para la combinación de tornillos:

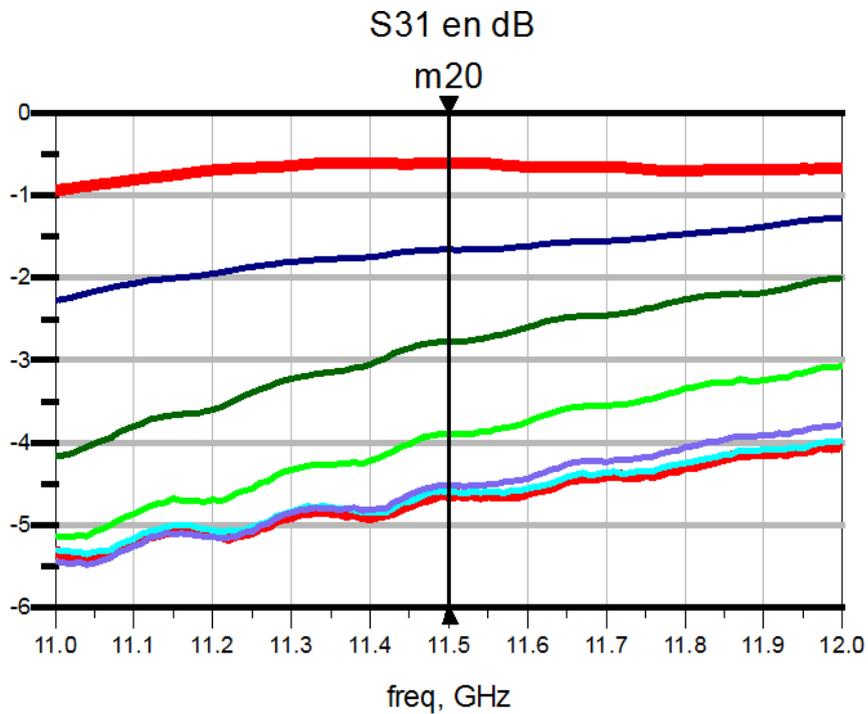


Figura 4.56: Valores de acoplo para las posiciones escogidas de los tornillos combinados para vía 4.5mm

Las fases producidas para las posiciones de tornillos escogidas para explicar este apartado son las que aparecen en la siguiente figura:

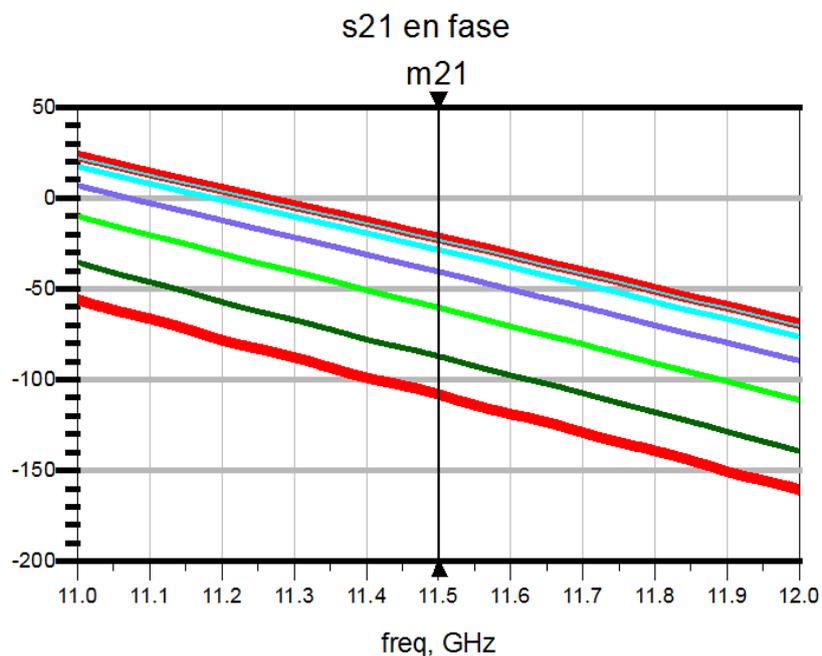


Figura 4.57: Fases para las posiciones escogidas de tornillos combinados para vía 4.5mm

En este caso el desfase producido entre los valores de mayor y menor acoplo es mayor que en los apartados anteriores. Para la vía de 4.5mm aparece un desfase de unos 90 grados.

Para el caso de los tornillos combinados se obtuvieron los siguientes resultados de rango de acoplo:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-4.64 dB	-22.03 grados	Tornillo de salida a 0.7mm y Tornillo central a 0.7mm
Valor máximo de acoplo	-0.61 dB	-108,16 grados	Tornillo de salida a 4.9 mm y tornillo central a 2.1mm
Rango de variación	4.03 dB	86.13 grados	-

Tabla 4.9: Valores de rango de acoplo medidos en la anecoica con tornillos combinados para vía 4mm

4.6 Comparativa entre simulación y medidas

Una vez realizadas todas las medidas en la cámara anecoica para las distintas vías y los tornillos de sintonía se llevó a cabo un estudio comparativo entre simulación y medidas que viene recogido en la siguiente tabla. Hay que tener en cuenta que las diferencias significativas que aparecen entre los valores simulados y medidos se puede deber a la fabricación de los conectores comentado en el apartado [4.5.2.2]. Como bien se comentó, el corte manual del teflón y del alma de los conectores no da la precisión necesaria para que la longitud de la vía de acoplo simulada y del

conector medido sea iguales y, a estas frecuencias, la estabilidad de los resultados experimentales respecto a los simulados se resienten notablemente. Sin embargo, aunque los valores de medición sean mayores, los rangos de acoplo para cada vía entre simulación y medida son similares. Por lo tanto, se puede deducir que la longitud del alma introducida dentro de la estructura era mayor que la longitud simulada.

	Resultados simulación (dB)			Resultados medidas (dB)		
	Rango (dB)	Valor mínimo (dB)	Valor máximo (dB)	Rango (dB)	Valor mínimo (dB)	Valor máximo (dB)
Vía 300	2.06	-10.05	-7.99	3.87	-6.87	-2.89
Vía 350	3.2	-8.22	-5.2	3.97	-6.73	-2.76
Vía 400	1.69	-6.65	-4.96	4.1	-5.37	-1.27
Vía 450	4.37	-5.46	-1.9	4.03	-4.64	-0.61
Total	8.26			6.4		

Tabla 4.10: Comparativa entre valores simulados y medidos para los distintos conectores

Como se puede observar, en el caso de las medidas experimentales del prototipo se han conseguido valores de acoplo más altos, igual que rangos de acoplo más amplios. Sin embargo, los valores nominales son mayores, por lo que el rango total de acoplo conseguido de forma experimental es de **6.4 dB** mientras que el simulado es de **8.26 dB**.

5. GUÍA RELLENA PARCIALMENTE DE DIELECTRICO

5.1 Introducción

Una vez concluido el estudio para el elemento unitario con vía se propuso realizar un segundo prototipo con una línea de acoplo respetando los valores nominales conseguidos en el diseño de elemento unitario con vía del capítulo 4.

Para este prototipo se ha realizado un proyecto en CST que cuenta con una vía o conector de 50Ω que se une a la línea de acoplo por la parte superior, un sustrato interior para posicionar la línea de acoplo dentro de la guía, el propio aire dentro de la guía y los tornillos de sintonía. En la siguiente figura se puede observar la estructura:

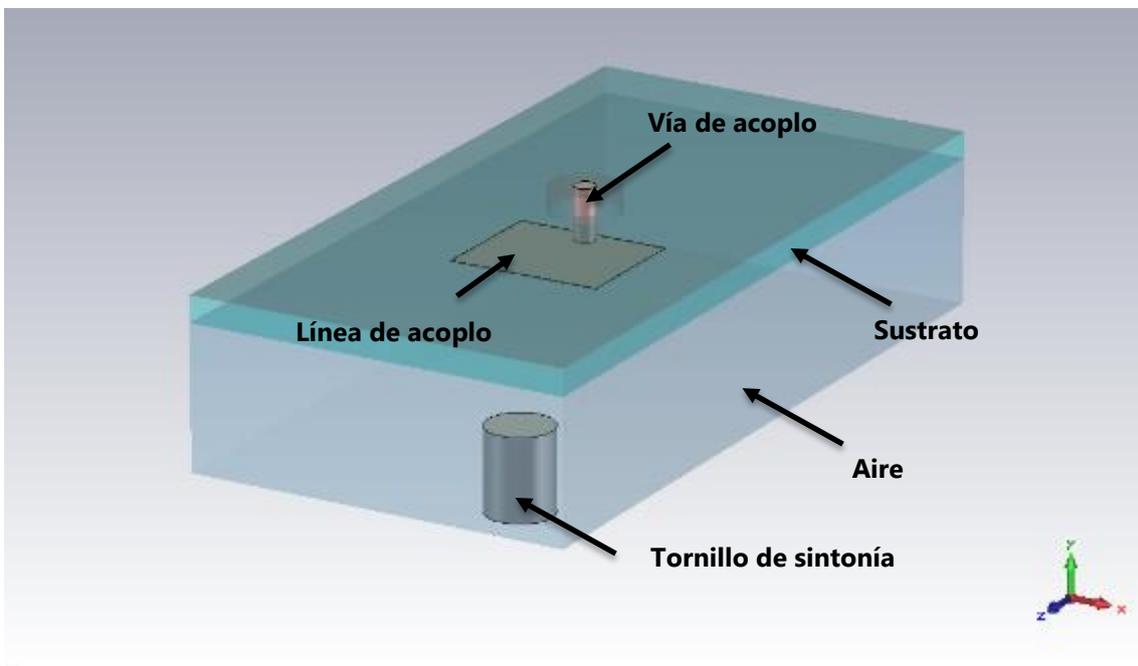


Figura 5.1: Estructura del elemento unitario con línea de acoplo

En este caso la vía o el conector de 50Ω recubierto de teflón ($\epsilon_r=2$ sin pérdidas) atraviesan el sustrato hasta unirse con la línea de acoplo situada en el interior de la parte superior de guía de onda. A continuación se puede ver una imagen más detallada de esta unión:

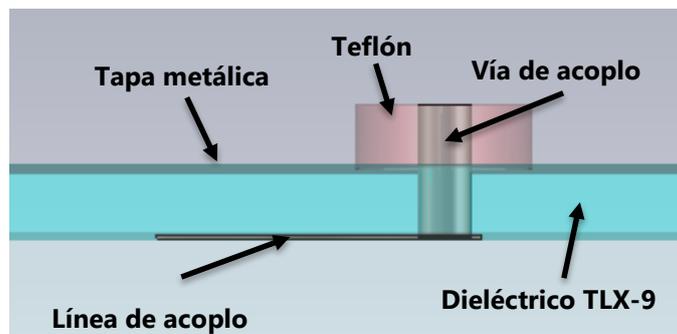


Figura 5.2: Vista frontal de la línea de acoplo

Como en el caso del diseño presentado en el capítulo 3 se ha llevado a cabo un modelo de tres puertos para caracterizar el elemento unitario. De esta forma, podemos conocer con exactitud el valor de los parámetros de adaptación ($S_{1,1}$), de transmisión ($S_{2,1}$) y de acoplo ($S_{3,1}$).

En este capítulo del documento se ha necesitado utilizar un material dieléctrico, como bien se ha explicado en el párrafo anterior, para situar la línea de acoplo dentro de la guía. Debido a esto el modo fundamental TE_{10} que se propagaría en una guía de onda de estas características se convierte en un modo híbrido con ciertas peculiaridades.

5.2 Carta de modos

Sobre la guía de onda rellena de aire estudiada en el apartado 4 de este documento se introducía una estructura coaxial vertical que, en función de su penetración dentro de la guía de onda (dirección y), conseguía acoplar mayor cantidad de señal. En este caso se introduce en la parte superior del interior de la guía un material dieléctrico que se extiende por todo el ancho de la misma, siendo posicionado en la parte superior. Al tener tanto dieléctrico como aire dentro de la guía, aparece un modo híbrido que permite acoplar mayor cantidad de señal aumentando las dimensiones de la estructura acopladora pero manteniendo fija la longitud de penetración del coaxial. El dieléctrico escogido es el TLX-9 de constante dieléctrica 2,5 y espesor de 1,575mm.

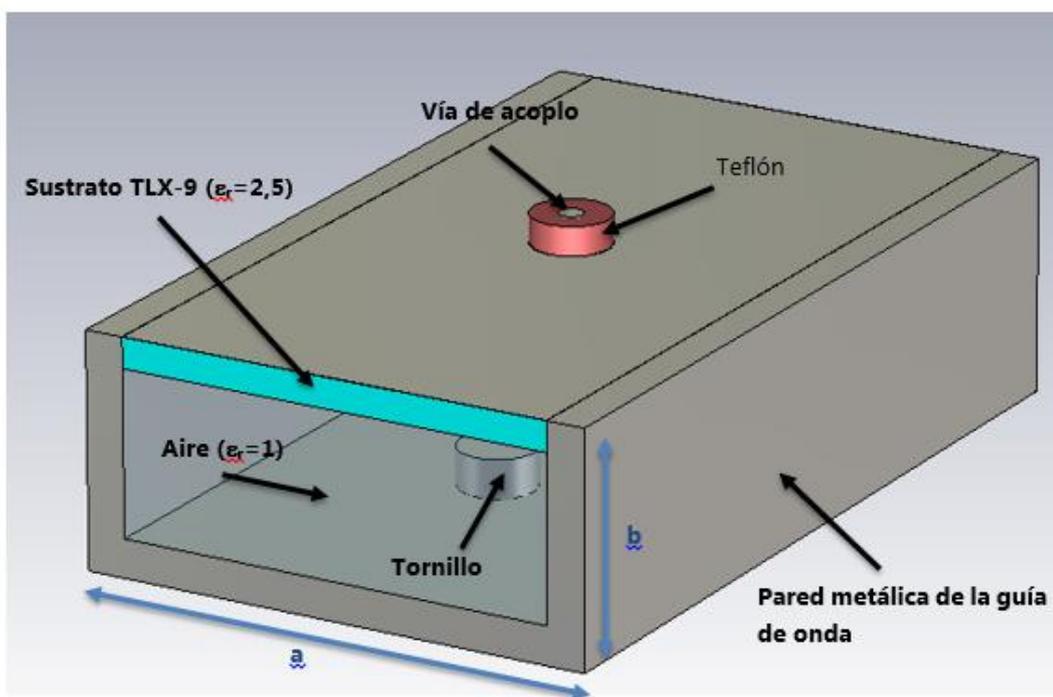


Figura 5.3: Guía WR90 rellena de aire y dieléctrico

Precisamente por el uso del dieléctrico dentro de la guía la constante ϵ_{reff} de la misma varía. De esta forma, en vez de tener un modo puro (TE o TM) aparece lo llamado Modo Híbrido o LSM. En el caso de este elemento unitario el modo híbrido propagado se denomina LSM^y, ya que la discontinuidad se produce en el eje y (la superficie de contacto entre los dos materiales, aire y dieléctrico, es perpendicular al eje y). Este nuevo modo híbrido implica que la componente $E_z \neq 0$, lo que permite el acoplamiento de señal hacia el exterior de la guía aumentando la dimensión z del parche de acoplo. Precisamente por el uso del dieléctrico dentro de la guía se define una

nueva constante dieléctrica efectiva (ϵ_{reff}) dentro de la guía. Para calcular la nueva ϵ_{reff} , llamada ϵ_{reff} se sigue el procedimiento descrito en [4]. De esta forma, el nuevo valor de la ϵ_{reff} es de **1,177**, quedando la nueva frecuencia de corte del modo LSM^y_{10} aplicando la fórmula (3.1) de **6.062** GHz. De esta forma, la carta de modos para la guía de onda con dos dieléctricos, es:

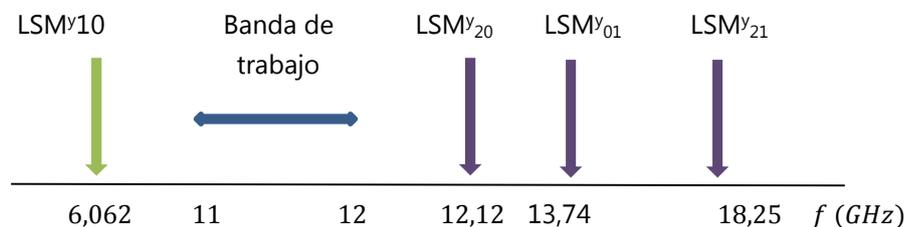


Figura 5.4: Carta de modos monomodo para la WR-90 con $\epsilon_{\text{reff}}=1,17$

Como podemos apreciar, se sigue trabajando en la banda monomodo, sin embargo el modo LSM^y_{20} está demasiado cercano a la banda de trabajo. En este proyecto, y por simplicidad, no se ha tratado de modificar las dimensiones de la guía para alejar este modo superior pero debería dejarse un cierto ancho de banda de guarda para asegurar que no se monte el primer modo superior de la estructura.

La estructura de este nuevo prototipo consta de una guía de onda rellena parcialmente dieléctrico (TLX-9 de $\epsilon_r=2.5$) sobre el cual, en su cara inferior, se sitúa un parche o línea de acoplo que atraerá la señal hasta la vía para enviarla al parche que iría conectado en la parte superior. La vía de acoplo atraviesa el sustrato hasta llegar a la línea de acoplo, estando recubierta por teflón en la parte superior. A continuación se puede ver una figura que describe esta parte de la estructura:

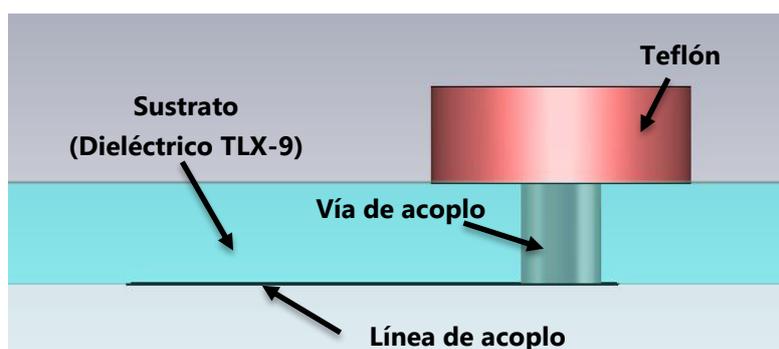


Figura 5.5: Elemento con vía hasta la línea de acoplo atravesando el sustrato

5.3 Posiciones de los tornillos

Para las posiciones de los tornillos en el caso de las líneas de acoplo se realizó un estudio de posiciones tal y como se presentó en el capítulo 4. Las posiciones de variación fueron las mismas que en el capítulo ya mencionado: desde -7mm a 7mm. Las posiciones escogidas fueron las de a 3mm de la posición central hacia el puerto 2 y a -5mm, de la posición central del puerto 1.

Con las posiciones escogidas el esquema del elemento unitario con las posiciones de los tornillos es la siguiente:

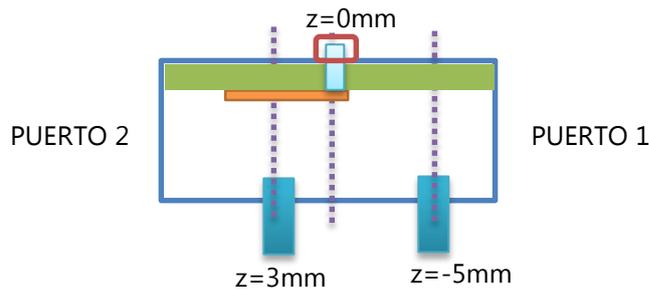


Figura 5.6: Esquema de la posición óptima de los tornillos

Una vez escogidas las posiciones de los tornillos optimizadas para la línea de acoplo de 4.5 mm se procedió al estudio detallado de cada línea de acoplo correspondiente con estas posiciones de tornillos de sintonía. Para este capítulo se nombrará al tornillo situado en la posición $z=3\text{mm}$ tornillo central y al situado en la posición $z=-5\text{mm}$ tornillo de entrada. Igual que en el capítulo 4 para el caso de las vías se ha podido observar un problema con la reflexión provocado por la introducción de tornillos de forma vertical irrumpiendo así con la propagación del modo fundamental LSM_{10}^y , produciéndose así ese desfase. A continuación se puede ver el efecto que se produce por cada tornillo:

- $Z=-5\text{mm}$ (tornillo de entrada)

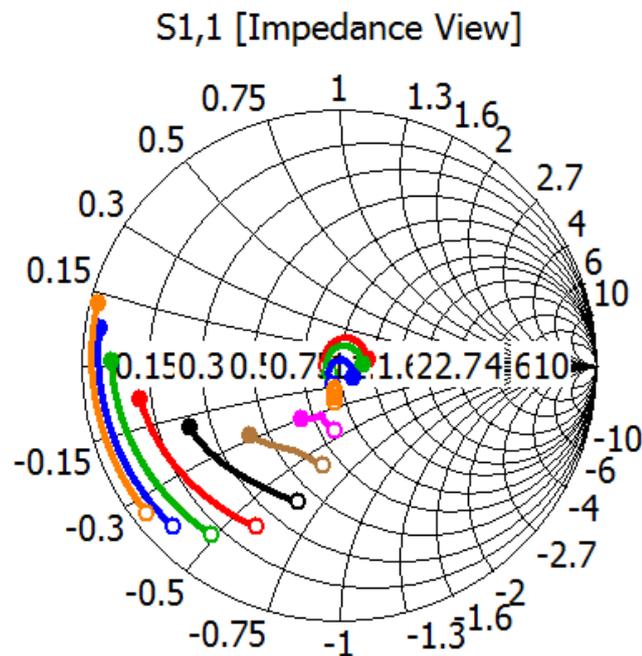


Figura 5.7: Movimiento en Carta de Smith del tornillo para la posición $z=-5\text{mm}$

En este caso podemos apreciar un movimiento de impedancias en carta hacia impedancias imaginarias menores. Esto provoca un efecto capacitivo que se tratará de compensar con un segundo tornillo.

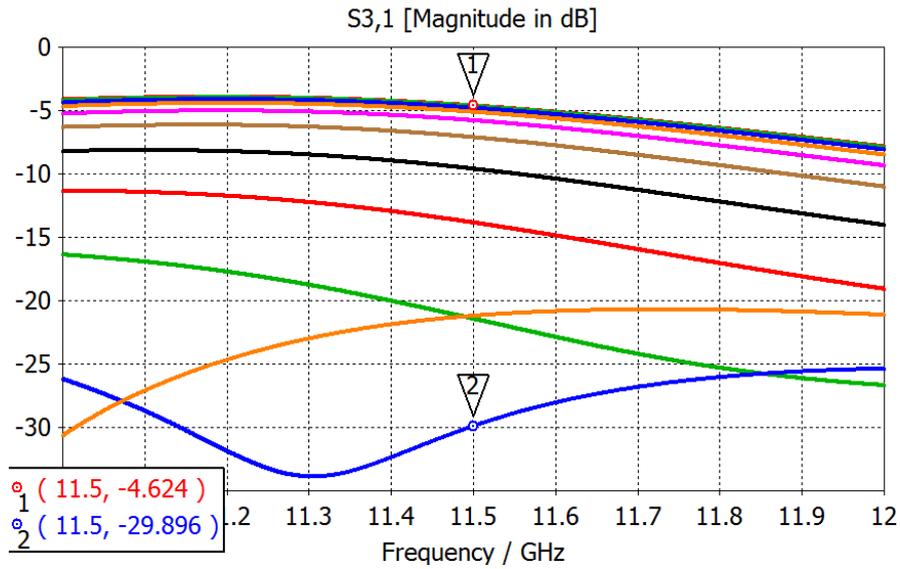


Figura 5.8: Rango de acoplo para el tornillo situado en la posición $z=-5\text{mm}$

En este caso podemos apreciar que el valor del acoplo varía mucho conforme se introduce el tornillo. En este caso el valor del acoplo disminuye conforme introducimos el tornillo.

- $Z= 3\text{mm}$ (tornillo central)

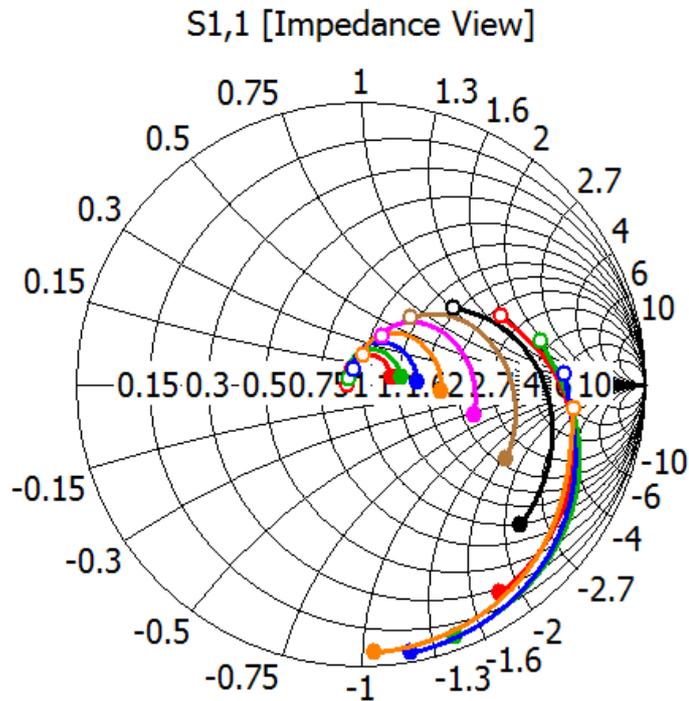


Figura 5.9: Movimiento en Carta de Smith del tornillo para la posición $z=3\text{mm}$

Como se puede ver en este caso el movimiento se realiza hacia valores reales mayores aunque en los extremos de la banda se consiguen valores imaginarios altos (inductivo). De esta forma, en el centro de la banda, se consigue compensar el efecto producido por el tornillo anterior.

A continuación se puede ver el rango de acoplo que se produce en la banda de trabajo con este tornillo:

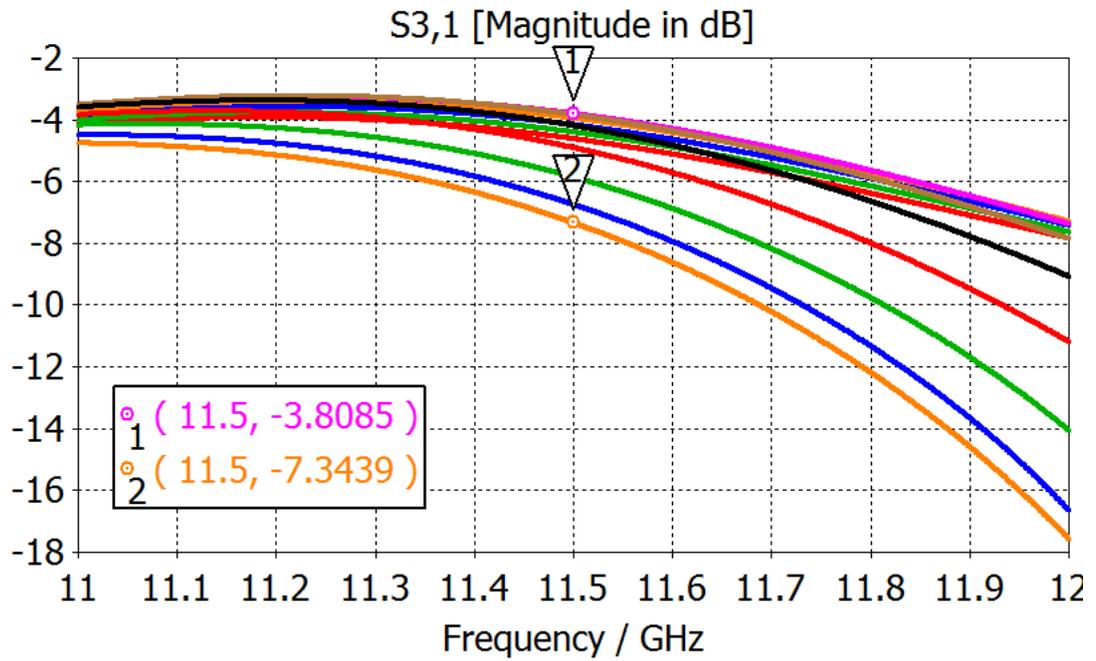


Figura 5.10: Rango de acoplo para el tornillo situado en la posición z=3mm

En este caso los valores de acoplo varían menos en comparación con el tornillo anterior. Por esto, es posible conseguir modificar la adaptación sin variar el acoplo.

En la siguiente gráfica se puede apreciar la diferencia de fase producida con estos tornillos:

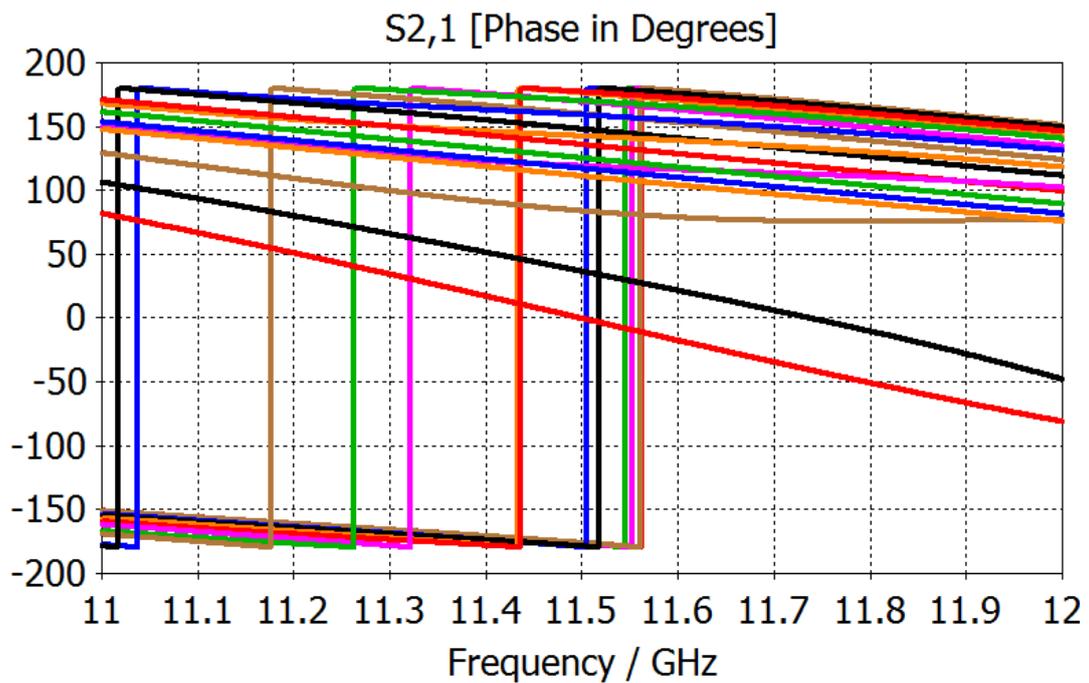


Figura 5.11: Desfase de todos los tornillos para guía rellena parcialmente de dieléctrico

Una vez estudiado el comportamiento individual de cada tornillo se procedió de igual manera que en el apartado [4.3]. Se escogió una posición fija del tornillo de entrada (en este caso, igualmente, 1.4mm de longitud de penetración de tornillo) variando el tornillo central.

- Tornillo de entrada a 1.4mm y tornillo central variable

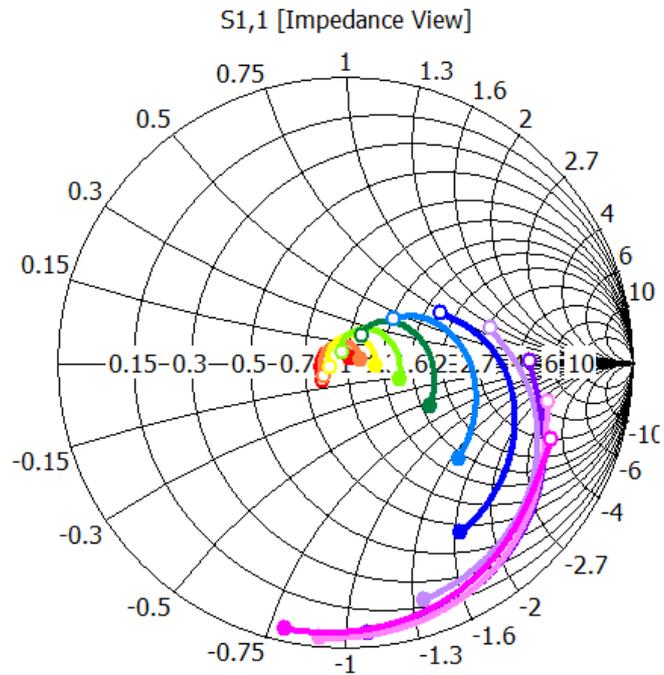


Figura 5.12: Efecto que produce el tornillo central sobre el tornillo 1 para guía rellena parcialmente de dieléctrico

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el efecto que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada crea un movimiento en carta hacia valores imaginarios mayores, creando un efecto inductivo marcado por el tornillo central.

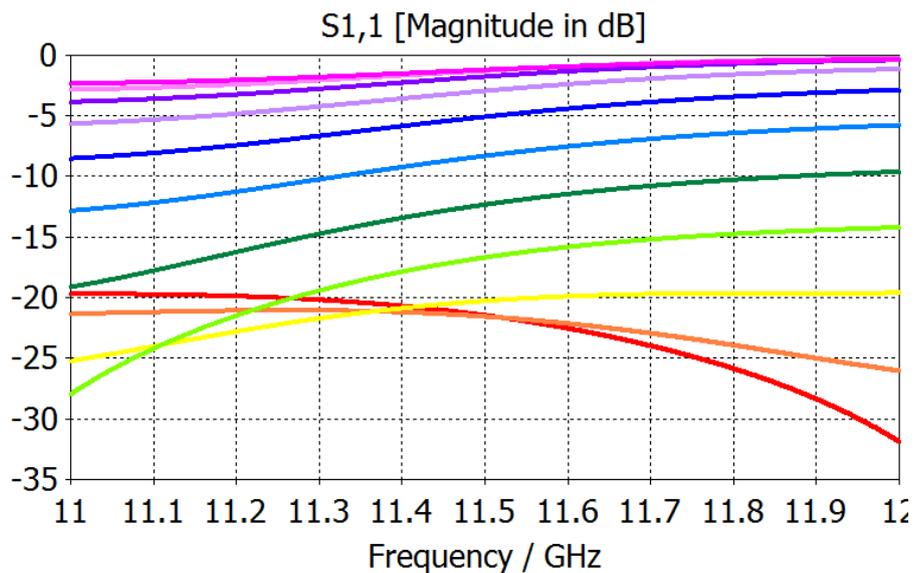


Figura 5.13: Valor de adaptación en magnitud que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en línea de acoplo

Como se puede ver, conforme se introduce el tornillo central la adaptación va disminuyendo hasta conseguir una desadaptación total.

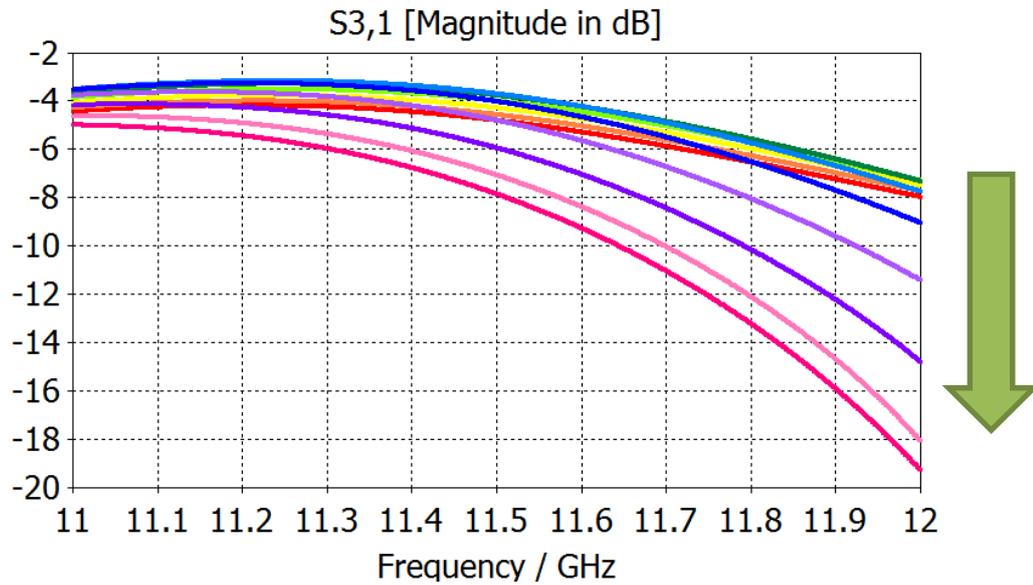


Figura 5.14: Valor de acoplo en magnitud que produce el tornillo central sobre el tornillo de entrada en la línea de acoplo

En este caso, hasta una cierta posición de penetración de tornillo, en este caso, hasta 3,5mm el acoplo sube. A partir de este valor de penetración dentro de la guía de onda el acoplo disminuye. Esto es debido a que el valor de desadaptación para estas posiciones es muy alto y la estructura no es capaz de acoplar.

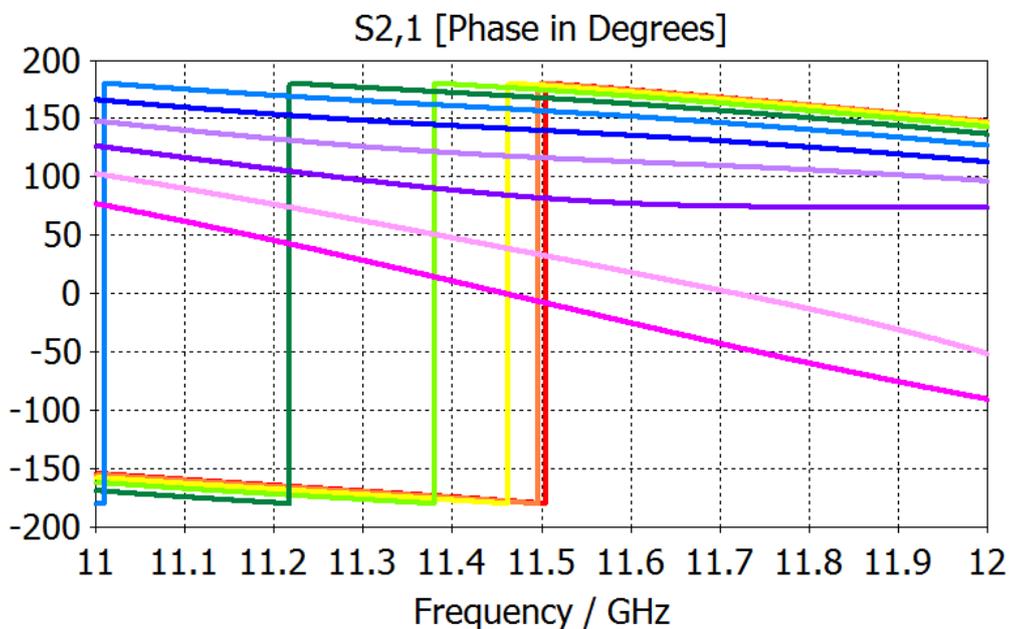


Figura 5.15: Valores de fase producidos por el tornillo central sobre el tornillo de entrada en la línea de acoplo

En este caso, para valores de penetración menores se aprecia un valor de fase positivo alto, mientras que para valores mayores de penetración la fase es menor.

5.4 Elemento unitario con línea de acoplo

Para la elección de las distintas dimensiones de las líneas de acoplo se tuvieron en cuenta los valores nominales conseguidos en el capítulo 4 con el tamaño de las vías utilizados. En la siguiente tabla se recogen los valores del tamaño de la línea de acoplo correspondiente a las distintas vías:

Línea de acoplo		Vía
Sección_x	Sección_z	Tamaño de la vía
9.0 mm	5.17 mm	3.0 mm
9.0 mm	5.91 mm	3.5 mm
9.0 mm	7.54 mm	4.0 mm
12.0 mm	7.34 mm	4.5 mm

Tabla 5.1: Tamaños de las líneas de acoplo

5.4.1 Línea de acoplo equivalente a vía 3.0mm

En los siguientes apartados se procederá a realizar el mismo estudio que en los apartados [4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4] del capítulo anterior. Para ello se procederá a mostrar el movimiento en carta, adaptación, acoplo y fase para cada línea de acoplo.

A continuación se puede apreciar el movimiento en carta de la combinación de los tornillos para esta línea de acoplo:

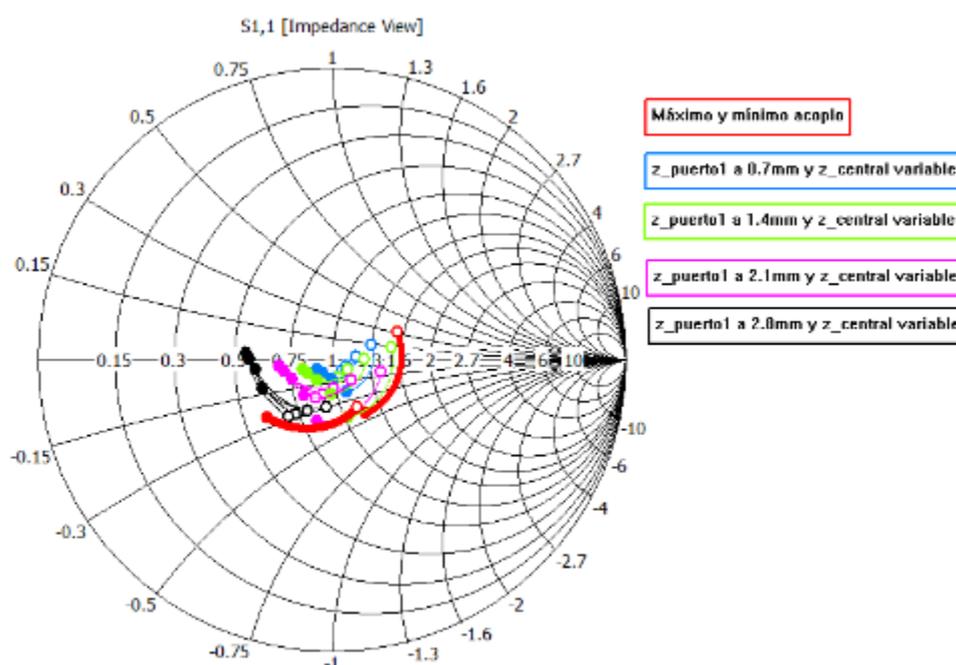


Figura 5.16: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 3.0 mm

Como se puede apreciar se realiza, para posiciones iniciales de tornillos, un movimiento hacia impedancias imaginarias mayores (efecto inductivo) y, conforme se introducen los tornillos con longitudes de penetración mayores se produce un movimiento hacia impedancias imaginarias menores (efecto capacitivo).

En la siguiente gráfica se puede ver el valor de la adaptación para cada posición combinada de tornillos:

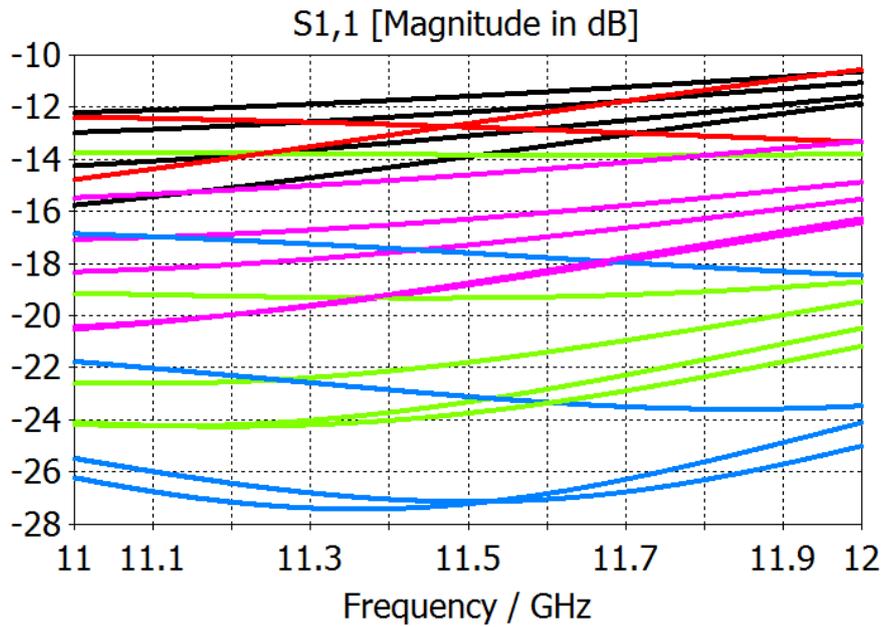


Figura 5.17: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 3.0mm

A continuación se puede apreciar el rango de acoplo producido por la combinación de los tornillos:

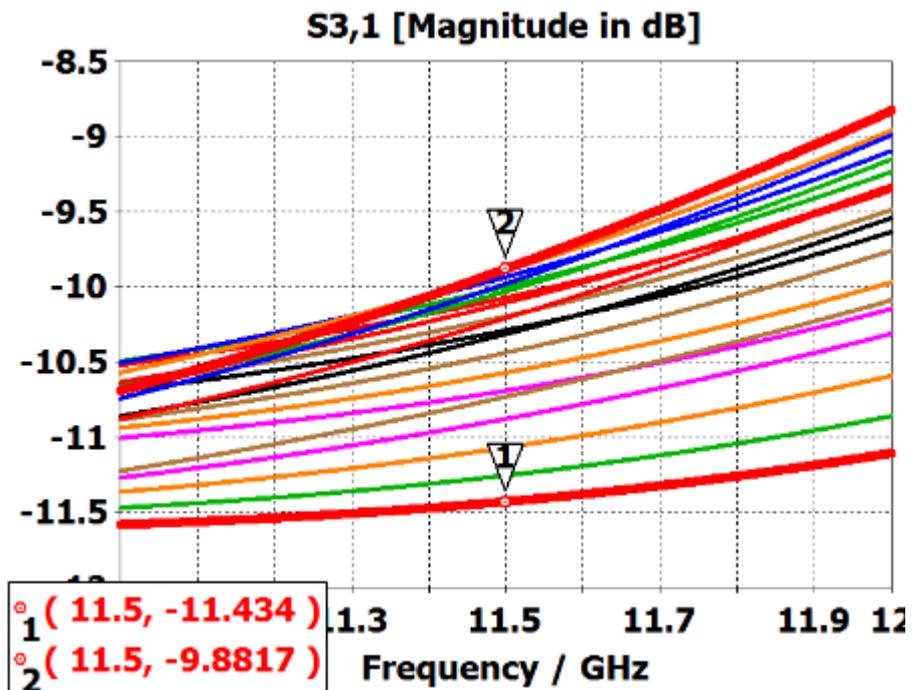


Figura 5.18: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.0mm

El desfase que se produce al ir introduciendo los tornillos se puede apreciar en la siguiente imagen:

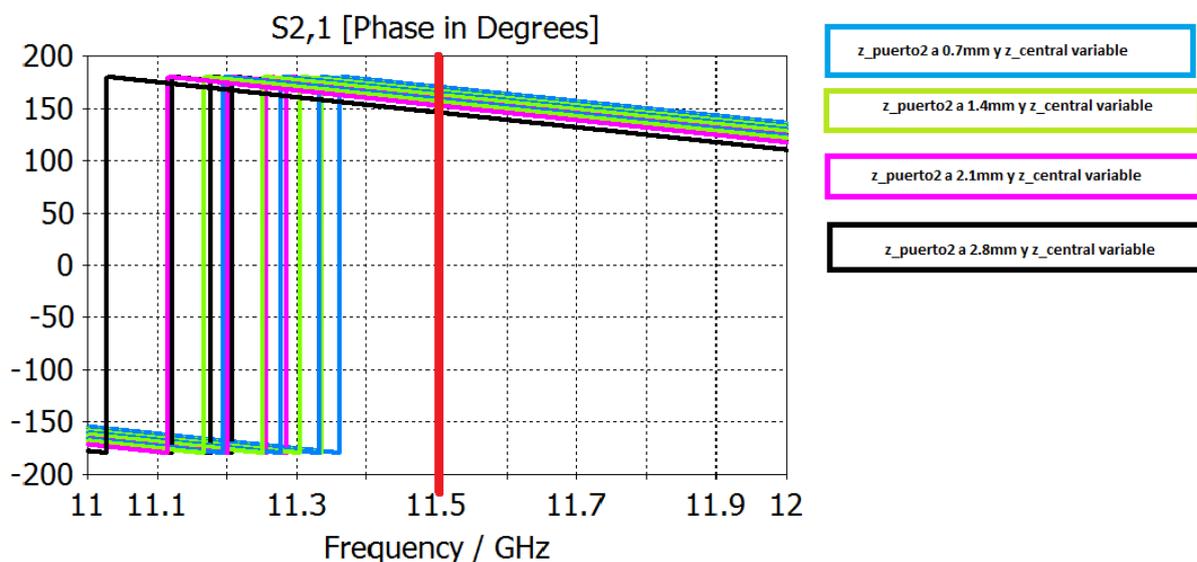


Figura 5.19: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 3.0mm

En el caso de la línea de acoplo, al contrario que con su vía equivalente, todas las fases de cada posición de tornillo se encuentran en valores positivos. El desfase producido por la introducción de tornillos en este caso es de 24.4 grados. Esto supone una diferencia notable con respecto a su equivalente en vía, donde el desfase para este caso se ha reducido bastante.

Para la combinación de tornillos tornillo central y tornillo de salida se consiguieron los siguientes resultados de rango de acoplo para valores por debajo de -10dB:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-11.43 dB	160.35 grados	Tornillo de entrada a 2.8mm y tornillo central a 0 mm
Valor máximo de acoplo	-9.88 dB	158.37 grados	Tornillo de entrada a 0.7mm y tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	1.55 dB	1.98 grados	-

Tabla 5.2: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.0mm

5.4.2 Línea de acoplo equivalente a vía 3.5mm

Para este apartado se realizó el mismo estudio que en el apartado anterior, es decir, movimiento en carta, adaptación, rango de acoplo y fase de transmisión.

En la siguiente figura se puede apreciar el movimiento en carta de los tornillos combinados:

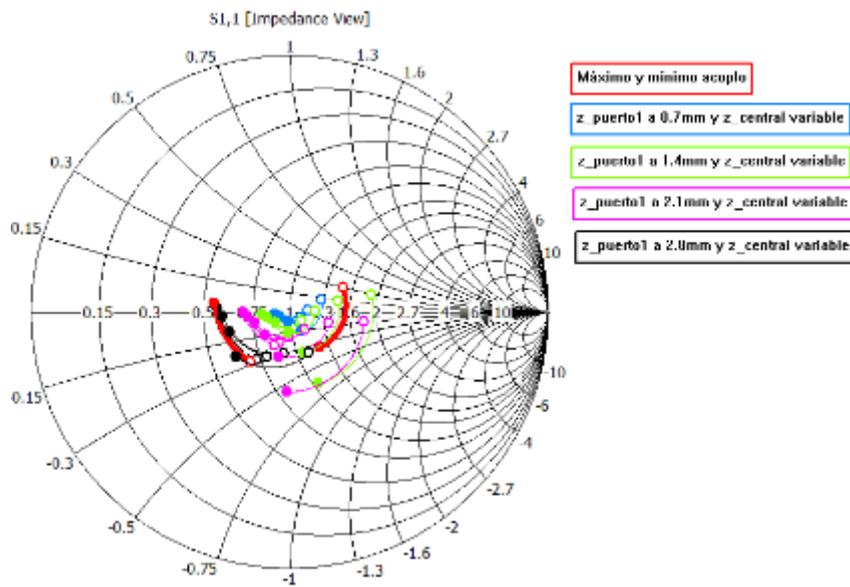


Figura 5.20: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acople como vía 3.5 mm

En este caso también se aprecia un movimiento en torno al centro de la carta. La tendencia para longitudes de penetración de tornillo menores es hacia impedancias imaginarias mayores (inductivo) y para posiciones de tornillo posteriores el movimiento es hacia impedancias imaginarias menores (capacitivo).

A continuación se puede ver la adaptación de los tornillos combinados:

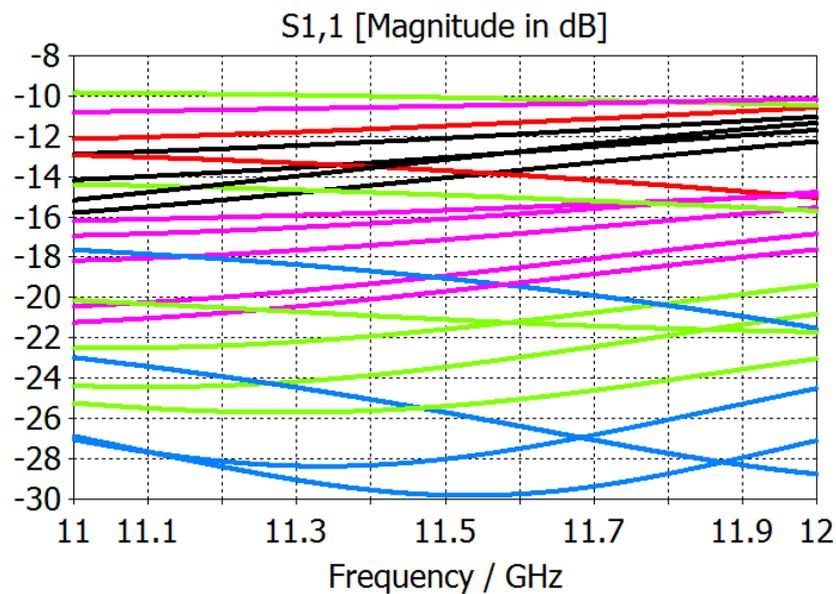


Figura 5.21: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acople como vía 3.5mm

En la siguiente imagen se puede observar el rango de acoplo conseguido con la combinación de los tornillos:

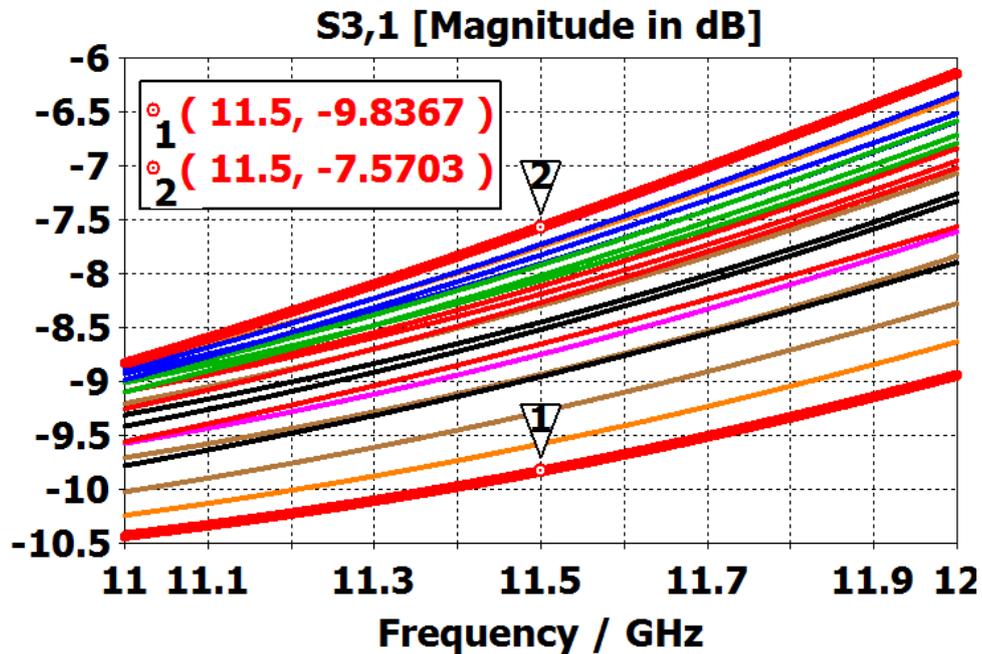


Figura 5.22: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.5mm

En el caso de esta línea de acoplo los desfases producidos con los siguientes:

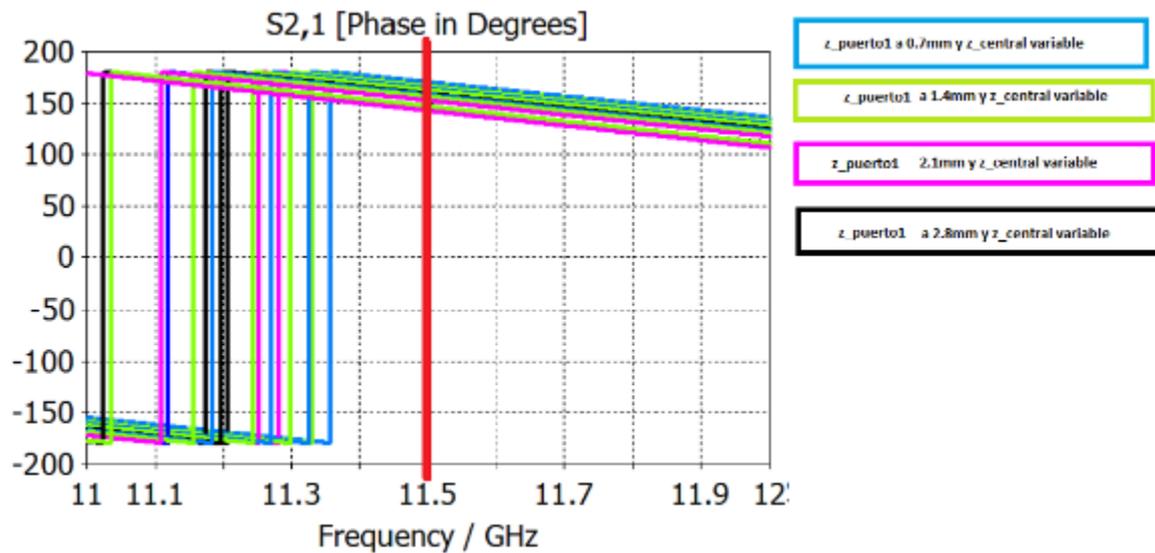


Figura 5.23: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 3.5mm

Como ocurría en el caso anterior todos los valores de fase son positivos, produciéndose solo un desfase de 27,6 grados. Esto también supone una mejora sustancial respecto a su equivalente en vía.

Para la combinación dentro de este caso se ha conseguido un rango de acoplo de:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-9.83 dB	160.20 grados	Tornillo de entrada a 2.8mm y tornillo central a 0mm
Valor máximo de acoplo	-7.6 dB	157.58 grados	Tornillo de entrada a 0.7mm y tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	2.23 dB	2.62 grados	-

Tabla 5.3: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 3.5mm

5.4.3 Línea de acoplo equivalente a vía 4.0mm

Se realizó el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para estudiar el efecto de la combinación de tornillos en esta línea de acoplo.

A continuación se puede ver el movimiento en carta que generan estos tornillos:

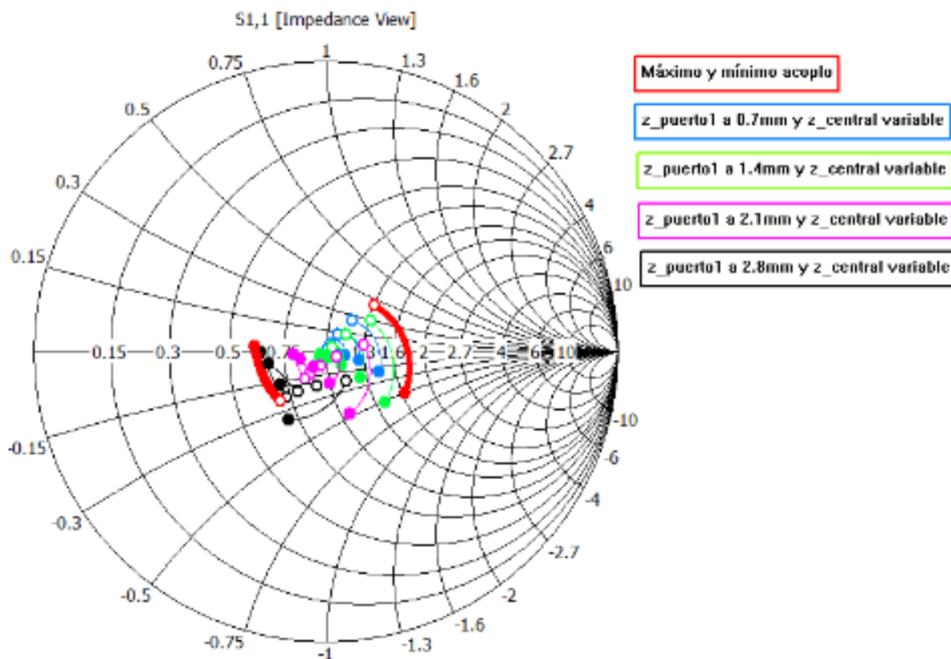


Figura 5.24: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 4.0 mm

En este caso se produce un movimiento hacia impedancias reales mayores e impedancias imaginarias mayores (inductivo) dentro de la banda de trabajo para posiciones de tornillo de longitud de penetración menores. Para posiciones de mayor penetración dentro de la guía se tiende, como es el caso del tornillo central a 2.8mm de penetración, hacia impedancias imaginarias menores (capacitivo).

A continuación se puede ver la adaptación para las posiciones de los tornillos:

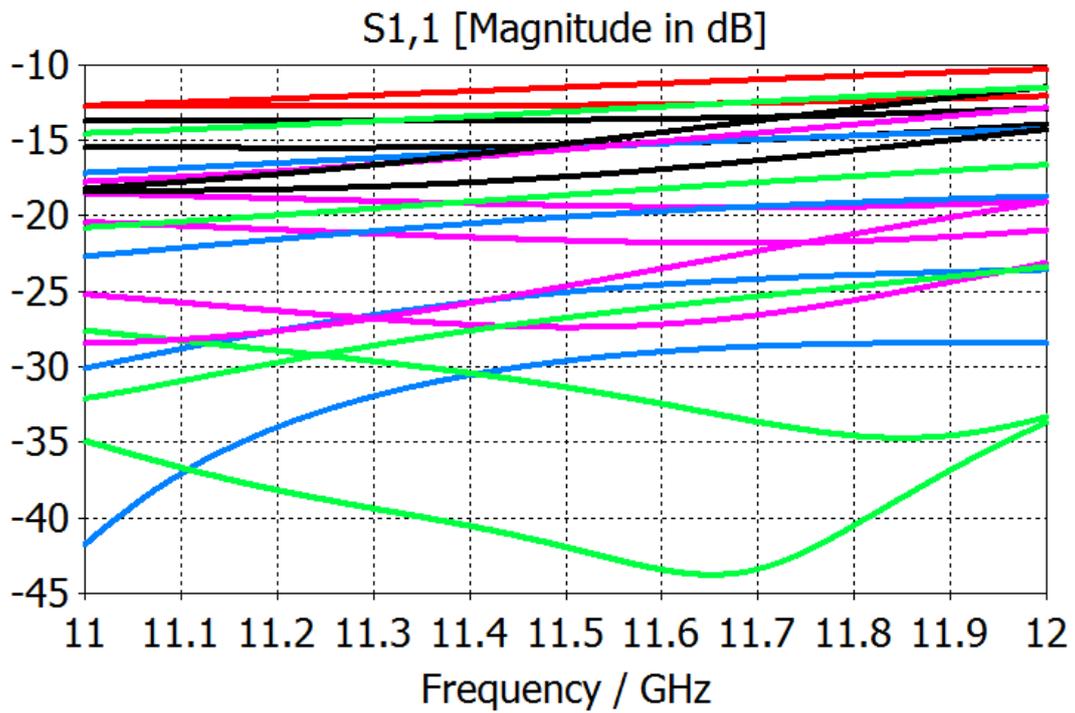


Figura 5.25: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 4.0mm

En la siguiente gráfica se puede apreciar el rango de acoplo conseguido con esta combinación de tornillos bajo el umbral de adaptación:

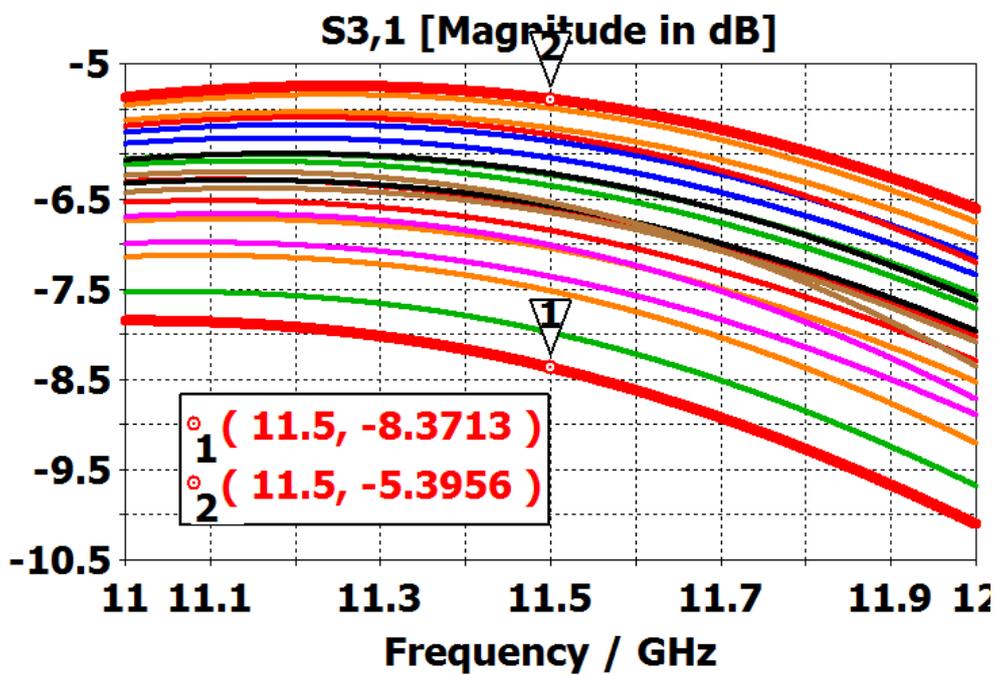


Figura 5.26: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.0 mm

Para esta línea de acoplo es desfase producido se puede apreciar en la siguiente imagen:

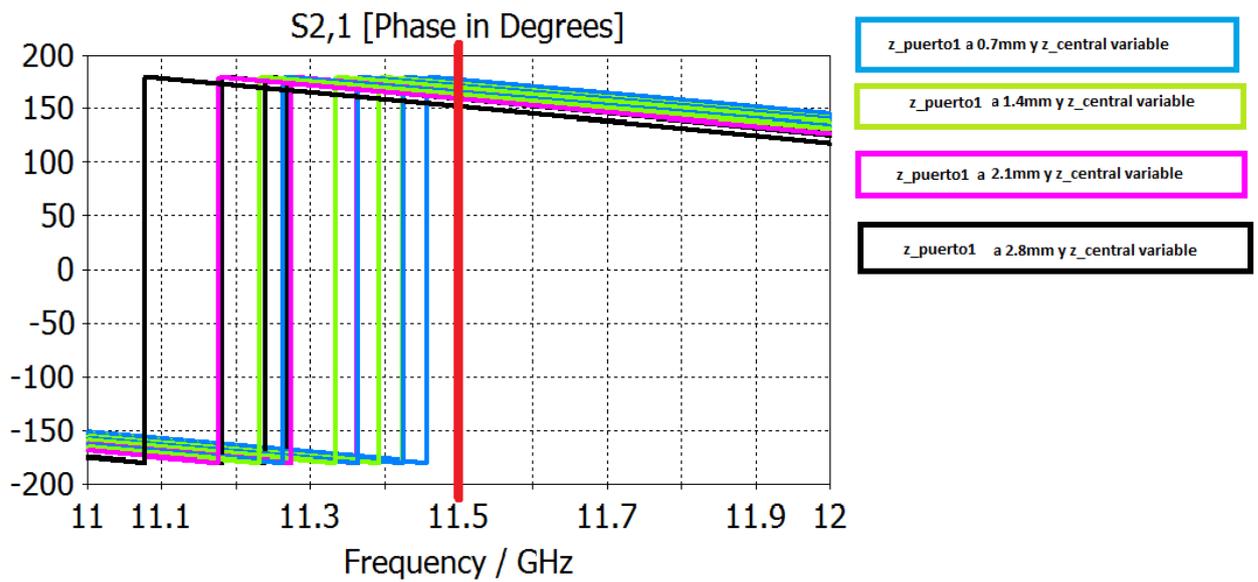


Figura 5.27: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 4.0mm

Como ha ocurrido en los casos anteriores con línea de acoplo la fase de todas las posiciones de los tornillos es positiva, dejando un desfase de 25,35 grados.

En el caso de este tamaño de línea de acoplo se ha conseguido, para la combinación de tornillos, un rango de:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-8.37 dB	165.10 grados	Tornillo de entrada a 2.8mm y tornillo central a 0mm
Valor máximo de acoplo	-5.39 dB	165.36 grados	Tornillo de entrada a 0.7mm y Tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	2.98 dB	0.26 grados	-

Tabla 5.4: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.0mm

5.4.4 Línea de acoplo equivalente a vía 4.5mm

El movimiento en carta generado por las posiciones de los tornillos combinados bajo el umbral de adaptación es el que aparece en la siguiente figura:

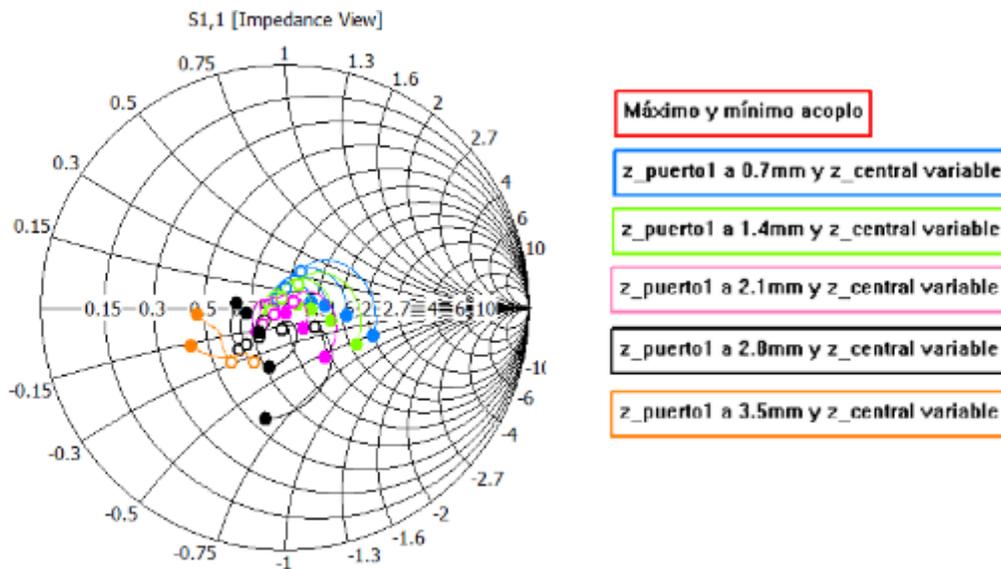


Figura 5.28: Movimiento en carta de la introducción del tornillo central fijando el tornillo de entrada para línea de acoplo como vía 4.5 mm

En este caso aparece un gran rizado alrededor del centro de la carta. Para valores pequeños de longitud de tornillo dentro de la guía el movimiento tiende hacia impedancias reales. Para el caso de longitudes mayores dentro del tornillo se aprecia un movimiento hacia impedancias imaginarias menores (capacitivo).

A continuación se pueden ver los valores de adaptación de estas posiciones de tornillos:

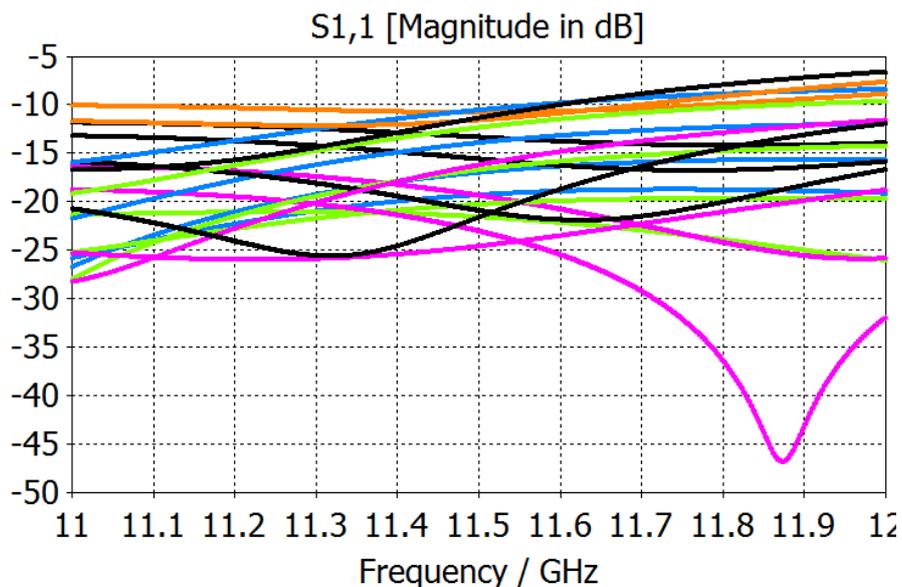


Figura 5.29: Valores de adaptación de tornillos combinados para línea de acoplo como vía 4.5mm

En este caso el rango de acoplo conseguido con los tornillos es el que aparece en la siguiente gráfica:

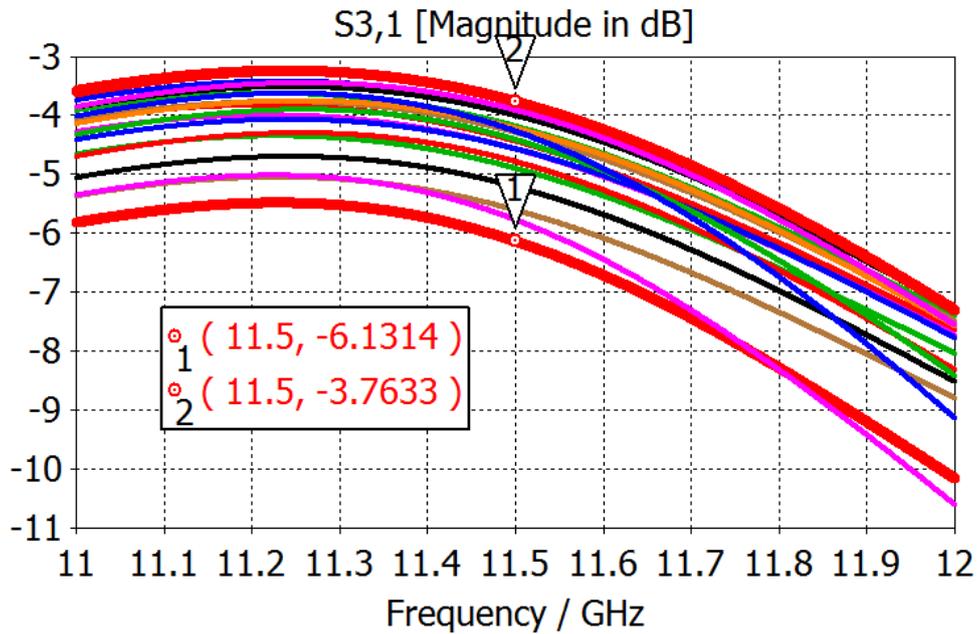


Figura 5.30: Rango de acoplo para los tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.5 mm

En el caso de la línea de acoplo como vía de 4.5mm hay un único valor de fase negativa, que corresponde a los dos primeros valores de longitud del tornillo dentro de la guía para la segunda posición del tornillo del puerto, es decir, el tornillo del puerto introducido 1.4mm y el tornillo central introducido 0.7mm. Para el resto de longitudes de penetración del tornillo hay un desfase entre ellas (líneas de cada color) de unos 10 grados, dando por lo tanto un valor de desfase positivo total de unos 25 grados. Se puede ver el efecto a continuación:

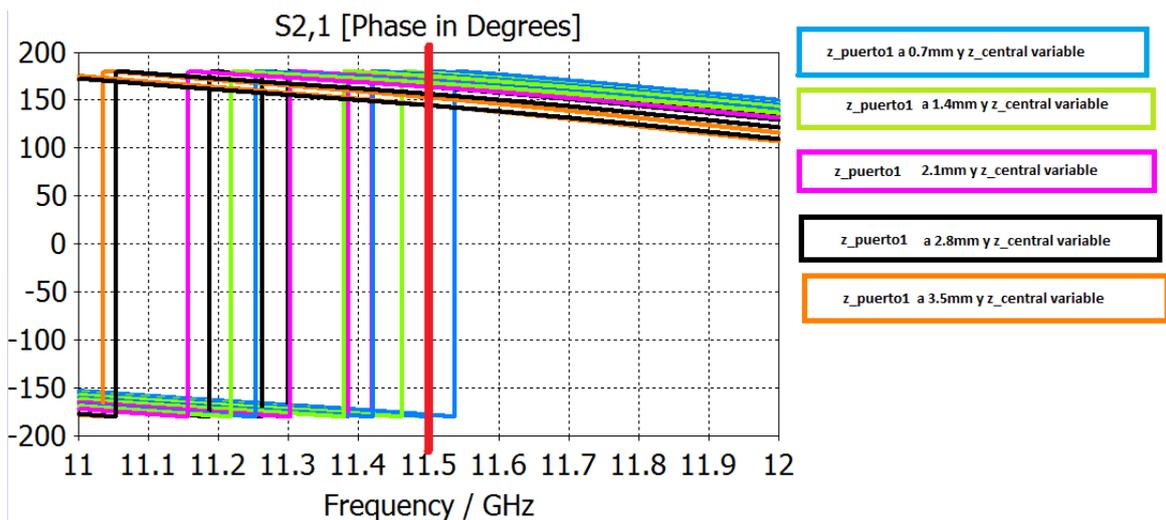


Figura 5.31: Desfase para los tornillos combinados para la línea de acoplo como vía 4.5mm

En el caso de la línea de acoplo como vía 4.5mm se ha conseguido un rango de acoplo de:

Configuración de tornillos	Nivel de acoplo	Fase de cada posición	Posiciones de los tornillos para cada valor
Valor mínimo de acoplo	-6.13 dB	152.49 grados	Tornillo de entrada a 3,5 mm y tornillo central a 2,1mm
Valor máximo de acoplo	-3.76 dB	169.36 grados	Tornillo de entrada a 0,7mm y Tornillo central a 2.8mm
Rango de variación	2.37 dB	16.87 grados	-

Tabla 5.5: Rango de acoplo para tornillos combinados en línea de acoplo como vía 4.5mm

5.5.5 Consideraciones finales del diseño del elemento unitario con línea de acoplo

Con el uso de las líneas de acoplo anteriores se ha conseguido un rango de acoplo total de 7.67 dB con el uso de tres líneas de acoplo:

- Línea de acoplo equivalente a vía 300: desde -11.43 hasta -9,88dBs.
- Línea de acoplo equivalente a vía 350: desde -9.83 hasta -7.6 dBs.
- Línea de acoplo equivalente a vía 450: desde -6,13 hasta -3,76 dBs.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los apartados [5.5.1, 5.5.2, 5.5.3 y 5.5.4] se obtiene un valor total de acoplo de tornillos combinados de:

Rango de acoplo	7.67 dB	Posiciones de los tornillos para cada valor	Línea de acoplo
Valor mínimo de acoplo	-11.43 dB	Tornillo de salida a 2.8mm y tornillo central a 2.8mm	Línea de acoplo equivalente a vía 300
Valor máximo de acoplo	-3.76 dB	Tornillo de salida a 0.7mm y tornillo central a 2.8 mm	Línea de acoplo equivalente a vía 450

Tabla 5.6: Valores de rango de acoplo y máximo y mínimo para combinación de tornillos

En la siguiente tabla se recogen los valores de acoplo y las posiciones de tornillo conseguidas para cada vía utilizada en los apartados [5.5.1, 5.5.2, 5.5.3 y 5.5.4]:

Línea de acoplo como vía 3,0mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-10	170,34	0,7
	-9,94	168,26	1,4
	-9,89	164,42	2,1
	-9,88	158,37	2,8
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-10,2	168,5	0,7
	-10,11	166,37	1,4
	-10,03	162,58	2,1
	-9,98	156,33	2,8
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-10,58	165,05	0,7
	-10,44	162,96	1,4
	-10,31	159	2,1
	-10,21	152,6	2,8
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-11,26	159,56	0,7
	-11,07	157,28	1,4
	-10,88	153,18	2,1
	-10,73	145,92	2,8

Línea de acoplo como vía 3,5mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,06	169,98	0,7
	-7,91	167,82	1,4
	-7,75	163,86	2,1
	-7,6	157,59	2,8
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,3	168,2	0,7
	-8,12	166,01	1,4
	-7,92	162,1	2,1
	-7,73	155,68	2,8
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-8,75	164,82	0,7
	-8,52	162,7	1,4
	-8,27	158,68	2,1
	-8,02	152,15	2,8
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-9,58	159,42	0,7
	-9,28	157,15	1,4
	-8,96	153,03	2,1
	-8,66	145,73	2,8

Línea de acoplo como vía 4,0 mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,36	177,25	0,7
	-6,05	175,36	1,4
	-5,72	171,6	2,1
	-5,39	165,36	2,8
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-6,58	175,12	0,7
	-6,24	173,23	1,4
	-5,86	169,59	2,1
	-5,5	163,25	2,8
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-7,05	171,12	0,7
	-6,66	169,35	1,4
	-6,22	165,64	2,1
	-5,79	159,27	2,8
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-7,98	164,68	0,7
	-7,52	162,79	1,4
	-7,02	159,04	2,1
	-6,54	151,9	2,8

Línea de acoplo como vía 4,5 mm			
tornillo de salida a 0.7mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-4,44	-177,97	0,7
	-4,18	-179,84	1,4
	-3,94	176,22	2,1
	-3,76	169,36	2,8
tornillo de salida a 1.4mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-4,57	179,79	0,7
	-4,28	177,97	1,4
	-4	174,23	2,1
	-5,5	167,35	2,8
tornillo de salida a 2.1mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-4,9	175,57	0,7
	-4,56	173,95	1,4
	-4,22	170,23	2,1
	-3,91	163,49	2,8
tornillo de salida a 2.8mm	S3,1	S2,1	central
	dB	grados	mm
	-5,6	168,7	0,7
	-5,21	167,05	1,4
	-4,79	163,42	2,1
	-4,41	156,04	2,8

Tabla 5.7: Valor de acoplo y fase para cada posición de tornillos adaptada en las líneas de acoplo

5.6 Construcción

En este capítulo se tratará la construcción del elemento unitario con línea de acoplo y la guía parcialmente rellena de dieléctrico.

Debido a que el dieléctrico utilizado (TLX-9) tiene un grosor demasiado pequeño y debe situarse perfectamente a la cara superior del interior de la guía de onda ha sido necesario realizar una aproximación a una SIW en los extremos de la guía. Una SIW (Substrate Integrated Waveguide) es una implementación de guía onda sobre un sustrato dieléctrico en la que las paredes laterales de la guía se conforman con una serie de vías metalizadas que generan una pseudo pared metálica. De esta forma, en las paredes laterales del sustrato que contiene la línea de acoplo impresa se ha propuesto realizar unos taladros para permitir la sujeción del dieléctrico y, al introducir los tornillos de sujeción, provocar la aproximación a SIW. En la siguiente imagen se observa la extensión del dieléctrico hasta los bordes de la guía y los taladros de los tornillos utilizados para sujetar el dieléctrico y crear el efecto SIW. Debido a que la estructura no es completamente una SIW no se ha seguido el proceso de equivalencia entre guía de onda rectangular y SIW. Se puede ver una imagen de la estructura a continuación:

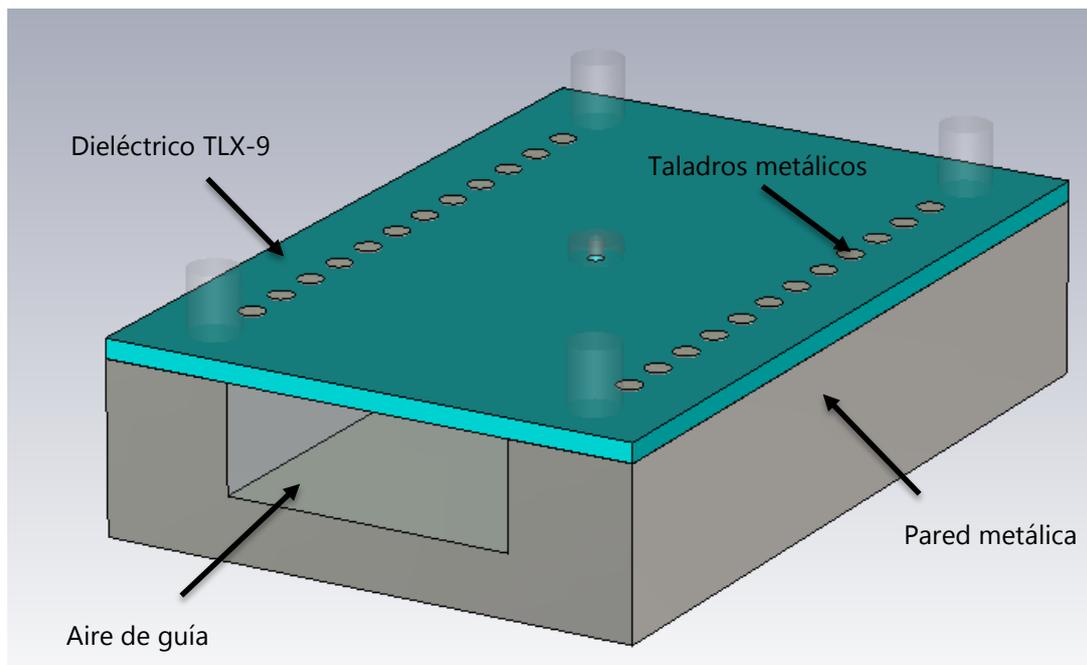


Figura 5.32: Estructura SIW para la construcción del prototipo 2

Se ha decidido realizar taladros de métrica M2 y separados 4mm para evitar problemas de rozamiento con las cabezas de los tornillos.

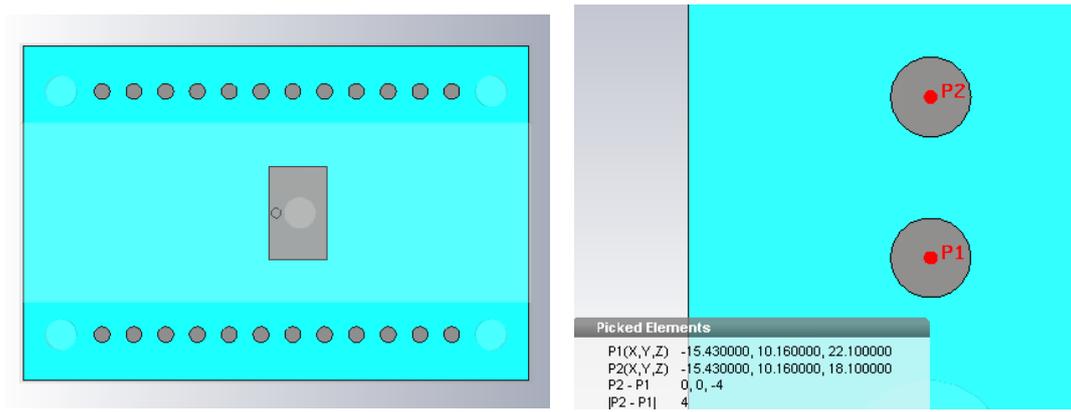


Figura 5.33: Planta superior de la estructura pseudo-SIW con la línea de acoplo

Sin embargo, este prototipo no se ha podido llegar a construir debido a las limitaciones de tiempo, por lo que quedará como trabajo futuro a desarrollar.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1. Conclusiones

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado ha sido investigar los tornillos de sintonía, que son tornillos que penetran en la guía de onda de alimentación, y descubrir el efecto que ejercen sobre los elementos radiantes.

En el desarrollo de este TFG se han simulado dos elementos unitarios diferentes, uno de ellos de guía de onda rellena de aire con vía de acoplo (vía que penetra dentro de la guía de onda desde la parte superior de la misma) y otro de guía de onda rellena parcialmente de dieléctrico con vía y línea de acoplo.

Para el primer prototipo o primer elemento unitario se han utilizado cuatro tamaños de vías de acoplo introducidas dentro de la guía para así conseguir un amplio rango de acoplo de 8,25dB. Los tamaños escogidos de penetración de vía de acoplo dentro de la vía fueron 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm y 4.5mm, aunque finalmente solo son necesarias las de 3.0mm, 3.5mm y 4.5mm para cumplir todo el rango de acoplo. Se realizó la construcción y medida de este primer elemento unitario para comprobar las simulaciones. En las mediciones se vio que los resultados de acoplo son mayores que en simulación pero en rango de acoplo los resultados eran bastante similares. Esto es debido al corte manual de las vías de acoplo o conectores de 50Ω utilizados para medir el prototipo.

Para el segundo prototipo o elemento se han utilizado cuatro líneas de acoplo equivalentes a las vías de acoplo usadas en el primer prototipo. Después de realizar las simulaciones para cada una de ellas se vio que, igual que en el caso equivalente de únicamente vía de acoplo, solo son necesarias tres líneas de acoplo para cumplir todo el rango de acoplo, que resulta ser de 7.67dB. Las líneas de acoplo necesarias para barrer este rango son las equivalentes a vía 3.0mm, vía 3,5mm y vía 4,5mm. Se diseñó para este segundo elemento unitario un prototipo fabricable ya que había que cambiar ligeramente la estructura debido al espesor del sustrato utilizado. Sin embargo, por cuestiones de tiempo, no fue posible construirlo y medirlo.

Las conclusiones del trabajo desarrollado son las siguientes: se ha conseguido desarrollar un método capaz de modificar los acoplos del elemento radiante con alimentación en guía de onda a tiempo real y de forma dinámica sin tener que recurrir a una reconstrucción del elemento completo. Se ha podido diferenciar claramente la red de alimentación del elemento radiante, permitiendo así el diseño y desarrollo de la red de alimentación de forma independiente.

6.2. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro inmediato se debería tratar de construir el prototipo con guía de onda rectangular rellena parcialmente de dieléctrico, medirlo y hacer una comparativa entre simulaciones y medida tal y como se realizó con el primer diseño.

Otro punto necesario sería poder realizar algún tipo de sistema de mecanización para el corte de los conectores a la distancia deseada, ya que su corte manual produce resultados notablemente diferentes a los simulados.

Como segunda línea de trabajo futuro se debería tratar de realizar un array lineal de parches apilados alimentado por guía de onda rectangular. Para ello se deberán tratar los problemas de fase presentes en el primer diseño, ya que la introducción de la vía de acoplo produce bastante desfase.

Otra línea de estudio podría ser el diseñar elementos unitarios en los cuales la introducción de los tornillos de sintonía se realice de forma lateral, y comprobar si los efectos conseguidos difieren mucho de los de este proyecto.

REFERENCIAS

[1]: Proyecto de Fin de Carrera de Pablo Sánchez Olivares: Diseño de array lineal plano con guía de alimentación en sustrato integrado para banda Ku.

[2]: Proyecto de Fin de Carrera de Sergio Casas Olmedo: Diseño de un array lineal de parches sobre guía de onda rectangular para banda Ku.

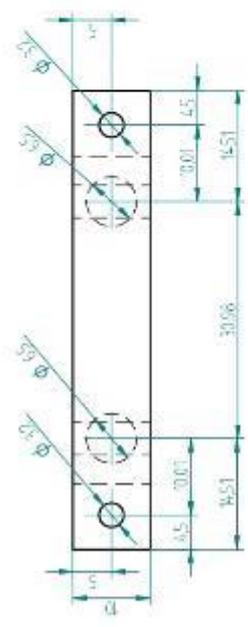
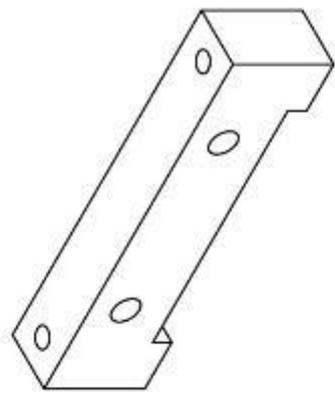
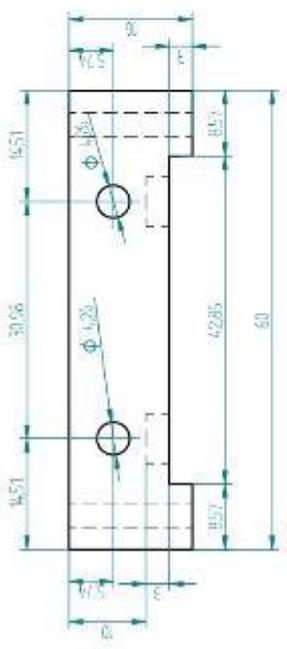
[3]: Proyecto de Javier Hernández Ortega: Diseño de antenas en guía de onda con control de alimentación mediante tornillos de sintonía.

[4]: C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley & Sons Inc, 1989.

[5]: José Luis Masa Campos. *Antenas y Compatibilidad Electromagnética*, 2014. Asignatura de Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.

[6]: Jorge Alfonso Ruiz Cruz. *Medios de Transmisión*, 2012. Asignatura de Grado de Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.

Revisión		
Nº:	Descripción	Fecha
		Aprobado



Diseño:	Fecha:	Libro:
Comprobado:	STDL	Solid Edge ST
Aprobado 1:		Siemens PLM Software
Aprobado 2:		Título
Salvo indicación contraria: todos en milímetros ángulos en grados tolerancias 40,5 y 51°		
Escala:	Peso:	Rev:
		43
		Flange
		Arhiv: Arhiv_s2_u1.dwg
		Fig. 1.26.1

ANEXO B: CALIBRACIÓN PARA GUÍA DE ONDA TRL

Motivación e introducción a la calibración

Las guías de onda son el método más usado a la hora de transportar señales de alta frecuencia debido a sus bajas pérdidas. A dichas frecuencias, las líneas de transmisión tradicionales como los cables coaxiales presentan una gran atenuación.

Existen otras alternativas como la alimentación microstrip, pero las guías de onda presentan menores pérdidas a altas frecuencias, además, al ser un medio cerrado, evita que existan interferencias en los campos debidas otros objetos, al contrario de lo que ocurre en los sistemas de transmisión abiertos. Debido a ello, son usadas ampliamente para la comunicación de los sistemas de alimentación con sus antenas correspondientes.

Para comprobar que el proceso de alimentación se lleva a cabo de manera correcta, se hace necesaria una calibración precisa y de calidad a la hora de medir la señal transmitida por una guía de onda. La mayoría de los analizadores de redes comerciales sólo presentan puertos con conectores coaxiales, lo que hace necesario el uso de adaptadores coaxial-guía para poder realizar las mediciones. Estos conectores no son perfectos, presentan pérdidas y, sobre todo, reflexiones que hacen que las medidas finales presenten un importante rizado, inaceptable si se quiere mantener una precisión alta.

La calibración del analizador de redes con los adaptadores ya conectados a sus puertos puede solucionar en gran medida los rizados, y hacer que los resultados obtenidos no estén sujetos a grandes errores, pero para ello se debe contar con un kit de calibración para guía de onda.

En este caso en concreto, el analizador de redes utilizado es el Agilent E5071C, y el kit de calibración de guía de onda es el Maury Microwave X7007H para WR-90. Se ha decidido realizar una calibración TRL (Thru, Reflect, Line) ya que el kit disponible posee los elementos necesarios para la misma. Este tipo de calibración sólo suele usarse en casos que requieren gran precisión y en los que la tecnología de los conectores (coaxial, guía de onda...) no es igual entre el analizador y el sistema a medir (como es este caso).

Entre las principales ventajas de la calibración TRL destacan los buenos resultados que alcanza en sistemas en los que no es fácil colocar una carga adaptada, y que no se necesita mucha precisión a la hora de realizar los elementos del kit, sino que estos aseguren una buena repetitividad.

La calibración TRL se compone de la medición de un "**Thru**" o conexión entre ambos puertos, "**Reflect**" o gran reflexión en cada puerto, y por último "**Line**": otro "thru" con una línea de longitud efectiva conocida, típicamente $\lambda/4$, de por medio. Mediante estas medidas, el analizador consigue calcular los parámetros S incluyendo los adaptadores en la red. Las ecuaciones que sigue para realizar el proceso son las siguientes:

Medida	Reflexión 1	Reflexión 2	Transmisión 1-2
Conexión (Through)	$S_{11}^M = S_{11}^E + S_{24}^E \frac{S_{11}^E S_{24}^E}{1 - S_{33}^E S_{44}^E}$	$S_{22}^M = S_{22}^E + S_{33}^E \frac{S_{11}^E S_{24}^E}{1 - S_{33}^E S_{44}^E}$	$S_{21}^M = \frac{S_{11}^E S_{24}^E}{1 - S_{33}^E S_{44}^E} + S_{21}^E$
Reflexión (Reflect-Γ)	$S_{11}^M = S_{11}^E + \Gamma \frac{S_{11}^E S_{33}^E}{1 - \Gamma S_{33}^E}$	$S_{22}^M = S_{22}^E + \Gamma \frac{S_{22}^E S_{33}^E}{1 - \Gamma S_{33}^E}$	$S_{21}^M = S_{21}^E$
Línea (Line -kL)	$S_{11}^M = S_{11}^E + S_{44}^E \frac{S_{11}^E S_{33}^E}{e^{2j\theta} - S_{33}^E S_{44}^E}$	$S_{22}^M = S_{22}^E + S_{33}^E \frac{S_{22}^E S_{44}^E}{e^{2j\theta} - S_{33}^E S_{44}^E}$	$S_{21}^M = \frac{S_{11}^E S_{24}^E}{e^{j\theta} - S_{33}^E S_{44}^E e^{-j\theta}} + S_{21}^E$

Figura B.1: Ecuaciones de calibración con Through-Reflect-Line

Proceso de calibración

1. Importar los datos del kit de calibración

Si no se ha realizado antes ninguna calibración con este kit, deben importarse todos los parámetros del mismo al analizador para crear un perfil del kit de calibración. Este paso es muy sencillo, simplemente se debe introducir en el analizador la memoria USB que se encuentra en la caja del kit. Después se debe ir al menú de calibración (botón Cal) y una vez dentro de la pantalla en la que se debe seleccionar qué kit se quiere utilizar, se debe elegir una ranura vacía. El siguiente paso es pinchar en la opción "Import kit definition" donde se seleccionará el archivo con las definiciones de los parámetros para el kit a utilizar. Por último se puede guardar el kit definido con un nombre que lo identifique claramente.

Una vez realizado este proceso ya se podrá elegir el modelo del kit entre los disponibles en el analizador cada vez que desee utilizarse, sin necesidad de repetir la importación.

2. Calibración TRL

Antes de realizar los siguientes pasos, se deben haber conectado los adaptadores coaxial-guía al analizador de redes y entrado en el menú de "2 Port TRL-Cal" dentro del menú de calibración del analizador:

a. Medida del Thru

Se deben conectar ambos adaptadores entre sí directamente. Para ello se disponen de unos pequeños "pinchos" o varillas que se encuentran en una bolsita dentro del kit de calibración. Estas varillas se pueden introducir en unos orificios presentes en los adaptadores para conseguir que no se separen. Un ejemplo de este montaje sería el de la siguiente fotografía:



Figura B.2: Conexión Thru

Una vez se ha conseguido montar la estructura, se presiona la opción "Thru" en la pantalla del analizador.

b. Medida del Reflect

El elemento del kit utilizado en este caso es el short, que está diseñado para reflejar toda la potencia recibida por el puerto en el que se conecta. Puede verse en la siguiente imagen:



Figura B.3: Short del kit de calibración

Deberá conectarse a cada puerto, utilizando tornillos para fijarlo, y una vez conseguido, se podrá pulsar la opción "Reflect" del puerto correspondiente.



Figura B.4: Conexión del short en cada puerto para medir el Reflect

c. Medida del Line.

En este caso se deberá realizar un montaje similar al thru pero con la guía de longitud $\lambda/4$ que se incluye en el kit:

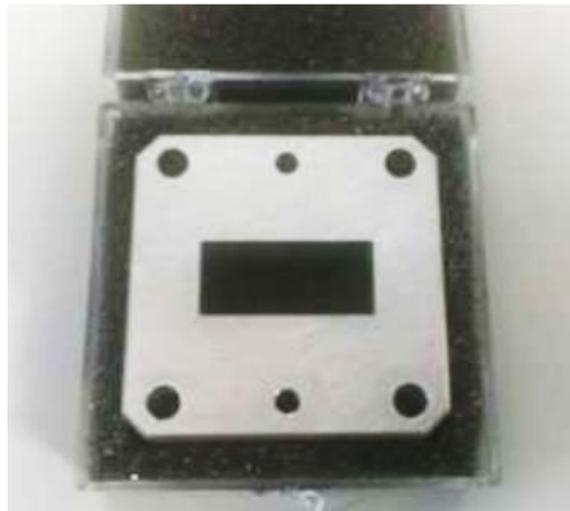


Figura B.5: Guía de longitud $\lambda/4$ del kit de calibración

Fijándola una vez más con las varillas y los tornillos, se debe conseguir un montaje como el siguiente:



Figura B.6: Conexión de la guía de longitud $\lambda/4$ para Line

Finalmente se puede proceder a pulsar la opción "Line->Ports 1-2" en la pantalla del analizador.

Para terminar la calibración, solo faltaría pulsar la opción "Done". Esta puede guardarse en la memoria del analizador vectorial para su uso en otras ocasiones sin tener que repetir todo el proceso. Sin embargo, se recomienda realizar siempre la calibración antes de realizar medida.

