

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



**Trabajo Fin de Grado**

**Diseño de filtros para aplicaciones  
espaciales aplicando técnicas de modelado  
geométrico**

AUTOR: Rafael Pérez Campos  
DIRECTOR(es): Alejandro Álvarez Melcón  
Fernando Daniel Quesada Pereira  
CODIRECTOR: Alejandro Pons Abenza

Cartagena, Septiembre 2017



# Agradecimientos

El trabajo desarrollado aquí solo ha podido realizarse manteniendo un nivel alto de motivación. Esta motivación hay en muchos momentos que, por diversas circunstancias, no es fácil mantener. Han sido muchas las personas que, de una manera u otra, han contribuido a mantener esta motivación donde siempre ha de estar.

Quiero agradecer a mis padres su ayuda permanente, su preocupación y su apoyo mostrado. Sobre todo, cuando lo he necesitado. También quiero agradecer a mis hermanas su cariño y su apoyo mostrado. Cada conversación, cada problema contado, cada inquietud. Daba igual lo que fuese; siempre habéis estado ahí.

También quiero agradecer a cada uno de mis compañeros de la universidad todos los buenos momentos disfrutados, el apoyo mostrado y la empatía generada por cada examen que no salió como quería. Al final resultó que tropezarse era parte del camino.

Quiero agradecer también a Fernando, Antonio, A. Pons y A. Melcón, miembros principales de las reuniones de los viernes por la tarde, las ganas mostradas por aprender, la pasión puesta en esto. Cada momento con vosotros era un plus de inquietud, de querer aprender más.

Quería dedicar un agradecimiento especial a mi director del proyecto: Alejandro Álvarez Melcón. Por demostrar pasión y vocación. Por resolver cada duda con la mayor amabilidad posible. Por estar disponible a cualquier hora. En fin, por haber hecho que realizar este proyecto haya sido un placer.

Quién también merece otro agradecimiento especial es el codirector del proyecto: Alejandro Pons Abenza. Por todas las dudas resueltas. Por todos los scripts dejados a partir de los cuáles puede desarrollar mi trabajo y, sin los cuáles, no habría podido realizarlo. Por la paciencia tenida cuando yo era un mar de dudas. Por la disponibilidad. Por contribuir a que realizar este proyecto haya sido una experiencia motivadora de cara a mi futuro laboral.



# Índice

## 1. Introducción

### 1.1 Descripción del proyecto

1.1.1 Planteamiento inicial del proyecto

1.1.2 Objetivos

1.1.3 Estructura de la memoria

1.1.4 Modelado aplicado

1.1.5 Software utilizado

### 1.2 Análisis de las técnicas de fabricación de filtros en guías de onda

1.2.1 Técnica convencional

1.2.2 Introducción al concepto de fabricación aditiva

1.2.2.1 Deposición fundida (FDM)

1.2.2.2 Estereolitografía (SLA) y PolyJet

1.2.2.3 Fusión selectiva de lecho de polvo (SLM, SLS, etc.)

### 1.3 Conceptos básicos

1.3.1 Matriz de acoplamiento

1.3.1.1 Introducción al concepto de acoplamiento

1.3.1.2 Definición de la matriz de acoplamiento

1.3.1.3 Cálculo de la matriz de acoplamiento

1.3.2 Método de realización del filtro en guía de onda

1.3.2.1 Primer paso: obtención de las dimensiones de la cavidad

1.3.2.2 Segundo paso: cálculo de las dimensiones de los acoplamientos interiores

1.3.2.3 Tercer paso: cálculo de las dimensiones físicas de los acoplamientos entre los puertos y la cavidad adyacente a ellos

1.3.2.4 Cuarto paso: cálculo de las longitudes de las cavidades “interiores”

1.3.2.5 Quinto paso: cálculo de las longitudes de las cavidades “exteriores”

## **2. Primeros análisis de cavidades con el *shaping* propuesto**

### 2.1 Estudio de la fiabilidad del programa

### 2.2 Ejemplos de cavidades y análisis de resultados

#### 2.2.1 Primer ejemplo con el *shaping* propuesto

#### 2.2.2 Segundo ejemplo con el *shaping* propuesto

#### 2.2.3 Tercer ejemplo con el *shaping* propuesto

#### 2.2.4 Cuarto ejemplo con el *shaping* propuesto

#### 2.2.5 Quinto ejemplo con el *shaping* propuesto

#### 2.2.6 Sexto ejemplo con el *shaping* propuesto

### 2.3 Conclusiones

## **3. Comparación de la cavidad diseñada con la cavidad rectangular y la cavidad ridge**

### 3.1 Comparación con la cavidad rectangular

#### 3.1.1 Factor de calidad $Q_{UNLOADED}$

##### 3.1.1.1 Dependiendo de la altura central

##### 3.1.1.2 Dependiendo de las alturas intermedias

#### 3.1.2 Rango libre de espurios (SFR: *Spurious Free Range*)

##### 3.1.2.1 Dependiendo de la altura central

##### 3.1.2.2 Dependiendo de las alturas intermedias

#### 3.1.3 Parámetro de "mérito": *SFR&Q*

##### 3.1.3.1 Dependiendo de la altura central

##### 3.1.3.2 Dependiendo de las alturas intermedias

### 3.2 Comparación con la cavidad ridge

#### 3.2.1 Factor de calidad $Q_{UNLOADED}$

##### 3.2.1.1 Dependiendo de la altura central

##### 3.2.1.2 Dependiendo de las alturas intermedias

#### 3.2.2 Rango libre de espurios (SFR: *Spurious Free Range*)

##### 3.2.2.1 Dependiendo de la altura central

##### 3.2.2.2 Dependiendo de las alturas intermedias

#### 3.2.3 Parámetro de "mérito": *SFR&Q*

##### 3.2.3.1 Dependiendo de la altura central

##### 3.2.3.2 Dependiendo de las alturas intermedias

### 3.3 Conclusiones

#### **4. Diseño de dos filtros *single mode***

- 4.1 Selección de un primer *shaping* para crear un filtro
  - 4.1.1 Realización de un barrido anidado
  - 4.1.2 Empleo de las líneas de contorno
    - 4.1.2.1  $Q_U$  y SFR
    - 4.1.2.2 SFR&Q
- 4.2 Creación del primer filtro
  - 4.2.1 Características deseadas del filtro a realizar
  - 4.2.2 Diseño del filtro
- 4.3 Comparación con un filtro de cavidades rectangulares
- 4.4 Selección de un segundo *shaping* para crear un filtro
  - 4.4.1  $Q_U$  y SFR
  - 4.4.2 SRF&Q
- 4.5 Creación del segundo filtro
  - 4.5.1 Características deseadas del filtro a realizar
  - 4.5.2 Diseño del filtro
- 4.6 Comparación de resultados
- 4.7 Aplicación de modelados en el diseño de filtros y ajuste de éstos
- 4.8 Conclusiones

#### **5. Diseño de un filtro *dual mode***

- 5.1 Definición de filtro *dual mode*
- 5.2 Búsqueda del máximo factor de calidad con el modelado propuesto
- 5.3 Creación del filtro
  - 5.3.1 Introducción de la asimetría
  - 5.3.2 Cambio en la topología
  - 5.3.3 Creación de la estructura final del filtro
- 5.4 Aparición de un modo TM
- 5.5 Conclusiones

#### **6. Conclusiones y líneas futuras de investigación**

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Líneas futuras de investigación

#### **Bibliografía**





# Índice de figuras

Figura 1.1 Sección transversal de una guía de onda ridge

Figura 1.2 Sección transversal de la cavidad con el modelado aplicado

Figura 1.3 Pasos en el proceso de síntesis de un filtro paso banda de cuarto orden

Figura 1.4 Estructura en guía de onda de dos resonadores acoplados mediante un iris capacitivo

Figura 1.5 (a) Inversor de admitancias. Circuito equivalente de dos resonadores capacitivamente acoplados; (b) pared magnética (*even mode*); (c) pared eléctrica (*odd mode*)

Figura 1.6 Estructura en guía de onda tras aplicar las condiciones de simetría

Figura 1.7 Modelo circuital compuesto por dos puertos, dos inversores de admitancias y una resonancia en paralelo

Figura 1.8 Estructura en guía de onda compuesta por dos puertos, dos iris y una cavidad resonante

Figura 2.1 Primer ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.2 Resultados del primer ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.3 Dispersión del máximo de campo eléctrico

Figura 2.4 Segundo ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.5 Resultados del segundo ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.6 Tercer ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.7 Resultados del tercer ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.8 Cuarto ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.9 Resultados del cuarto ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.10 Quinto ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.11 Resultados del quinto ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.12 Sexto ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 2.13 Resultados del quinto ejemplo con el *shaping* propuesto

Figura 3.1  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando la altura central (alturas intermedias: 10,16mm)

Figura 3.2 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y la rectangular (alturas intermedias: 10,16mm)

Figura 3.3  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando las alturas intermedias (altura central: 10,16mm)

Figura 3.4 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y de la rectangular (altura central: 10,16mm)

Figura 3.5 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (alturas intermedias: 10,16mm)

Figura 3.6 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la rectangular (alturas intermedias: 10,16mm)

Figura 3.7 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (altura central: 10,16mm)

Figura 3.8 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la rectangular (altura central: 10,16mm)

Figura 3.9 Comparación del  $SFR&Q$  con el de la rectangular dependiendo de la altura central (alturas intermedias: 10,16mm)

Figura 3.10 Comparación del  $SFR&Q$  con el de la rectangular dependiendo de las alturas intermedias (altura central: 10,16mm)

Figura 3.11  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando la altura central (alturas intermedias: 8,2mm)

Figura 3.12 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y la ridge (alturas intermedias: 8,2mm)

Figura 3.13  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando las alturas intermedias (altura central: 1,6mm)

Figura 3.14 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y de ridge (altura central: 1,6mm)

Figura 3.15 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (alturas intermedias: 8,2mm)

Figura 3.16 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la ridge (alturas intermedias: 8,2mm)

Figura 3.17 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (altura central: 1,6mm)

Figura 3.18 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la ridge (altura central: 1,6mm)

Figura 3.19 Comparación del  $SFR&Q$  con el de la ridge dependiendo de la altura central (alturas intermedias: 8,2mm)

Figura 3.20 Comparación del  $SFR&Q$  con el de la ridge dependiendo de las alturas intermedias (altura central: 1,6mm)

Figura 4.1  $Q_U$  obtenido mediante un barrido anidado

Figura 4.2  $Q_U$  representado con líneas de contorno

Figura 4.3 SFR representado con líneas de contorno

Figura 4.4 SFR y  $Q_U$  representados con líneas de contorno

Figura 4.5 Parámetro de mérito representado mediante líneas de contorno

Figura 4.6 Frecuencia *even* para el primer mejor diseño

Figura 4.7 Frecuencia *odd* para el primer mejor diseño

Figura 4.8 Coeficiente de acoplo normalizado para el primer mejor diseño

Figura 4.9 Estructura final del primer filtro diseñado

Figura 4.10 Parámetros S para el primer filtro en la banda de paso

Figura 4.11 Pérdidas de inserción para el primer filtro diseñado mostrando los dos primeros espurios

Figura 4.12 Parámetros S del primer filtro diseñado

Figura 4.13 Filtro de cavidades rectangulares de tercer orden

Figura 4.14 Parámetros S del filtro rectangular en la banda de paso

Figura 4.15 Parámetros S del filtro con cavidades rectangulares mostrando el primer espurio

Figura 4.16 Pérdidas de inserción para el filtro de cavidades rectangulares

Figura 4.17 SFR y  $Q_U$  representados con líneas de contorno en un rango reducido

Figura 4.18 Cavidad empleada para realizar el segundo filtro

Figura 4.19 Características de la cavidad empleada para realizar el segundo filtro

Figura 4.20 Estructura final del segundo filtro diseñado

Figura 4.21 Parámetros S del segundo filtro diseñado

Figura 4.22 Parámetros S del segundo filtro diseñado

Figura 4.23 Frecuencias de resonancia (GHz) al variar la longitud de las cavidades

Figura 5.1 Máximos valores de  $Q_{UNLOADED}$  proporcionados por el modelado

Figura 5.2 SFR (GHz) para los máximos valores de  $Q_{UNLOADED}$

Figura 5.3 Ejemplo de shaping para realizar un filtro *dual mode*

Figura 5.4 Características de la cavidad empleada para realizar el filtro *dual mode*

Figura 5.5 Estructura diseñada para comprobar los modos que se excitan en la cavidad introduciendo potencia desde un puerto

Figura 5.6 Parámetros S de la estructura mostrada en la figura 5.5

Figura 5.7 Sección transversal de la cavidad con la asimetría introducida

Figura 5.8 Estructura diseñada para comprobar los modos que se excitan introduciendo potencia desde un puerto y existiendo una asimetría

Figura 5.9 Parámetros S de la estructura mostrada en la figura 5.8

Figura 5.10 Topología implementada por la estructura de la figura 5.8

Figura 5.11 Topología necesaria para realizar un filtro *dual mode* de orden 2 con topología en línea

Figura 5.12 Estructura en guía de onda con uno de los puertos girados

Figura 5.13 Parámetros S de la estructura de la figura 5.12, pero tras ser ajustada adecuadamente

Figura 5.14 Topología de un filtro *dual mode* de orden 4

Figura 5.15 Filtro *dual mode* de orden 4

Figura 5.16 Parámetros S en la banda de paso del filtro *dual mode* de orden 4

Figura 5.17 Parámetros S del filtro *dual mode* de orden 4

Figura 5.18 Parámetros S de la estructura mostrada en la figura 5.12 en un rango amplio de frecuencias

Figura 5.19 Módulo del campo eléctrico a la frecuencia de 11,62GHz

# Índices de tablas

Tabla 4.1 Características de las cavidades estudiadas hasta ahora

Tabla 4.2 Características de los filtros diseñados hasta ahora

Tabla 5.1  $Q_{\text{UNLOADED}}$  de cavidades usadas para fabricar *dual mode*

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1.1 Planteamiento inicial del proyecto

Los filtros utilizados en satélites y, prácticamente, en la mayoría de aplicaciones espaciales son del tipo de guía de onda. Éstos destacan por su elevado factor de calidad y alta capacidad de manejo de potencia. Esta característica permite fabricar filtros con unas pérdidas de inserción menores respecto a otros tipos de filtros como, por ejemplo, los implementados en tecnología microstrip.

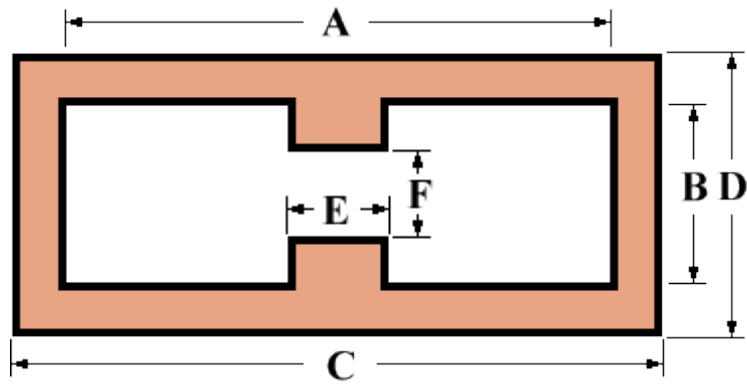
Una característica a tener en cuenta para realizar cada comparación es el factor de calidad  $Q_{UNLOADED}$  ( $Q_U$ ), que se define como el producto de la pulsación de resonancia (o frecuencia de resonancia en radianes por segundo) por la energía máxima que la cavidad es capaz de almacenar dividida entre las pérdidas debidas a que las paredes de la cavidad no son perfectas.

Otra característica de estos filtros es el rango libre de espurios (SFR, *Spurious Free Range*) que se define como la distancia en frecuencia que existe entre el primer modo que se propaga por la guía de onda y el siguiente modo. Esta distancia indica la máxima frecuencia a la que podrá trabajar el filtro sin que se llegue a propagar el siguiente modo.

En este proyecto se han tenido en cuenta estas dos características a la hora de crear cavidades que, posteriormente, se usarían para diseñar filtros. Para el diseño de cavidades se ha aplicado un modelado geométrico con la intención de obtener las mejores características posibles.

### 1.1.2 Objetivos

En este proyecto, el objetivo principal ha sido encontrar un modelado geométrico o *shaping* basado en dos parámetros que mejore las características que ofrecía la guía de onda *ridge* (figura 1.1).



**Figura 1.1 Sección transversal de una guía de onda ridge**

Debido a los resultados obtenidos (posteriormente explicados), se ha realizado también una comparación con la guía de onda rectangular.

Finalmente, se ha hecho un filtro *dual-mode* con el *shaping* escogido (posteriormente mostrado en la figura 1.2). En este caso, aparte de las ventajas referentes a las características en las que se ha basado la comparación, también se ha comprobado que se pueden realizar este tipo de filtros sin la necesidad de utilizar tornillos de sintonía.

### 1.1.3 Estructura de la memoria

Para explicar todo el trabajo desarrollado a lo largo de este proyecto, se ha optado por dividirlo en partes. En total han sido cinco capítulos.

En la primera parte se ha explicado brevemente en que va a consistir el proyecto así como el planteamiento inicial. El modelado geométrico propuesto en este proyecto también se muestra en esta parte. Se han explicado los conceptos básicos necesarios para comprender el trabajo realizado a lo largo del proyecto.

En la segunda parte se han mostrado varios ejemplos de cavidades a las que se les ha aplicado el *shaping*. Se han mostrado las características de cada cavidad, y se ha explicado por qué variaban sus características.

En la tercera parte se han hecho estudios sobre las consecuencias de variar los parámetros del modelado de forma individual. Cada resultado obtenido ha sido comparado con los ofrecidos por una cavidad rectangular y por una cavidad ridge.

En la cuarta parte se han obtenido los resultados de variar los parámetros del *shaping* de forma conjunta. Así se han podido calcular las características de la cavidad modelada para cada par de valores dados a las variables del modelado. Se han seleccionado dos cavidades óptimas, y se han diseñado dos filtros. Los resultados de éstos se han comparado con los ofrecidos por un filtro hecho con cavidades rectangulares.

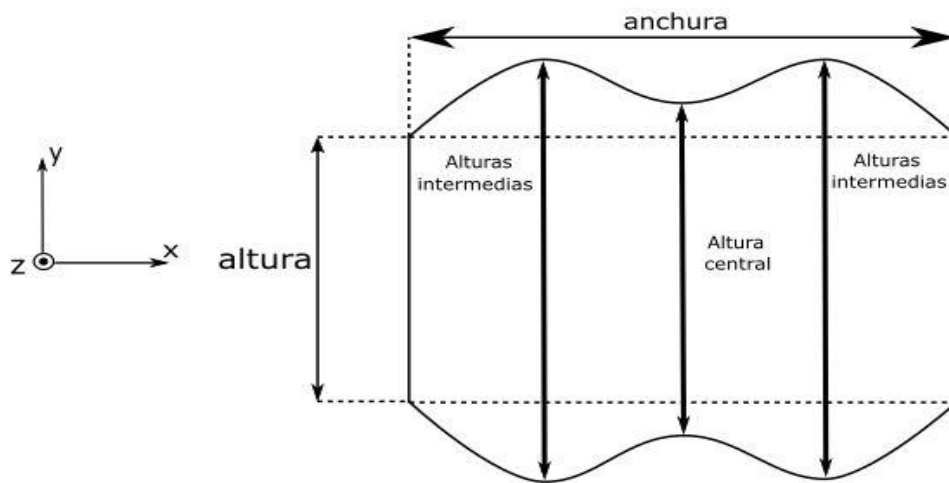
En la quinta parte se ha diseñado un filtro *dual mode*. También se ha explicado cómo surge esta idea, pues no estaba establecida para ser desarrollada en este proyecto.

En la sexta, y última parte, están las conclusiones sacadas de todo el proyecto. Se han expuesto también una serie de futuras líneas de investigación a partir de todo lo que se ha expuesto en este proyecto.

#### 1.1.4 Modelado aplicado

Este proyecto presenta un modelado que se consigue mediante la aplicación de formas curvilíneas en la parte superior e inferior de una cavidad. El uso de dos parámetros para definir la agresividad del *shaping* permite variar su geometría y, por tanto, sus características ( $Q_{UNLOADED}$  y rango libre de espurios), alcanzando así ciertas geometrías con mejores características que las cavidades usadas en las guías de onda convencionales.

Para el modelado se ha mantenido la sección transversal constante. Los dos parámetros utilizados han consistido en variar la altura de la guía de onda en tres puntos equidistantes, creando una línea curva que varía en altura (figura 1.2).



**Figura 1.2 Sección transversal de la cavidad con el modelado geométrico aplicado**

Por lo tanto, se ha mantenido la simetría respecto al plano  $XZ$  e  $YZ$ , siendo el eje  $x$  el eje horizontal, el eje  $y$  el vertical y el eje  $z$  el eje en el sentido de propagación. Las características para realizar la comparación han sido el factor de calidad  $Q_{unloaded}$  y el rango libre de espurios [12].



### 1.1.5 Software utilizado

Para la obtención de los resultados expuestos en este proyecto se ha utilizado el software *Ansys Electronics 17.2*, principalmente. Debido a la necesidad de manejar *scripts* que permitan obtener los resultados variando alguno de los parámetros, también se ha usado *Matlab*. Los códigos empleados no van a ser expuestos debido a la gran cantidad de líneas que ocuparían, pero sí se explicará cualquier proceso o método utilizado en la obtención de datos.

Además, aunque en menor medida, ha sido necesario recurrir a ciertas herramientas de *CST* (para el proceso de optimización de los filtros) y *FEST* (para el diseño del filtro rectangular), así como hacer uso del denominado *AWR Design Environment* (para la obtención de la respuesta ideal de parámetros de *Scattering* de un determinado filtro).

## 1.2 ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE FILTROS EN GUÍAS DE ONDA

Un motivo de elevada importancia para la fabricación de filtros en guía de onda con un modelado (o *shaping*) es la llegada de nuevas técnicas de fabricación. Estas técnicas van a permitir fabricar el filtro como una sola pieza metálica, capa por capa, con una precisión suficiente. En otras palabras, estas técnicas hacen posible que los diseños realizados en este proyecto así como el *shaping* empleado puedan crearse en la realidad, obteniendo unos resultados coherentes respecto a los obtenidos en teoría.

### 1.2.1 Técnica convencional

El empleo de técnicas convencionales para el desarrollo de filtros en guías de onda ha arrastrado a éstas a poseer unas formas geométricas simples. Hasta ahora, la fabricación de guías de onda se realiza generando por separado las distintas piezas que luego se unen empleando tornillos. Esta técnica limita la creatividad a la hora de fabricar filtros en guías de onda, pues sólo aquellos con formas geométricas adecuadas para la posterior unión de las piezas podrán ser fabricados.

Además, la introducción de tornillos para la fijación de las piezas y creación de la guía de onda supone unas pérdidas adicionales que, a priori, no pueden ser calculadas de forma exacta. Esto induce a la búsqueda de nuevas técnicas para la creación de filtros en guía de onda.

Estas nuevas técnicas (de las que se hablará posteriormente) permitirán crear filtros con unas características geométricas distintas a las que poseen los filtros convencionales que, principalmente, se resumen en rectangulares y cilíndricas.

Al variar las características geométricas, se buscará la optimización del filtro alcanzando los puntos óptimos de los parámetros creados para el modelado o *shaping* del filtro. Esta optimización ayudará a encontrar los filtros con mejores características respecto al factor de calidad, rango libre de espurios, volumen, etc.

### 1.2.2 Introducción al concepto de fabricación aditiva

El concepto de fabricación aditiva suele emplearse en entornos industriales, profesionales o especializados. La fabricación aditiva es un proceso utilizado para crear objetos tridimensionales a partir de un archivo digital. Se denomina aditiva porque, generalmente, se fabrica cada estructura mediante una serie de finas capas metálicas sucesivas. La tecnología puede producir formas complejas que antes eran imposibles con los métodos tradicionales de fundición y mecanizado o mediante técnicas sustractivas.

A menudo los términos de impresión 3D y fabricación aditiva se utilizan como sinónimos, especialmente en el lenguaje coloquial. Sin embargo, no son exactamente lo mismo.

La fabricación aditiva hace referencia a todas las técnicas de fabricación por adición de material y empleadas con el objetivo de producir nuevos componentes complejos y durables, mientras que la impresión 3D, como heredera del prototipado rápido, hace alusión a la fabricación de modelos o piezas finales de modo rápido pero limitado y, habitualmente, se limita a un tipo concreto de tecnología aditiva.

Por eso, desde un punto de vista técnico, hablar de fabricación aditiva no implica entrar en la tecnología que utilizamos. En función de cada proyecto, podemos utilizar la inyección de material o cualquiera de las otras tecnologías que, en general, están más avanzadas que la impresión 3D [3].

A diferencia de la impresión 3D tradicional, con estas tecnologías se puede fabricar en metales, lo que permite abordar proyectos más complejos. Los sectores principales para los que se utiliza este método son:

- Sector médico: producción de implantes, instrumentos quirúrgicos, elementos ortopédicos, modelos anatómicos...
- Sector aeroespacial: creación de prototipos funcionales, útiles, o piezas finales, por ejemplo, para mejorar la aerodinámica de los aviones.
- Ámbito industrial: fabricación de herramientas de trabajo, moldes personalizados, utillajes, etc.

### *1.2.2.1 Fused Depositon Modelling (FDM)*

El proceso se basa en un cabezal que se mueve en un plano y funde un filamento de plástico. El material se va aportando capa a capa y se crea una pieza 3D. Es la base de las conocidas impresoras 3D y su principal ventaja es el bajo coste del equipamiento junto con la posibilidad de trabajar en diferentes materiales poliméricos [6].

El FDM o, también conocido por modelado por deposición fundida (MDF), es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos y la producción a pequeña escala.

Se utiliza una técnica aditiva, depositando el material en capas, para conformar la pieza. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en los tres ejes (x, y, z) controlada electrónicamente. La boquilla normalmente la mueven motores a pasos o servomotores. La pieza es construida con finos hilos del material que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla.

Esta técnica se puede dividir en tres procesos o fases. Primero, el software lamina y coloca un archivo CAD 3D. Se calcula la trayectoria para extrudir el material termoplástico y cualquier material de soporte necesario. Después, la impresora 3D calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas ultrafinas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora 3D deposita un material eliminable que hace las veces de andamiaje. Finalmente, el usuario retira el material de soporte o lo disuelve en agua y detergente y, a continuación, la pieza ya se puede utilizar.

La tecnología FDM utiliza los mismos materiales termoplásticos probados que se pueden encontrar en los procesos de fabricación tradicionales. Para aplicaciones que requieran tolerancias exactas, resistencia y estabilidad medioambiental (o propiedades especializadas tales como la disipación electrostática, la traslucidez, la biocompatibilidad, la inflamabilidad V.0 y la clasificación FST) se pueden utilizar diferentes tipos de aditivos FDM.

Las principales ventajas de este procedimiento son los costos del modelado por deposición fundida y su sencillez de uso. Las desventajas incluyen una calidad de impresión reducida en comparación con los procedimientos estándar de impresión como el sinterizado láser o la estereolitografía. El precio de las máquinas de modelado por deposición fundida oscilan entre los 400 y los 80.000 euros (para los modelos más sofisticados) y por lo tanto, son mucho más fáciles de adquirir que las impresoras de sinterizado láser 3D que se inician a partir de los 80.000 euros [7].

### 1.2.2.2 Estereolitografía (SLA) y PolyJet

La técnica de impresión estereolitográfica consiste en la impresión sucesiva de finas capas de un líquido polimérico que solidifica por fotopolimeración bajo la acción de la luz ultravioleta. Generalmente se usa un láser de fibra de iterbio de alta potencia para fundir el polvo fino metálico. El proceso originario fue la estereolitografía, pero posteriormente se desarrolló el denominado *polyjet* que se basa en curar la resina con múltiples haces de luz ultravioleta.

Para crear cada capa, el láser empleado tiene que ser desactivado para que la plataforma que contiene la cuba con el líquido baje unos milímetros y rellene de nuevo el contorno de la capa anterior, ya solidificada. Evidentemente, todo este proceso ralentiza el modelado de la pieza y genera puntos débiles por las interfaces entre capas del objeto acabado.

Las mejoras recientes introducidas permiten que el proceso se realice de forma continua y con la seguridad de no crear interfaces entre las capas, lo cual incrementa significativamente la resistencia de la pieza acabada. Para ello, introducen una fina capa de oxígeno que bloquea temporalmente las reacciones del líquido polimérico, con el fin de retardar el proceso de solidificación mientras asciende la plataforma con respecto a la cuba con el líquido para generar la siguiente sección.

Se obtienen piezas a partir de resinas líquidas que se curan con un haz de luz. El resultado es una pieza con excelente calidad tanto en precisión dimensional como en acabado superficial. A pesar de que en los últimos años se han desarrollado materiales que imitan a los principales polímeros industriales, la principal desventaja que plantean estos procesos es la necesidad de utilizar materiales especiales [6].

### 1.2.2.3 Fusión selectiva de lecho de polvo (SLM, SLS, etc.)

La fabricación aditiva mediante fusión de lecho de polvo, también conocida como Selective Laser Melting o SLM, es uno de los procesos de fabricación aditiva más extendidos, sobre todo para la fabricación de piezas metálicas. El proceso se basa en fabricar piezas 3D mediante la fusión de una capa de polvo que se ha depositado previamente sobre la capa generada en la operación anterior. El material en polvo se funde únicamente en aquellos puntos donde se requiere añadir material, resultando así en un aporte selectivo de material [6].

Este tipo de procesos se basan en repetir siempre los mismos pasos. En primer lugar, se deposita una capa de polvo de espesor constante en una placa base. Posteriormente, una fuente de calor (que puede ser un láser o un haz de electrones) funde el material que se desea aportar. La resolidificación del

material fundido crea una capa consolidada de material. Una vez que se ha creado una capa, se deposita una nueva capa de polvo de espesor constante, que se vuelve a fundir sobre la capa aportada anteriormente. Repitiendo el proceso se consigue generar una pieza en 3D capa a capa.

El motivo por el que se emplea un láser o un haz de electrones como fuente de calor se basa, principalmente, en dos motivos: por un lado, son fuentes de calor capaces de concentrar la energía en un punto muy pequeño, por lo que se pueden fabricar piezas con una resolución muy pequeña. Por otro lado, son fuentes de calor que pueden ser guiadas a alta velocidad, con lo que se consigue incrementar la productividad de estos procesos.

En general, se parte de un archivo *CAD* que se descompone en capas y se calculan una serie de trayectorias por cada una de las capas. Posteriormente, el material se funde por la acción de un láser guiado por un escáner galvanométrico, el cual sigue las trayectorias generadas. El proceso es similar tanto para piezas de plástico como para piezas metálicas, variando el tipo de láser y las condiciones de proceso según el material. Además, para la fabricación de piezas metálicas, es necesario disponer de cámaras de atmósfera controlada para evitar la oxidación de las piezas mientras se están fabricando.

Independientemente del sistema empleado, las bases del proceso son similares. En primer lugar, se generan capas de un modelo de *CAD* que oscilan entre 20 y 100 micras de espesor, dependiendo de la resolución que se quiera obtener y el tamaño de polvo empleado. Lógicamente, a medida que se reduce el espesor por capa, se incrementa la resolución de la pieza pero es necesario fabricar más capas por lo que se reduce la productividad.

Las capas de polvo se distribuyen dentro de una cámara de atmósfera controlada mediante un mecanismo que permite el movimiento de una regla que uniformiza el espesor de polvo y una guía que permite el desplazamiento vertical de la base una vez que se termina cada capa. Mediante la combinación de estos dos elementos se distribuye el polvo capa a capa. Es importante controlar la atmósfera en la que se realiza el aporte de material, siendo lo habitual emplear Argón, mezclas de Argón y Helio o incluso Nitrógeno, con el objeto de reducir al máximo la cantidad de Oxígeno presente.

En cuanto a los materiales, en el caso de plásticos se pueden utilizar polímeros industriales como Nylon, ABS o polímeros reforzados y en el caso de metales se pueden fabricar piezas en aleaciones base Níquel o Titanio así como en acero inoxidable o aceros de herramienta. Incluso existe la posibilidad de fabricar piezas de metales preciosos. El requisito principal es que el material se encuentre en formato polvo con tamaños de polvo por debajo de 50 micras. En muchos casos, los materiales son suministrados por el propio fabricante del sistema de fabricación aditiva [6].

## 1.3 CONCEPTOS BÁSICOS

En el presente proyecto se aborda la realización de filtros en guías de onda. Para entender adecuadamente cada uno de los pasos de la realización del filtro, es obligatorio tener claros los conceptos de matriz de acoplo así como comprender por qué se realiza cada uno de los pasos en la realización del filtro.

Por ello, se ha hecho un apartado exclusivamente para explicar detalladamente los conceptos necesarios más importantes para, más adelante, poder entender sin dificultad cada paso realizado hasta la obtención del filtro final.

### 1.3.1 Matriz de acoplamiento

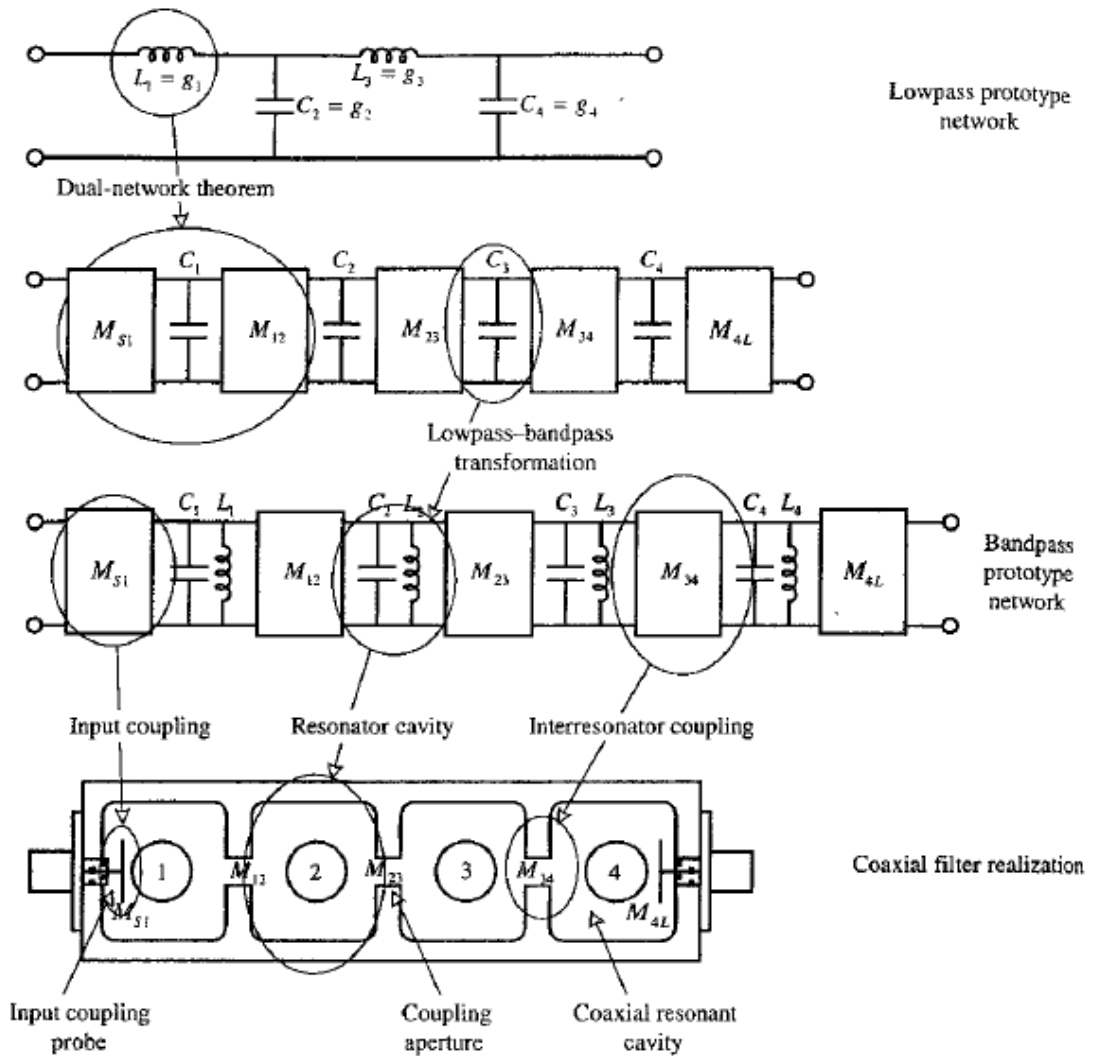
#### *1.3.1.1 Introducción al concepto de acoplamiento*

Para realizar cualquier tipo de filtro, la estructura de éstos se resume siempre en dos partes diferenciadas: resonadores y acopladores. Para comprender mejor dicha estructura, se comenzará aplicando a circuitos. Después se podrá extrapolar a guías de onda, una vez hallada la matriz de acoplamiento.

La resonancia está comprendida por la conexión en serie o en paralelo de un condensador y una bobina. Los valores de la capacidad y de la inductancia determinan el valor que poseerá la frecuencia de resonancia. En nuestro caso, la conexión entre ambos elementos para conseguir la resonancia será en paralelo.

Los acopladores pueden poseer distintas estructuras. Están compuestos por un cierto número de bobinas y/o condensadores. Son los encargados de transferir parte de la energía entre dos estructuras resonantes para poder realizar filtros de orden mayor. El orden (normalmente representado mediante la letra  $n$ ) de un filtro viene dado por el número de resonancias que éste posea.

A modo de ejemplo, en la figura 1.3 se puede ver cómo se consigue un filtro coaxial con cuatro resonancias a partir de un filtro paso bajo compuesto de cuatro elementos ideales: dos bobinas y dos condensadores.



**Figura 1.3 Pasos en el proceso de síntesis de un filtro paso banda resonante de cuarto orden [1]**

El primer paso que se realiza consiste en transformar las bobinas del filtro paso bajo con el que se va a trabajar en inversores de impedancias. Estos inversores son cuadripolos y, por lo tanto, se pueden definir mediante una matriz de tamaño 2x2. Cada acoplo posee una matriz que lo caracteriza.

Para el acoplo  $M_{S1}$  (acoplo de la fuente al primer nodo resonante), los valores de la matriz que lo definen son:

$$\begin{bmatrix} 0 & j \\ j & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ sC_1 & 1 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ sC_1 & 1 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} sC_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

La matriz que define al acoplo  $M_{12}$ , correspondiente al acoplo entre los nodos resonantes 1 y 2, tendría los siguientes valores:

$$\begin{bmatrix} sC_1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & sC_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Para el acoplo  $M_{23}$ , la matriz sería la siguiente:

$$-\begin{bmatrix} 1 + s^2 C_1 C_2 & s C_1 \\ s C_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} s C_1 & 1 + s^2 C_1 C_2 \\ 1 & s C_2 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Siendo la primera matriz el resultado de haber cogido la matriz  $M_{12}$  teniendo en cuenta el efecto producido por la presencia del condensador  $C_2$ :

$$-\begin{bmatrix} 1 & s C_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ s C_2 & 1 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} 1 + s^2 C_1 C_2 & s C_1 \\ s C_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Para la matriz que define al acoplo  $M_{3L}$  ocurre lo mismo: primero se ha de tener en cuenta el efecto que produce el condensador  $C_3$  sobre el acoplo.

$$\begin{bmatrix} s C_1 & 1 + s^2 C_1 C_2 \\ 1 & s C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ s C_3 & 1 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} s(C_1 + C_3) + s^3 C_1 C_2 C_3 & 1 + s^2 C_1 C_2 \\ 1 + s^2 C_2 C_3 & s C_2 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Por lo tanto, la matriz que define al acoplo  $M_{3L}$  poseería los siguientes valores:

$$-j \begin{bmatrix} s(C_1 + C_3) + s^3 C_1 C_2 C_3 & 1 + s^2 C_1 C_2 \\ 1 + s^2 C_2 C_3 & s C_2 \end{bmatrix} \cdot j \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 1 + s^2 C_1 C_2 & s(C_1 + C_3) + s^3 C_1 C_2 C_3 \\ s C_2 & 1 + s^2 C_2 C_3 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

El segundo paso consiste en transformar el filtro paso bajo en uno paso banda. Para ello, se añade en paralelo una bobina de valor  $L_i$  por cada condensador cuyo valor sea  $C_i$ . De esta forma, se consigue una resonancia para una frecuencia determinada por los valores del condensador y la bobina.

El último paso consiste en extrapolar el filtro obtenido en modo circuital a uno en guía de onda. Para ello, los condensadores y bobinas en paralelo pasan a ser cavidades resonantes. La frecuencia a la que resuena viene determinada por la anchura y longitud de la cavidad (suponiendo que el primer modo que se propaga es el  $TE_{10}$ ).

Cada acoplo se convierte en un *iris*. Un iris es el encargado de unir dos cavidades resonantes de un mismo filtro. Puede unir las manteniendo la misma altura que las cavidades resonantes pero siendo mucho más estrecho. Este acoplo se realizaría por el campo magnético de la onda que se propaga, por lo que el iris sería inductivo. También puede acoplar dos cavidades resonantes manteniendo la misma anchura que dichas cavidades pero disminuyendo en altura respecto a ellas. En este caso, el acoplo se produce por medio del campo eléctrico, luego el iris sería capacitivo.

Una anchura mayor (en el caso de un iris inductivo) o una altura mayor (en el caso de un iris capacitivo) indicaría un mayor acoplo entre cavidades.



### 1.3.1.2 Definición de matriz de acoplamiento

La matriz de acoplamiento es una matriz cuadrada de tamaño  $N+2$  (también existe de tamaño  $N \times N$ , pero aquí se trabajará con la de tamaño  $N+2$ ). Los valores que contiene indican cuanta energía se transfiere de un determinado nodo resonante a otro. Un valor elevado indica un acoplamiento alto, es decir, el nodo resonante  $i-1$  transfiere más energía al nodo resonante  $j-1$ , y viceversa, puesto que la matriz de acoplamiento es simétrica respecto de la diagonal principal (siendo  $i$  la fila del valor en cuestión y siendo  $j$  la columna de dicho valor). Estos valores pueden ser negativos y/o imaginarios (variaciones en la fase de la señal). La posición del valor indica cuáles son los nodos que se influyen con ese valor.

Los valores de la diagonal principal indican el efecto de carga que los iris introducen.

El tamaño de la matriz de acoplamientos es  $N+2$ , siendo  $N$  el número de cavidades resonantes (orden del filtro), puesto que también se tienen en cuenta la influencia de la fuente y de la carga.

### 1.3.1.3 Cálculo de la matriz de acoplamiento

Para el cálculo de los valores de la matriz de acoplamiento hay que diferenciar entre los acoplamientos entre resonadores y los acoplamientos de entrada y salida. La forma de obtener sus valores es distinta.

Para hallar el valor de los acoplamientos entre resonadores se han de calcular los valores  $g$  pasobajo que sinteticen la respuesta del filtro *Chebyshev*. Las ecuaciones a utilizar son las siguientes [1]:

$$g_0 = 1 \quad (1.7)$$

$$\beta = \ln\left(\coth\left(\frac{L_{AR}}{17.37}\right)\right) \quad (1.8)$$

$$Y = \sinh\left(\frac{\beta}{2n}\right) \quad (1.9)$$

$$a_k = \sin\left[\frac{(2k-1)\pi}{2n}\right], \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1.10)$$

$$b_k = Y^2 + \sin^2\left(\frac{k\pi}{n}\right), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1.11)$$

$$g_1 = \frac{2^{a_1}}{Y} \quad (1.12)$$

$$g_k = \frac{4^{a_{k-1}a_k}}{b_{k-1}g_{k-1}}, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (1.13)$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1, & \text{si } n \text{ es impar} \\ \coth^2\left(\frac{\beta}{4}\right), & \text{si } n \text{ es par} \end{cases} \quad (1.14)$$

Donde  $n$  es el orden del filtro y  $L_{AR}$  es el rizado del parámetro  $S_{21}$  en la banda de paso, y que puede ser calculado conociendo las pérdidas de retorno.

Respecto a los acoplamientos de entrada y salida, es necesario conocer el comportamiento de la fase en frecuencias cercanas a la de resonancia.

### 1.3.2 Método de realización del filtro en guía de onda

La realización de un filtro en guía de onda comprende una serie de pasos que han de ser explicados para comprender mejor el conjunto de conceptos básicos ya explicados y la influencia que posee el valor de los parámetros que se empleen en el resultado final del filtro.

En este proyecto, los filtros realizados están todos compuestos por cavidades idénticas. Este suceso es debido a que las propiedades de simetría necesarias para crear el filtro sólo se cumplen si las cavidades tienen todas las mismas características físicas.

La creación del filtro se dividirá en pasos diferenciados:

- En el primer paso se obtiene las dimensiones de la cavidad atendiendo al estándar escogido y al *shaping* aplicado a la cavidad.
- En el segundo paso se calculan las dimensiones de los acoplamientos “interiores”, siendo éstos los comprendidos entre las cavidades.
- En el tercer paso se halla el valor físico de los acoplamientos entre el puerto y la cavidad de entrada.
- En el cuarto paso se hallan las longitudes de las cavidades “interiores”, es decir, de las cavidades comprendidas entre los acoplamientos que no son adyacentes ni al puerto de entrada ni al de salida.
- En el quinto paso se calculan las dimensiones exactas de las cavidades primera y última.

#### 1.3.2.1 Primer paso: obtención de las dimensiones de la cavidad

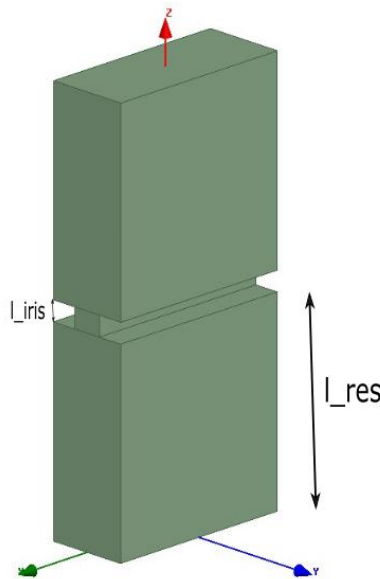
Las dos principales longitudes que se han de tener claras son la anchura y la altura de la cavidad. Estas dimensiones definirán el tamaño del puerto. Existen una serie de tamaños de anchura y altura atendiendo a los estándares definidos por la *Energy Information Administration* (EIA) y por la *Radio Components Standardization Committee* (RCSC). La EIA define los estándares *WR* y la RCSC los estándares *WG*.

El valor correspondiente a las variables del modelado se obtendrá mediante el análisis de auto valores. Este análisis proporcionará las características para cada uno de los valores introducidos, permitiendo así escoger las dimensiones para el modelado atendiendo a los intereses del diseñador.

### 1.3.2.2 Segundo paso: cálculo de las dimensiones de los acoplamientos interiores

Para realizar este paso es necesario aplicar las propiedades de simetría con dos resonadores acoplados. Éstas permiten calcular el valor del coeficiente de acoplamiento normalizado.

Para el cálculo de los acoplamientos interiores se crea una estructura en guía de onda compuesta por las cavidades  $i$  e  $i+1$ , unidas mediante el acoplamiento  $M_{i,i+1}$ . Siendo  $z$  el eje de propagación, se obtiene una simetría respecto al plano  $XY$  justo en  $z=l_{res}+l_{iris}/2$ , siendo  $l_{res}$  la longitud de las cavidades (ambas poseen la misma longitud) y  $l_{iris}$  la longitud del iris (ver figura 1.4).

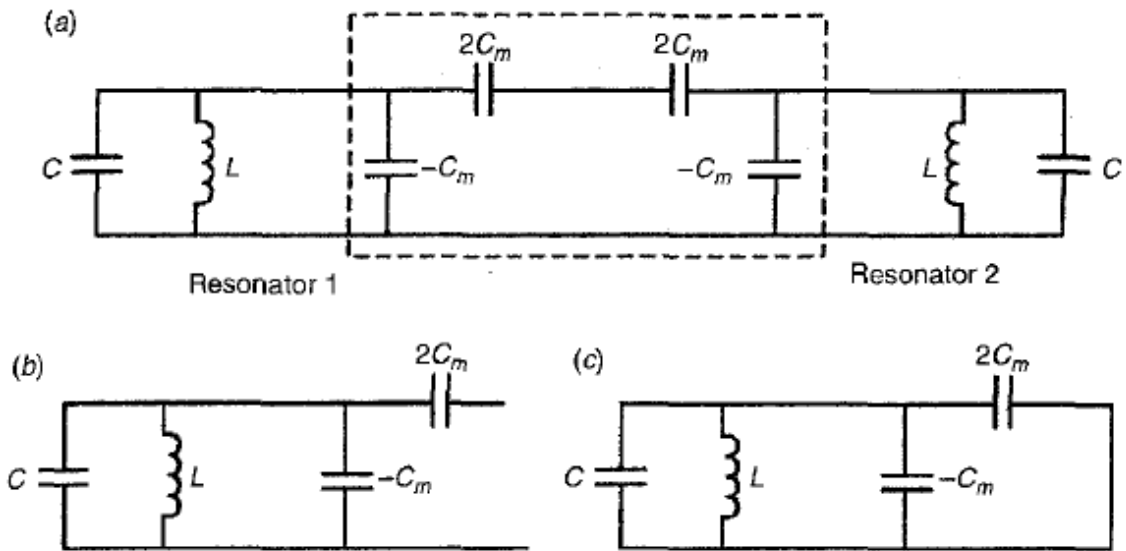


**Figura 1.4 Estructura en guía de onda de dos resonadores acoplados mediante un iris capacitivo**

Si se tiene un iris capacitivo, la dimensión a calcular sería su altura ya que la anchura sería la misma que la de la cavidad. En un iris inductivo ocurriría al contrario: el valor a calcular es la anchura, pues la altura sería la de la cavidad.

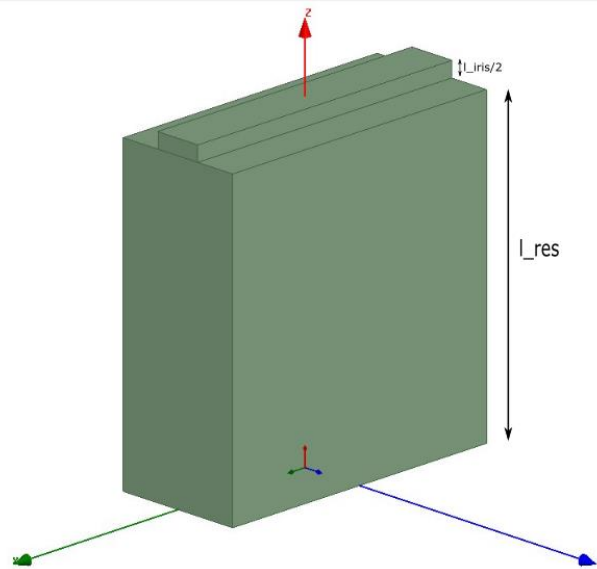
Si se trabaja con circuitos, se tendrían dos resonancias de idénticas características compuestas por un condensador y una bobina en paralelo. Estos elementos estarían unidos dos a dos mediante un acoplamiento capacitivo compuesto por varios condensadores de un cierto valor. En la figura 1.4 se puede observar cómo sería este circuito, y cómo se aplicarían las condiciones de

simetría para poder hallar el valor exacto del acoplamiento dadas unas especificaciones del filtro.



**Figura 1.5 (a) Inversor de admitancias. Circuito equivalente de dos resonadores capacitivamente acoplados; (b) pared magnética (*even mode*); (c) pared eléctrica (*odd mode*) [1].**

Si se extrapola esta idea a guías de onda, y suponiendo que se tiene un iris capacitivo, el parámetro a barrer es la altura de dicho iris. Es aquí donde se aplican las condiciones de simetría. Para ello, se “parte” la guía en el punto  $z = l_{res} + l_{iris}/2$ . Se impone la condición de pared eléctrica para la superficie del iris que está justo en el punto  $z$  ya nombrado, y se calcula la frecuencia de resonancia. Esta frecuencia se corresponde con la frecuencia *odd* (ver figura 1.6).



**Figura 1.6 Estructura en guía de onda tras aplicar las condiciones de simetría**

Para calcular la frecuencia *even*, la condición a imponer es la de pared magnética en la misma superficie en la que se impuso la condición de pared eléctrica.

Una vez calculadas las frecuencias *even* y *odd*, se puede calcular el coeficiente de acoplamiento como:

$$k = \frac{f_{odd}^2 - f_{even}^2}{f_{odd}^2 + f_{even}^2} \quad (1.15)$$

Este mismo paso se realiza sucesivas veces modificando el valor de la altura del iris. Al final se obtendrán tantos valores de coeficientes de acoplamiento como valores se le hayan asignado a la altura del iris.

Es necesario normalizar el coeficiente de acoplamiento. Para ello, se multiplica dicho coeficiente por el cociente entre la frecuencia central del filtro dividida entre el ancho de banda que se desea obtener una vez esté el filtro diseñado, como se muestra en (1.16).

$$k_n = k \cdot \frac{f_0}{BW} \quad (1.16)$$

Siendo  $k$  el coeficiente de acoplamiento,  $f_0$  la frecuencia central de la banda de paso y  $BW$  el ancho de banda.

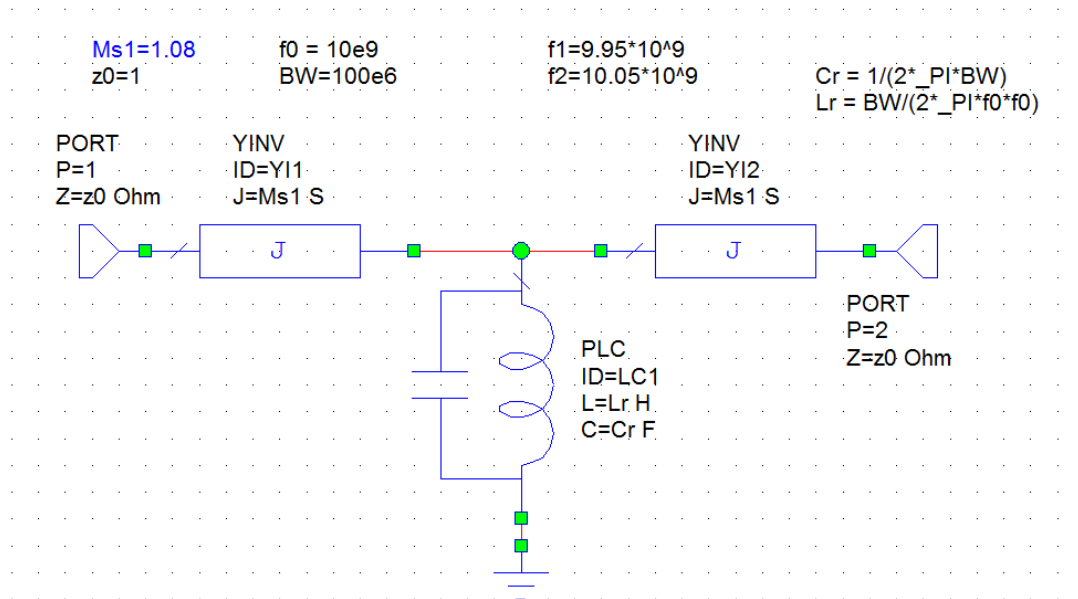
Estando ya normalizado el coeficiente de acoplamiento, el valor que éste debe poseer para cumplir las especificaciones solicitadas viene dado por la matriz de acoplamientos. El coeficiente de acoplamiento  $k_{i,i+1}$  (siendo  $i=1$  el acoplamiento entre la primera y la segunda cavidad resonante) debe poseer el mismo valor que el acoplamiento  $M_{i,i+1}$  de la matriz de acoplamiento  $N+2$  calculada mediante la síntesis de Chebyshev. Esto sólo se cumple para una determinada altura del iris.

### 1.3.2.3 Tercer paso: cálculo de las dimensiones físicas de los acoplamientos entre los puertos y la cavidad adyacente a ellos

Para hallar las dimensiones físicas de los acoplamientos entre el puerto y la cavidad adyacente es necesario conocer la respuesta que debe tener un filtro ideal de semejantes características. Este filtro ideal se puede realizar empleando el programa *AWR Design Environment*.

En este paso se realiza una guía de onda compuesta de un puerto, el iris en cuestión, la primera cavidad resonante, otro iris de semejantes características al anterior y otro puerto.

Esta estructura es representada en *AWR Design Environment* mediante un circuito compuesto por un puerto adaptado, un inversor de admitancias, un condensador con una bobina en paralelo, otro inversor de admitancias y, finalmente, se coloca otro puerto adaptado. La bobina y el condensador se corresponden con la cavidad resonante de la estructura en guía de onda, y los inversores de admitancias se corresponden con los iris de la estructura en guía de onda. En la figura 1.7 está mostrado el modelo circuital descrito.



**Figura 1.7 Modelo circuital compuesto por dos puertos, dos inversores de admitancias y una resonancia en paralelo**

En el modelo circuital, la impedancia del puerto posee un valor normalizado igual a 1. El valor del condensador y el valor de la bobina vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$C = \frac{1}{2\pi BW} \quad L = \frac{BW}{2\pi f_0^2} \quad (1.17 \text{ y } 1.18)$$

BW es el ancho de banda deseado para el filtro y  $f_0$  es la frecuencia central.

El valor del inversor de admitancias (acoplamiento) depende del ancho de banda que se desee así como del orden del filtro a realizar.

Una vez creado el modelo circuital ideal correspondiente a la estructura en guía de onda compuesta de dos puertos, dos iris de iguales características y la cavidad resonante, se calculan los parámetros S de la estructura. Esta respuesta es la ideal y, por tanto, es la que se debe alcanzar con la estructura en guía de onda.

Los parámetros que se han de modificar en la estructura en guía de onda para obtener la respuesta adecuada son la longitud de la cavidad resonante y la altura del iris (suponiendo un iris capacitivo). Aumentar o disminuir la longitud de la cavidad disminuirá o aumentará la frecuencia de resonancia, respectivamente. Aumentar o disminuir la altura del iris traerá dos consecuencias: aumentar el ancho de banda y reducir la frecuencia de resonancia o disminuir el ancho de banda y aumentar la frecuencia de resonancia.

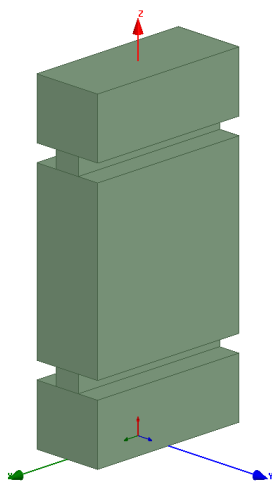
Como la respuesta que se desea obtener es conocida, y el efecto que sobre ella ejercen los parámetros con los que se está trabajando también, alcanzar la respuesta deseada no es un proceso demasiado costoso. De esta forma, ya se obtendría el valor para el acoplamiento (iris) de los puertos.

#### 1.3.2.4 Cuarto paso: cálculo de la longitud de las cavidades “interiores”.

Las cavidades interiores son aquellas que a ambos lados tienen otra cavidad. En un filtro se corresponderían con todas las cavidades exceptuando la primera y la última, pues a uno de los lados tienen un puerto.

Para el cálculo de estas longitudes se realizará un análisis de auto valores. Para ello, se usará el *eigensolver* de HFSS. Esto permitirá hallar la longitud exacta para conseguir que la frecuencia de resonancia sea la deseada.

La estructura que se tiene que diseñar ahora estará compuesta por dos puertos (a pesar de ser un análisis de auto valores, es necesaria la introducción de los dos puertos para conocer la variación en frecuencia que sufre el modo resonante en la cavidad), dos iris y una cavidad resonante entre los iris (ver figura 1.8). Esta estructura sólo será implementada para cavidades “interiores”. El valor de los iris determina la cavidad a la que se le está calculando la longitud.



**Figura 1.8 Estructura en guía de onda compuesta por dos puertos, dos iris y una cavidad resonante**

En un filtro de orden N, se tienen N cavidades resonantes y N+1 iris, que se enumerarán desde el 1 al N+1. El primer iris de la estructura generada en este paso poseerá el valor del iris 2 (calculado en el paso dos, se corresponde con el iris situado entre la primera cavidad y la segunda) y el segundo iris el valor del iris 3 (también calculado en el paso dos, se corresponde con el iris situado entre la segunda cavidad y la tercera) cuando se calcula la longitud de la cavidad resonante 2.

Para el cálculo de la tercera cavidad resonante, el primer iris de la estructura generada poseerá el valor del iris 3 y el segundo iris de la estructura poseerá el valor del iris 4. Este proceso se repite sucesivamente hasta calcular la longitud de la cavidad  $\frac{N}{2}$  para valores de N pares y hasta la cavidad  $\frac{N}{2} + 1$  cuando N sea impar. Este hecho sucede debido a que el filtro es simétrico respecto al plano XY en su punto medio.

#### *1.3.2.5 Quinto paso: cálculo de las longitudes de las cavidades “exteriores”.*

Se entenderán por cavidades exteriores aquellas que no son las interiores, es decir, la primera y la última cavidad del filtro.

Una vez llegado a este punto, se puede apreciar que se han calculado las dimensiones de todos los iris, y la longitud de todas las cavidades exceptuando las que han sido denominadas como exteriores. Para hallar esta longitud (al ser el filtro simétrico, la longitud de la primera cavidad es igual a la longitud de la última cavidad) se tiene que crear la estructura total del filtro que se pretende diseñar. La longitud a calcular debe tomar el valor que se le dio a la cavidad central en el paso 3.

Con la estructura completamente definida, se realiza un barrido de parámetros S. El resultado que se obtendrá será parecido al deseado, diferenciándose de éste en que uno de los polos estará separado claramente del resto. Esto se debe a que las dimensiones del filtro están casi todas perfectamente calculadas, a excepción de la longitud que ahora se pretende calcular. Modificando el valor de esta longitud adecuadamente (disminuyéndola si se pretende que el polo “solitario” suba en frecuencia y aumentándola si se pretende lo contrario) se conseguirá la respuesta en frecuencia deseada.

Muchas veces, a pesar de modificar correctamente esta longitud, la respuesta del filtro no es tan buena como se desea. En estos casos, es necesario aumentar un poco el acoplamiento de los puertos.



## 2. Primeros análisis de cavidades con el *shaping* propuesto

### 2.1 Estudio de la fiabilidad del programa

Para realizar el estudio de cavidades y guías de onda existen diversos programas que pueden realizar los análisis deseados. Por ejemplo, *HFSS* y *CST*. El programa sobre el que se va a desarrollar este trabajo será *Ansys Electronics 17.2*, una de las últimas versiones de *HFSS* [13].

Como prueba de la precisión del programa, se ha calculado el factor de calidad de forma analítica y usando el programa para una cavidad rectangular con las dimensiones del estándar WR90, cuyas longitudes son  $a=22.86\text{mm}$ ,  $b=10.16\text{mm}$  y  $d=19.88\text{mm}$ , siendo  $a$  la anchura,  $b$  la altura y  $d$  la longitud en el eje de propagación. Estas medidas proporcionan una frecuencia de resonancia de 10GHz. Para ello, se ha aplicado la siguiente ecuación:

$$Q_U = \left(\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}\right)^{-1} \quad (2.1)$$

Donde  $Q_c$  es el factor de calidad debido al conductor y  $Q_d$  es el factor de calidad debido al dieléctrico.

Por un lado:  $Q_d = (\tan \delta)^{-1}$ ,  $\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon \epsilon'}$  = 0, ya que  $\sigma_e = 0$  Siemens. La inexistencia de dieléctricos para esta cavidad es el motivo por el que no se puede perder energía en los dieléctricos, por lo que  $\tan(\delta) = 0$ .

Por lo tanto:  $Q_d = \infty$ .

Utilizando las fórmulas expuestas en [12]:

$$Q_c = \frac{\pi \cdot \eta}{2 \cdot R_s} \frac{b \cdot (a^2 + d^2)^{3/2}}{a \cdot d \cdot (a^2 + d^2) + 2 \cdot b \cdot (a^3 + d^3)} \quad (2.2)$$

Siendo  $R_s$  la resistencia superficial, que depende únicamente del material conductor.

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu}{2 \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 10 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 38.000.000}} = 0.032232 \frac{\Omega}{m} \quad (2.3)$$

Entonces:  $Q_c = 6333,28$ . Finalmente, se obtiene que:

$$Q_U = \left(\frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{Q_c}\right)^{-1} = Q_c = 6333,28.$$

Si se calcula este factor usando *Ansys Electronics* se podrá comprobar la fiabilidad al usar el programa. Para este caso, el  $Q_{UNLOADED}$  obtenido mediante simulación ha sido:

$Q_U = 6331,07$ .

El error producido por el programa empleado, *Ansys Electronics*, ha sido del 0,035%. El error muestra la certidumbre en los resultados que proporcionará el programa.

## 2.2 Ejemplos de cavidades y análisis de resultados

Para todos los ejemplos de este apartado, las dimensiones de la cavidad se corresponden con las del estándar WR90. En este apartado simplemente se explicará cómo y por qué varían las características de una determinada forma al modificar el valor de los parámetros empleados para variar el *shaping*. Para dar estas explicaciones, la comparación se ha realizado respecto a la guía rectangular, pues así es más fácil de entender.

Para que la frecuencia de resonancia del primer modo sea siempre 10GHz, se ha adecuado la longitud de la cavidad para cada caso.

### 2.2.1 Primer ejemplo con el *shaping* propuesto

El modelado propuesto (figura 1.2), ya explicado en el subsección correspondiente a la descripción del proyecto (subsección 1.1.4, *modelado aplicado*), está basado en dos parámetros que varían la geometría de la cavidad modificando la altura de ésta en tres puntos equidistantes y manteniendo la sección transversal constante. Por lo tanto, a lo largo del eje de propagación no existirá ninguna variación geométrica.

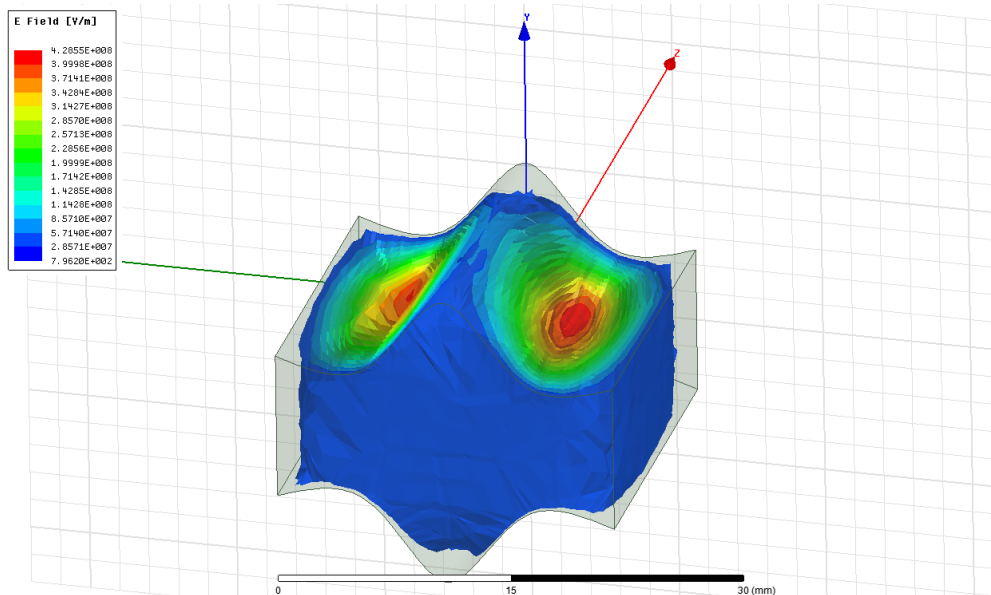
Este *shaping* puede ser interpretado como la sustitución en la sección transversal de una cavidad rectangular de las líneas horizontales que delimitan la altura (las “tapas” de la cavidad rectangular) por líneas sinusoidales.

Teniendo en cuenta esta forma de entender el modelado aplicado, se tendrán máximos y mínimos. Se comenzará situando el “máximo” (mayor altura) justo en el punto central. Los “mínimos” estarán en los puntos que les corresponde, cuya posición es el punto intermedio entre el centro (donde ahora se sitúa el máximo) y el lateral (ver figura 2.1).

En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de cavidad con esta forma. Se puede apreciar claramente la posición del “máximo” justo en la zona central y de los mínimos en los puntos intermedios entre esta zona y los laterales. En la figura 2.2 se pueden ver los resultados para la cavidad.

Dichos resultados se componen de dos características: frecuencia de resonancia y factor de calidad no cargado. La frecuencia de resonancia es aquella en la que

se produce un campo electromagnético en el interior de la cavidad. El factor de calidad no cargado es el cociente entre la energía máxima que la cavidad puede almacenar dividido por la potencia disipada en las paredes de la cavidad.



**Figura 2.1** Primer ejemplo con el *shaping* propuesto (altura central: 20,32mm; alturas intermedias: 9,144mm)

Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
Mode 1	10.0075 +j 0.000816701	6126.79
Mode 2	12.2851 +j 0.000862345	7123.06
Mode 3	12.9897 +j 0.00111559	5821.91

**Figura 2.2** Resultados del primer ejemplo con el *shaping* propuesto

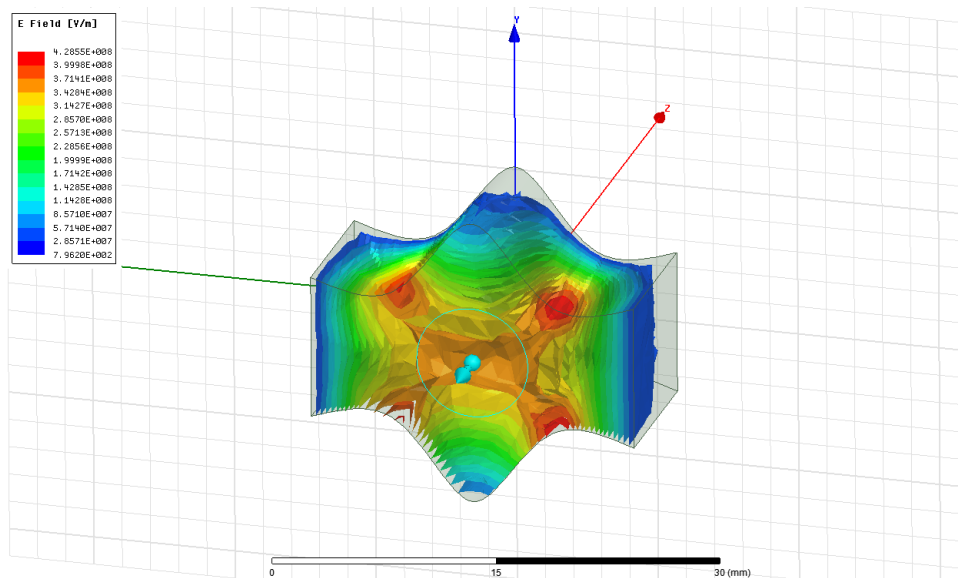
La altura central (distancia entre máximo) para este caso es de 20,32mm, y las alturas intermedias (distancia entre “mínimos”) poseen un valor de 9,144mm.

El factor de calidad  $Q_{UNLOADED}$  viene determinado por el Q del primer modo:  $TE_{10}$ . En este caso, dicho  $Q_U$  posee un valor de 6126,79. El rango libre de espurios se define como la distancia en frecuencia entre el modo más cercano al modo de trabajo y éste. Es decir, sería la diferencia entre la frecuencia a la que resuena el segundo modo y la frecuencia a la que resuena el primero. Este valor es, para este caso, de 2,28GHz.

Si se recuerda del apartado anterior, el factor de calidad para una cavidad rectangular tenía un valor de 6331,24 (valor obtenido con el software). El rango de espurios para una cavidad rectangular con las dimensiones del estándar WR90 es de 5,13GHz. Al comparar ambas cavidades, se ve como se ha

empeorado en las dos características en las que se ha basado el análisis en este proyecto.

El *shaping* aplicado provoca que el máximo de campo que debería situarse en la zona central se disperse hacia los lados. Este efecto se puede observar mejor en la figura 2.3. Por lo tanto, los máximos de campo eléctrico se sitúan muy cerca de los “mínimos” de la geometría. Es decir, se ha disminuido el volumen donde el campo eléctrico reside con más intensidad, provocando así que la energía que la cavidad es capaz de almacenar disminuya.



**Figura 2.3** Dispersión del máximo de campo eléctrico

Teniendo en cuenta que el factor de calidad se define como el cociente entre la energía total almacenada y la energía disipada en las paredes de la cavidad, se puede ver como la relación entre el factor  $Q_{UNLOADED}$  y la energía almacenada es directamente proporcional. Por lo tanto, al disminuir la energía total que es capaz de almacenar también disminuirá dicho factor.

La otra característica que se ha tenido en cuenta para este proyecto, el rango libre de espurios, también decrece. En otras palabras, también empeora. Este hecho viene marcado por las variaciones de la altura, pues introducen desplazamientos en la frecuencia de resonancia de algunos modos. En este caso, se ha disminuido la frecuencia de resonancia del primer modo espurio.

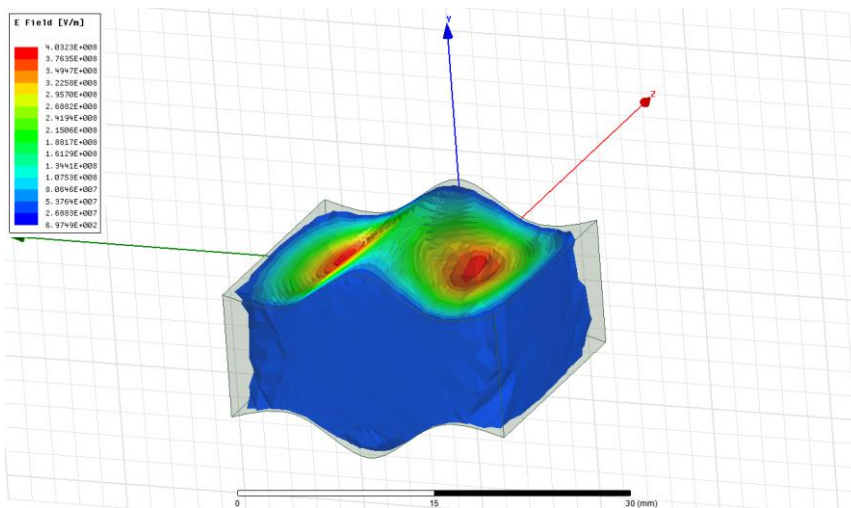
### 2.2.2 Segundo ejemplo con el *shaping* propuesto

Para este segundo caso se ha disminuido la altura central. En la figura 2.1 se podía ver como el *shaping* anterior provocaba en el centro de la cavidad la aparición de zonas (las más cercanas a las paredes de arriba y de debajo de la

cavidad) donde la intensidad de campo era muy baja (representado mediante un color azul oscuro).

Este hecho indica que no se está aumentando la energía máxima que es capaz de almacenar la cavidad, pero sí que se está aumentando la potencia disipada en las paredes de la cavidad. Con estas premisas, se llega a la conclusión de que disminuyendo la altura central del caso anterior se mejorará el factor de calidad  $Q_{UNLOADED}$ .

En la figura 2.4 se muestra la distribución del campo eléctrico en la nueva cavidad generada. Los resultados se muestran en la figura 2.5.



**Figura 2.4 Segundo ejemplo con el *shaping* propuesto (altura central: 15,24mm; alturas intermedias: 9,144mm)**

Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
Mode 1	9.99742 +j 0.000809746	6173.18
Mode 2	13.8405 +j 0.00106752	6482.55
Mode 3	14.4087 +j 0.000899882	8005.88

**Figura 2.5 Resultados del segundo ejemplo con el *shaping* propuesto**

Para este segundo caso, se le asignó a la variable altura central un valor de 15,24mm. El valor que se le dio a la otra variable empleada para realizar el *shaping*, las alturas intermedias, fue de 9,144mm.

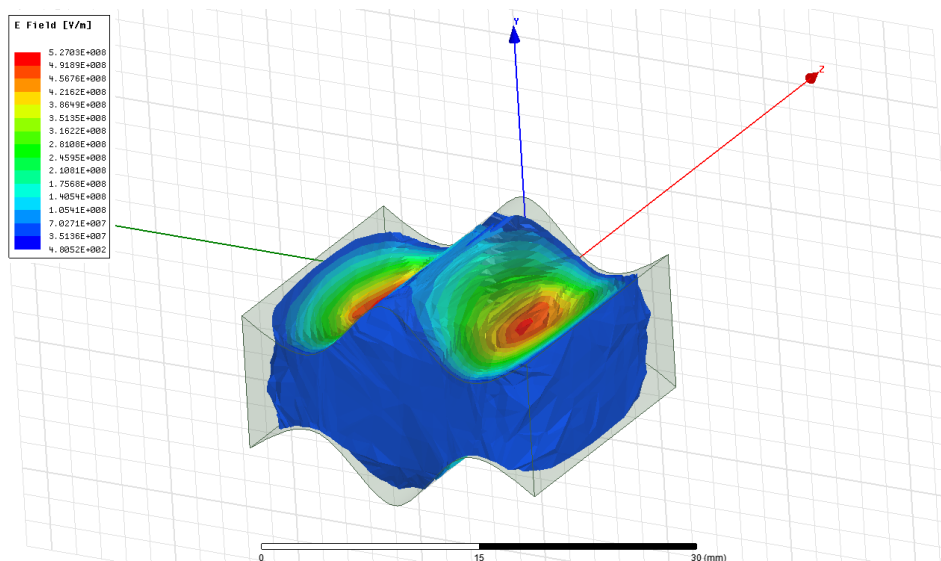
El  $Q_{UNLOADED}$  apenas varía. La energía máxima que es capaz de almacenar la cavidad es la misma. La potencia disipada en las paredes de la cavidad ha disminuido un poco.

El rango libre de espurios es ahora de 3,84GHz. Ha mejorado respecto al caso anterior. El modo espurio más cercano se ve claramente influenciado por esta altura. Si se desea que este modo resuene a una frecuencia mayor para aumentar el rango libre de espurios, la denominada altura central deberá disminuirse.

### 2.2.3 Tercer ejemplo con el *shaping* propuesto

Un último ejemplo que se va a exponer manteniendo el “máximo” de la geometría en el centro de la cavidad consistirá en disminuir las denominadas alturas intermedias a la cavidad del caso anterior. Este hecho ayudará a entender cómo afecta esta variable a las características de la cavidad.

La cavidad que se obtendría al aplicar dicho *shaping* se muestra en la figura 2.6, y en la figura 2.7 se pueden ver sus características.



**Figura 2.6 Tercer ejemplo con el *shaping* propuesto (altura central: 15,24mm; alturas intermedias: 6,096mm)**

	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	10.0110 +j 0.00107955	4636.64
	Mode 2	12.8072 +j 0.00132257	4841.81
	Mode 3	14.9568 +j 0.00111352	6716.00

**Figura 2.7 Resultados del tercer ejemplo con el *shaping* propuesto**

En este tercer ejemplo, el valor de la altura central es de 15,24mm. Las alturas intermedias poseen aquí un valor de 6,096mm.

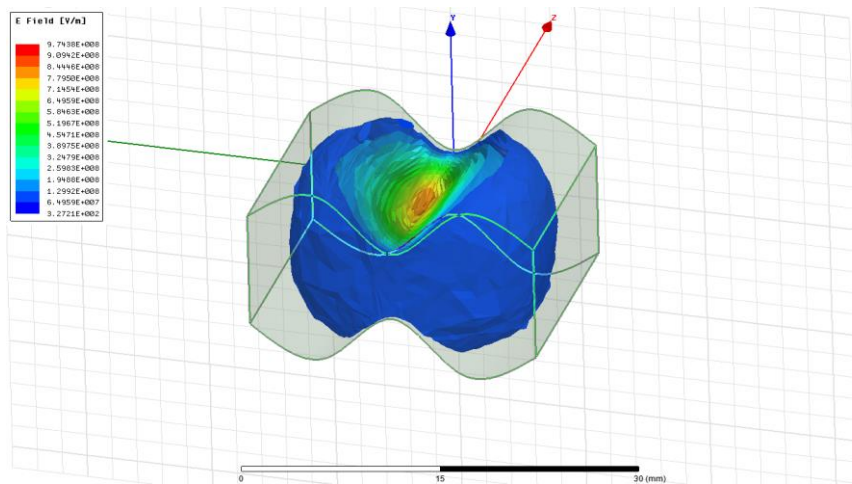
En lo referente al factor de calidad, se observa una fuerte disminución en su valor. Como anteriormente se dijo, el máximo de campo eléctrico, influenciado por el modelado aplicado, se dispersa hacia los lados. Al disminuir las alturas intermedias, esta zona donde se sitúan los máximos de campo eléctrico posee un volumen menor que en el caso anterior. Por lo tanto, el factor  $Q_{UNLOADED}$  es menor.

El rango libre de espurios también disminuye. Al hacer más pequeñas las alturas intermedias es necesario aumentar la longitud de la cavidad para mantener la frecuencia de resonancia (10 GHz). Este aumento en la longitud afecta más al modo espurio que al primer modo que se excita, provocando que aquel se acerque en frecuencia más a éste, conforme se disminuye la variable denominada alturas intermedias.

#### 2.2.4 Cuarto ejemplo de cavidad con el *shaping* propuesto

Para los tres ejemplos mostrados se ha comprobado que en ningún caso se ha mejorado ninguna de las dos características ( $Q_{UNLOADED}$  y rango libre de espurios) respecto a la cavidad rectangular. Debido a esto, se va a realizar un cambio: ahora la altura central tendrá un mínimo, mientras que las denominadas alturas intermedias poseerán un máximo.

En la figura 2.8 se puede observar qué forma posee una cavidad como la descrita ahora. Esta “nueva” cavidad se puede entender como una cavidad *ridge* (mostrada en la figura 1.1) pero con los lados redondeados. Los resultados de esta cavidad se pueden ver en la figura 2.9.



**Figura 2.8** Cuarto ejemplo con el *shaping* propuesto (altura central: 6,096mm; alturas intermedias: 15,24mm)

Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
Mode 1	10.0039 +j 0.000980367	5102.10
Mode 2	14.3935 +j 0.00102872	6995.85
Mode 3	14.5835 +j 0.00108762	6704.35

**Figura 2.9** Resultados del cuarto ejemplo con el *shaping* propuesto

En este caso, el valor de la altura central es de 6,096mm. Las alturas intermedias han tomado un valor de 15,24mm.

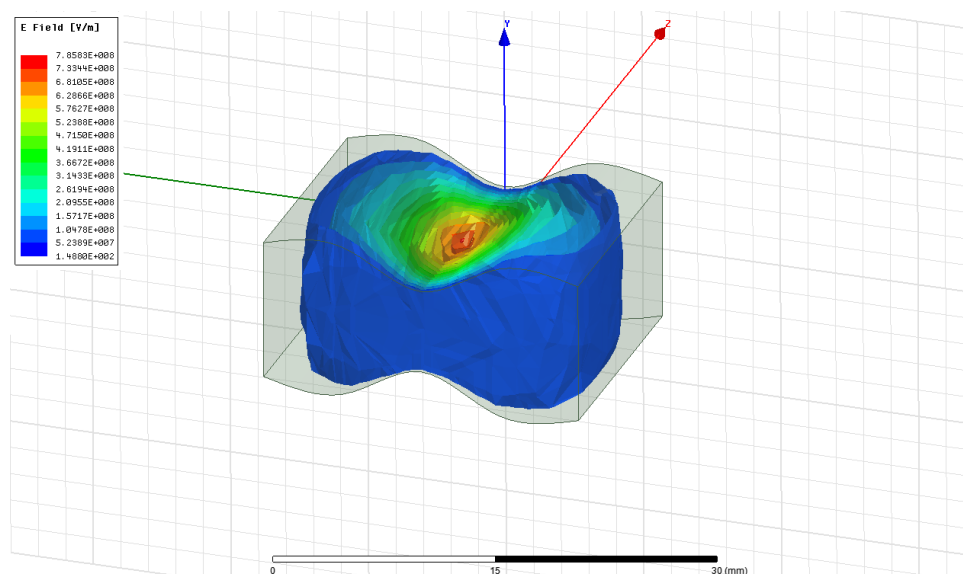
El factor de calidad posee un valor de 5102,1. Este valor sigue siendo inferior al ofrecido por la guía rectangular (6331,07). En este caso, el máximo de campo eléctrico no se dispersa hacia los lados, sino que se queda en la zona central. Esta zona está muy influenciada por el valor del parámetro altura central, cuyo valor ha sido disminuido para realizar este ejemplo. Esto indica que la energía máxima que es capaz de almacenar la cavidad va a ser menor, trayendo como consecuencia un factor de calidad menor.

El rango libre de espurios es de 4,39 GHz. Esta característica también ha sido empeorada respecto al caso de la cavidad rectangular. El aumento del parámetro alturas intermedias provoca el acercamiento en frecuencia del modo espurio.

### 2.2.5 Quinto ejemplo con el *shaping* propuesto

En el paso del segundo al tercer ejemplo, la variación introducida fue la disminución del valor de la variable alturas intermedias. Se pudo comprobar como este hecho empeoraba las características de la cavidad. En el caso anterior, las características obtenidas también han sido bastante pobres. En cambio, las denominadas alturas intermedias poseían un valor bastante elevado. Por ende, parece que esta variable debe tener un valor parecido a la altura del lateral de la cavidad.

En la figura 2.10 se muestra la cavidad correspondiente a la que se obtendría si a la cavidad del apartado anterior se le modifica al valor de las alturas intermedias para hacer que tengan un valor cercano al que posee el lateral de la cavidad. Este valor es 11,176mm. La figura 2.11 muestra las características de esta nueva cavidad creada.



**Figura 2.10 Quinto ejemplo con el *shaping* propuesto (altura central: 6,096mm; alturas intermedias: 11,76mm)**



	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	10.0348 +j 0.000953227	5263.62
	Mode 2	16.2488 +j 0.000980359	8287.17
	Mode 3	16.7089 +j 0.00130398	6406.87

**Figura 2.11 Resultados del quinto ejemplo con el *shaping* propuesto**

El factor de calidad posee un valor de 5263,62. Sigue siendo menor al obtenido con una cavidad rectangular. El hecho que produce este efecto es el valor de la altura central, produciendo que la intensidad máxima de campo eléctrico, situado en esa misma zona, sea disminuida. Como consecuencia, la energía máxima que es capaz de almacenar la cavidad disminuye, disminuyendo entonces el  $Q_{UNLOADED}$ .

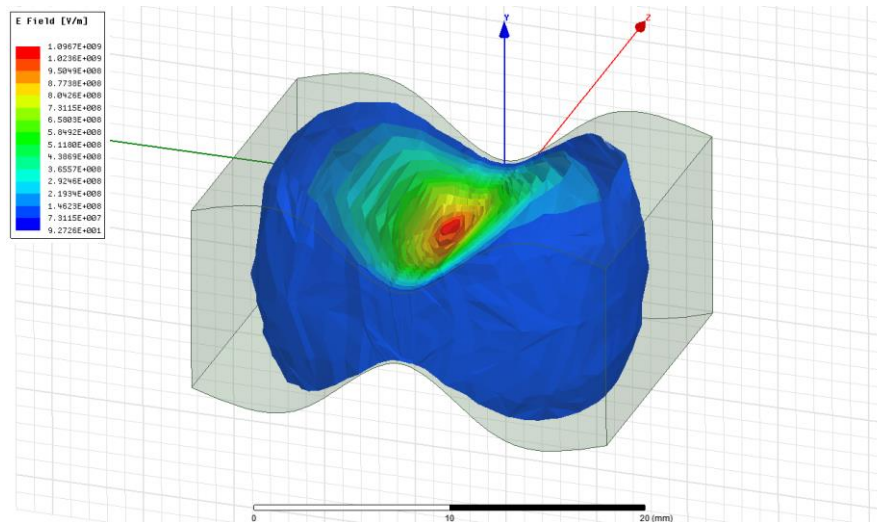
Este ejemplo es el primero que ofrece una mejora: el rango libre de espurios aumenta. Para este caso, posee un valor de 6,25 GHz. El valor dado a los parámetros utilizados ha conseguido que la distancia en frecuencia entre el modo espurio y el primer modo sea mayor.

Además, cabe destacar que cualquier variación en los parámetros empleados (altura central y alturas intermedias) traerá como consecuencia variaciones en los valores del factor de calidad y del rango libre de espurios. Basándonos en esta premisa, y teniendo en cuenta que se ha conseguido aumentar el rango libre de espurios (aunque el factor de calidad sea algo menor), se puede concluir que existe una cavidad con este *shaping* que puede aumentar considerablemente el rango libre de espurios de la cavidad rectangular manteniendo un  $Q_{UNLOADED}$  de valor similar.

### 2.2.6 Sexto ejemplo con el *shaping* propuesto

Como último ejemplo, se ha mostrado una cavidad muy similar a la anterior, pero introduciendo una disminución notable en la altura central. Hasta ahora se ha comprobado como la variable alturas intermedias debe poseer valores cercanos a la longitud del lateral para obtener buenos resultados. También se ha visto que la altura central no debe tener valores excesivamente grandes, pero no se ha propuesto ninguna cavidad con una altura central muy pequeña.

Esta cavidad se muestra en la figura 2.12, y en la figura 2.13 se pueden apreciar los resultados que ofrece.



**Figura 2.12 Sexto ejemplo con el *shaping* propuesto (altura central: 4,064mm; alturas intermedias: 11,76mm)**

	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	9.99964 +j 0.00117202	4265.98
	Mode 2	16.8414 +j 0.00110671	7608.76
	Mode 3	16.8522 +j 0.00135354	6225.22

**Figura 2.13 Resultados del sexto ejemplo con el *shaping* propuesto**

Las alturas intermedias mantienen el valor del caso anterior. La altura central pasa a valer 4,064mm.

Al igual que en el resto de casos, el factor de calidad es menor. La explicación es la misma: la presencia de un valor pequeño para la altura central.

En cambio, el rango libre de espurios ahora es incluso mayor que en el caso anterior. La disminución en el valor del parámetro denominado altura central propicia un aumento en la distancia entre las frecuencias de resonancia del primer modo y del siguiente (modo espurio).

El hecho de conseguir rangos libres de espurios grandes a cambio de sacrificar el factor de calidad es el motivo principal por el que la comparación se realiza con la cavidad ridge. Esta cavidad se concibió con el mismo propósito. Por lo tanto, resulta interesante una comparación entre ambas (sección 3.2) y comprobar cuál ofrece mejores características.

## 2.3 Conclusiones

Este apartado ha mostrado cómo influyen los parámetros empleados en el modelado. Se ha podido comprobar con datos concretos cómo varían las características de la cavidad al dar unos valores determinados a las variables del *shaping*.

En los últimos ejemplos se ha llegado a mejorar una de las características en las que se basa el estudio de este proyecto: el rango libre de espurios. Este hecho indica que la elección de este modelado para ser estudiado ha sido correcta, pues consigue la mejora en, al menos, una característica de la cavidad.

Los datos mostrados parecen indicar que, para conseguir una cavidad óptima con este modelado, la variable denominada alturas intermedias debe poseer un valor cercano al de la altura lateral. Respecto a la variable altura central, se ha visto cómo permite sacrificar el factor de calidad para ganar en rango libre de espurios.

Por lo tanto, este *shaping* puede ofrecer lo mismo que la cavidad ridge. Además, también ofrece una gran flexibilidad, pues puede ofrecer rangos libres de espurios mayores o menores a costa de un sacrificio mayor o menor del factor de calidad.

### 3. Comparación de la cavidad diseñada con la cavidad rectangular y la cavidad ridge

Hasta ahora se han mostrado datos concretos dados por el estudio de una cavidad a la que se le habían asignado valores determinados para las variables. Estos datos han sido comparados con los que se obtendrían con una cavidad rectangular. Debido a la mejora en el rango de espurios en dos de los ejemplos mostrados, en este apartado también se realizará una comparación con la cavidad ridge. Esta cavidad destaca por tener un gran rango libre de espurios.

Con los datos que se han ido obteniendo, se ha podido interpretar de forma intuitiva como serían las características de una cavidad a la que se le dan unos determinados valores a las dos variables. En este apartado se analiza de forma exacta cual es la variación que sufren las características de la cavidad cuando a uno de sus parámetros se le modifica su valor.

#### 3.1 Comparación con la cavidad rectangular

Al igual que en los ejemplos del capítulo 2, se va a continuar realizando una comparación de los datos obtenidos con los ofrecidos por una cavidad rectangular. Cómo se ha hecho hasta ahora, las características a medir son el factor de calidad  $Q_U$  y el rango libre de espurios (SFR).

Para realizar esta comparación, se barre una de las variables empleadas en el modelado. Por lo tanto, la otra variable permanece fija. El valor que poseerá la variable que esté fija es el valor que tiene ese mismo punto en la cavidad rectangular.

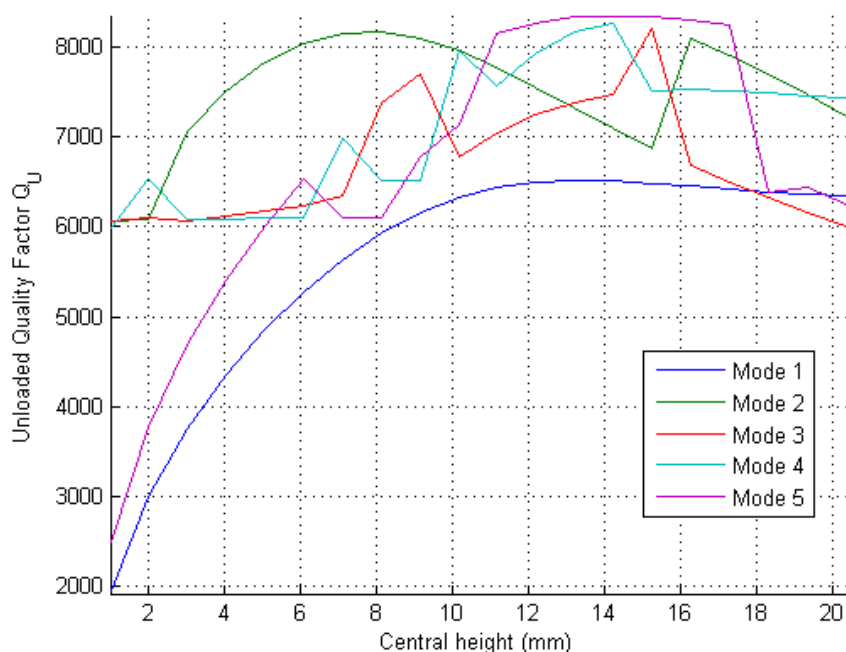
En esta comparación, el estándar usado para dar valores a las alturas laterales y a la anchura de la cavidad ha sido el WR90. La altura es 10,16mm, y la anchura, 22,86mm. Dicho esto, ya se puede conocer el valor que poseerá la variable que permanezca fija mientras se realiza el barrido en la otra variable. Ese valor, como ya se ha dicho, será el mismo que poseería ese punto en la cavidad rectangular. En conclusión, a la variable fija se le ha asignado un valor de 10,16mm.

### 3.1.1 Factor de calidad $Q_{UNLOADED}$

La primera característica que va a ser empleada para la comparación es el factor de calidad  $Q_U$ . Esta comparación va a permitir averiguar donde se sitúa el óptimo para cada una de las variables estando la otra variable fija, así como comprobar si el  $Q_U$  que ofrece la cavidad rectangular puede ser mejorado con el *shaping* propuesto.

#### 3.1.1.1 *Dependiendo de la altura central*

En la figura 3.1 se han mostrado los factores de calidad correspondientes a los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad. El barrido realizado ha sido para la variable altura central.



**Figura 3.1  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando la altura central (alturas intermedias: 10,16mm)**

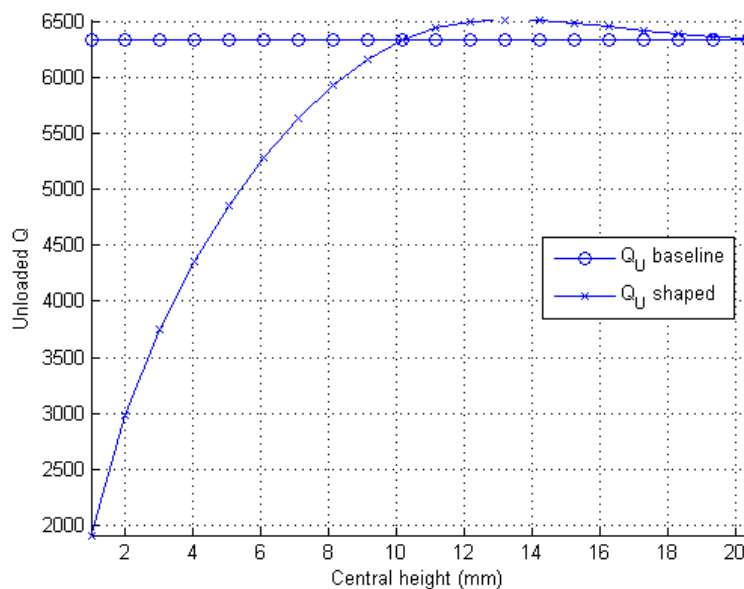
El modo que más interés genera es el primero en propagarse. Está representado en color azul oscuro. Se puede apreciar cómo, para este modo, el valor del factor de calidad aumenta hasta alcanzar un máximo. A partir de ahí comienza a disminuir. Ese máximo se corresponde con el punto óptimo de la variable. No se debe olvidar que este óptimo variará al modificar el valor en el que se ha fijado el otro parámetro del estudio: las alturas intermedias.

La gráfica muestra muchos más cruces de modos (tomando sólo el factor de calidad de cada uno) de los que de verdad existen. La prueba de ello reside en

la incoherencia de los saltos en el valor del factor de calidad en algunos de los modos para una pequeña variación de la altura central. Este hecho viene dado por la forma con la que el programa usado para realizar la gráfica, *Matlab*, une los puntos previamente calculados.

Aun así, los puntos sí que están bien calculados. Además, prestando un poco de atención a la gráfica, se pueden unir fácilmente los puntos de forma coherente. De esta manera se obtendrían 5 líneas curvas que presentan un óptimo cada una para distintos valores de la altura central.

En la figura 3.2 se muestra una gráfica que compara el factor de calidad obtenido en la gráfica 3.1 para el primer modo con el factor de calidad que ofrece la cavidad rectangular.



**Figura 3.2 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y la rectangular (alturas intermedias: 10,16mm)**

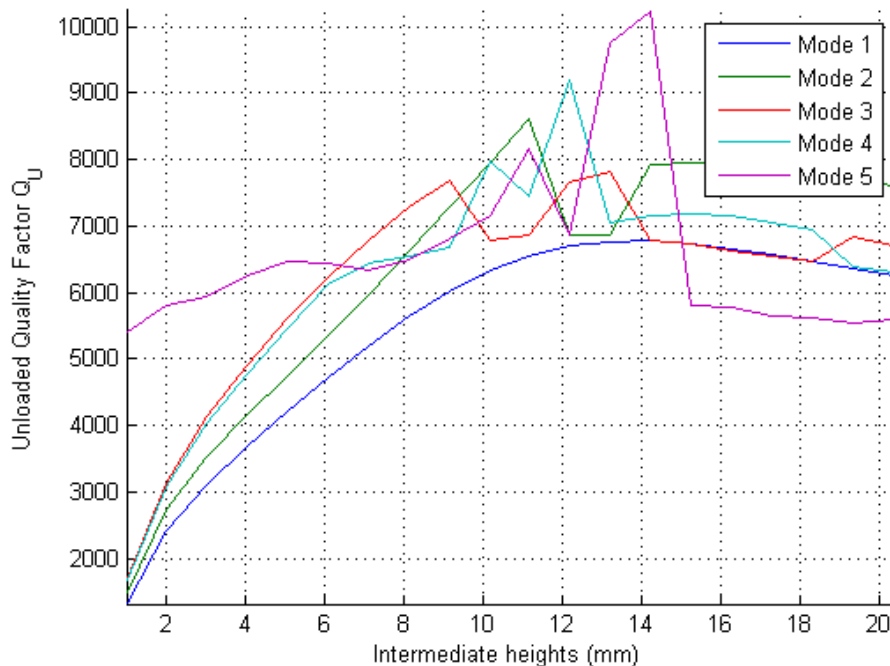
El comportamiento del factor de calidad al variar la altura central queda claramente reflejado en esta gráfica. Como ya se predecía en el apartado 2, un valor muy pequeño de este parámetro conllevaría la disminución brusca del  $Q_U$  de la cavidad.

Un hecho destacable es que el óptimo ya visto en la figura 3.1 presenta un factor de calidad mayor que el ofrecido por la cavidad rectangular. Este hecho es crucial: se había comprobado ya que el rango libre de espurios se podía mejorar, pero no se había comprobado que el factor de calidad también se pudiese.

El rango de valores del parámetro altura central en los que el  $Q_{UNLOADED}$  es mayor no es muy grande. Sin embargo, parece suficiente como para intuir que alguno de los valores dentro de ese rango no va a suponer un sacrificio importante en el rango libre de espurios.

### 3.1.1.2 Dependiendo de las alturas intermedias

En el siguiente estudio, la variable que permanecerá fija será la altura central. El valor que va a poseer es 10,16mm. En la figura 3.3 se muestran los factores de calidad de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad cuando se varía el valor del parámetro denominado alturas intermedias.

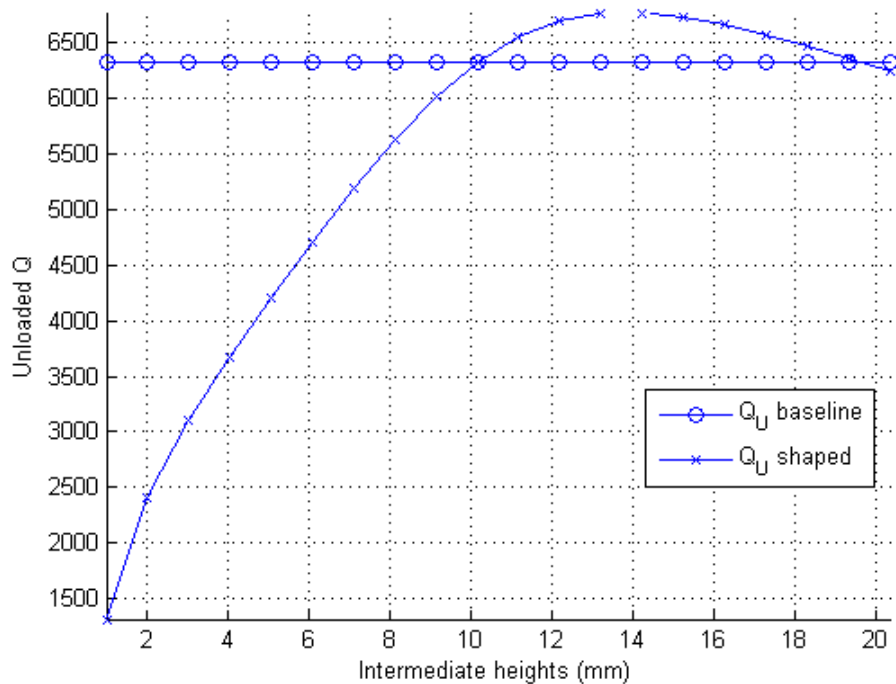


**Figura 3.3 Q<sub>U</sub> de los primeros 5 modos variando las alturas intermedias (altura central: 10,16mm)**

El modo de mayor interés es el primero en excitarse. Está representado por la línea azul oscura. Al igual que en el caso anterior, existe un punto óptimo que ofrece el máximo factor de calidad para este modo. Lógicamente, también ocurre lo mismo: este punto óptimo será diferente si la variable fijada (altura central) recibe otro valor.

La cantidad de cruces que existen entre los valores de los factores de calidad de los modos mostrados en la figura 3.3 no son reales. Aquí ocurre lo mismo que en el caso anterior: una vez que han sido calculados los factores de calidad para cada modo según el valor del parámetro alturas intermedias, se han unido los puntos pero no de forma coherente. A excepción del primer modo, que presenta un comportamiento normal sin cambios bruscos en su factor de calidad.

La comparación a realizar consiste en comprobar si el primer modo de la figura 3.3 puede superar el factor de calidad de la cavidad rectangular. En la figura 3.4 se puede ver esta comparación.



**Figura 3.4 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y de la rectangular (altura central: 10,16mm)**

En esta figura se ve de forma más sencilla el comportamiento que adopta el factor de calidad cuando se modifica el valor del parámetro alturas intermedias. En la gráfica habría que resaltar dos hechos: la presencia de un máximo y que este máximo posea un factor de calidad mayor que el ofrecido por la cavidad rectangular.

La presencia de un máximo muestra que existe un óptimo para las dos variables. Para cada valor que reciba la variable que en este análisis está siendo fijada existirá un valor óptimo distinto para la otra variable. La consecuencia es que existe una cavidad realizable con el modelado propuesto que alcanza el mayor valor posible de  $Q_U$ .

Además, esta cavidad óptima que maximiza el  $Q_U$  superará a la cavidad rectangular en dicho factor.

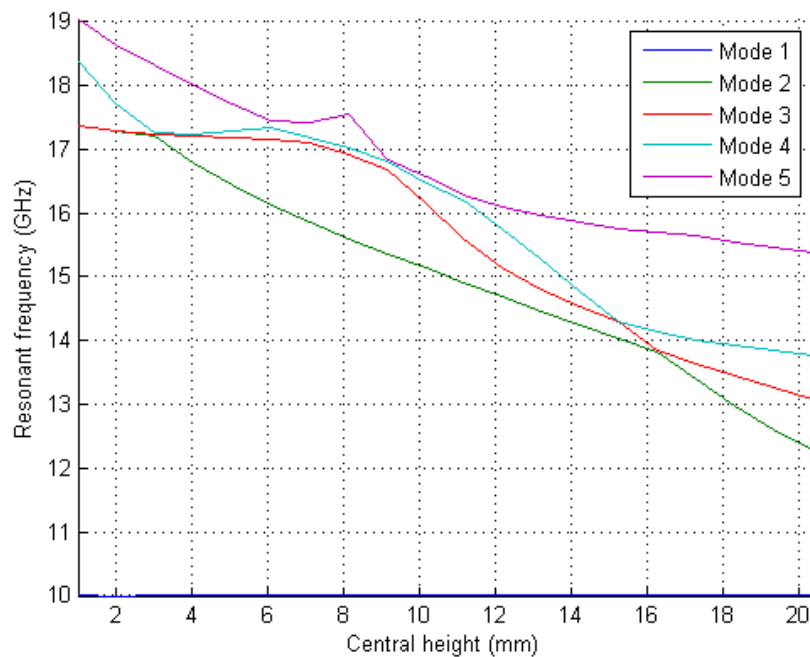
### 3.1.2 Rango libre de espurios (SFR: *Spurious Free Range*)

La otra característica de las cavidades que ha sido empleada para realizar la comparación es el rango libre de espurios. Este estudio va a resolver dos dudas que hasta ahora siguen vigentes: dónde se sitúan los óptimos respecto a este parámetro y si coinciden con los óptimos obtenidos para el  $Q_U$ .



### 3.1.2.1 Dependiendo de la altura central

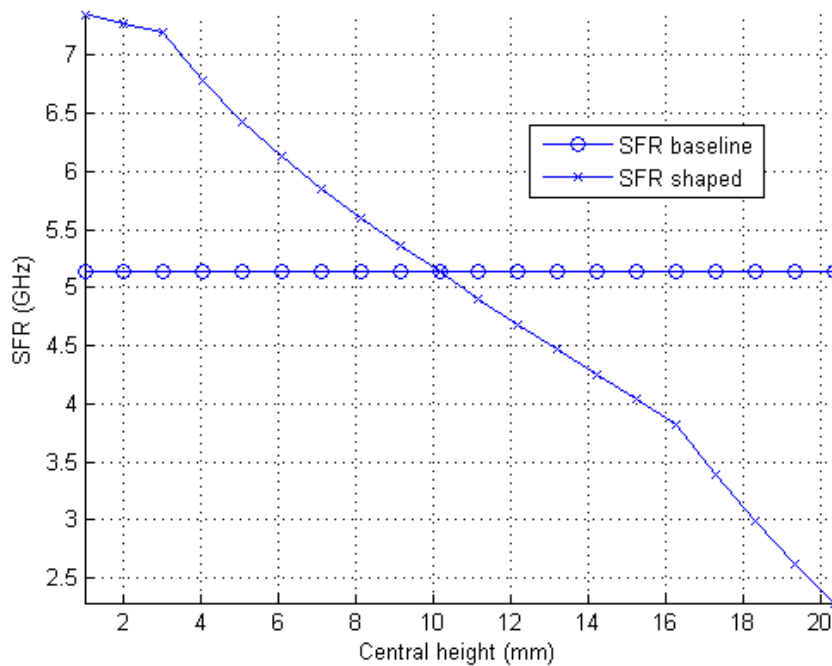
En la figura 3.5 se muestra el comportamiento de los primeros cinco modos que se excitan en la cavidad dependiendo del valor de la altura central. Esta gráfica permite observar cómo se modifica la frecuencia de resonancia de cada modo al variar este parámetro.



**Figura 3.5 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (alturas intermedias: 10,16mm)**

Al resto de modos les afecta de forma distinta aunque parecida la variación de la altura central y, por tanto, la modificación del valor de la longitud de la cavidad. Para todos los modos, la frecuencia de resonancia disminuye al aumentar la altura central. Sin embargo, a algunos modos les afecta más que a otros. Este hecho trae como consecuencia la presencia de distintas pendientes en la gráfica 3.5.

En la figura 3.6 se pueden ver los rangos libres de espurios que ofrece la cavidad rectangular y la cavidad modelada, dependiendo del valor dado a la altura central.



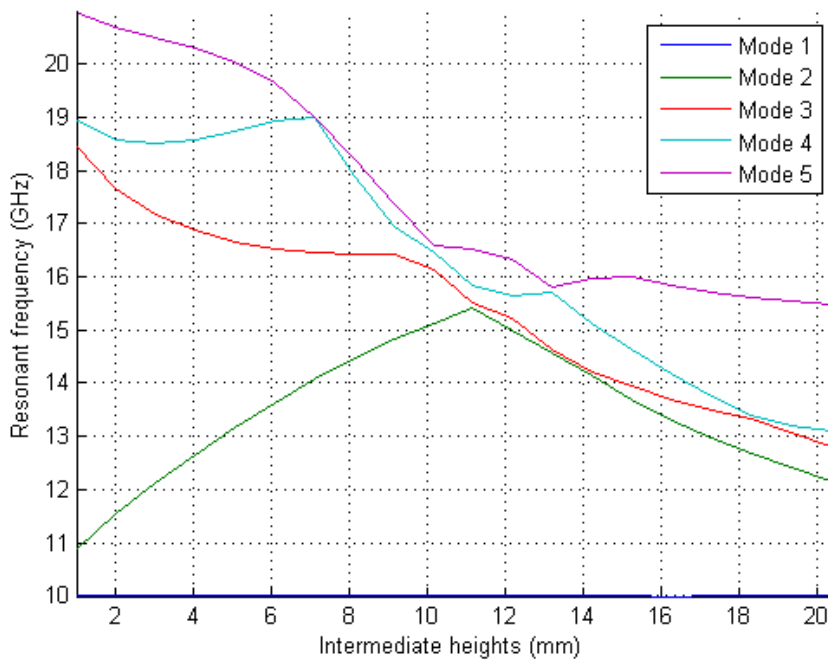
**Figura 3.6 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la rectangular (alturas intermedias: 10,16mm)**

Como se había anunciado previamente, el rango libre de espurios de la cavidad modelada presenta diferentes pendientes, aunque todas conservan su carácter descendente. Este hecho se debe a que el primer modo espurio (segundo modo que se excita en la cavidad) no es siempre el mismo. A cada modo le afecta de forma diferente la variación del valor en una variable, y este hecho queda reflejado en las distintas pendientes que posee el rango libre de espurios.

Otro hecho destacable es el rango de valores para la altura central con un rango libre de espurios mayor que el de la cavidad rectangular. A pesar de que dentro de ese rango no se sitúa el óptimo en factor de calidad que existe para la altura central, sí que es interesante observar cómo se puede superar a la cavidad rectangular en, al menos, una de las características. Según el *shaping* que se decida aplicar, se podrá establecer un compromiso entre sacrificar levemente uno de estas características para superar a la cavidad rectangular en la otra característica.

### 3.1.2.2 *Dependiendo de las alturas intermedias*

En la figura 3.7 se muestran las frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos conforme se modifica el valor de la variable alturas intermedias. La altura central, al igual que en la subsección 3.1.1.2, ha sido fijada a 10,16mm.



**Figura 3.7 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (altura central: 10,16mm)**

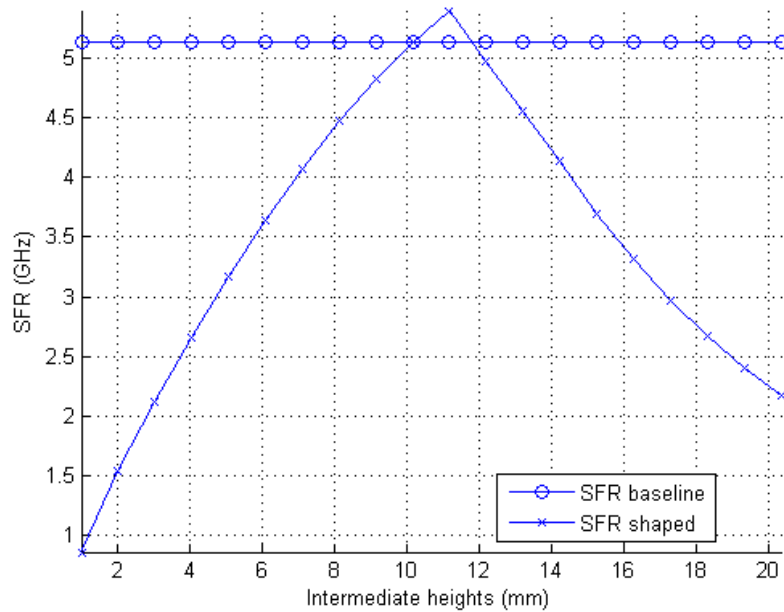
EL primer modo, representado en azul oscuro, resuena siempre a 10 GHz. Como se explicó anteriormente, esta es la frecuencia de resonancia elegida.

En esta gráfica se puede ver un modo que, en la primera mitad del rango de valores estudiados, aumenta su frecuencia de resonancia al aumentar las alturas intermedias. Esto es debido a que, para conseguir que el primer modo resuene a 10 GHz al aumentar de valor las alturas intermedias, la longitud de la cavidad debe disminuir. Normalmente, este hecho tiende a disminuir las frecuencias de resonancia del resto de modos.

En cambio, aquí se puede ver como existe un modo que está mucho más afectado por la disminución de la longitud de la cavidad que por el aumento del valor del parámetro y, por tanto, obtiene cada vez mayores valores de frecuencia de resonancia para la primera mitad del rango de valores de las alturas intermedias.

El resto de modos posee un carácter descendiente: conforme se aumenta el valor del parámetro alturas intermedias, disminuye su frecuencia de resonancia. Dicho de otro modo, conforme se aumente el valor de las alturas intermedias disminuirá el rango libre de espurios de la cavidad con *shaping*.

En la figura 3.8 se realiza la comparación entre los rangos libres de espurios de la cavidad rectangular y de la cavidad modelada cuando se varía el valor del parámetro alturas intermedias.



**Figura 3.8 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la rectangular (altura central: 10,16mm)**

Esta gráfica muestra el rango libre de espurios de la cavidad modelada, y lo compara con el valor de rango libre de espurios que ofrece la cavidad rectangular.

Si se recuerda del apartado anterior, allí el rango libre de espurios era decreciente conforme aumentaba la variable altura central. Sin embargo, en este caso el rango libre de espurios es creciente en la primera mitad de valores. De hecho, para unos valores muy pequeños del parámetro alturas intermedias, el rango libre de espurios es sumamente pequeño.

A partir de un cierto valor de este parámetro, el rango libre de espurios comienza a disminuir. Por lo tanto, existe un valor óptimo del parámetro alturas intermedias que ofrece el máximo valor posible de rango libre de espurios para el modelado propuesto. Cabe recordar que este valor óptimo variará si se modifica el valor del parámetro fijado en este caso: la altura central.

Un hecho que no debe pasar desapercibido es que este óptimo se sitúa dentro del rango de valores óptimos hallados para este mismo parámetro pero comparando el factor de calidad  $Q_U$ . En otras palabras, existe un valor para las alturas intermedias que permite mejorar tanto el factor de calidad como el rango libre de espurios respecto a la cavidad rectangular.

También se debe destacar que este óptimo es para un valor del parámetro alturas intermedias igual a 11mm, aproximadamente. Cuando se realizaron los primeros análisis mostrados en el capítulo 2, se anunció que este parámetro debía de poseer un valor cercano al de la altura lateral (10,16mm). Aquí se ha comprobado que aquella suposición basada en la intuición tras ver los primeros resultados era correcta.

### 3.1.3 Parámetro de “mérito”: *SFR&Q*

Cuando se ha realizado la comparación, se ha hecho una clasificación dependiendo tanto de la característica a comparar como del parámetro a barrer.

Para el caso de la altura central, estudiar por un lado el comportamiento que adopta el factor de calidad y por otro el comportamiento del rango libre de espurios ha sido muy útil, pues prácticamente tenían tendencias opuestas, como se puede ver en la figura 3.2 y en la figura 3.6, respectivamente.

En el caso del estudio sobre el comportamiento de ambas características al modificar las alturas intermedias, éstas poseían comportamientos similares. Ambas presentaban el óptimo cercano al valor de la altura lateral, e iban empeorando conforme el valor del parámetro se alejaba de éste. En la figura 3.4 y en la figura 3.8 se puede observar este hecho.

Sin embargo, para ambos parámetros no se ha podido establecer dónde se sitúa el óptimo teniendo en cuenta ambas características. Normalmente, mejorar una característica supone empeorar la otra. Por lo tanto, el óptimo dependerá de la importancia que se le dé a cada característica.

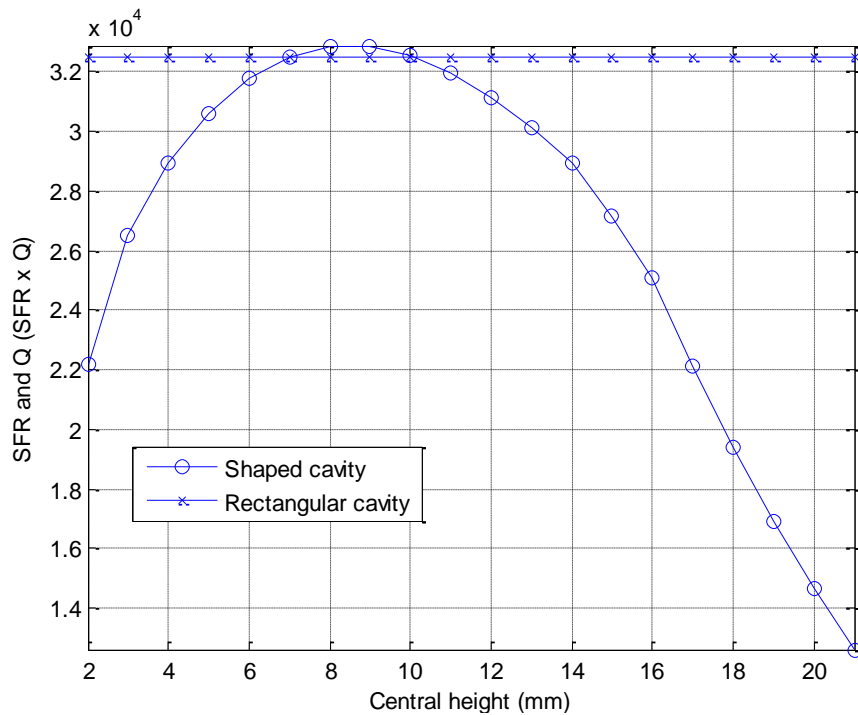
Como medio para averiguar dónde se sitúa el óptimo, se ha creado un parámetro de “mérito”: el *SFR&Q*. Esta característica es el producto del factor de calidad y el rango libre de espurios. Sabiendo esto, se comprueba que a la hora de calcular este parámetro se le ha otorgado la misma importancia al factor de calidad  $Q_U$  que al rango libre de espurios.

#### 3.1.3.1 *Dependiendo de la altura central*

Este nuevo factor también se ha calculado para la cavidad rectangular. Así se ha podido comprobar si el óptimo obtenido dando la misma importancia a las dos características en las que se basa las comparaciones realizadas ofrece mejores resultados que los de la cavidad rectangular.

El comportamiento de este nuevo parámetro es predecible, pues es el producto del rango libre de espurios por el factor de calidad. Ambos ya han sido calculados, lo que permite conocer a simple vista y de forma aproximada dónde se situará el óptimo.

En la figura 3.9 se muestra este factor respecto a la variable altura central. Al igual que en los casos previos, la variable alturas intermedias ha sido fijada con el valor que obtendrían los puntos equivalentes en una cavidad rectangular. Es decir, las alturas intermedias poseen un valor fijo igual a 10,16mm.



**Figura 3.9 Comparación del *SFR&Q* con el de la rectangular dependiendo de la altura central (alturas intermedias: 10,16mm)**

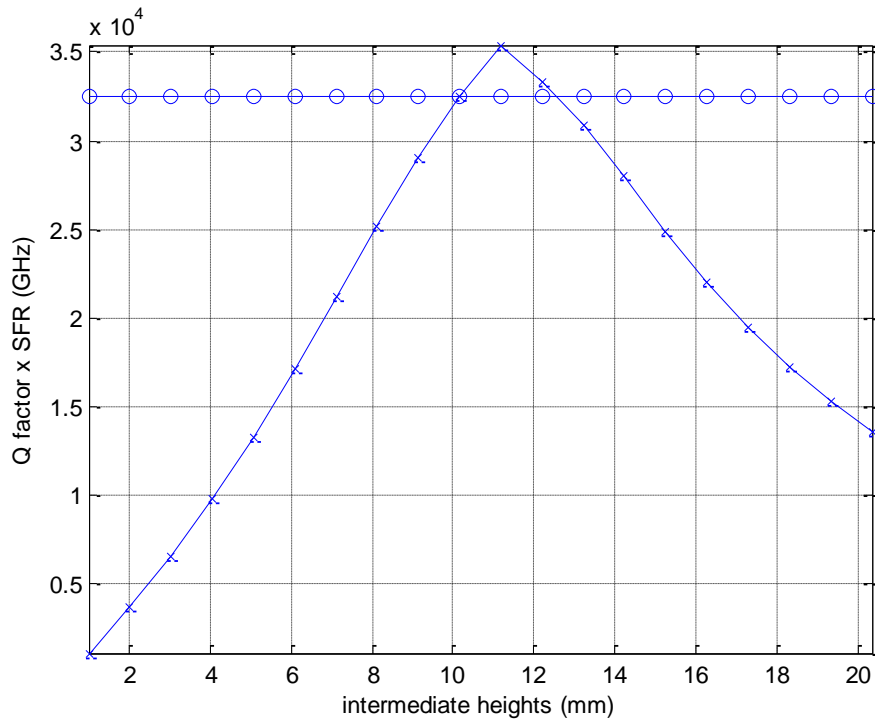
El óptimo para la altura central no coincide con los óptimos obtenidos en las figuras 3.2 y en la figura 3.6. Este hecho era de esperar, pues ya se dijo que el comportamiento del  $Q_U$  y del rango libre de espurios cuando se variaba el valor de la altura central eran casi opuestos.

Por lo tanto, el óptimo mostrado en la figura 3.9 es el resultado de mantener un compromiso entre ambas características. Se observa que llega a superar al *SFR&Q* que ofrece la cavidad rectangular. Esto es síntoma de que esta cavidad puede ser superada por la cavidad generada con el *shaping* propuesto en lo referente a las dos características principales de este estudio.

### 3.1.3.2 *Dependiendo de las alturas intermedias*

Observar el comportamiento del nuevo parámetro denominado *SFR&Q* respecto de las alturas intermedias también resulta bastante interesante. Va a permitir ver cuáles son los valores de este parámetro menos aptos para realizar el *shaping*, además de indicar dónde se sitúa el óptimo para las alturas intermedias manteniendo la misma importancia para las características que hasta ahora han sido base de las comparaciones realizadas.

En la figura 3.10 se muestra la gráfica con el comportamiento de este nuevo factor al dejar fijo la variable altura central con un valor de 10,16mm y variar en un rango determinado de valores el parámetro alturas intermedias.



**Figura 3.10 Comparación del  $SFR \times Q$  con el de la rectangular dependiendo de las alturas intermedias (altura central: 10,16mm)**

Al igual que en el caso anterior, teniendo en cuenta los resultados obtenidos previamente se podía deducir de forma aproximada dónde se podría situar el óptimo.

Este resultado muestra una idea que ya había sido dicha en relación a la figura 3.9: el punto óptimo posee un valor superior al que ofrece la cavidad rectangular. Teniendo en cuenta que este nuevo factor es producto de las dos características principales de una cavidad, esto supone que el *shaping* propuesto es capaz de producir, al menos, una cavidad que superará en estas dos características a la cavidad rectangular.

Cómo se ha indicado varias veces, el punto óptimo de la variable alturas intermedias se sitúa cerca del valor de la altura lateral (10,16mm). De hecho, está en los 11,2mm, aproximadamente.

### 3.2 Comparación con la cavidad ridge

En el capítulo 2 se expusieron seis ejemplos de cavidades con el *shaping* propuesto en la figura 1.2. Más en concreto, en el último ejemplo se obtuvo un rango libre de espurios de 6,84GHz. Este hecho parece indicar que también se debe comparar los resultados de este modelado con las características de la cavidad ridge, y comprobar así si ésta puede ser superada.

El estándar empleado para la comparación ya no es el WR90, pues la guía de onda ridge posee sus propios estándares. El que se va a utilizar para este proyecto es el WRD500, pues dentro del rango de frecuencias en el que es usado está la frecuencia de trabajo usada hasta ahora en el proyecto: 10GHz.

Las medidas de este estándar, atendiendo a la nomenclatura usada en la figura 1.1, son:

$A = 19,1\text{mm}$ ,  $B = 8,2\text{mm}$ ,  $E = 4,78\text{mm}$ ,  $F = 1,6\text{mm}$ .

Los parámetros  $C$  y  $D$  se corresponderían con el grosor que posea la cavidad. Este grosor es indiferente para los análisis de este proyecto. Debido a esto, no es necesario asignarles ningún valor concreto para estudiar las características de la cavidad ridge.

Debido al cambio en el estándar usado, también se han modificado ciertos aspectos de la cavidad modelada. Por un lado, la altura lateral ahora es de 19,1mm. Por otro lado, la anchura de la cavidad pasa a ser de 8,1mm.

En este análisis, cuando se realiza el barrido en una de las dos variables usadas para implementar el *shaping*, la otra variable queda fija con el valor que obtendría su punto equivalente en la cavidad ridge. Por lo tanto, cuando se realiza un barrido del parámetro altura central, las alturas intermedias poseerán un valor de 8,1mm. Cuando se realice el barrido del parámetro alturas intermedias, la altura central tendrá un valor de 1,6mm.

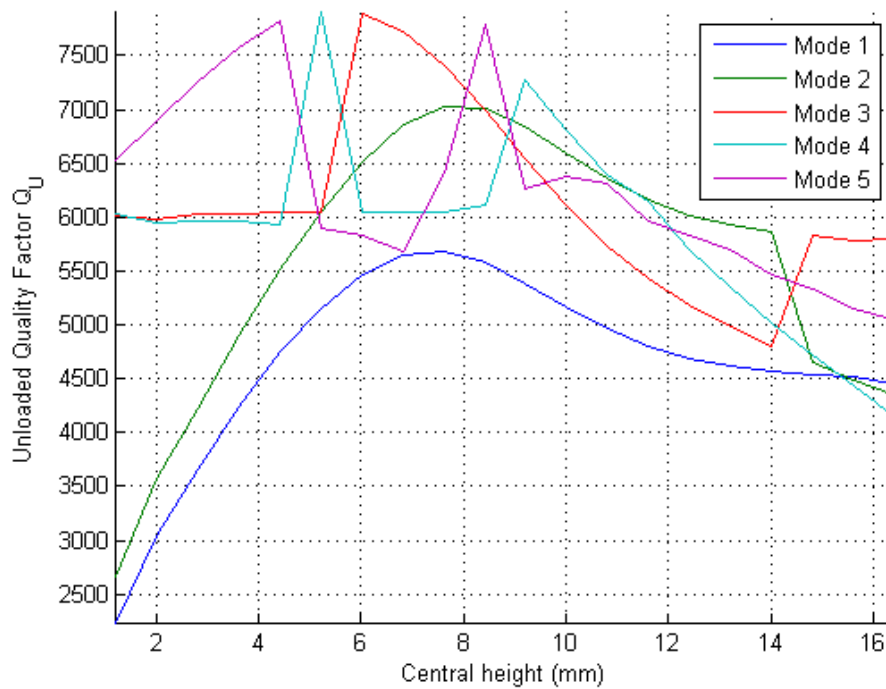
### 3.2.1 Factor de calidad $Q_{\text{UNLOADED}}$

Se va a comenzar por comprobar si con el modelado utilizado en el proyecto se pueden obtener mejores factores de calidad que los que ofrece la cavidad ridge. De antemano se puede afirmar que sí, pues la guía de onda ridge es el resultado de obtener un rango libre de espurios enorme a cambio de sacrificar mucho el factor de calidad.

#### 3.2.1.1 *Dependiendo de la altura central*

Para empezar, se va a mostrar el comportamiento del  $Q_U$  de la cavidad modelada cuando se varía la altura central. Las alturas intermedias, por tanto, permanecen fijas. En la figura 3.11 se puede observar el resultado de comparar los factores de calidad de los cinco primeros modos que se excitan en la cavidad con *shaping*.



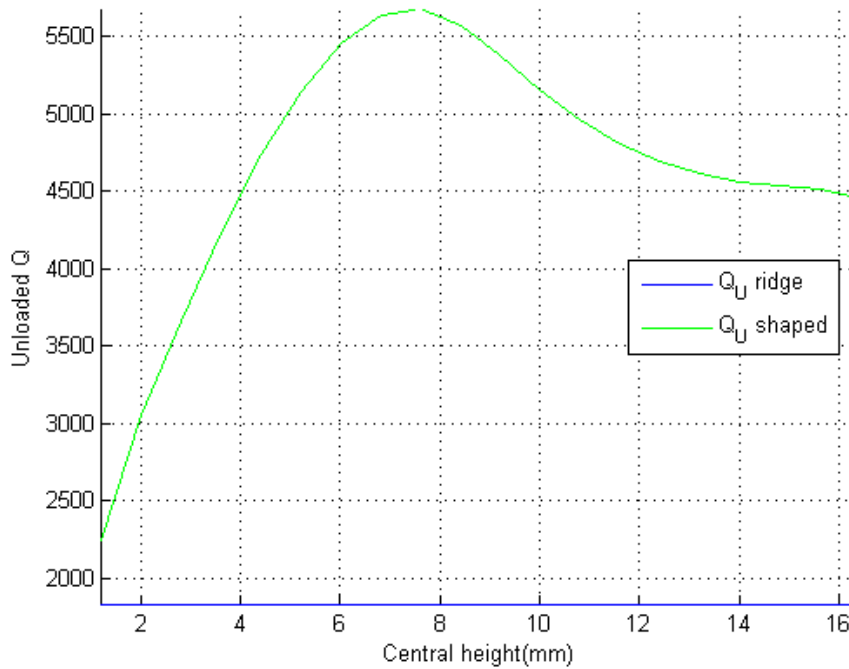


**Figura 3.11  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando la altura central (alturas intermedias: 8,2mm)**

El comportamiento que se muestra en esta figura es muy parecido al que se mostraba en la figura 3.1. Esto es lógico, pues el *shaping* es exactamente el mismo. La única diferencia reside en las dimensiones principales de la cavidad (altura y anchura) ya que ahora son algo menores.

Esto provoca que los óptimos de la altura central respecto al factor de calidad se desplacen hacia valores menores. Aun así, el comportamiento que adopta cada uno de los factores de calidad de los modos es el mismo. Para el primer modo, que es el de mayor interés, existe un óptimo claro.

Al comparar el factor de calidad del primer modo con el ofrecido por la cavidad ridge, como se ha hecho en la figura 3.12, se puede verificar lo que ya se había anunciado: superar el  $Q_U$  de la cavidad ridge es fácil de conseguir.



**Figura 3.12 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y la ridge (alturas intermedias: 8,2mm)**

En todo el rango de valores escogidos para realizar el barrido de la altura central, el factor de calidad obtenido es superior al ofrecido por la cavidad ridge.

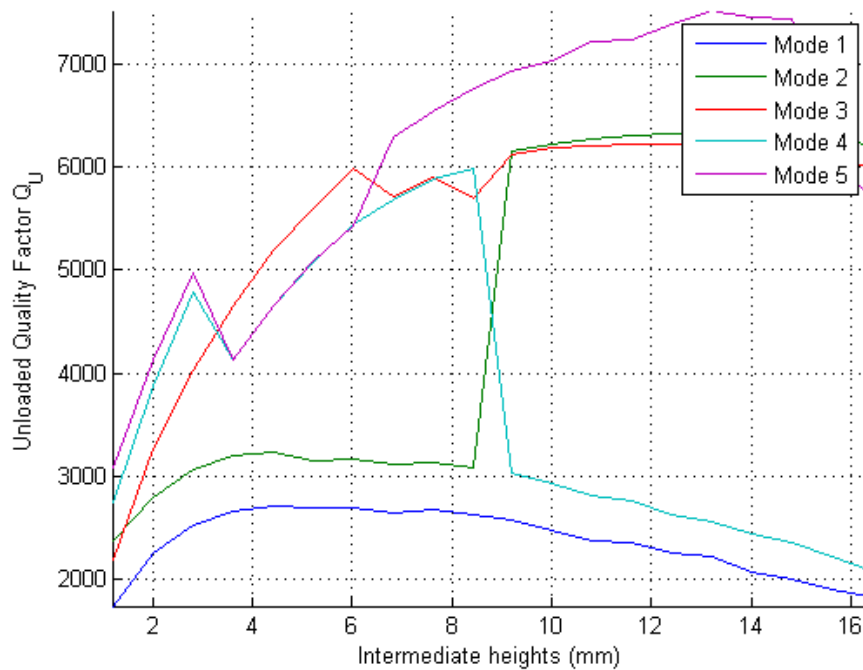
Además, existe un óptimo claro como muestra de la posibilidad de obtener una cavidad óptima en factor de calidad con el modelado aplicado. A pesar de esto, al superar el factor de calidad de la cavidad ridge en todo el rango de valores estudiado, cualquiera de estos valores para la altura central serviría para generar una cavidad con un  $Q_U$  mayor que el ofrecido por la cavidad ridge.

### 3.2.1.2 *Dependiendo de las alturas intermedias*

Al igual que con la altura central, también se ha realizado un barrido de las denominadas alturas intermedias (ver figura 1.2). La altura central ha sido fijada con un valor de 1,6mm (valor de la altura central en la guía de onda ridge). Debido a esto, estas gráficas mostrarán un factor de calidad menor que el mostrado hasta ahora, y un rango libre de espurios mayor.

Esto facilitará la comprensión de los resultados, pues los valores de las cavidades a comparar estarán más próximos. Lo importante es ver y entender el comportamiento del factor de calidad al variar las alturas intermedias, y encontrar los puntos óptimos.

En la figura 3.13 se pueden observar los factores de calidad de los cinco primeros modos que se excitan en la cavidad.

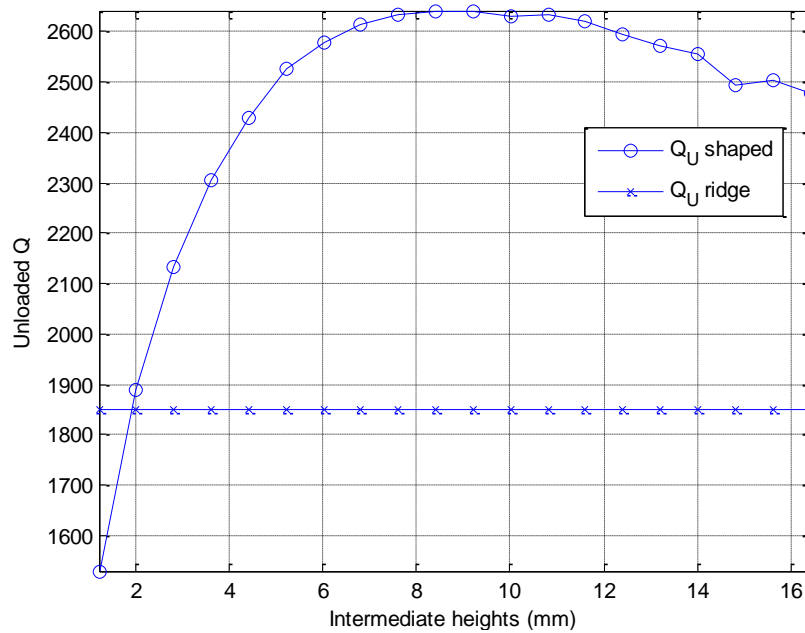


**Figura 3.13  $Q_U$  de los primeros 5 modos variando las alturas intermedias (altura central: 1,6mm)**

Como ya se había indicado, el valor de los factores de calidad es menor que el mostrado en las otras figuras anteriores. Como se dijo, esto es debido a que la altura central ha sido fijada con un valor pequeño, de 1,6mm.

El comportamiento, al igual que con la altura central, se conserva. Para ver esto, basta con volver a mirar la figura 3.3, y ver como ocurre lo mismo: existe un óptimo para la variable que ofrece un factor de calidad mayor posible. La única diferencia radica en el desplazamiento que sufren los óptimos hacia valores menores de las alturas intermedias como consecuencia de usar un estándar cuyas dimensiones principales (altura y anchura) son menores que las dimensiones principales del estándar anteriormente utilizado.

En la figura 3.14 se muestra la comparación entre el factor de calidad para la cavidad modelada y el ofrecido por la cavidad ridge.



**Figura 3.14 Comparación de los  $Q_U$  de la cavidad modelada y de ridge (altura central: 1,6mm)**

El comportamiento del factor de calidad respecto al parámetro alturas intermedias es normal. El único punto que parece “salirse” de esta normalidad es el antepenúltimo calculado (tercero empezando por la derecha). Esto no es debido a ningún motivo de índole electromagnética, sino más bien a una mala convergencia en ese punto del programa empleado para su cálculo.

Exceptuando los valores excesivamente pequeños (menores de 2mm) pertenecientes al barrido, el resto ofrecen un factor de calidad mayor que el de la cavidad ridge. Por lo tanto, existen una amplia cantidad de valores a aplicar al *shaping*. El punto óptimo de este parámetro se tendrá que decidir tras conocer de forma exacta el comportamiento que posea el rango libre de espurios respecto a esta variable.

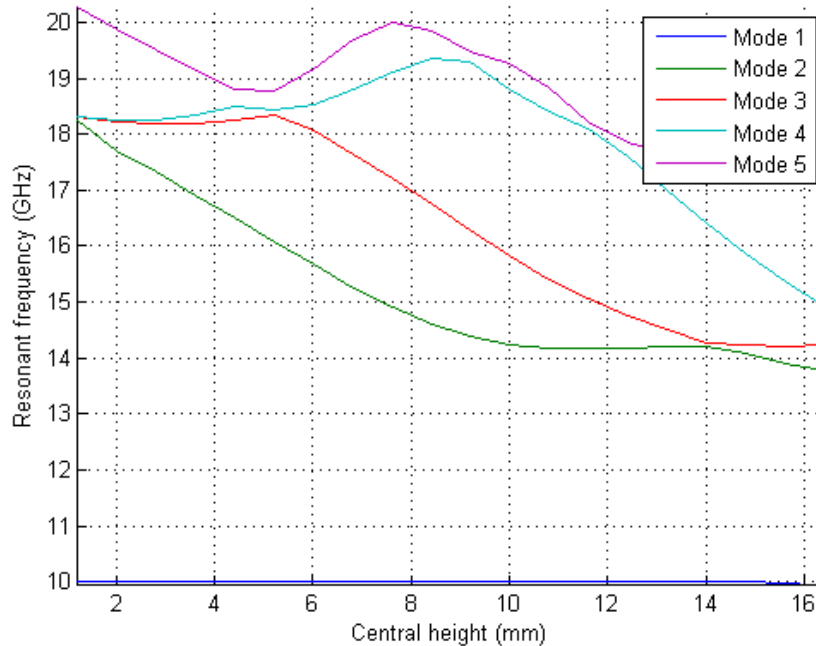
### 3.2.2 Rango libre de espurios (SFR: *Spurious Free Range*)

La otra característica a comparar es el rango libre de espurios. En este apartado se comprobará si se puede alcanzar o no a la cavidad ridge. Como dato previo, la guía de onda ridge posee un rango libre de espurios de 8,67GHz. Si a esto se le suma que esta cavidad está diseñada para ofrecer el rango libre de espurios mayor posible, parece casi imposible alcanzar este valor mediante la aplicación de un modelado geométrico a la cavidad.

En todas las gráficas de esta subsección, las longitudes de las cavidades estudiadas han sido modificadas adecuadamente para que la resonancia del primer modo siempre sea a 10GHz.

### 3.2.2.1 Dependiendo de la altura central

Se van a mostrar las frecuencias de resonancia de los primeros cinco modos que se excitan en la cavidad cuando se varía la altura central. En la figura 3.15 se puede observar una gráfica con estos datos.



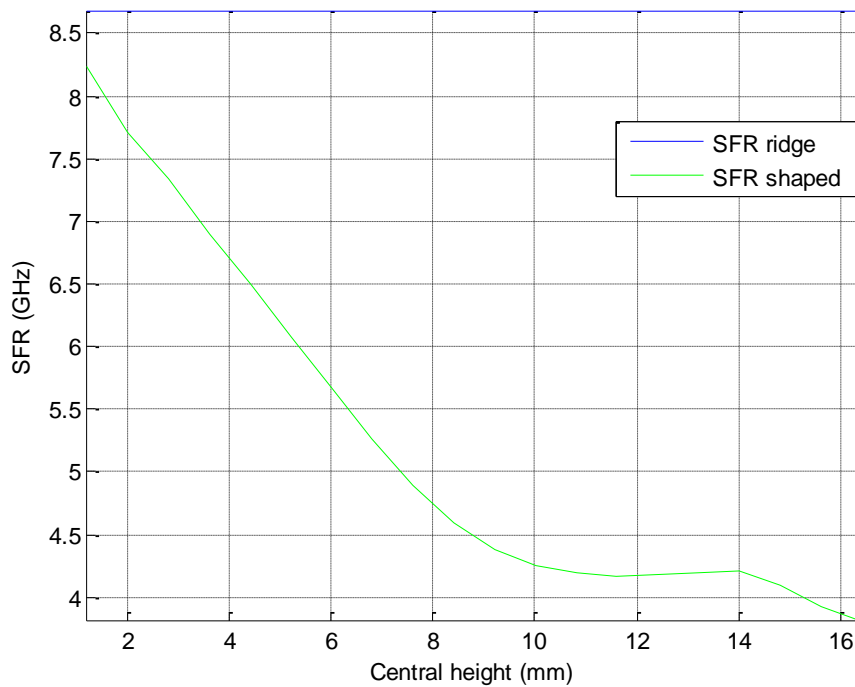
**Figura 3.15 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (alturas intermedias: 8,2mm)**

La gráfica muestra como las frecuencias de resonancia de cada uno de los modos varían al aumentar la altura central. El comportamiento más usual es que tiendan a disminuir conforme aumente la altura central.

De esta gráfica se puede predecir como es el rango libre de espurios de la cavidad modelada. Para el primer rango de valores barridos, el rango libre de espurios disminuirá, hasta alcanzar un punto a partir del cual permanecerá prácticamente estable. En el tramo final de valores dados a la altura central comenzará otro descenso.

Esto es debido al cruce con un modo de orden superior que sufre un enorme descenso en frecuencia al aumentar la altura central.

En la figura 3.16 se comparan el rango libre de espurios de la cavidad con *shaping* con el de la cavidad ridge.



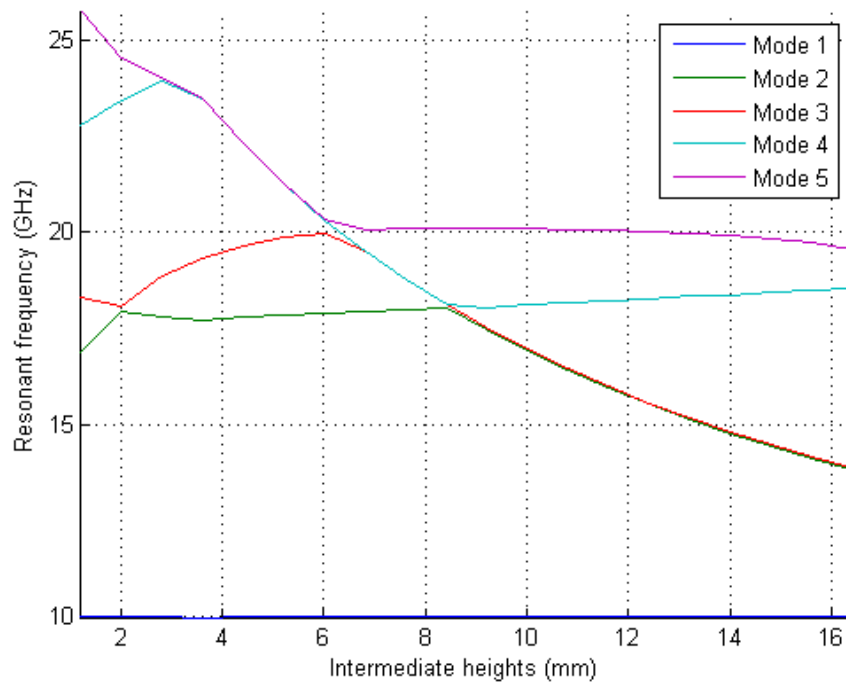
**Figura 3.16 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la ridge (alturas intermedias: 8,2mm)**

Con esta gráfica se puede comprobar como la deducción del comportamiento del rango libre de espurios que se ha realizado observando las frecuencias de resonancia de los modos es correcto.

Al contrario que con el factor de calidad, donde se ha superado el valor ofrecido por la cavidad ridge para todos los valores barridos de la altura central, aquí no se ha alcanzado el rango libre de espurios que posee la cavidad ridge. A pesar de ello, la distancia que existe hasta alcanzar los 8,67GHz no es excesiva. De hecho, para algunos valores, se han llegado a conseguir superar los 8GHz de rango libre de espurios, aunque ha sido para alturas muy pequeñas.

### 3.2.2.2 *Dependiendo de las alturas intermedias*

Para realizar este estudio, la variable altura central ha sido fijada con un valor de 1,6mm. En la figura 3.17 se pueden observar las frecuencias a las que resuenan cada uno de los primeros cinco modos que se excitan en la cavidad modelada cuando se varían las alturas intermedias.



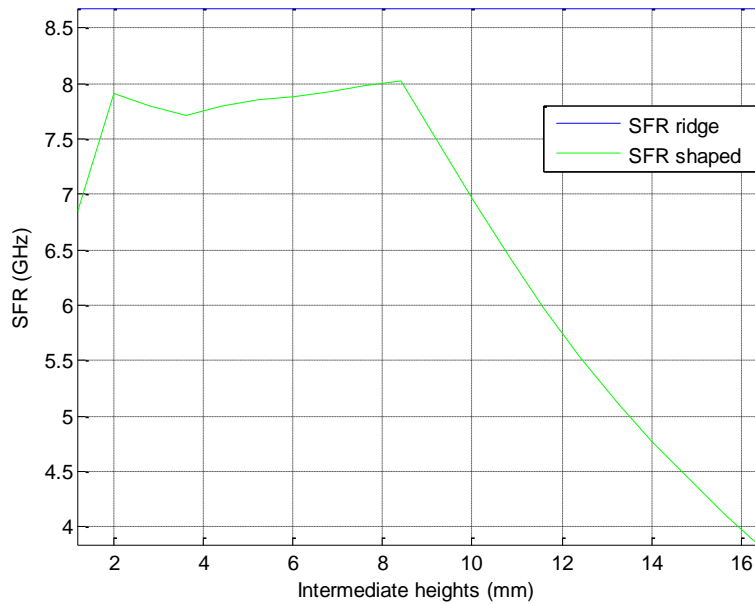
**Figura 3.17 Frecuencias de resonancia de los primeros 5 modos que se excitan en la cavidad (altura central: 1.6mm)**

Se debe reiterar que los colores no se corresponden con un modo en cuestión, sino con la posición de los modos. Para obtener el comportamiento de un modo en cuestión, habría que unir los puntos de forma coherente. Esto sería de manera “suave”, de forma que no quedasen saltos bruscos en las frecuencias de resonancia frente a leves variaciones de las alturas intermedias.

El comportamiento de las frecuencias de resonancia es distinto para cada modo. Por ejemplo, el segundo modo al principio (verde) pasa a ser el tercero (rojo) cuando las alturas intermedias poseen un valor de 2mm. Continúa en el mismo color hasta los 6mm, donde cambia de color a morado. En todo este trayecto (en el que las alturas intermedias van teniendo valores cada vez mayores) la frecuencia de resonancia de este modo primero ha aumentado y luego ha permanecido prácticamente constante.

En cambio, el modo que comienza excitándose a los 25GHz no deja de disminuir en frecuencia hasta convertirse en el modo espurio más cercano, llegando a resonar a 14GHz, aproximadamente, para grandes valores de la altura central.

Para observar cómo sería el rango libre de espurios de la cavidad con *shaping* y compararla con la cavidad ridge, en la figura 3.18 se muestra la comparación entre ambas.



**Figura 3.18 Rango libre de espurios de la cavidad modelada y de la ridge (altura central: 1,6mm)**

Las distintas pendientes que posee el rango libre de espurios de la cavidad modelada son debidas a los cruces de modos presentes. Es decir, según cual sea el segundo modo en resonar, la pendiente del rango libre de espurios será distinta.

Un hecho interesante de esta gráfica es la existencia de un rango de valores para las alturas intermedias (de los 2 a los 8.5mm) en los que permanece casi constante el rango libre de espurios. Además de constante, en torno a los 8GHz.

En la figura 3.14 se puede ver el factor de calidad respecto a las alturas intermedias, y el óptimo se situaba cerca de los 9mm. Por lo tanto, ya se pueden predecir dos sucesos: el óptimo se situará dentro de este rango y el factor de comparación  $SFR&Q$  de la cavidad con *shaping* superará con creces al  $SFR&Q$  ofrecido por la cavidad ridge.

### 3.2.3 Parámetro de “mérito”: $SFR&Q$

En la comparación con la cavidad ridge se ha visto que superar el factor de calidad que ésta ofrece no es difícil. En cambio, parece imposible alcanzar su rango libre de espurios.

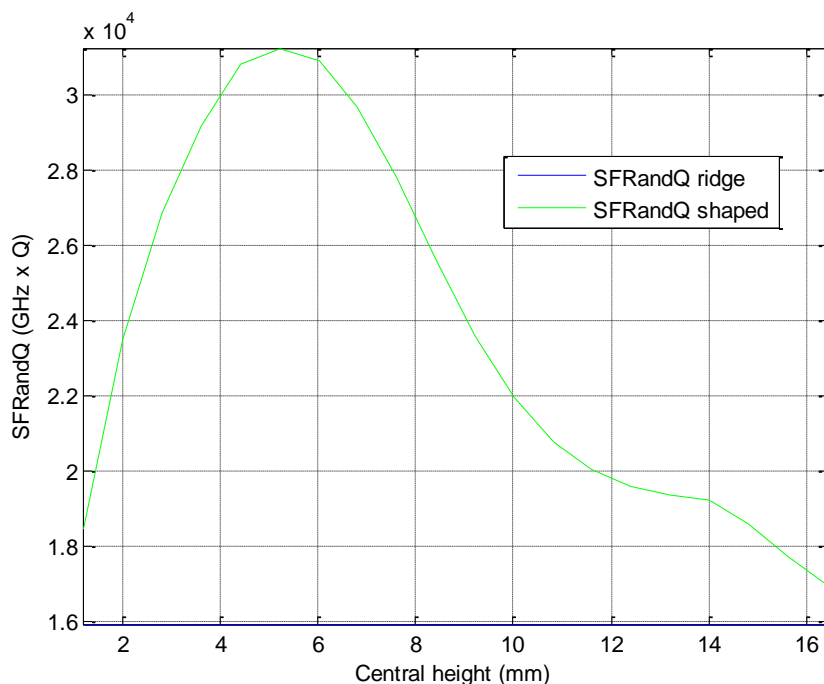
Por lo tanto, una forma de afrontar si se puede optimizar esta cavidad aplicando un modelado geométrico es comparando los parámetros de “mérito”  $SFR&Q$  de ambas cavidades. El motivo principal radica en que con este parámetro se están teniendo en cuenta ambas características de las cavidades de forma igualitaria. Es decir, sin recibir una más importancia que la otra.



### 3.2.3.1 Dependiendo de la altura central

El comportamiento de este parámetro producto de las dos características principales de una cavidad va a determinar el punto óptimo de la cavidad modelada. Además, se va a comprobar si la cavidad ridge puede ser mejorada con el *shaping* propuesto.

En la figura 3.19 se muestra el  $SFR&Q$  de la cavidad modelada, siendo comparado con el  $SFR&Q$  de la cavidad ridge.



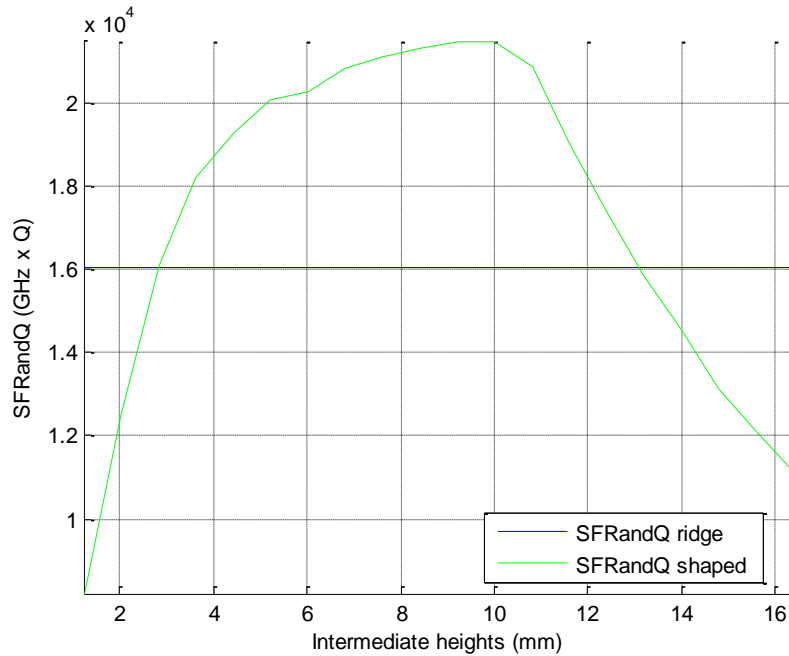
**Figura 3.19 Comparación del  $SFR&Q$  con el de la ridge dependiendo de la altura central (alturas intermedias: 8,2mm)**

La gráfica muestra la existencia de un óptimo claro cuando la altura centra recibe un valor de 5mm, aproximadamente. También permite comprobar que la cavidad ridge se puede mejorar empleando el modelado aplicado a la cavidad, ya que para todo el rango de valores dados a la altura central, el parámetro  $SFR&Q$  de la cavidad con *shaping* es superior al ofrecido por la cavidad ridge.

### 3.2.3.2 Dependiendo de las alturas intermedias

El mismo análisis realizado en el apartado anterior se ha de realizar para conocer el óptimo de las alturas intermedias. Debido a que el parámetro  $SFR&Q$  es producto del rango libre de espurios (en GHz) y el factor de calidad  $Q_U$ , se puede predecir el comportamiento que se va a obtener de forma más o menos precisa.

Observando las figuras 3.14 y 3.18 se puede predecir la existencia de un rango de valores óptimos para el parámetro  $SFR\&Q$  de la cavidad modelada. En la figura 3.20 se muestra los  $SFR\&Q$  de la cavidad con *shaping* y de la cavidad ridge.



**Figura 3.20 Comparación del  $SFR\&Q$  con el de la ridge dependiendo de las alturas intermedias (altura central: 1,6mm)**

La gráfica muestra la presencia de un conjunto de valores óptimos comprendido entre los 6mm y los 11mm. El  $SFR\&Q$  que ofrece la cavidad ridge ha sido superado en el rango delimitado por los 3mm y los 13mm. Esta gráfica confirma la misma idea que la figura 3.19: la cavidad ridge puede ser mejorada con el *shaping* estudiado en este proyecto.

### 3.3 Conclusiones

El estudio individual de las dos variables empleadas para realizar el *shaping* ha demostrado que existe un óptimo para cada variable, y para cada característica estudiada: factor de calidad  $Q_U$  y rango libre de espurios.

Respecto a la cavidad rectangular, se ha visto cómo pueden superarse las características que ésta posee. El rango libre de espurios que puede llegar a ofrecer la cavidad modelada es muy superior al ofrecido por la cavidad rectangular. Esto conllevaría un importante sacrificio del factor de calidad. Este hecho marcará si merece la pena la sustitución de la cavidad rectangular por la cavidad modelada propuesta en este proyecto, ya que la mejora es evidente pero no es excesiva.

Si la aplicación para la que se diseña la cavidad permite un sacrificio en  $Q_U$  notable, en rango libre de espurios sí que se ha comprobado como la cavidad modelada puede superar con creces a la rectangular. Por lo tanto, para esta aplicación sí que se podría sustituir a la cavidad rectangular.

En lo que refiere a la cavidad ridge, se ha observado cómo superar el factor de calidad de ésta es relativamente sencillo. El rango libre de espurios que esta cavidad posee no ha sido alcanzado. Aun así, con el *shaping* propuesto se han obtenido rangos libres de espurios algo superiores a los 8GHz, valor muy cercano al ofrecido por la cavidad ridge.

La creación de un parámetro de mérito,  $SFR\&Q$ , resultado de multiplicar el factor de calidad  $Q_U$  por el rango libre de espurios (en GHz), ha sido de gran utilidad. Por definición, este nuevo factor incluye a ambas características otorgando la misma importancia a las dos. Cuando se han comparado los  $SFR\&Q$  de la cavidad modelada con la rectangular y con la ridge (figuras 3.9, 3.10, 3.19 y 3.20) se ha demostrado que con el *shaping* propuesto se pueden mejorar ambas cavidades.

## 4. Diseño de dos filtros *single mode*

Hasta este punto, los resultados mostrados han consistido en el estudio de una de las dos variables. Para ello, la otra variable permanecía fija. Es importante insistir en que los óptimos calculados en todos los casos variarán si se modifica el valor del parámetro que está fijo.

Es por esto por lo que es necesario conocer donde se sitúa exactamente el óptimo, así como el comportamiento que éste posee cuando se modifica el valor del parámetro fijo.

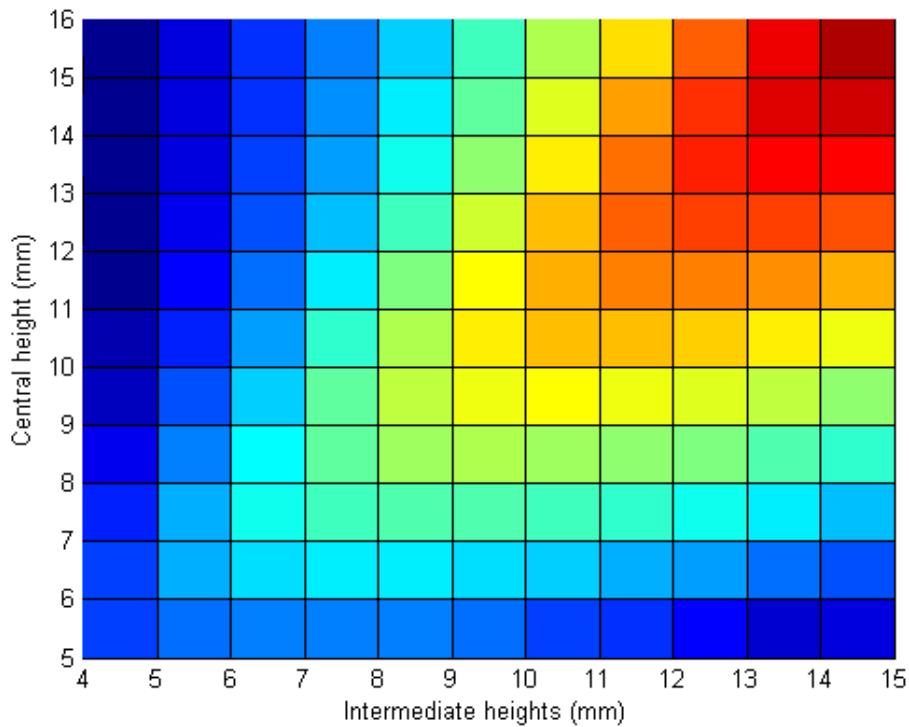
El estándar empleado para realizar los filtros ha sido el WRD500, pues la idea inicial era realizar una única comparación con la cavidad ridge. Todos los resultados también han sido calculados para las dimensiones correspondientes a dicho estándar.

### 4.1 Selección de un (primer) *shaping* para crear un filtro

Para escoger un *shaping* con la certeza de que es el óptimo (en nuestro juicio, pues el óptimo dependerá de la importancia dada tanto al factor de calidad como al rango libre de espurios) se deben conocer los valores de las dos características,  $Q_U$  y SFR, respecto a los dos parámetros empleados en el modelado: la altura central y las alturas intermedias.

#### 4.1.1 Realización de un barrido anidado

Para obtener una gráfica que nos muestre exactamente esos datos, ha sido necesario realizar un barrido anidado de ambos parámetros. En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de cómo quedaría la gráfica.



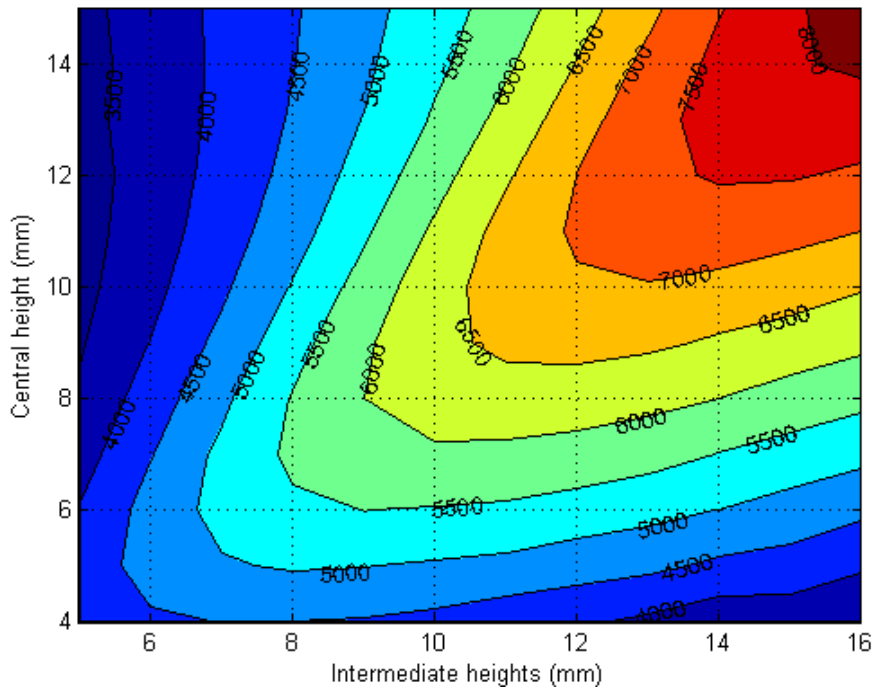
**Figura 4.1  $Q_U$  obtenido mediante un barrido anidado**

En rojo están representados los mayores valores del factor de calidad (en torno a un valor de 7000). En azul, los menores (5000, aproximadamente). Esta gráfica muestra dónde se sitúan estos valores. Sin embargo, no permite conocer que *shaping* existen que proporcionen un mismo  $Q_U$ . Para esto, en la figura 4.1 es necesario crear unas líneas de contorno.

#### 4.1.2 Empleo de las líneas de contorno

##### 4.1.2.1 $Q_U$ y *SFR*

En la figura 4.2 se pueden observar cómo quedan estas líneas. De esta forma resulta mucho más fácil entender que características (en este caso, que factor de calidad) proporciona cada *shaping*.

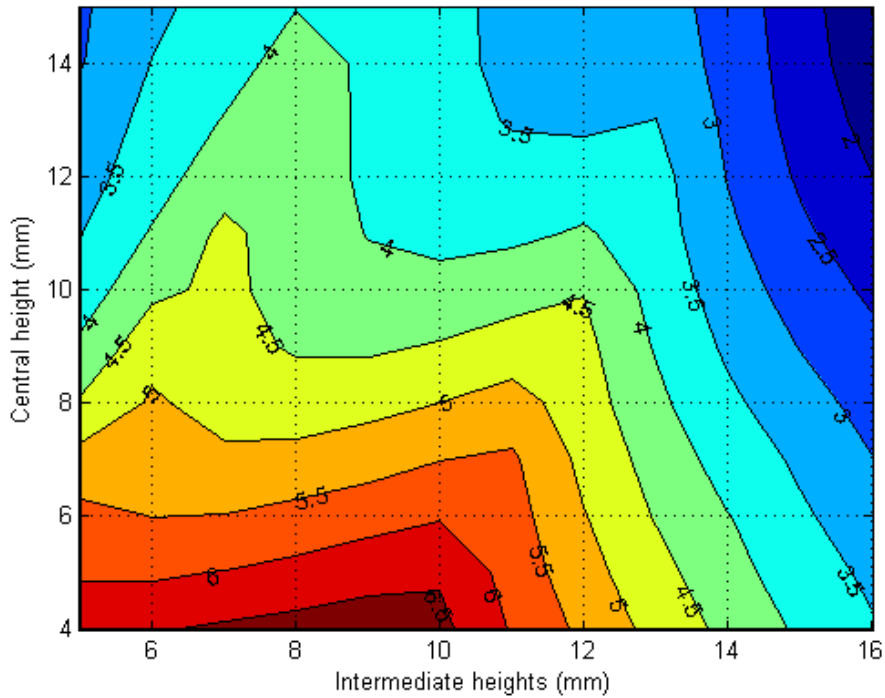


**Figura 4.2  $Q_U$  representado con líneas de contorno**

Los máximos valores de factor de calidad alcanzables con el modelado propuesto son posibles para valores muy grandes de las variables. En la figura 4.2 se muestra como para conseguir el  $Q_U$  mayor posible, los valores de los dos parámetros deben ser parecidos. Además, cuánto mayores sean, mayor factor de calidad se obtendrá. Posteriormente (en el apartado 5, *diseño de un filtro dual mode*) se verá que existe un tope a partir del cual el factor de calidad comienza a decrecer.

Esta gráfica permite conocer los distintos modelados que proporcionan un mismo factor de calidad. Por ejemplo, si se escogen los valores de 13mm para la altura central y 10mm para las alturas intermedias se obtendrá el mismo  $Q_U$  que si se escogen los valores 10mm para la altura central y 12,5mm para las alturas intermedias.

Por lo tanto, habrá que decidir que valores se le van a dar a los parámetros del *shaping* de alguna forma. Esta forma es representando, también mediante líneas de contorno, el rango libre de espurios que ofrece cada modelado a aplicar. En la figura 4.3 se muestra el rango libre de espurios respecto a las dos variables utilizadas en el modelado propuesto.

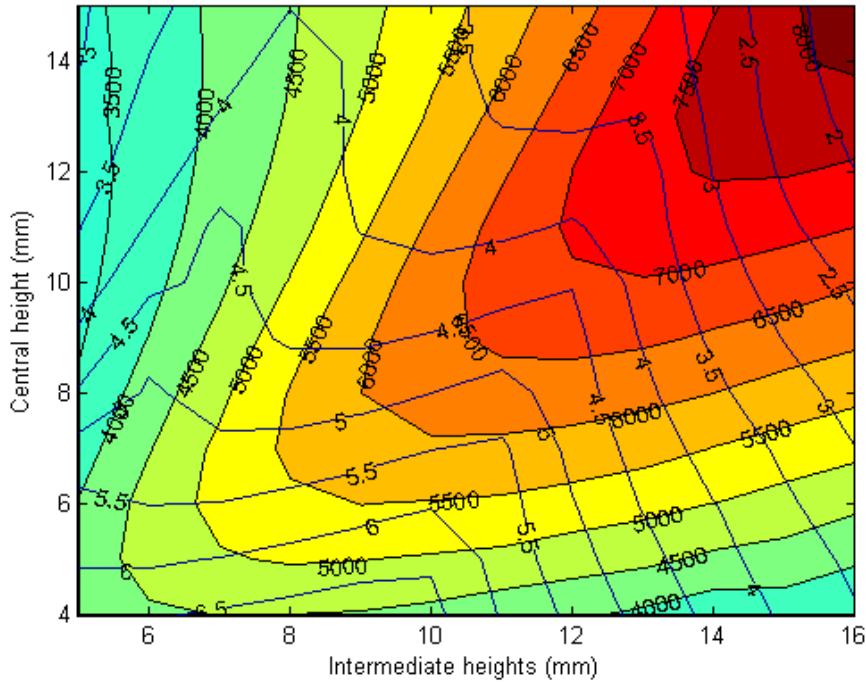


**Figura 4.3 SFR representado con líneas de contorno**

El SFR posee un carácter casi antagónico al factor de calidad, pues crece conforme decrece la altura central. En cambio, el mayor rango de espurios posible no se obtiene para valores muy pequeños de las alturas intermedias, sino que el óptimo reside para valores presentes en la zona central de los valores barridos (entre los 8 y los 10mm).

Una vez conocidos tanto el factor de calidad como el rango libre de espurios de la cavidad modelada respecto a los dos parámetros creados para realizar el *shaping*, ya se pueden escoger los valores deseados para las variables del modelado sabiendo de antemano las características que poseerá la cavidad a diseñar.

Esta selección de valores se puede realizar visualizando una sola gráfica en la que se muestren tanto los datos que ofrece la figura 4.2 como los datos que muestra la figura 4.3. En la figura 4.4 se han sobrepuesto unos datos sobre otros para, de un solo vistazo, tener toda la información necesaria para elegir los valores adecuados para el modelado.



**Figura 4.4 SFR y  $Q_U$  representados con líneas de contorno**

A pesar de dar la sensación de sobrecarga de información al visualizar esta gráfica, simplemente se están mostrando los datos necesarios para escoger el modelado adecuado.

Para escoger un punto óptimo de la gráfica se han tenido que realizar dos pasos. Primero, se ha escogido un valor para el rango libre de espurios. Este valor es alcanzable con distintos modelados que, además, ofrecen distintos factores de calidad. Para obtener el máximo factor de calidad para ese rango libre de espurios, se ha centrado la atención en esta línea y se ha buscado el punto que proporcionaba mayor  $Q_U$ .

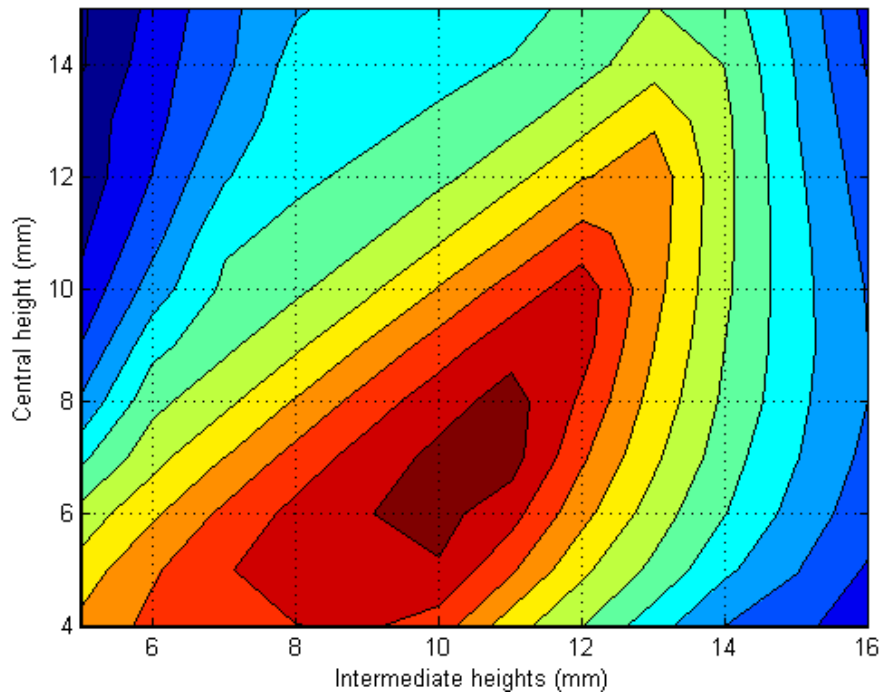
Por ejemplo, si se desea un rango libre de espurios de 4,5GHz, el punto que se ha de escoger es el que se corresponde con un valor de 10,3mm para la altura central y de 12,2mm para las alturas intermedias. Estos valores serán los usados para el diseño del primer filtro con el modelado propuesto en este proyecto.

#### 4.1.2.2 *SFR&Q*

Otra forma de recoger toda la información necesaria para seleccionar los valores adecuados para los parámetros del *shaping* es realizando una gráfica mediante un barrido anidado de estos dos parámetros en la que se represente el parámetro de mérito creado y explicado en las subsecciones 3.1.3 y 3.2.3.

En la figura 4.5 se muestra la gráfica resultado de representar el parámetro de mérito respecto a las dos variables del modelado.





**Figura 4.5 Parámetro de mérito representado mediante líneas de contorno**

Esta gráfica permite descartar aquellas zonas en las que el parámetro de mérito obtiene valores muy pequeños. Esto es porque, en esas zonas, o el factor de calidad es demasiado pequeño o el rango libre de espurios es muy pequeño. En ambos casos, si a ambas características se les ha dado la misma importancia, los resultados que se obtendrán con esos valores para el modelado no serán buenos.

Esta gráfica pierde su utilidad cuando una característica recibe mucha más importancia que la otra. De momento, la intención es conseguir altos valores del factor de calidad sin sacrificar demasiado el rango libre de espurios. Esta gráfica sirve como guía para indicar si el sacrificio de una característica para aumentar la otra ha sido excesivo (el *shaping* escogido se situaría en zonas representadas con tonos azulados) o si ha sido correcto (el *shaping* a aplicar estaría representado mediante tonos rojizos).

Los valores escogidos en el apartado anterior se situarían en la franja color naranja. Esto es consecuencia de haber elegido un *shaping* que mantiene un compromiso entre ambas características, aunque se haya sacrificado en rango libre de espurios para aumentar el factor de calidad. Este sacrificio es si se compara la cavidad escogida con la cavidad óptima según la figura 4.5.

## 4.2 Creación del primer filtro

Una vez seleccionados los valores que se van a asignar a los parámetros del *shaping*, se va a proceder a realizar un filtro que deberá cumplir unas determinadas especificaciones.

También deberá reflejar en los resultados que ofrezca las características de la cavidad empleada para su creación. Es decir, si el factor de calidad es mayor que el de la cavidad rectangular, las pérdidas de inserción del filtro deberán ser menores que las de un filtro rectangular con las mismas especificaciones.

### 4.2.1 Características deseadas del filtro a realizar

Las especificaciones que se van a tomar para diseñar el filtro son las siguientes:

- El filtro será de tercer orden.
- La frecuencia central de la banda de paso serán 10GHz.
- El ancho de banda serán 100MHz.
- Las pérdidas de retorno del filtro serán de 20dB.

El orden del filtro viene determinado por el número de resonancias que posea el filtro. Cada cavidad es una resonancia. Por lo tanto, el orden del filtro coincide con el número de cavidades que éste tenga.

La frecuencia central deseada para el filtro se obtiene ajustando las longitudes de las cavidades. En este apartado se ha mantenido la frecuencia de resonancia del primer modo que ha sido utilizado para el estudio de las cavidades.

El ancho de banda ha sido seleccionado de forma casi arbitraria. La idea es realizar un filtro típico. En otras palabras, el diseño no debe suponer problemas propios de filtros excesivamente selectivos o con anchos de banda demasiado grandes. Simplemente se quiere demostrar que el modelado propuesto puede suponer una mejora respecto a los filtros convencionales.

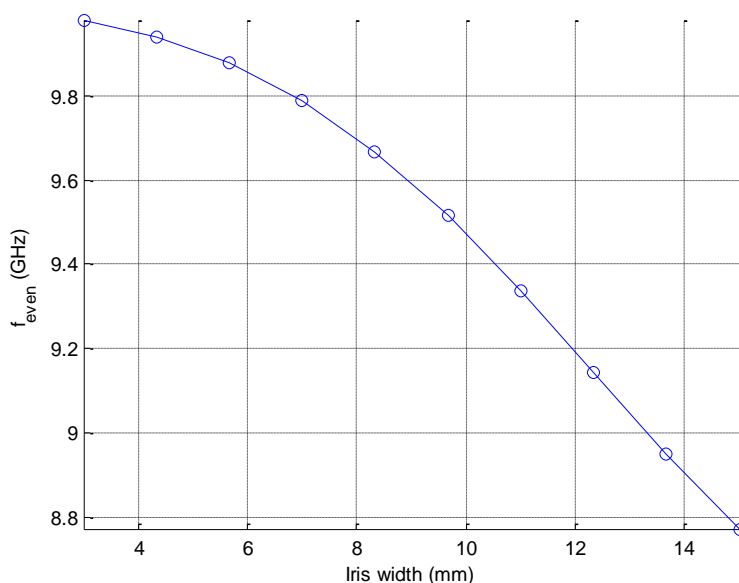
Las pérdidas de retorno son las mismas que las empleadas en la mayoría de los filtros. De esta forma es más fácil comprobar si las pérdidas de inserción responden adecuadamente a lo que el factor de calidad puede ayudar a predecir.

#### 4.2.2 Diseño del filtro

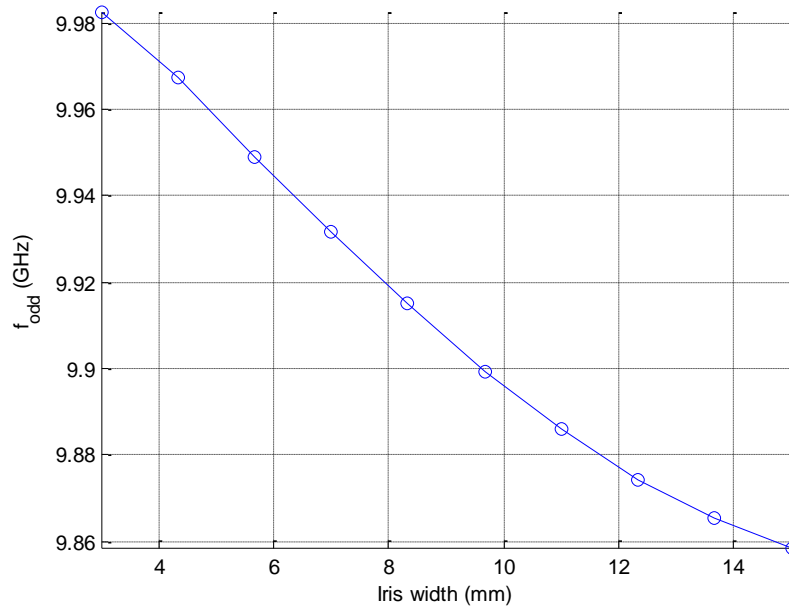
El estándar a usar será el WRD500. Por lo tanto, las dimensiones principales, anchura y altura, del filtro a diseñar tendrán los valores 19,1 y 8,2mm, respectivamente.

El segundo paso, explicado en la subsección 1.3.2.2, consiste en calcular las dimensiones de los acoplamientos “interiores” (acoplamientos entre cavidades resonantes). En este caso, los acoplamientos van a ser inductivos, por lo que la dimensión a calcular es su anchura.

Aplicando las condiciones de simetría como se ha explicado en la subsección citada en el párrafo anterior, se pueden calcular las frecuencias *even* y *odd*. En la figura 4.6 y 4.7 se muestran estas frecuencias para este primer modelado.



**Figura 4.6** Frecuencia *even* para el primer mejor diseño

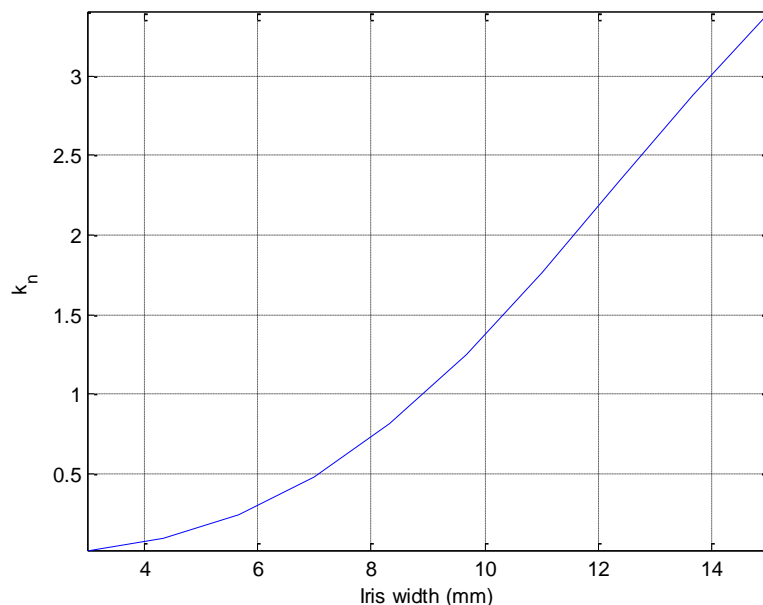


**Figura 4.7 Frecuencia *odd* para el primer mejor diseño**

A partir de estas frecuencias se puede calcular el coeficiente de acoplamiento normalizado ( $k_n$ ) aplicando (1.16) y normalizando respecto a la frecuencia central y el ancho de banda:

$$k_n = \frac{f_0}{BW} \frac{f_{odd}^2 - f_{even}^2}{f_{odd}^2 + f_{even}^2}$$

En la figura 4.8 se ha mostrado el coeficiente de acoplamiento normalizado obtenido a través de las frecuencias *even* y *odd*.



**Figura 4.8 Coeficiente de acoplamiento normalizado para el primer mejor diseño**

El comportamiento del coeficiente es evidente: a mayor anchura del iris, mayor acoplamiento (mayor distancia hasta el 0). También podría haber sido un acoplamiento negativo. En estos casos, el coeficiente de acoplamiento decrece,

es decir, tiene un comportamiento literalmente opuesto al de la figura 4.8: comienza en 0 y no deja de decrecer.

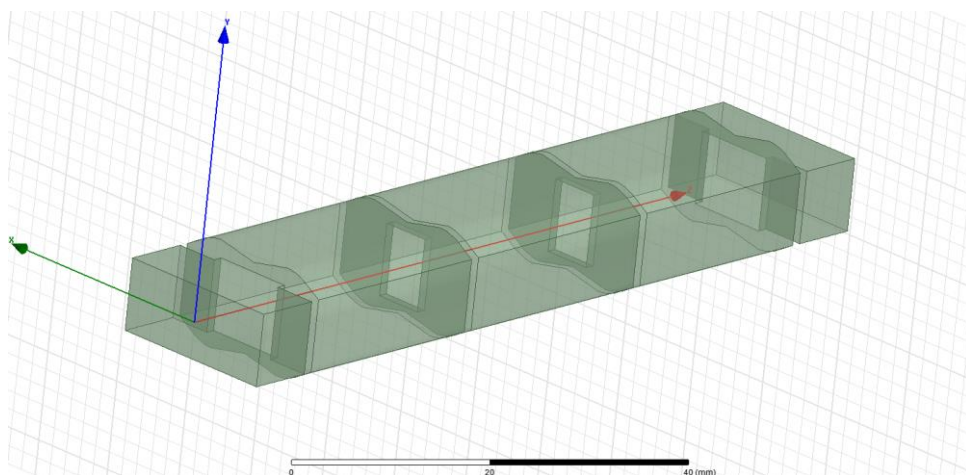
El siguiente paso es calcular la matriz de acoplamiento como se explicó en la subsección 1.3.1.3, y averiguar para que anchura del iris el coeficiente de acoplamiento coincide con el valor del acoplamiento dado por dicha matriz. También existe la posibilidad de conocer los valores de la matriz de acoplamientos empleando el software CST [14]. Dicho esto, ya estarían calculados las dimensiones de los acoplamientos “interiores”. La matriz de acoplamientos obtenida es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.08 & 0 & 0 & 0 \\ 1.08 & 0 & 1.0303 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0303 & 0 & 1.0303 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0303 & 0 & 1.08 \\ 0 & 0 & 0 & 1.08 & 0 \end{bmatrix}$$

Para los acoplamientos de los puertos se tendrían sus valores correspondientes en la matriz de acoplamientos ( $M_{S1}$  y  $M_{NL}$ ) ya calculada. Ambos poseerían el mismo valor debido al carácter simétrico del filtro. Con ayuda del software *AWR Design Environment* se puede obtener la respuesta exacta deseada del modelo circuital que se corresponde con la estructura en guía de onda a realizar para calcular estos acoplamientos. El proceso de cálculo de estos acoplamientos viene explicado en el apartado 1.3.2.3.

Las longitudes de las cavidades “interiores” se calculan una vez ya conocidas las dimensiones de los acoplamientos. Se ha de crear la estructura en guía de onda definida en la subsección 1.3.2.4. Para este paso se necesita usar el *eigensolver* del software utilizado (en este caso, de *Ansys Electronics 17.2*). Ajustando la longitud de la cavidad se busca que la cavidad resuene a la frecuencia deseada.

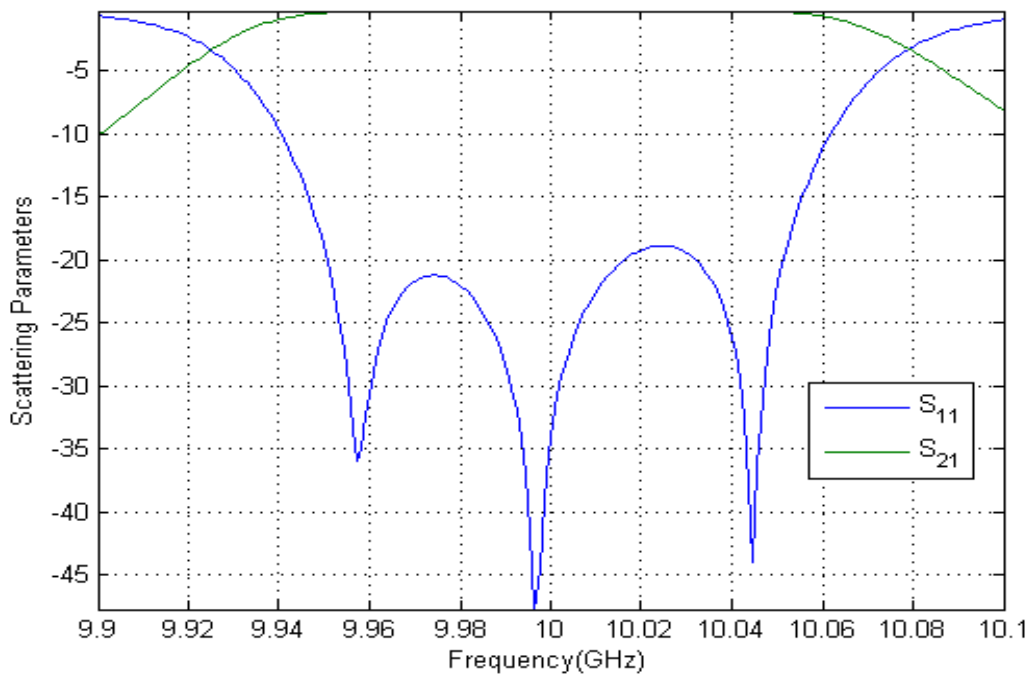
Por último, sólo faltan por ajustar las longitudes de las cavidades “exteriores”. Para ello, se realiza un barrido de parámetros S en la estructura total del filtro. En la subsección 1.3.2.5 está explicado este paso detalladamente. La estructura final del filtro se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9 Estructura final del primer filtro diseñado**

Los puertos se corresponden con las cavidades rectangulares de menor longitud situadas en los extremos de la estructura. Como se dijo, la estructura contiene tres cavidades con mejor *shaping*. Los acoplamientos entre estas cavidades son los que se han denominado como acoplamientos “interiores”. Los otros dos acoplamientos, situados entre un puerto y una cavidad, serían los acoplamientos “exteriores”.

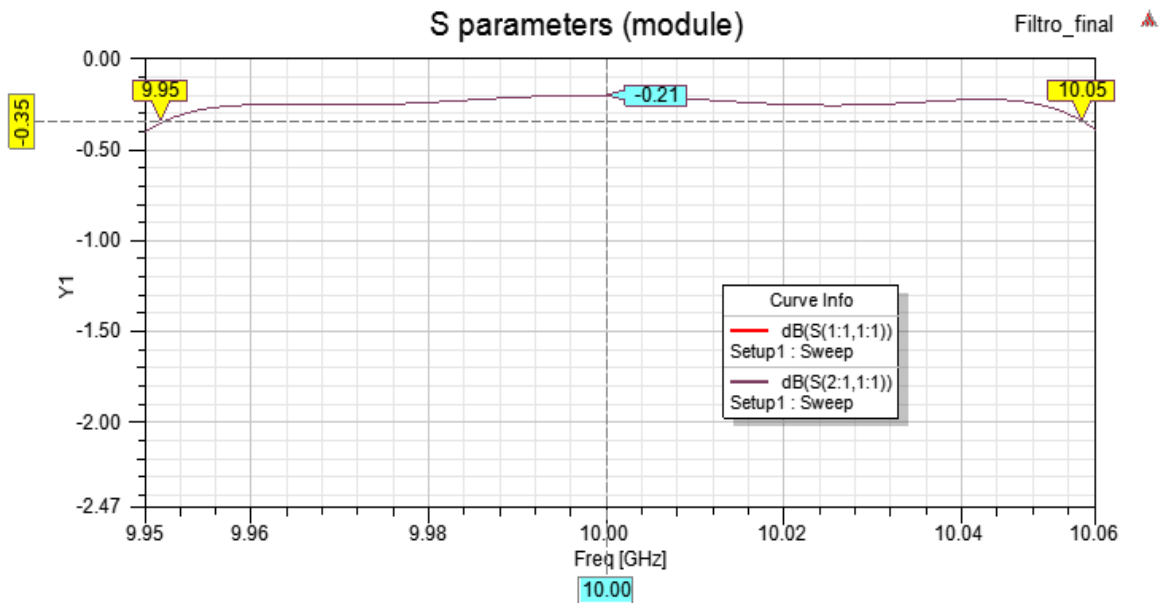
Con todos los pasos ya realizados, y las dimensiones a calcular ya correctamente ajustadas, se obtiene una respuesta de parámetros S como la mostrada en la figura 4.10.



**Figura 4.10 Parámetros S para el primer filtro en la banda de paso**

Las tres resonancias propias de los filtros de orden 3 se ven claramente en los picos que posee el parámetro  $S_{11}$ . El ancho de banda del filtro es de 100MHz, como se deseaba. La frecuencia central de la banda de paso, 10GHz, también coincide con las especificaciones. Las pérdidas de retorno son de 20dB, aproximadamente.

Las pérdidas de inserción debidas a que el filtro no es ideal son de 0.21dB. El material asignado a las paredes de la estructura en guía de onda ha sido el aluminio, cuya conductividad es  $3,78 \cdot 10^7$  S/m. Para observar mejor este hecho, en la figura 4.11 se muestra solamente un detalle del parámetro  $S_{21}$  en la banda de paso.

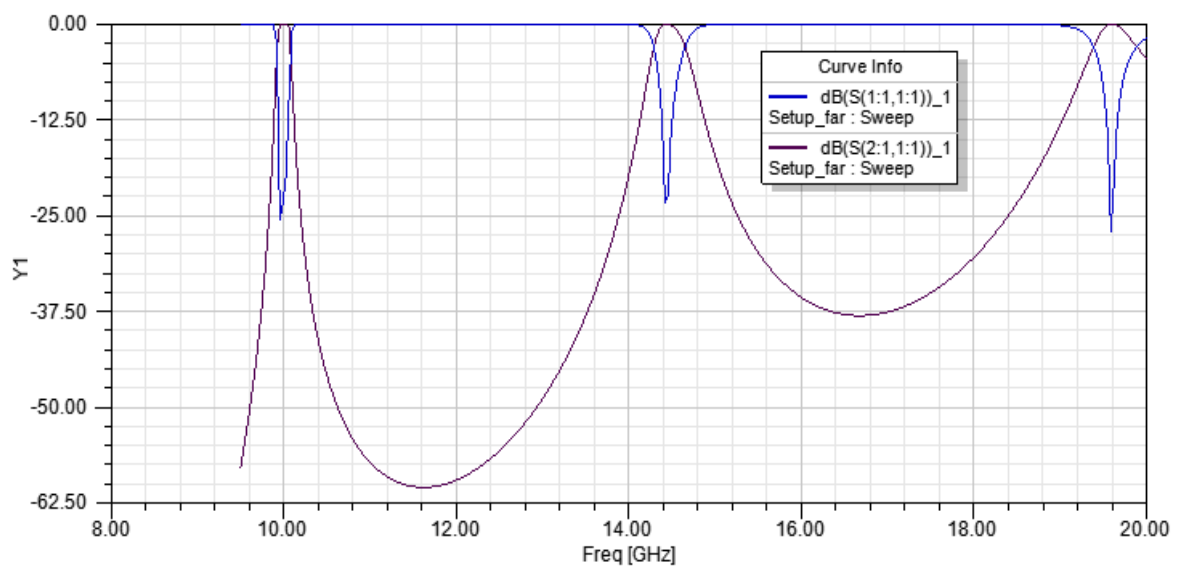


**Figura 4.11 Pérdidas de inserción para el primer filtro diseñado mostrando los dos primeros espurios**

Las pérdidas de inserción del filtro son de 0,21dB. El rizado en la banda de paso es pequeño. En el siguiente apartado se compararán estas pérdidas con las de un filtro realizado con cavidades rectangulares y se comprobará si éste puede ser mejorado con el *shaping* propuesto o no.

El filtro que se ha diseñado está constituido por cavidades cuyo rango libre de espurios era de 4,5GHz. Por lo tanto, el filtro debería tener ese mismo rango de espurios. Para comprobar este hecho, se realiza un barrido de parámetros S desde una frecuencia algo menor que la banda de paso hasta varios gigahercios por encima de ella.

En la figura 4.12 se muestra el resultado de realizar dicho barrido para el filtro diseñado.



**Figura 4.12 Parámetros S del primer filtro diseñado**

Esta figura muestra como el rango de espurios coincide con el esperado. Por lo tanto, se puede concluir afirmando que el diseño del filtro se ha realizado de forma adecuada, obteniendo los resultados pertinentes teniendo en cuenta la cavidad elegida para realizar el diseño.

### 4.3 Comparación con un filtro de cavidades rectangulares

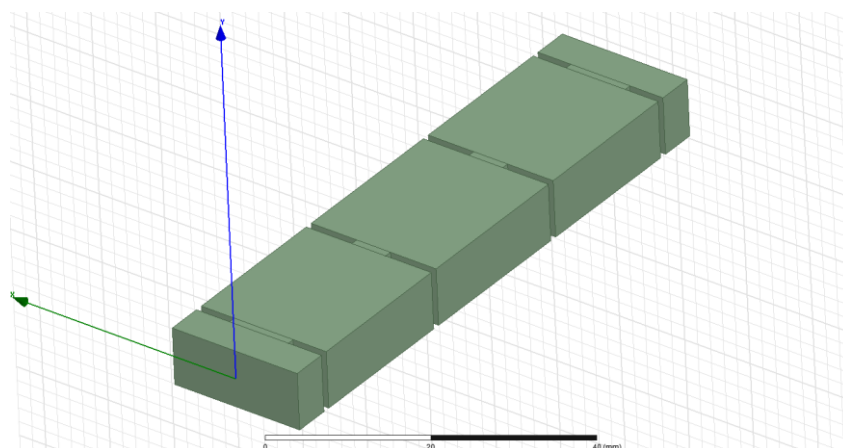
Los resultados obtenidos en el apartado anterior han sido coherentes respecto a las características de la cavidad empleada en el diseño del filtro. A pesar de esto, todavía no se ha comprobado si el filtro diseñado supera a un filtro en estructura en guía de onda rectangular estándar.

Debido a esto, se ha diseñado un filtro rectangular. Un hecho importante es que las dimensiones principales de la cavidad son las proporcionadas por el estándar WRD500. Este estándar es el propio de las guías de onda ridge. El motivo es que todos los cálculos y análisis hechos para la obtención de los valores óptimos del *shaping* han sido realizados siendo las dimensiones principales de la cavidad (altura y anchura) las del estándar WRD500. Esto se debe a la idea inicial del proyecto, cuya meta era diseñar un filtro que optimizase la guía de onda ridge.

Dicho esto, se procede a diseñar un filtro de cavidades rectangulares en línea cuyas dimensiones principales son las del estándar WRD500. Las especificaciones de este filtro son las mismas que las del filtro diseñado con cavidades modeladas. Si esto no fuese así, no tendría sentido comparar ambas cavidades. A modo de recordatorio, se van a exponer las especificaciones del filtro diseñado:

- Filtro de tercer orden.
- La frecuencia central de la banda de paso son 10GHz.
- El ancho de banda son 100MHz.
- Las pérdidas de retorno son de 20dB.

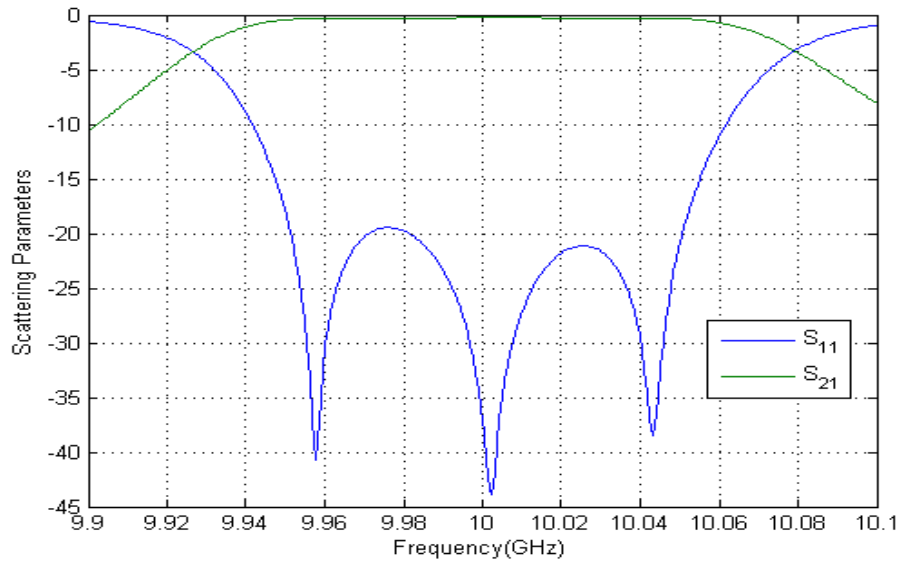
El filtro se ha creado haciendo uso de FEST [15]. En la figura 4.13 se muestra cómo quedaría este filtro.



**Figura 4.13 Filtro de cavidades rectangulares de tercer orden**



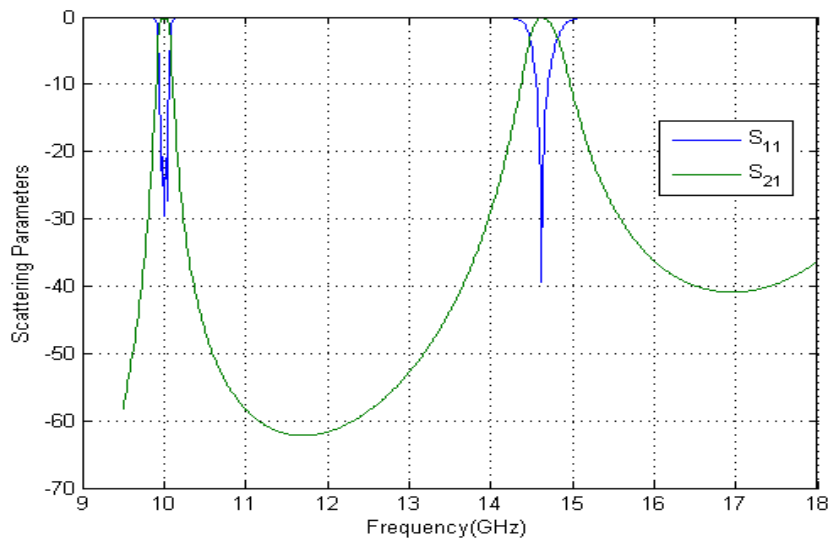
Los iris empleados también son inductivos. El módulo de los parámetros S de este filtro en la banda de paso se muestra en la figura 4.14.



**Figura 4.14 Parámetros S del filtro con cavidades rectangulares en la banda de paso**

Las especificaciones deseadas para el filtro son las mismas que presentan sus parámetros S: tres resonancias, 10GHz como frecuencia central de la banda de paso, 100MHz como ancho de banda y 20dB de pérdidas de retorno.

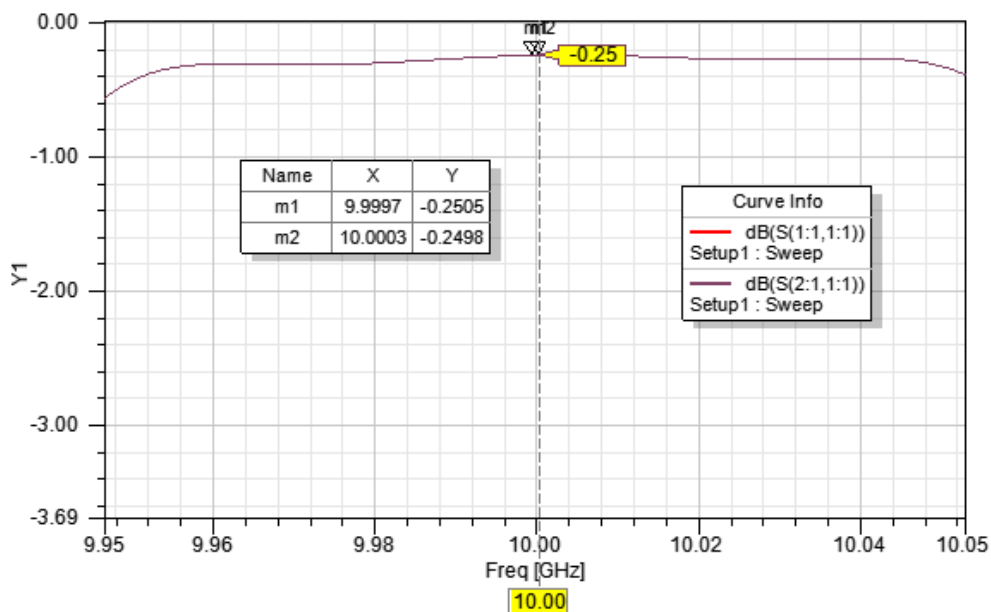
La distancia hasta el espurio se puede conocer gracias a la figura 4.15, para la cual se ha realizado un barrido del módulo de los parámetros S más amplio que en la figura anterior.



**Figura 4.15 Parámetros S del filtro con cavidades rectangulares mostrando el primer espurio**

La distancia hasta el espurio es de 4,67GHz. Todavía no se conocen las pérdidas de inserción que presenta este filtro. Para saber cuál es su valor, se le ha asignado a las paredes el mismo material que se le asignó a las paredes del filtro diseñado con cavidades modeladas: aluminio.

En la figura 4.16 se muestra el parámetro  $S_{21}$  en la banda de paso, de forma que se pueden conocer las pérdidas de inserción del filtro y el rizado que posee la banda de paso.



**Figura 4.16 Pérdidas de inserción para el filtro de cavidades rectangulares**

Las pérdidas de inserción poseen un valor de 0,25dB. El rizado presente en la banda de paso no es elevado, luego no supone ningún problema adicional.

Ya conocidas las características principales del filtro con cavidades rectangulares en línea, se pueden comparar con las características ofrecidas por el filtro diseñado con la cavidad modelada.

La primera característica que se va a comparar es el rango libre de espurios. Para el filtro con *shaping*, es de 4,5GHz. En cambio, para el filtro de cavidades rectangulares era algo mayor. Más en concreto, tenía un valor de 4,67GHz. Esta diferencia es casi nula. El empeoramiento del rango libre de espurios es del 3,64% ( $\frac{4,67-4,5}{4,67} \times 100 = 3,64$ ). Por lo tanto, la decisión sobre que filtro es más óptimo la dará las pérdidas de inserción.

Para el filtro de cavidades modeladas, estas pérdidas eran de 0,21dB. Sin embargo, en el filtro de cavidades rectangulares, poseían un valor mayor: 0,25dB. La mejora introducida por el filtro de cavidades con *shaping* ha sido del 16% ( $\frac{0,25-0,21}{0,25} \times 100 = 16$ ). La mejora del filtro en las pérdidas de inserción multiplica por un factor de 4,4 a la empeora producida en el rango libre de

espurios. Por lo tanto, se puede afirmar que el filtro diseñado con el modelado propuesto en este proyecto supera al filtro de cavidades rectangulares.

Aun así, se reitera el hecho de que el estándar aplicado para obtener las dimensiones principales de las cavidades ha sido el WRD500. Este estándar es propio de guías de onda ridge, no de guías de onda rectangulares. Este hecho puede provocar que la mejora introducida en las pérdidas de inserción no sea tan elevada.

Sin embargo, sí que se puede afirmar que seguirá existiendo mejora, pues el factor de calidad  $Q_U$  de la cavidad con *shaping* para los valores escogidos de los parámetros del modelado era superior al de la cavidad rectangular para el estándar WR90.

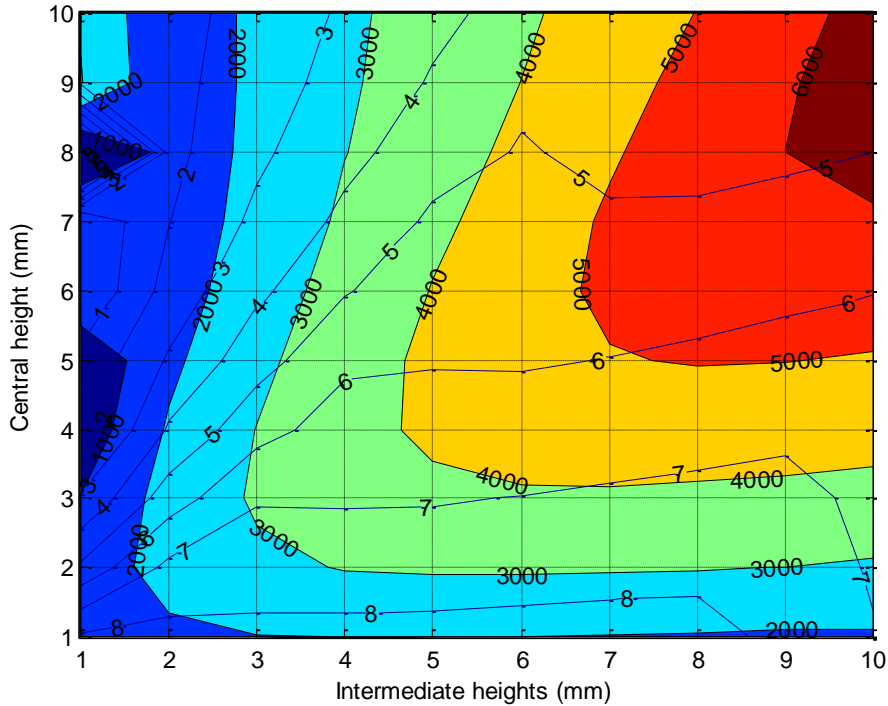
#### **4.4 Selección de un segundo *shaping* para crear un filtro**

En el *shaping* anterior, se escogió un rango libre de espurios similar al ofrecido por una cavidad rectangular. Con esta característica fijada, se pudo obtener un factor de calidad bastante alto (el valor de  $Q_U$  era cercano a 7000). Para este caso, se intentará relizar un filtro con mayor rango libre de espurios, de modo que existirá un sacrificio del factor de calidad. Este sacrificio no será muy grande, pues entonces las pérdidas de inserción serían demasiado elevadas.

##### 4.4.1 $Q_U$ y SFR

En la figura 4.4 se mostraron el  $Q_{UNLOADED}$  y el SFR con líneas de contorno, y así se pudieron elegir los valores de los parámetros del modelado conociendo de antemano las características que la cavidad poseería. En este caso, se va a observar también las características presentes en la figura 4.17.

En esta figura, se ha realizado un barrido anidado de las variables del *shaping*. La diferencia entre estas figuras radica en que en la figura 4.17 las variables han tenido valores menores. Este hecho ha permitido conocer los máximos rangos libres de espurios, así como el factor de calidad correspondiente.



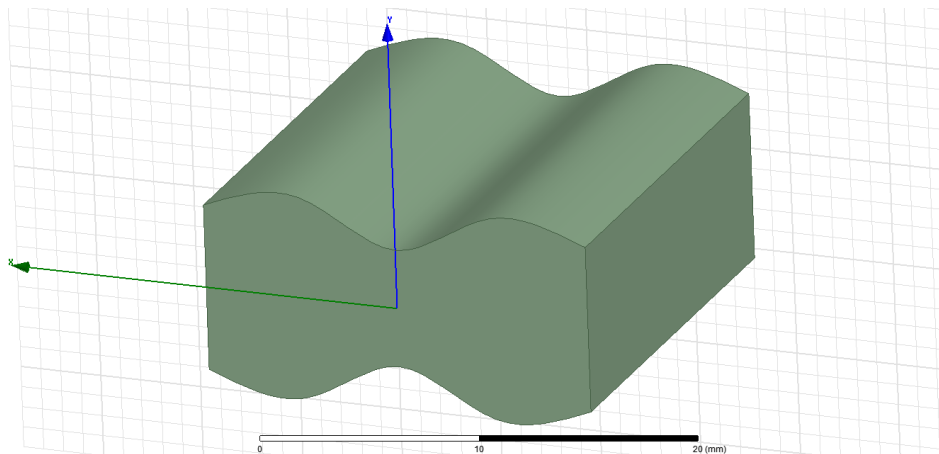
**Figura 4.17 SFR y  $Q_U$  representados con líneas de contorno en un rango reducido**

En esta gráfica se demuestra que se pueden conseguir rangos libres de espurios superiores a 8GHz. Sin embargo, el  $Q_{UNLOADED}$  conseguido sería pequeño, con un valor algo superior a 2000. Por lo tanto, el filtro a realizar deberá tener un rango libre de espurios no tan grande.

Si se desea un rango libre de espurios de 6GHz (mayor que el ofrecido por cualquier cavidad rectangular), también se deseará obtener el máximo factor de calidad manteniendo el SFR especificado. Para conseguir esto habrá que encontrar, sin abandonar la línea que indica los 6GHz de rango libre de espurios, el máximo  $Q_U$ . Los valores necesarios en los parámetros del modelado para conseguir las características deseadas no se encuentran en la figura 4.17.

Por lo tanto, se deberá volver la atención sobre la figura 4.4. En esta figura se ha de realizar la búsqueda de las características mencionada en el párrafo anterior. Una vez encontrado el punto exacto deseado, se tendrán los valores a asignar a las dos variables del *shaping*: la altura central y las alturas intermedias.

Los valores que se han asignado a la altura central y a las alturas intermedias han sido 5,8mm y 10mm, respectivamente. En la figura 4.18 se muestra la cavidad obtenida con dicho modelado, y en la figura 4.19 sus características principales.



**Figura 4.18** Cavity empleada para realizar el segundo filtro

	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	10.0002 +j 0.000936820	5337.29
	Mode 2	16.0398 +j 0.00126429	6343.40

**Figura 4.19** Características de la cavity empleada para realizar el segundo filtro

El  $Q_U$  de la cavity es de 5337,29, como bien se había predicho con los datos de la figura 4.4. El rango libre de espurios es de 6GHz, como se había deseado.

#### 4.4.2 SFR&Q

El modelado escogido ha sido elegido por medio de la determinación del valor de una de las características, y la búsqueda del máximo posible para la otra característica manteniendo el valor de la primera. Al final, el deseo es obtener un *shaping* óptimo.

Otra forma de encontrar un modelado que sea óptimo es, como se explicó en la subsección 4.1.2.2, escogiendo el *shaping* que proporcione un mayor valor para el parámetro de mérito.

En este proyecto, los modelados escogidos siempre se han realizado como se ha explicado en el párrafo. Sin embargo, no está mal situar el modelado escogido en la gráfica del parámetro de mérito (figura 4.5), y comprobar su valor. Éste va a permitir conocer si el sacrificio cometido en una de las características para aumentar la otra ha sido excesivo o no.

Si se cogen los valores tomados para este segundo *shaping* (5.8mm para la altura central y 10mm para las alturas intermedias) y se sitúan en la gráfica 4.5, se podrá ver que el modelado seleccionado está dentro de la zona granate. En otras palabras, está en la zona óptima, lo que supone un auténtico compromiso entre el factor de calidad y el rango libre de espurios.

## 4.5 Creación del segundo filtro

Estando ya los valores asignados a los parámetros del *shaping*, sólo falta especificar las características propias del filtro. Estas características se conseguirán ajustando adecuadamente los valores de los acoplamientos, así como las longitudes de las cavidades.

Una vez terminado el filtro, se comprobará si es coherente con los resultados que proporciona la cavidad.

### 4.5.1 Características deseadas del filtro a realizar

Las especificaciones para realizar este filtro son las mismas que las exigidas para el anterior filtro diseñado:

- El filtro será de tercer orden.
- La frecuencia central de la banda de paso será 10GHz.
- El ancho de banda serán 100MHz.
- Las pérdidas de retorno poseerán un valor de 20dB.

Por lo tanto, la estructura final del filtro será muy parecida a la obtenida para el primer filtro diseñado. Se tendrán tres cavidades resonantes, cuyas dimensiones serán semejantes a las del anterior filtro realizado empleando un *shaping* diferente. Los acoplamientos también poseerán dimensiones parecidas a los acoplamientos del primer filtro.

### 4.5.2 Diseño del filtro

Las dimensiones principales (altura y anchura) que poseerán tanto las cavidades resonantes como los puertos serán las propias del estándar WRD500.

Los acoplamientos “interiores” también van a ser inductivos. Una de las diferencias que se observará en este filtro respecto al ya diseñado reside en el valor de la altura de estos acoplamientos. En el otro filtro, este valor era igual al de la altura lateral. En este nuevo filtro, debido a que la altura central es menor que la altura del lateral, la altura del acoplamiento será igual a la altura central.

Para el cálculo de la anchura de los acoplamientos “interiores” se hará uso de las propiedades de simetría. Como se explicó en la subsección 1.3.2.2, creando la estructura en guía de onda correspondiente y aplicando correctamente estas propiedades, se obtienen las frecuencias *even* y *odd*. A partir de éstas se puede

conocer el valor del coeficiente de acoplamiento normalizado mediante la ecuación (1.15).

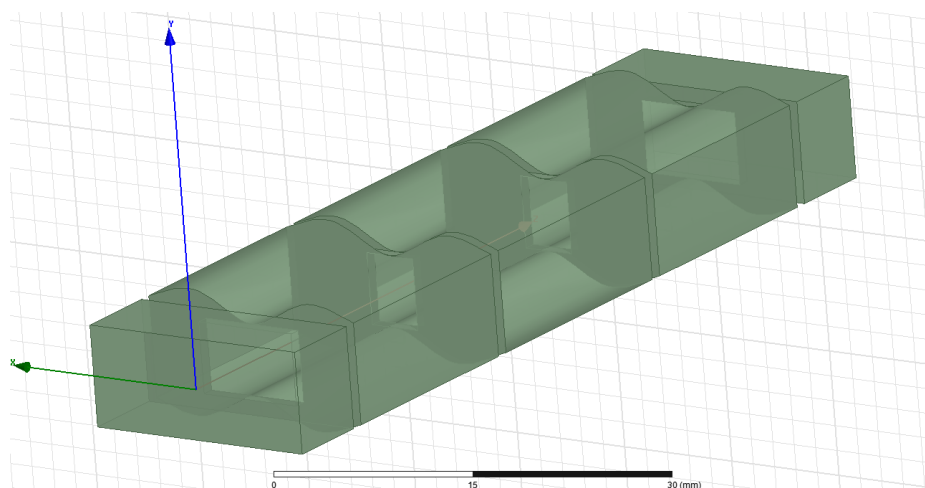
La matriz de acoplamientos que se ha de calcular es la misma que para el filtro anteriormente diseñado, pues las especificaciones son las mismas (mismo orden, misma frecuencia central de la banda de paso, mismo ancho de banda y mismas pérdidas de retorno). Por lo tanto, ya se tendrían los valores para las anchuras de los acoplamientos “interiores”.

Para los acoplamientos “exteriores”, se emplearía el método definido en la subsección 1.3.2.3: diseño de la estructura en guía de onda compuesta por la cavidad modelada y dos puertos. La unión se realizaría con los iris correspondientes a los acoplamientos “exteriores” del filtro final. También es necesario crear su correspondiente modelo circuital, asignándole los valores adecuados a cada parámetro de este último. Finalmente, variando la anchura de los acoplamientos “exteriores”, se intenta igualar la respuesta de la estructura en guía de onda a la que ofrece el modelo circuital.

Las longitudes de las cavidades “interiores” se calculan como se explicó en la sección 1.3.2.4, haciendo uso del *eigensolver*. Se intenta que la estructura en guía de onda que se ha de diseñar para este paso resuene a la frecuencia central de la banda de paso. Para conseguirlo, la dimensión que se debe ir modificando para alcanzar dicha meta es la longitud de la cavidad de la estructura generada.

Por último, quedan por calcular las longitudes de las cavidades “exteriores”. Como se definió en la sección 1.3.2.5, habrá que realizar un barrido de parámetros de *Scattering* para conocer la respuesta del filtro. Se observará que alguno de los polos está alejado de la banda de paso. Mediante el ajuste de la longitud de estas cavidades (se ha de recordar que el filtro es simétrico, por lo que la primera y la última cavidad poseen la misma longitud) el polo alejado debe introducirse en la banda de paso para obtener una respuesta adecuada del filtro diseñado.

En la figura 4.20 se muestra la estructura final del filtro diseñado.

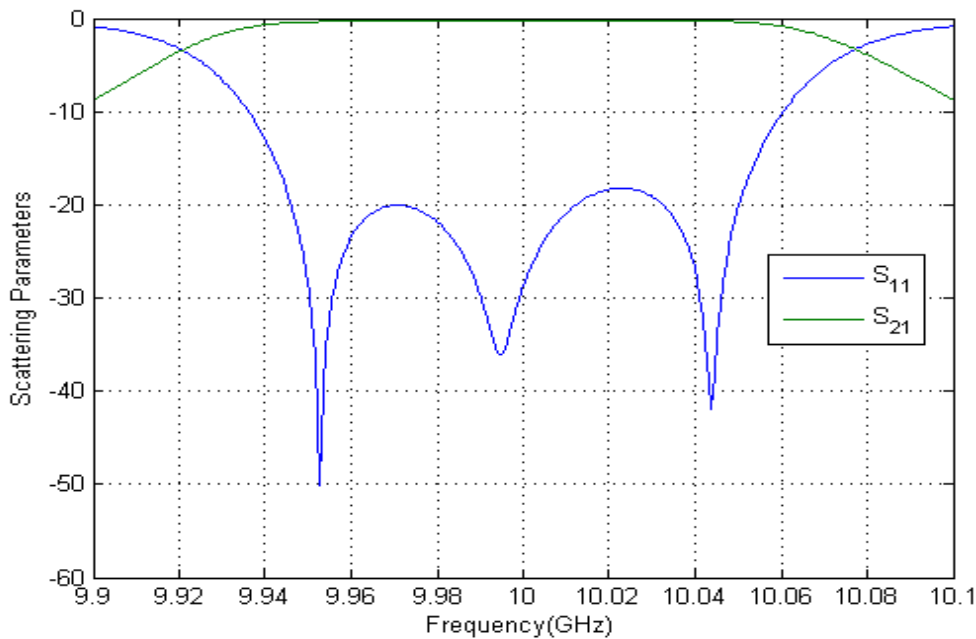


**Figura 4.20 Estructura final del segundo filtro diseñado**

Las semejanzas respecto al otro filtro diseñado residen en las especificaciones del filtro: posee tres cavidades resonantes, y tanto las cavidades como los iris poseen unas dimensiones semejantes. El tamaño de los puertos es exactamente el mismo que en el otro filtro.

La diferencia principal radica en los valores para los parámetros del *shaping*. Ahora, la altura central es menor que la lateral. Por lo tanto, los “picos” generados en la zona central del filtro son mayores.

En la figura 4.21 se muestra una gráfica que contiene los parámetros S del filtro.



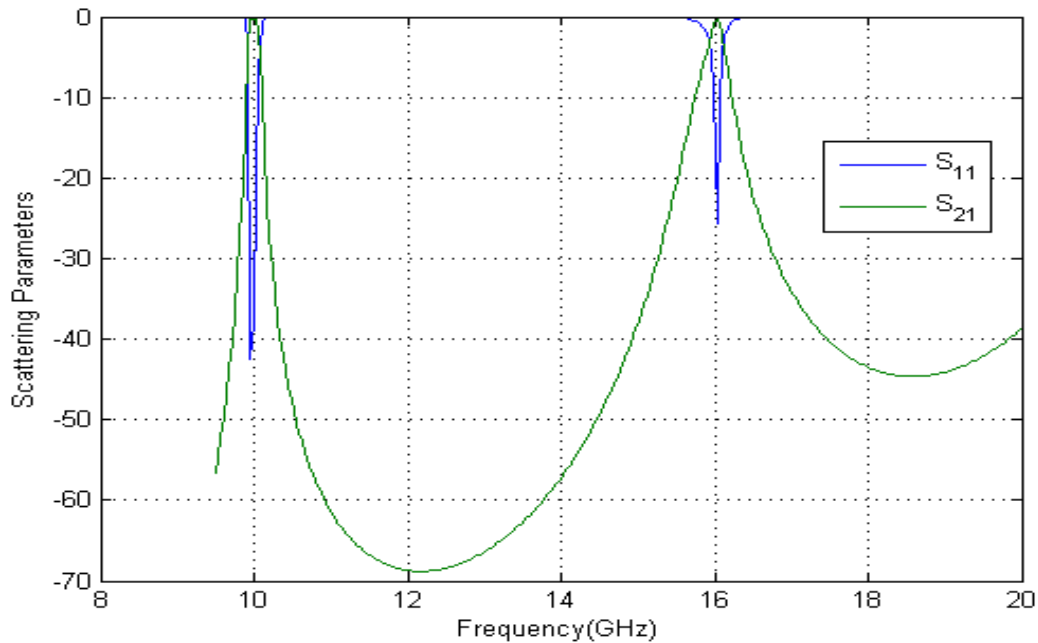
**Figura 4.21 Parámetros S del segundo filtro diseñado**

Esta gráfica demuestra que las especificaciones del filtro se cumplen. Existen tres resonancias marcadas por los tres polos del parámetro S21. También se pueden apreciar en los tres ceros del parámetro S11. La frecuencia central de la banda de paso son los 10GHz, así como el ancho de banda del filtro es de 100MHz, cómo se exigía en las especificaciones. Las pérdidas de retorno también coinciden con las solicitadas, con un valor de 20dB.

Las pérdidas de inserción que ofrece este filtro son de 0,28dB. Respecto al primer filtro diseñado, cuyas pérdidas de inserción son de 0,21dB, se ha empeorado. Este hecho era de esperar, pues el factor de calidad de la cavidad empleada para realizar el segundo filtro, de valor 5337, es menor que el  $Q_U$  de la cavidad empleada en el primer filtro, cuyo valor era 6941.

Para conocer la distancia hasta el espurio, se ha de realizar un barrido de los parámetros de *Scattering* que abarque un mayor rango de frecuencias. En la figura 4.22 se muestra una gráfica con los resultados tras realizar este barrido.





**Figura 4.22 Parámetros S del segundo filtro diseñado**

Como se tenía previsto, el espurio se sitúa a 6GHz de la banda de paso. Esto vuelve a demostrar que tanto la forma empleada para diseñar el filtro como los datos ofrecidos por la figura 4.4 son correctos.

#### 4.6 Comparación de resultados

En los apartados anteriores se han diseñado dos filtros a partir de cavidades cuyas características eran conocidas de antemano gracias a la gráfica 4.4. Con el barrido realizado de los parámetros de *Scattering* para cada una de las estructuras finales, se ha podido comprobar la coherencia entre los resultados ofrecidos por el filtro y los que proporcionaba la cavidad empleada para el diseño de cada uno de los filtros.

Para poder visualizar más fácilmente todos los resultados obtenidos, se han creado dos tablas. La tabla 4.1 muestra los datos de las cavidades estudiadas en los subsecciones 4.1 y 4.4 de este proyecto. La tabla 4.2 muestra las características de los filtros diseñados hasta ahora.

PARÁMETRO	SHAPED 1	SHAPED 2	RECTANGULAR	RIDGE
$Q_U$	6941	5337	5613	1857
$SFR$ (GHz)	4,5	6	4,67	8,67

**Tabla 4.1 Características de las cavidades estudiadas hasta ahora**

La cavidad *shaped 1* se corresponde con la cavidad empleada para diseñar el primer filtro. Por ende, la cavidad *shaped 2* se correspondería con la empleada para el diseño del segundo filtro.

La tabla 4.1 muestra cómo existe un compromiso entre el factor de calidad y el rango libre de espurios. Cuando una de estas características es mayor en un filtro que en otro, la otra característica es menor. Sin embargo, a pesar de este compromiso, sí que existen cavidades que son claramente mejores que otras. Por ejemplo, la cavidad *shaped 1* posee un espurio algo peor que la cavidad rectangular, pero la supera en un valor considerable en lo que se refiere a factor de calidad.

En la tabla 4.2 se muestran los datos obtenidos de los filtros diseñados hasta ahora en el proyecto.

PARÁMETRO	SHAPED 1	SHAPED 2	RECTANGULAR
Pérdidas de inserción (dB)	0,21	0,28	0,25
<i>SFR (GHz)</i>	4,5	6	4,67

**Tabla 4.2 Características de los filtros diseñados hasta ahora**

Esta tabla muestra como los filtros con mayores  $Q_U$  poseen unas pérdidas de inserción menores, y viceversa. El rango libre de espurios se mantiene en todos los casos. También se puede afirmar la existencia de un compromiso entre las pérdidas de inserción y el rango libre de espurios: cuando uno mejora, el otro empeora. Aun así, por supuesto que existen filtros que se pueden considerar mejores que otros.

Por ejemplo, recurriendo al mismo ejemplo de antes, el filtro *shaped 1* posee un espurio casi a la misma distancia en frecuencia que el filtro rectangular. Sin embargo, las pérdidas de inserción son bastante menores, lo que indica una mejora considerable.

#### **4.7 Aplicación de modelados en el diseño de filtros y ajuste de éstos**

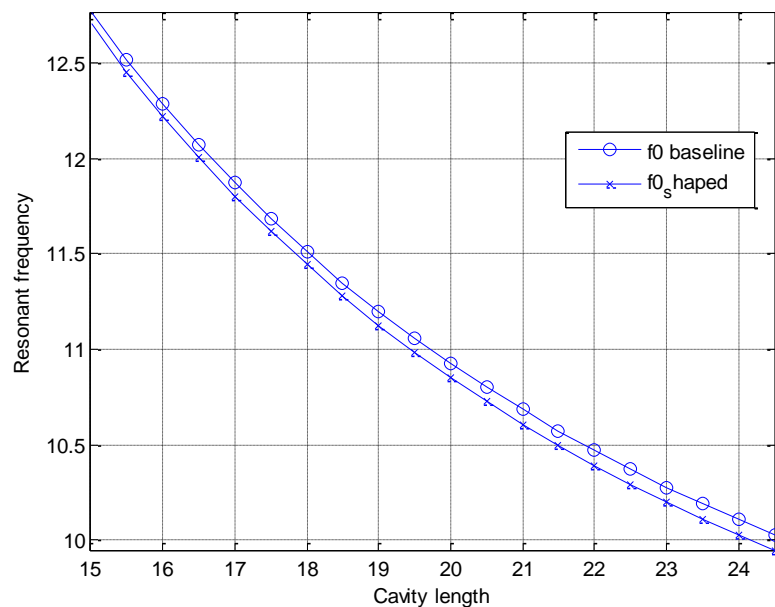
En el apartado 4 de este proyecto, se ha ido un paso más allá. Se ha pasado de comparar resultados ofrecidos por cavidades a resultados ofrecidos por filtros diseñados. Este paso es muy importante. Cuando se realiza un filtro con modelado geométrico, existe una dificultad añadida: el número de variables a tener en cuenta es mayor.

Este hecho puede suponer, en algunos casos, que la realización final del filtro no pueda ser posible debido a la geometría de la cavidad empleada. Si con una geometría determinada no se puede tener una cierta independencia entre las

consecuencias que conlleva modificar cada uno de los parámetros, el ajuste final del filtro puede no llegar a finalizarse correctamente.

En este proyecto no se ha tenido ese problema. Una manera de entender mejor la idea que aquí se está lanzando es visualizando la variación de la frecuencia de resonancia de una cavidad cuando se varía su longitud. Para una cavidad rectangular, se puede suponer de antemano cual será este comportamiento.

Sin embargo, en una cavidad con un determinado *shaping*, no se puede deducir cual será la variación que sufrirá la frecuencia de resonancia cuando se modifique el valor de la longitud de la cavidad. En la figura 4.23 se muestra una gráfica en la que se comparan las frecuencias de resonancia de una cavidad rectangular y de la cavidad modelada empleada en el diseño del primer filtro.



**Figura 4.23 Frecuencias de resonancia (GHz) al variar la longitud de las cavidades**

En esta gráfica se ve como la variación que sufre la frecuencia de resonancia de la cavidad modelada es casi idéntica a la que sufre la frecuencia de resonancia de la cavidad rectangular. Quizás sea este el motivo por el que en este proyecto no han existido problemas extra para ajustar las frecuencias.

Mientras la sección transversal de la cavidad modelada sea constante, la frecuencia de resonancia de ésta variará de forma similar a la que muestra la figura 4.23. Cuando la sección transversal no sea constante, se darán casos en los que modificar la longitud de la cavidad cause unos desajustes en la frecuencia de resonancia más difíciles de predecir. Debido a esto, el ajuste final del filtro puede resultar mucho más complicado.

## 4.8 Conclusiones

Este apartado ha servido, principalmente, como prueba evidente de que el modelado geométrico aplicado a filtros de microondas en estructuras de guías de onda supone un nuevo camino para el diseño de éstos. Las características que se pueden obtener con este modelado superan a las que proporcionan los filtros convencionales, y el diseño del filtro no se ve alterado (por lo menos, manteniendo la sección transversal constante no se ha añadido ninguna dificultad).

En las tablas 4.1 y 4.2 se aprecian dos cosas de cierto grado de importancia. La primera, la coherencia entre las características de las cavidades y las de los filtros, estando éstas mostradas en los parámetros de *Scattering*. La segunda es la capacidad del modelado para, escogiendo unos valores u otros, poder obtener un rango de espurios mayor a costa de sacrificar el factor de calidad o viceversa.

Este hecho permite, con un mismo modelado, tener distintos filtros. Es decir, con un mismo modelado se pueden generar filtros para aplicaciones que requieran características muy distintas.

Además, cabe añadir que en este proyecto se ha realizado un *shaping* que consiste solo en variar la altura (en tres puntos distintos y equidistantes) y mediante el uso de dos variables. Por lo tanto, existen muchas partes del filtro aquí diseñado a modificar mediante una cantidad de nuevas variables a crear para su optimización.

## 5. Diseño de un filtro *dual mode*

En este apartado se va a diseñar un filtro *dual mode* con el *shaping* propuesto en este proyecto. Primero se va a explicar en qué consiste este tipo de filtros. También será necesario explicar cómo surgió la idea de realizar este filtro. Finalmente se abordará todo el diseño con las explicaciones pertinentes.

### 5.1 Definición de filtro *dual mode*

Este tipo de filtros se realizan con geometrías que presentan modos degenerados. Se entiende por modos degenerados aquellos que resuenan exactamente a la misma frecuencia. Por lo tanto, las cavidades que normalmente se utilizan para diseñar estos filtros son cilíndricas y cuadradas. Para una guía cuadrada, los dos modos degenerados son el  $TE_{101}$  y el  $TE_{011}$ .

Con estos filtros se necesitan la mitad de cavidades para obtener el mismo número de resonancias. Es decir, en cada cavidad hay dos resonancias. Esto permite obtener filtros de un cierto orden ocupando un volumen mucho menor. La principal desventaja de estos filtros es su sensibilidad y dificultad en ajustar las distintas partes del filtro de forma independiente.

En el diseño de estos filtros existen algunas diferencias respecto al diseño de los filtros *single mode*. Por ejemplo, para conseguir la excitación del segundo modo se ha de generar algún tipo de asimetría. Para esto, normalmente se usan tornillos, que se colocan formando un ángulo de  $45^\circ$  respecto al eje  $x$  y siendo paralelos al plano  $XY$ .

También se colocan tornillos formando ángulos de  $0$  y  $90^\circ$  respecto al mismo eje, y siendo también paralelos al plano  $XY$ . Estos tornillos permiten controlar de forma independiente las frecuencias de resonancia de los dos modos degenerados. Como ya se ha dicho, este tipo de filtros es muy sensible y necesitan un ajuste muy fino para conseguir un funcionamiento adecuado.

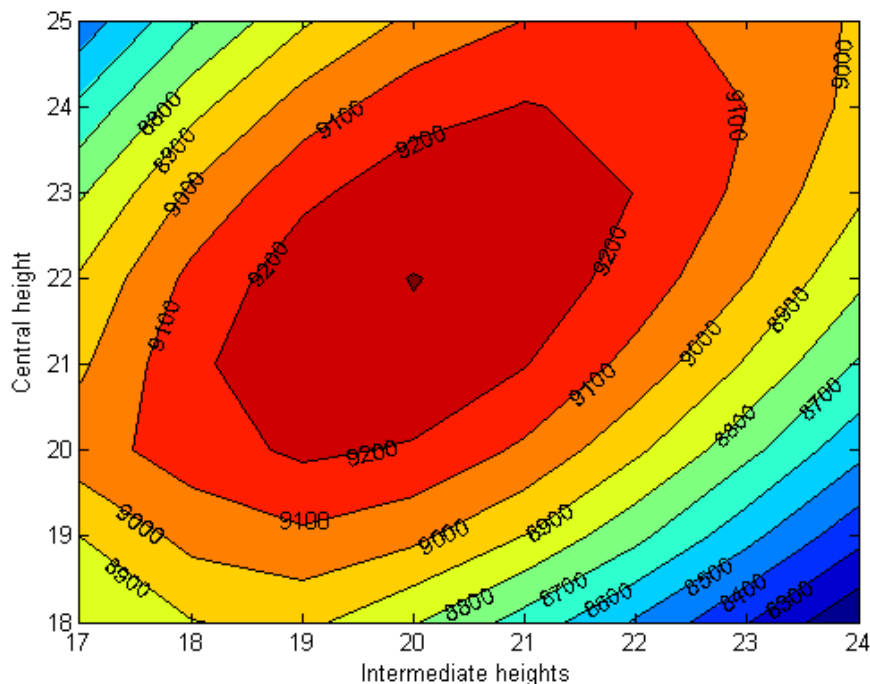
Otra diferencia a destacar es que los acoplamientos ya no serán todos inductivos o capacitivos. Los acoplamientos determinarán la topología del filtro, pues definen qué modo se acoplará a la siguiente cavidad. Según la topología deseada, se usarán un tipo de iris u otro.

## 5.2 Búsqueda del máximo factor de calidad con el modelado propuesto

Debido al uso de filtros paso bajo, muchas veces recibe más importancia el factor de calidad de la cavidad que el rango libre de espurios. El motivo es evidente: existiendo un rango libre de espurios pequeño y un  $Q_U$  alto, se puede colocar tras este filtro paso-banda uno paso-bajo y eliminar cualquier espurio que pueda haber.

Si solo se atiende a la idea lanzada en el párrafo anterior, es evidente que se va a querer encontrar el máximo factor de calidad posible. Esto ocurre también para el modelado de este proyecto. En figura 4.2 se comprobó que el máximo factor de calidad sería para valores muy grandes de los parámetros altura central y alturas intermedias, en comparación con los valores que posee la altura del lateral marcada por el estándar utilizado.

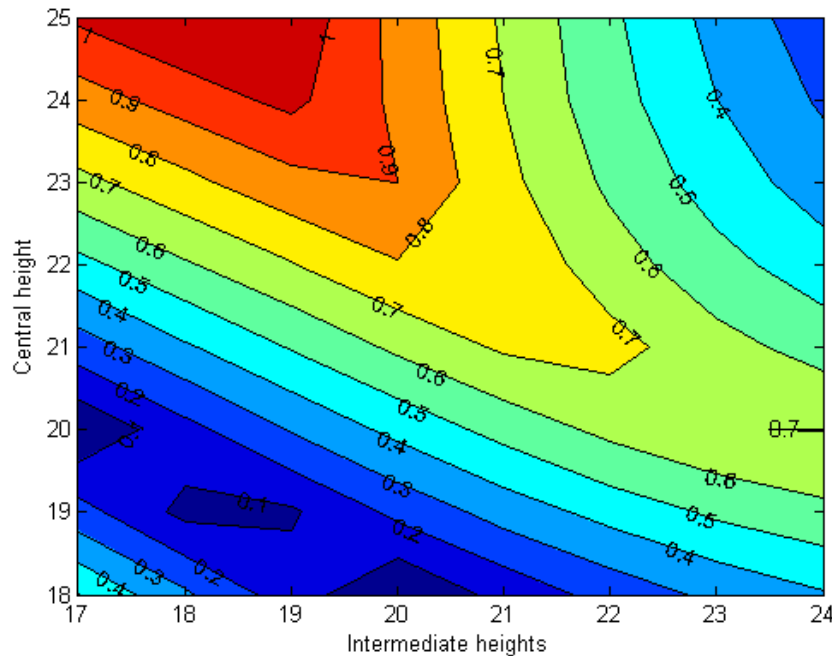
Dicho esto, aparece la necesidad de conocer cuáles son los valores que permitan obtener el máximo factor de calidad con el *shaping* propuesto. En la figura 5.1 se muestra una gráfica realizada mediante un barrido anidado. En este barrido los valores que han tomado los parámetros del modelado han sido bastante grandes.



**Figura 5.1 Máximos valores de  $Q_U$  proporcionados por el modelado**

Los valores que llega a tomar el factor de calidad superan los 9000. Realizar un filtro con cavidades que tengan un  $Q_U$  tan alto sería bastante interesante, pues se conseguirían unas pérdidas de inserción bastante menores que las vistas hasta el momento.

A pesar del gran factor de calidad que se puede llegar a conseguir, también es necesario conocer el rango libre de espurios que presentarían unas cavidades con tales factores de calidad. En la figura 5.2 se muestran los valores del SFR (en GHz) para los mismos valores de los parámetros del *shaping* empleados para realizar la figura 5.1



**Figura 5.2 SFR (GHz) para los máximos valores de  $Q_U$**

Para estos valores, el rango libre de espurios es sumamente pequeño. A este problema se suma que, probablemente, el primer modo en resonar para ciertos valores de los parámetros mostrados en la figura 5.2 sea el modo espurio. Por lo tanto, habría que seleccionar todos los puntos de la gráfica que se deseen para realizar el modelado, comprobar si el primer modo en resonar es el  $TE_{101}$  y obtener una distancia al espurio suficiente como para poder conectar tras este filtro un filtro paso-bajo.

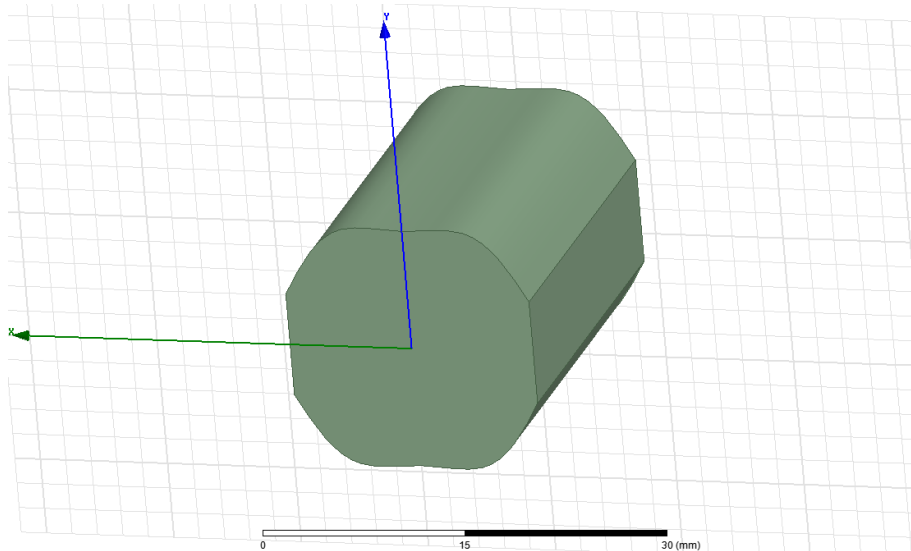
Otra forma de realizar un filtro mediante el empleo de una cavidad con un factor de calidad tan alto es aprovechando las zonas donde el espurio y el primer modo se pueden considerar modos cuasi-degenerados. De esta forma, resonarían el modo principal y el primer espurio a la misma frecuencia. Siendo conscientes de esto, se adaptarían los acoplamientos para poder trabajar con los dos modos.

De esta forma se evitaría el problema relacionado con la cercanía del primer espurio. También se solucionaría el problema acerca de tener la obligación de conocer si el modo que resuena es el esperado ( $TE_{101}$ ) o no.

En la figura 5.2, la mejor zona para generar la cavidad empleada en el filtro *dual mode* es la zona donde el rango libre de espurios es casi nulo y el  $Q_U$  muy alto. Esta zona se corresponde con unos valores para las alturas intermedias y la altura central de 18,5mm y 19mm, respectivamente.

### 5.3 Creación del filtro

Con las figuras 5.1 y 5.2 se han seleccionado los valores que se asignarán a las variables del modelado. En la figura 5.3 se muestra cómo quedaría una cavidad si a los parámetros del *shaping* se le dan esos valores.



**Figura 5.3 Ejemplo de *shaping* para realizar un filtro *dual mode***

Al igual que en una cavidad cuadrada, o en una cavidad cilíndrica, la altura en el centro de la cavidad (en la modelada se corresponde con el valor asignado al parámetro altura central) es prácticamente el mismo que el valor de la anchura de la cavidad.

La sección transversal de esta cavidad es similar a la de un octógono cuyos lados, exceptuando los laterales, han sido curvados. En la figura 5.4 se muestran las características de esta cavidad para los primeros cinco modos que se excitan en ella.

	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
	Mode 1	10.0000 +j 0.000550524	9082.26
	Mode 2	10.0869 +j 0.000552665	9125.69
	Mode 3	11.3591 +j 0.000595397	9539.09
	Mode 4	12.5067 +j 0.000784251	7973.68
	Mode 5	13.4980 +j 0.000595917	11325.4

**Figura 5.4 Características de la cavidad empleada para realizar el filtro *dual mode***

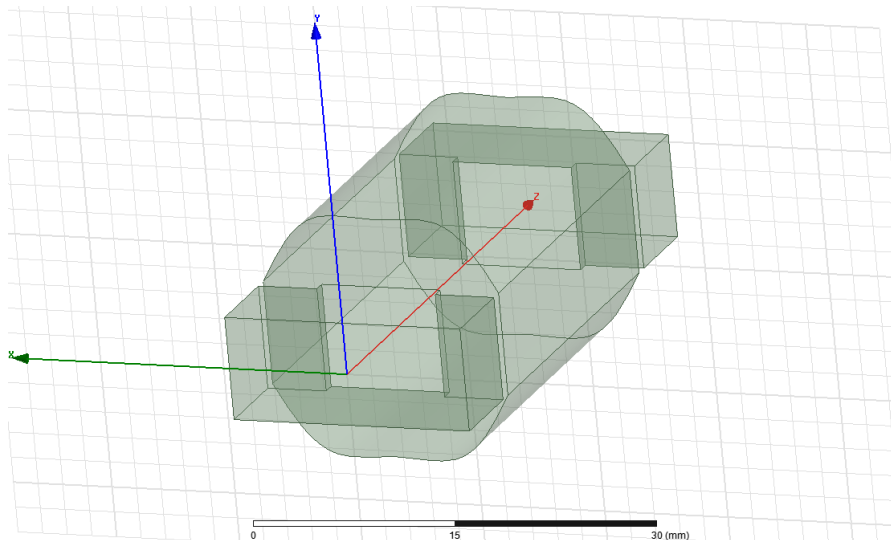
El  $Q_U$  de los dos primeros modos, que serán los dos modos que se excitarán a la vez en la cavidad, es superior a 9000. Este hecho era el esperado cuando, atendiendo a la gráfica de la figura 5.1, se seleccionaron los valores para los parámetros del *shaping*.



La distancia entre los dos primeros modos es todavía muy grande. Para acercar más estos dos modos, se ha modificado el valor de la altura central paulatinamente hasta que la distancia entre ambos modos era de 10MHz, aproximadamente.

### 5.3.1 Introducción de la asimetría

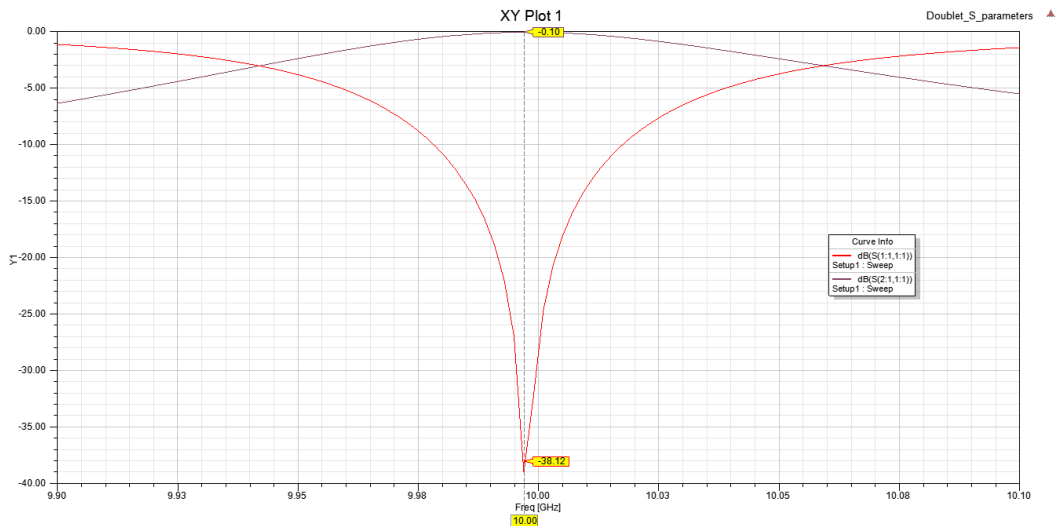
Una vez ajustada la cavidad para tener dos modos cuasi-degenerados, es necesario introducir una asimetría para excitar el segundo modo. La geometría mostrada en la figura 5.3 no consigue excitar por sí sola este segundo modo. En la figura 5.5 se muestra la estructura en guía de onda que consiste en la cavidad unida a dos puertos mediante dos iris cuadrados y, en la figura 5.6, se muestran sus parámetros de *Scattering* que demuestran cómo, sin introducir la asimetría, el segundo modo no consigue excitarse.



**Figura 5.5 Estructura diseñada para comprobar los modos que se excitan en la cavidad introduciendo potencia desde un puerto**

El motivo de usar irises cuadrados es para entender mejor lo que está ocurriendo. Si se utiliza un iris rectangular horizontal, el modo  $TE_{101}$  es fuertemente acoplado y, por tanto, llega fácilmente desde el puerto hasta la cavidad, para después continuar hasta el siguiente puerto. Si, por el contrario, se emplean irises rectangulares verticales, este modo estará débilmente acoplado. En cambio, el modo  $TE_{011}$  sí que estará fuertemente acoplado pero, como este modo nunca se llega a excitar, el traspaso de potencia desde un puerto al siguiente sería nulo.

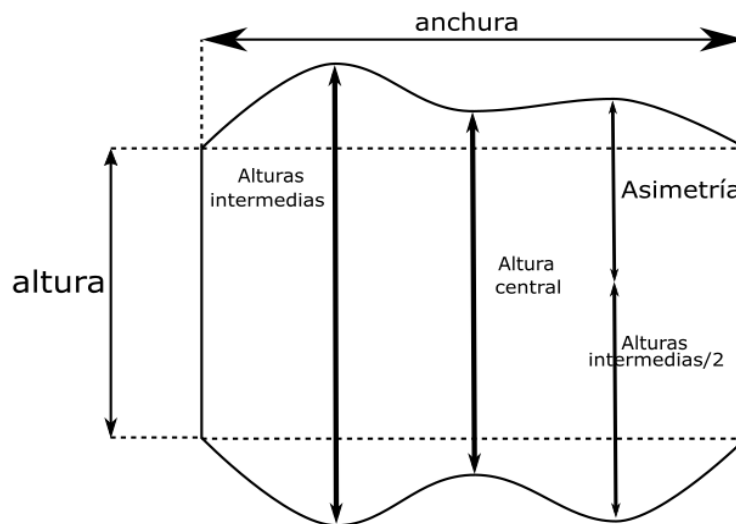
Se han utilizado irises cuadrados simplemente para comprobar que, a pesar de que el acoplamiento favorece igualmente a ambos modos, sólo se consigue propagar el  $TE_{10}$ . En la figura 5.6 se han representado los parámetros de *Scattering* para la estructura mostrada en la figura 5.5.



**Figura 5.6** Parámetros S de la estructura mostrada en la figura 5.5

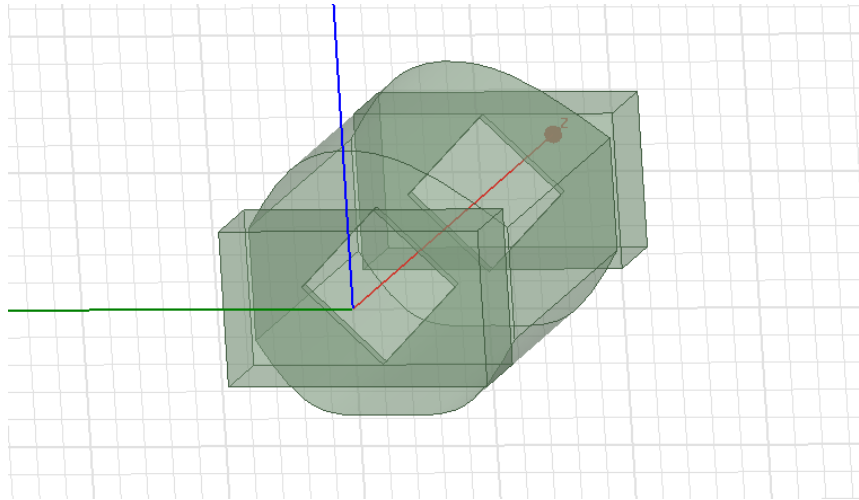
Esta figura muestra un único polo, consecuencia de tener excitado un único modo. Para excitar el segundo modo es necesario introducir una asimetría. Esta asimetría va a ser introducida aprovechando el propio *shaping*, prescindiendo de usar tornillos.

Para ello, uno de los puntos cuyo valor dependía del valor dado al parámetro alturas intermedias ahora será independiente de éste. Es decir, tendrá un valor distinto, produciendo la asimetría buscada. En la figura 5.7 se muestra cómo quedaría la sección transversal de la cavidad una vez introducida la asimetría.



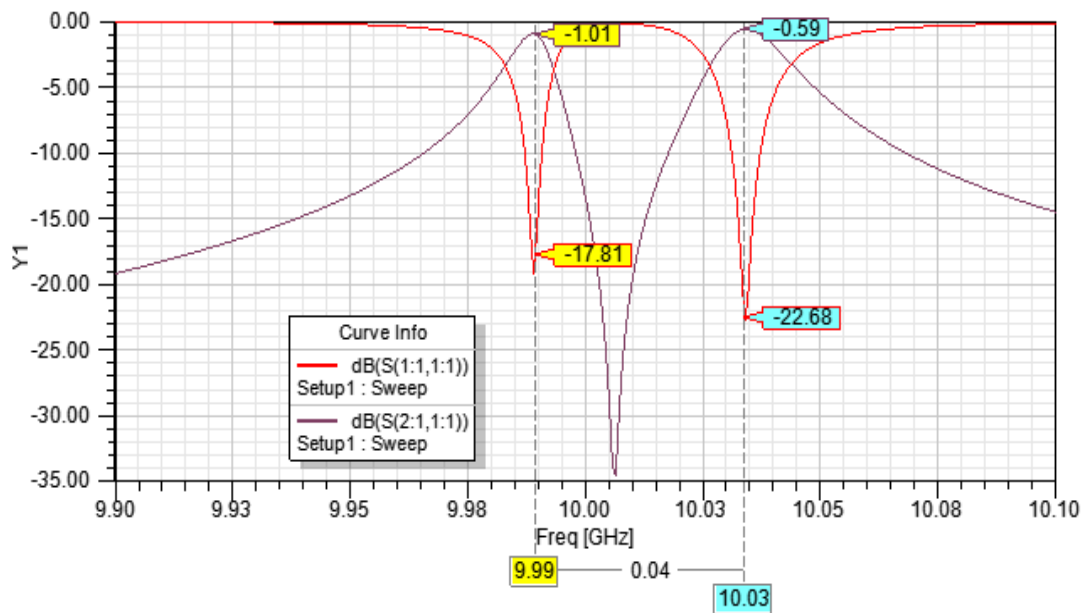
**Figura 5.7** Sección transversal de la cavidad con la asimetría introducida

Si se aplica esta asimetría a la estructura mostrada en la figura 5.5 se obtiene una estructura como la que se muestra en la figura 5.8.



**Figura 5.8 Estructura diseñada para comprobar los modos que se excitan introduciendo potencia desde un puerto y existiendo una asimetría**

En la figura 5.9 se muestran los parámetros de *Scattering* de la estructura en guía de onda mostrada en la figura 5.8.



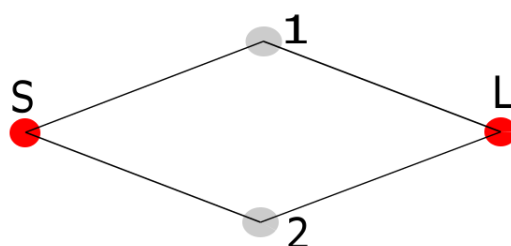
**Figura 5.9 Parámetros S de la estructura mostrada en la figura 5.8**

Esta gráfica muestra dos polos. Como se había afirmado anteriormente, la introducción de una asimetría excitaría al modo  $TE_{01}$ . Un problema que surge es el cero de transmisión dentro de la banda de paso. Este cero es necesario sacarlo de la banda de paso. En el siguiente apartado se explica detalladamente como realizar esta labor adecuadamente.

### 5.3.2 Cambio en la topología

Para sacar el cero de transmisión situado en el centro de la banda de paso es necesario modificar la topología del filtro. Esto se lleva a cabo modificando los acoplamientos. En este apartado el cero de transmisión se desplazará al infinito. Para modificar los acoplamientos hay que cambiar la geometría de los iris.

La topología que implementa el filtro mostrado en la figura 5.8 se corresponde con la mostrada en la figura 5.10.

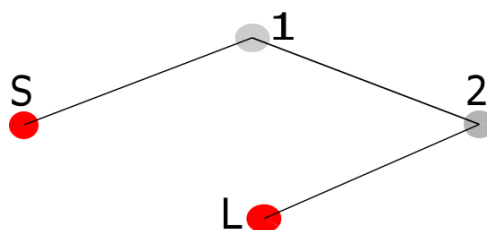


**Figura 5.10 Topología implementada por la estructura de la figura 5.8**

La “S” hace referencia a la fuente, *source*, y se corresponde con el primer puerto. La “L” a la carga, *load*, y se corresponde con el segundo puerto. El 1 sería la resonancia del primer modo ( $TE_{101}$ ) y el 2 la resonancia del segundo modo ( $TE_{011}$ ). Las líneas indican qué elementos de la topología están acoplados entre sí.

Al ser los acoplamientos cuadrados permiten que de la fuente se puedan conseguir de forma independiente cada uno de los dos modos. Cada modo se acoplará al siguiente puerto. Por lo tanto, teniendo en cuenta que cada resonancia es un polo, se genera un cero. Este cero además se sitúa en el centro de la banda de paso debido al signo de los acoplamientos.

Para desplazar este cero al infinito es necesario modificar la topología. Para ello, los acoplamientos deben ser alterados. En la figura 5.11 se muestra la topología que se desea conseguir.



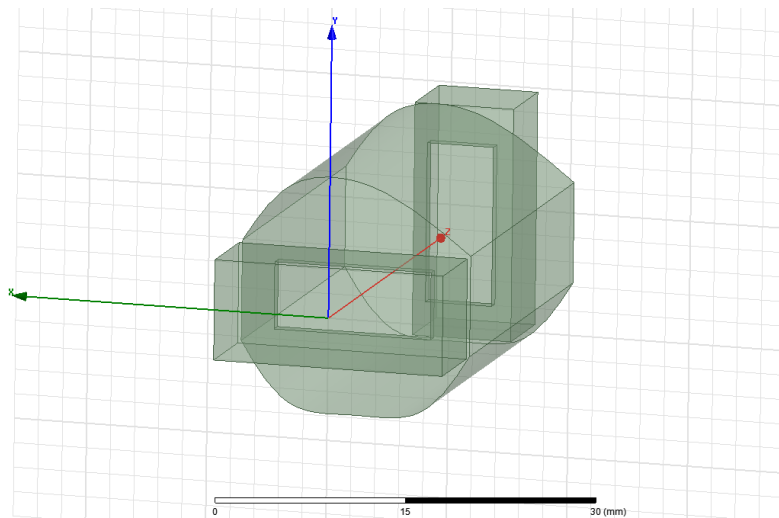
**Figura 5.11 Topología necesaria para realizar un filtro *dual mode* de orden 2 con topología en línea**

Para conseguir esta topología no se pueden usar iris cuadrados. Es necesario emplear iris rectangulares. El primer acoplamiento, encargado de unir la fuente con el primer modo que resuena ( $TE_{101}$ ), deberá ser horizontal para dejar paso

sólo a este modo. El segundo acoplamiento debe ser el que una el segundo modo que resuena con la carga. Por lo tanto, será vertical.

El acoplamiento presente entre las resonancias se corresponde con la asimetría introducida. Cuando el primer modo se propaga y llega a la cavidad diseñada con la asimetría, se acopla el segundo modo. Por lo tanto, la profundidad con la que se realice la asimetría indicará el valor del acoplamiento. Cuanto mayor sea la asimetría, mayor será el acoplamiento entre estos dos modos.

En la figura 5.12 se muestra la estructura en guía de onda resultado de variar los iris como se ha explicado anteriormente.



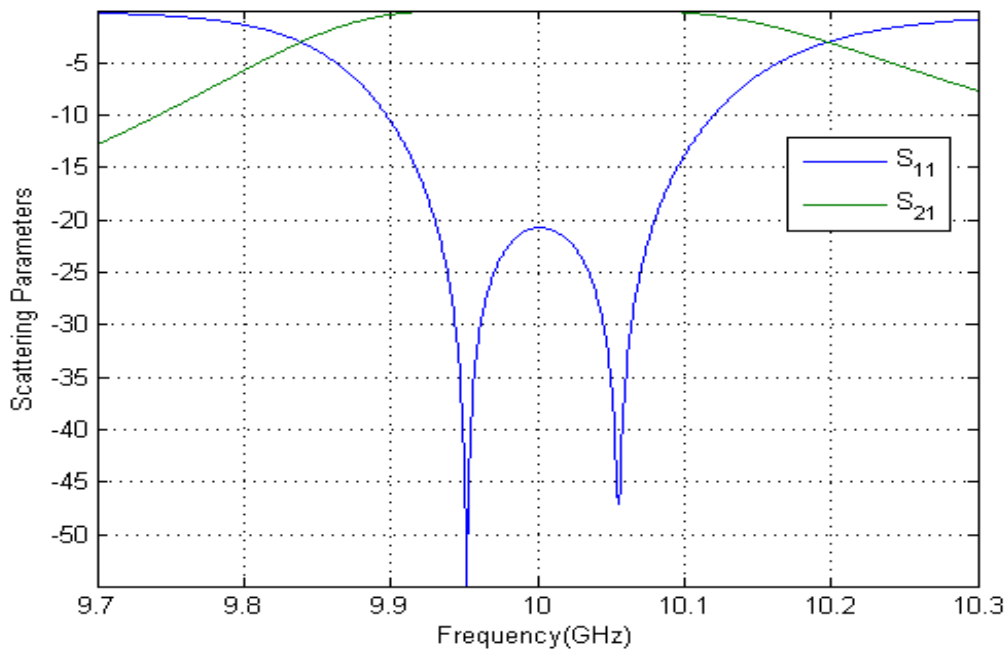
**Figura 5.12 Estructura en guía de onda con uno de los puertos girados**

Con esta estructura se debería desplazar el cero de transmisión presente en el centro de la banda de paso al infinito. De esta forma se obtendría una banda de paso compuesta por dos polos. Se habrían conseguido dos resonancias con tan solo una cavidad.

Para ajustar correctamente la estructura y así obtener dos polos claramente marcados en el parámetro  $S_{11}$ , se deberán modificar tanto los iris (altura para el primero y anchura para el segundo) como la asimetría introducida.

Aumentar el tamaño de los iris supone aumentar el acoplamiento y disminuir las frecuencias de resonancias de ambos modos. Aumentar la intensidad de la asimetría es aumentar el acoplamiento entre los modos. Esto conlleva alejar los polos entre sí y aumentar las pérdidas de retorno. También se deberá modificar la longitud de la cavidad para desplazar en frecuencia ambos polos y centrarlos en la frecuencia deseada.

Una vez realizados los ajustes pertinentes, se obtiene una respuesta de los parámetros de *Scattering* similar a la mostrada en la figura 5.13.

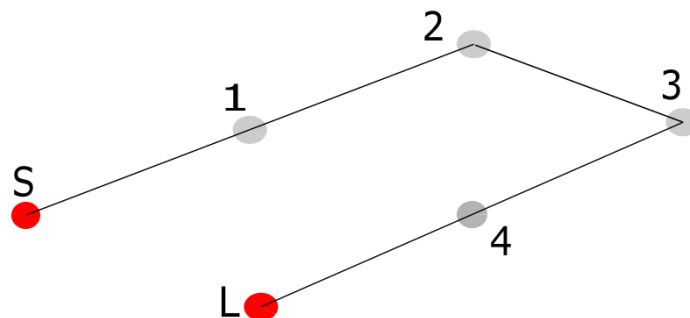


**Figura 5.13** Parámetros S de la estructura de la figura 5.12, pero tras ser ajustada adecuadamente

El cero que estaba en el centro de la banda de paso ha sido desplazado al infinito. Los dos polos están bien marcados, síntoma de que el ajuste realizado ha sido correcto. Actuando sobre el acoplamiento de los dos resonadores (aumentando o disminuyendo la asimetría) se ha ajusta el rizado para obtener unas pérdidas de retorno de 20dB.

### 5.3.3 Creación de la estructura final del filtro

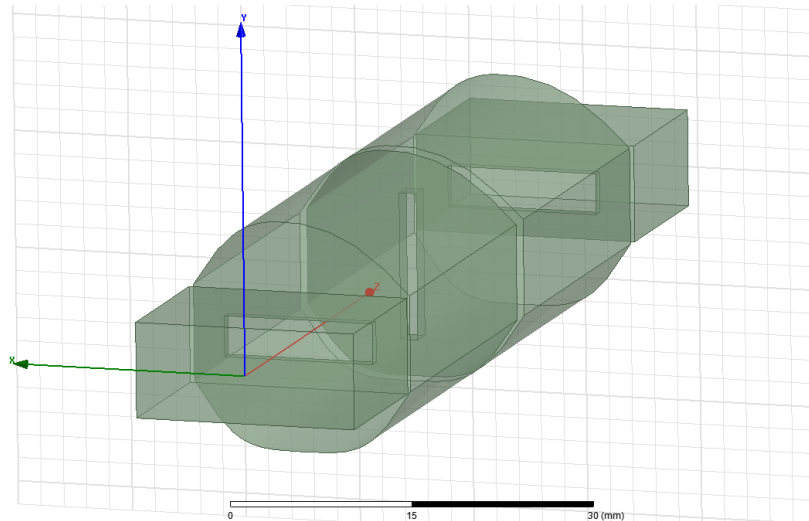
La estructura diseñada en el apartado anterior se correspondería con un filtro de orden 2 (orden mínimo para un *dual mode*). En este apartado se va a diseñar un filtro de orden cuatro, cuya frecuencia central de la banda de paso serán 10GHz. En la figura 5.14 se muestra la topología que se deberá implementar para realizar el filtro *dual mode* con topología en línea de orden 4.



**Figura 5.14** Topología de un filtro dual mode de orden 4

El nodo 1 se corresponde con el modo  $TE_{101}$ . Debido a la asimetría introducida en la primera cavidad se excita el modo  $TE_{011}$ . Este modo se acopla a la siguiente cavidad por medio de un iris rectangular vertical. El nodo 3 se corresponde con este modo, pero resonando en la segunda cavidad. Esta cavidad posee la misma asimetría que la primera cavidad, de modo que se consigue excitar el modo  $TE_{101}$ .

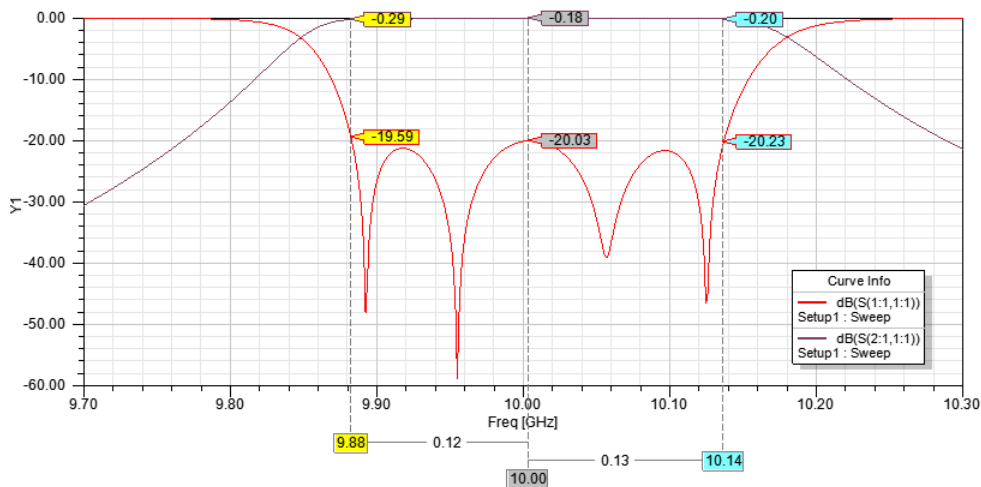
En la figura 5.15 se muestra la estructura diseñada en guía de onda correspondiente a la topología de la figura 5.14.



**Figura 5.15 Filtro *dual mode* de orden 4**

Los iris están girados  $90^\circ$  respecto al iris anterior. De esta forma se consigue un acoplamiento en serie entre los distintos modos, evitando que en la topología se formen ramas en paralelo. Así se consigue desplazar el cero al infinito. En esto consiste una topología de acoplo en línea.

En la figura 5.16 están representados los parámetros de *Scattering* correspondientes al filtro *dual mode* de orden 4.



**Figura 5.16 Parámetros S en la banda de paso del filtro *dual mode* de orden 4**

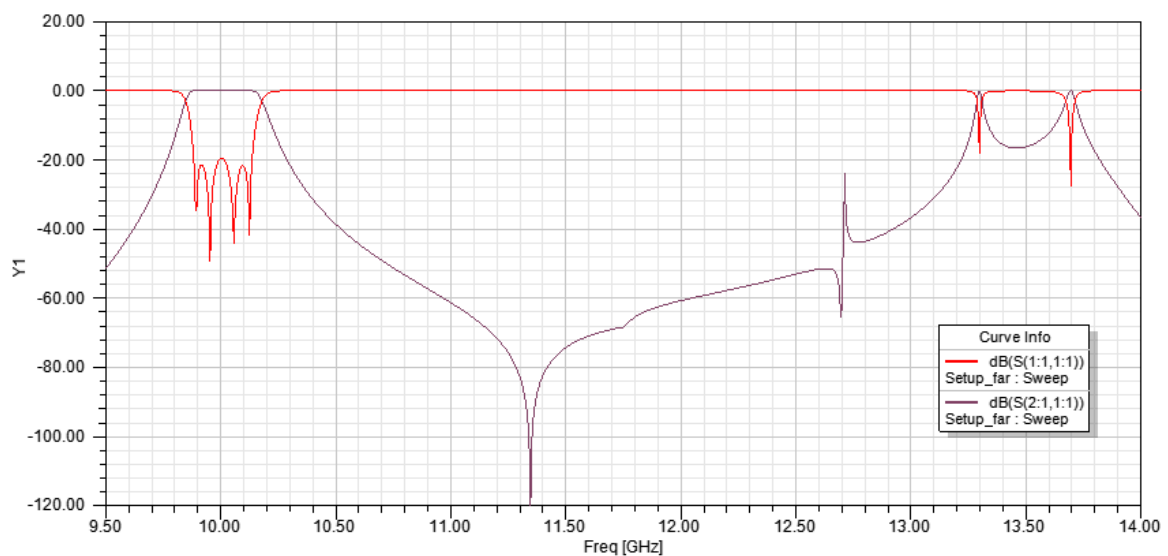
Los cuatro ceros del parámetro  $S_{11}$  marcan el orden de este filtro. Para ajustar adecuadamente sus frecuencias, se modificaron cuidadosamente tanto la anchura de la cavidad como la variable altura central. Las pérdidas de retorno son de 20dB. Para conseguirlo es necesario ajustar correctamente las alturas de los iris y la intensidad de la asimetría una vez generada la estructura final. El ancho de banda es de 260MHz. Es un ancho de banda de tamaño normal teniendo en cuenta la frecuencia central de la banda de paso, pues el ancho de banda relativo es del 1%.

Las pérdidas de inserción del filtro son de 0,18dB. Este dato muestra, otra vez, la coherencia entre las características de la cavidad empleada en el *shaping* y los parámetros de *Scattering*. Cuando se seleccionaron los valores para las variables del modelado, el  $Q_U$  era superior a 9000. Debido a la introducción del recorte y a los ajustes posteriormente realizados, este valor habrá variado, pero levemente.

Por lo tanto, el  $Q_U$  obtenido era superior al de las cavidades empleadas en el diseño de los otros dos filtros. También es superior al de la cavidad rectangular. Este hecho se puede visualizar en los parámetros S, pues las pérdidas de inserción de este filtro son menores que las del resto de filtros generados en este proyecto.

Si a esto se le suma que este filtro es de orden 4 (el resto era de orden 3, y las pérdidas de inserción aumentan con el orden del filtro), se hace más evidente que el filtro *dual mode* generado supera con creces al resto de los presentados en este proyecto en términos de pérdidas de inserción.

La otra característica del filtro que se ha de conocer es el rango libre de espurios. En la figura 5.17 están representados los parámetros de *Scattering* del filtro *dual mode* diseñado, barriendo un rango grande de frecuencias.



**Figura 5.17 Parámetros S del filtro *dual mode* de orden 4**



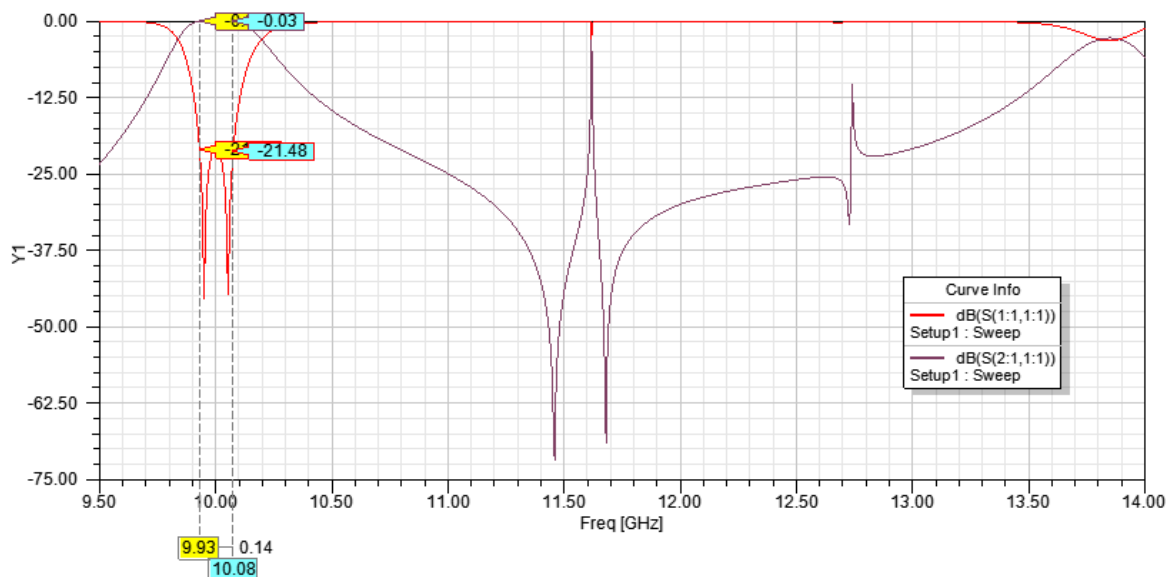
A los 12,7GHz existe un modo que se intenta excitar. Sin embargo, no lo llega a conseguir. El primer modo espurio en excitarse lo hace a una frecuencia de 13,3GHz, aproximadamente. Esto daría un rango libre de espurios de 3,3GHz.

Con el rango libre de espurios ya conocido, se tienen ya las características principales del filtro *dual mode* diseñado. El orden del filtro es cuatro. La frecuencia central es de 10GHz, el ancho de banda es de 260MHz y las pérdidas de retorno son de 20dB. Para estas especificaciones, las pérdidas de inserción son de 0,18dB y el rango libre de espurios es de 3,3GHz.

### 5.4 Aparición de un modo TM

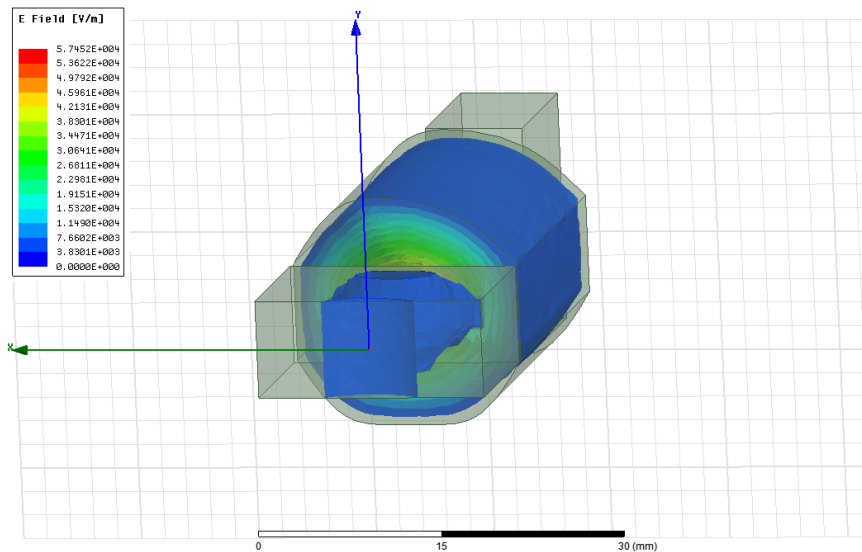
En los modos TM es el campo magnético el ortogonal respecto a la dirección de propagación. Estos modos se usan menos que los modos TE para desarrollar filtros. Sin embargo, en muchos casos pueden proporcionar ciertas ventajas. La ventaja principal es que la frecuencia de resonancia de estos modos no depende de la longitud de la cavidad, lo que permite jugar con esta dimensión para acercar o alejar los modos espurios.

Cuando se desarrolló la cavidad empleada para generar el filtro *dual mode* de orden 4 apareció un modo TM. La estructura en cuestión es la mostrada en la figura 5.12. En la figura 5.13 se mostraron los parámetros de *Scattering* en la banda de paso de esa estructura. Ahora, en la figura 5.18, se van a mostrar los parámetros de *Scattering*, pero realizando un barrido que abarque un rango mucho mayor de frecuencias.



**Figura 5.18** Parámetros S de la estructura mostrada en la figura 5.12 en un rango amplio de frecuencias

La gráfica muestra como el primer modo espurio resuena a los 11,62GHz. Para comprobar qué modo es, en la figura 5.19 se muestra el módulo del campo eléctrico a dicha frecuencia.



**Figura 5.19 Módulo del campo eléctrico a la frecuencia de 11,62GHz**

Este modo está diferenciado de cualquier modo TE por no depender su frecuencia de resonancia de la longitud de la cavidad. En otras palabras, el modo que se observa en la figura 5.19 es un modo TM. Su excitación es debida a las variaciones en altura presentes a lo largo del eje de propagación. La estructura del campo es constante a lo largo del eje z de la figura

La aparición de este modo podría suponer un problema para el filtro. Supondría tener un espurio a 1,62GHz. Sin embargo, cuando se ha creado la estructura final del filtro *dual mode*, y tras realizar los ajustes pertinentes, este modo ha desaparecido. En la figura 5.17 se puede comprobar este hecho: los dos ceros de transmisión y el polo situados entre los 11GHz y los 12GHz se convierten en tan solo un cero de transmisión.

## 5.5 Conclusiones

Este apartado ha servido para comprobar la versatilidad de usar modelados geométricos para crear filtros. Con el mismo *shaping* que se pretendía optimizar la cavidad ridge (y que se consiguió, véase la subsección 3.2), se ha creado un filtro *dual mode*. Además, el uso de un modelado para generar este filtro ha supuesto una serie de ventajas a describir.

Hasta ahora, para generar filtros *dual mode* ha sido necesario emplear tornillos a 45° respecto al eje x y paralelos al plano XY (siendo el eje z el eje de propagación de la señal). Esto suponía la adición de un componente, el tornillo, que podría modificar la respuesta de los parámetros de *Scattering* del filtro. Esta

modificación no puede ser conocida de antemano y puede suponer una desventaja importante a la hora de fabricar estos filtros.

Para ajustar los polos adecuadamente se añadían dos tornillos: ambos paralelos al plano XY, pero uno de ellos formaba un ángulo de 90° con el eje x, mientras que el otro formaba un ángulo de 0°. El uso de estos tornillos supone el mismo problema: no conocer de forma exacta la variación de los parámetros S del filtro al aumentar o disminuir la influencia del tornillo.

En cambio, utilizando el propio modelado tanto para ajustar las frecuencias de los polos como para introducir la asimetría, se evita el uso de tornillos. Esto permite conocer de forma casi exacta (pues depende de la precisión asignada en el *software* que se utilice) la variación que sufrirán los parámetros de *Scattering*. Este hecho puede evitar muchos problemas relacionados con el ajuste final del filtro una vez fabricado.

Esta ventaja es importante, pero hay que tener en cuenta si esto conlleva una pérdida considerable de factor de calidad. Para comprobar este hecho, se ha calculado el  $Q_{UNLOADED}$  de las cavidades cilíndrica, cuadrada y de la cavidad empleada en el diseño del filtro final *dual mode* creado en este apartado. En la tabla 5.1 se muestran los distintos factores de calidad.

CAVIDAD	SHAPED	CILÍNDRICA	CUADRADA
$Q_U$	8978	9240	7620

**Tabla 5.1  $Q_{UNLOADED}$  de cavidades usadas para fabricar *dual mode***

Para el cálculo de los distintos factores de calidad se ha mantenido la longitud de la cavidad *shaped* utilizada en el diseño del filtro *dual mode* de la figura 5.15. El ajuste a la frecuencia de resonancia deseada se ha realizado modificando el valor del radio en la cavidad cilíndrica y modificando el lado (anchura y altura) de la cavidad cuadrada.

El valor más bajo del factor de calidad se obtiene para la cavidad cuadrada. La cavidad cilíndrica y la cavidad *shaped* tienen valores parecidos, aunque el  $Q_U$  de la cilíndrica es algo mayor. Esta tabla muestra como la creación de filtros *dual mode* puede realizarse con cavidades modeladas, aprovechando el mismo *shaping* para conseguir tanto la asimetría necesaria para excitar el segundo modo como el ajuste de los polos a la frecuencia deseada.

## 6. Conclusiones y líneas futuras de investigación

### 6.1 Conclusiones

Debido a las nuevas técnicas de fabricación de filtros (fabricación aditiva), en guías de onda, se da paso a la creatividad para generar cavidades con distintas formas geométricas. Esto permite la búsqueda de cavidades que presenten características mejores que las obtenidas hasta ahora.

El *shaping* propuesto en este proyecto (figura 1.2) consta de dos variables. Cuando en el capítulo 2 se han analizado por separado cada uno de estos dos parámetros, se ha podido comprobar la existencia de ciertos valores para estas variables capaces de generar cavidades con interesantes características. Esto indicaba la posibilidad de encontrar modelados con mejores características que las mostradas hasta ahora por las cavidades convencionales.

La invención de un parámetro de mérito ( $SFR&Q$ ) ha sido una forma sencilla de mezclar las dos características principales de cualquier cavidad (factor de calidad  $Q_U$  y rango libre de espurios) en un mismo factor. Además, ambas características tienen la misma influencia sobre este nuevo factor. Comparando los parámetros de mérito de las cavidades modeladas con los parámetros de mérito ofrecidos por las cavidades convencionales, también se ha comprobado que con el *shaping* propuesto se pueden superar las características de las cavidades rectangular y ridge.

En el capítulo 3 se ha realizado un barrido anidado de las variables del modelado, obteniendo las características de la cavidad para cada valor dado a cada uno de los dos parámetros del *shaping*. Así se ha podido conocer el valor de cada característica para cada par de valores asignados a las variables del modelado. De esta forma se han podido seleccionar los mejores valores, atendiendo a las características que ofrecían, para diseñar los filtros prácticos.

En el capítulo 4 se han diseñado dos filtros *single mode*. En el primero de ellos se ha buscado un mayor factor de calidad. En el segundo, un mayor rango libre de espurios. Los datos obtenidos por cada uno de los filtros han sido completamente coherentes con las características proporcionadas por cada una de las cavidades empleadas para crear cada uno de los filtros. Se ha comprobado que, al igual que la cavidad rectangular podía ser superada, el filtro generado con esta cavidad también.

En el capítulo 5 se ha diseñado un filtro *dual mode* con el *shaping* propuesto en este proyecto. Este apartado ha servido como prueba de la versatilidad que ofrece trabajar con modelado geométricos para fabricar cavidades. Además, para el diseño del filtro final no ha sido necesario el empleo de tornillos. La

asimetría a introducir para excitar el segundo modo y el ajuste final de las frecuencias de resonancia se han realizado con las variables del propio modelado.

Finalmente, se puede afirmar que el empleo de modelados (el de este proyecto sirve como ejemplo) para la fabricación de filtros en guías de onda supone una serie de ventajas enorme. La más destacable es que permite observar como varían las características de la cavidad al modificar los valores de los parámetros del *shaping* para encontrar los puntos óptimos. Dicho de otro modo, permite variar las características de cualquier cavidad para adecuarla a la aplicación que se desee.

## 6.2 Líneas futuras de investigación

Cuando se comenzó el proyecto, se pretendía encontrar una cavidad que superase a la cavidad ridge. Por un lado, el rango libre de espurios que debía ofrecer tendría que poseer un valor cercano (aunque no se llegase a igualar) al de la cavidad ridge, 8,67GHz. Respecto al factor de calidad (que en una cavidad ridge es de 1857), se debía superar con creces. Cuando se realizaron los primeros estudios, se comprobó que eso era posible. Y que, además, existía la posibilidad de superar a la cavidad rectangular. Por esto, en el capítulo 4 se realizó la comparación con un filtro de cavidades rectangulares.

Esta idea inicial llevó a adoptar las dimensiones del estándar WRD500, propio de guías de onda ridge. El filtro rectangular con el que se realizó la comparación también poseía estas dimensiones. Por lo tanto, de cara a un futuro, se puede analizar la mejora exacta introducida por el modelado propuesto en este proyecto respecto a un filtro rectangular utilizando un estándar propio de guías rectangulares (por ejemplo, el WR90).

El *shaping* presentado en este proyecto consta de dos parámetros (a excepción del capítulo 5, cuando se introduce la asimetría). Se pueden añadir más variables al modelado. Por ejemplo, los puntos modificados por el *shaping* eran equidistantes entre ellos. Se podría comprobar si se pueden mejorar las características variando la distancia entre ellos.

Otra variable a introducir para optimizar este modelado consistiría en alterar los laterales de la cavidad. En este proyecto no se han modificado en ningún momento. Es probable que dando (o quitando) algo de volumen por los laterales se consigan interesantes resultados.

La sección transversal de cualquiera de las cavidades empleadas para diseñar los filtros ha sido siempre constante. Alterarla adecuadamente podría suponer un aumento del factor de calidad (o de rango libre de espurios) sin tener que sacrificar apenas el rango libre de espurios (o el factor de calidad).

En la subsección 5.4 se mostró la presencia de un modo TM. Otra rama a estudiar es centrar la atención en este modo. Se podría diseñar un filtro que utilice este modo. Una vez excitado, se podría variar la longitud de la cavidad para alejar el resto de modos. A esto se añade el hecho de que se puede disminuir considerablemente el volumen de la cavidad (disminuyendo su longitud) sin alterar la frecuencia de resonancia de este modo.

Cuando se diseñó el filtro *dual mode*, se tuvo que modificar la topología implementada mostrada en la figura 5.10. Para desplazar el cero de transmisión situado en el centro de la banda de paso se implementó la topología mostrada en la figura 5.11. De esta forma, se desplazó el cero al infinito. En la topología del filtro, figura 5.14, esto supone desplazar dos ceros al infinito.

Estos ceros se pueden acercar a la banda de paso, situando cada uno de ellos a un lado de la banda. Esto supondría una mejora en la respuesta del filtro, pues las frecuencias cercanas a la banda de paso serían atenuadas casi por completo. Esto supondría un aumento de la selectividad del filtro. La forma de conseguir este acercamiento es añadiendo al acoplamiento central del filtro (si se recuerda, éste era rectangular y vertical) un acoplamiento rectangular horizontal mucho más pequeño. Esto equivaldría a introducir un acoplamiento cruzado entre los nodos resonantes 1 y 4 de la figura 5.14.

El acoplamiento central tendría forma de cruz. Conforme se aumenta el tamaño de este nuevo iris rectangular, los polos de la banda de paso se irán desajustando, y los ceros se irán desplazando hacia la banda de paso. Los parámetros a ajustar para conseguir el resultado buscado son las dos dimensiones de este nuevo rectángulo, la altura del rectángulo que antes formaba sólo el acoplamiento central, los otros acoplamientos y las frecuencias de resonancia.

## Bibliografía

- [1] R. J. Cameron and Chandra M. Kudsia and Raafat R. Mansour, "Microwave Filters for Communication Systems", 2007, Wiley.
- [2] J. Antonio Lorente, et. al., "Single Part Microwave Filters Made From Direct Metal Laser Sintering", EuMC'09-39th European Microwave Conference, Ref. 2148, pp. 1421-1424, 28 Sept.-1 October 2009, Rome Italy.
- [3] ———, "Fabricación aditiva vs Impresión 3D" <http://mizaradditive.com/impresion-3d/>, 2016, [Online; accessed 18-July-2016].
- [4] ———, "Fabricación aditiva metálica (impresión 3D)", <http://www.renishaw.es/es/fabricacion-aditiva-metalica-impresion-3d-15240>, 2016, [Online; accessed 18-July-2016].
- [5] ———, "Fabricación aditiva", <https://www.sculpteo.com/es/servicios/fabricacion-aditiva/>, 2016, [Online; accessed 19-July-2016].
- [6] ———, "Fabricación aditiva. ¿Qué es cada tecnología?", <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138289-Fabricacion-aditiva-Que-es-cada-tecnologia.html>, 2015, [Online; accessed 20-July-2017].
- [7] ———, "Fused Deposition Modelling", <http://es.3dilla.com/impresora-3d/fused-deposition-modeling/>, 2016, [Online; accessed 24-July-2017].
- [8] B.P. Conner, G.P. Manogharan, A. N. Martof, L. M. Rodomsky, C. M. Rodomsky, D. C. Jordan, and J. W. Limperos, "Making sense of 3-d printing: Creating a map of additive manufacturing products and services", *Additive Manufacturing*, vol. 1-4, pp. 64 – 76, 2014, inaugural Issue.
- [9] J. T. Montejo-Garai, I. O. Saracho-Pantoja, C. A. Leal-Sevillano, J. A. Ruiz-Cruz, and J. M. Rebollar, "Design of microwave waveguide devices for space and ground application implemented by additive manufacturing", in *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2015 International Conference on, Sept 2015, pp. 325-328.
- [10] G. J. Schiller, "Additive manufacturing for aerospace", in 2015 IEEE Aerospace Conference, March 2015, pp. 1-8.

- [11] ———, “Metallic 3-d printed rectangular waveguides for millimeter-wave applications”, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 6, no. 5, pp. 796-804, May 2016.
- [12] Alejandro D. Morcillo, José F. Fernández y Juan Monzó Cabrera, “Microondas: Líneas de transmisión, guías de onda y cavidades resonantes”, 2015.
- [13] Ansys Electronics (Versión 2017.2) [Software]. (2016). Ansys Corporation.
- [14] CST Studio Suite [Software]. (2016). CST AG.
- [15] FEST3D (Versión 3) [Software]. (2016). AURORASAT