



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL DE FI DE CARRERA

**TÍTULO DEL TFC:** Estudio y medidas preliminares para el diseño de un filtro combline en banda c

**TITULACIÓN:** Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat en Sistemes de Telecomunicació

**AUTOR:** Fcs. Xavier Escayola Elias

**DIRECTOR:** Carlos Collado Gómez

**FECHA:** 26 de enero de 2009



**Título: Estudio y medidas preliminares para el diseño de un filtro combline en banda c**

**Autor: Fcs. Xavier Escayola Elias**

**Director: Carlos Collado Gómez**

**Fecha: 26 de enero de 2009**

### **Resumen**

En este trabajo se realiza un amplio estudio de cavidades resonantes coaxiales con el objetivo de un futuro diseño de filtros combline con pérdidas. Con esta finalidad, el primer capítulo hace una breve introducción teórica a los parámetros más importantes de los resonadores: frecuencia de resonancia y factor de calidad, así como al acoplamiento entre resonadores y con las cargas externas. En los capítulos 2 y 3 se realiza un estudio de dichos parámetros en función de las dimensiones de la cavidad o del radio del conductor central, y de las dimensiones de las ranuras que posibilitan el acoplo entre dos resonadores. También se proponen sistemas para el control del factor de calidad y la sintonización de la frecuencia de resonancia. Finalmente, en el último capítulo, se realiza una comparación entre el resultado de simulaciones y medidas realizadas con un analizador de redes de los prototipos fabricados mostrando una coincidencia suficiente para el diseño futuro de un filtro formado por las cavidades analizadas.

**Title: Study and preliminary measures for the design of a c-band filter combline**

**Author: Fcs. Xavier Escayola Elias**

**Director: Carlos Collado Gómez**

**Date: 26th january 2009**

## **Overview**

In the present project a wide study of coaxial resonating cavities is done with the main objective of the further design of a combline filter with losses. With the aim of this, in the first chapter we present a brief introduction of the main theoretical points related to resonators such as resonance frequency, quality factor and coupling among resonators and with the external loads. In chapters 2 and 3 we analyze these parameters depending on the cavity dimensions or on the radius of the central conductor. Moreover, we propose some mechanisms to tune the quality factor and the resonant frequency. Finally, in the last chapter, we do a comparison between the simulation results and the real measurements taken with a network analyzer of the fabricated prototypes, showing a sufficient coincidence for a future filter design composed by the analyzed cavities.

# ÍNDEX

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Resonadores: factor de calidad y frecuencia de resonancia.....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Cálculo del factor de calidad descargado Q0 .....	3
<b>1.2. Teoría de filtros .....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Acoplamientos entre resonadores .....	4
1.2.2. Acoplamientos externos.....	5
<b>1.3. Filtros combline .....</b>	<b>7</b>
1.3.1. Filtros con pérdidas .....	7
1.3.1.1. Adaptive predistorsion.....	8
1.3.1.2. Lossy filters .....	8
<b>CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE UNA CAVIDAD .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. Modo de trabajo TEM de una cavidad coaxial .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. Mayado óptimo de la cavidad con HFSS.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3. Diseño de cavidades combline.....</b>	<b>16</b>
2.3.1. Variación del radio del cilindro conductor respecto las dimensiones del vaciado fijas.....	17
2.3.2. Variación de las dimensiones del vaciado respecto a unos radios del cilindro central fijos .....	18
2.3.3. Efecto del material de la cavidad .....	19
2.3.4. Variación del vaciado con el radio fijo, trabajando a 4GHz .....	20
2.3.5. Conclusiones del estudio preliminar .....	21
<b>CAPÍTULO 3: ACOPLAMIENTOS ENTRE CAVIDADES .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Acoplamiento electromagnético .....</b>	<b>23</b>
3.1.1. Unión a través de los conectores.....	26
3.1.2. Unión a través de las ranuras .....	26
3.1.2.1. Vaciado de 20.32mm y ranura en la parte superior.....	26
3.1.2.2. Conclusiones del estudio .....	29
<b>3.2. Acoplamiento externo .....</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 4: PROTOTIPOS DE RESONADORES .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1. Factor de calidad a 4GHz .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2. Mecanismos de control del factor de calidad .....</b>	<b>32</b>
4.2.1. Aro cilíndrico de Styrofoam .....	32
4.2.2. Cilindro de Nylon .....	34
<b>4.3. Mecanismos de sintonización de la frecuencia de resonancia .....</b>	<b>36</b>
4.3.1. Tornillo en la parte superior de la cavidad .....	36

<b>CAPÍTULO 5: MEDIDA DE CAVIDADES.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1. Propiedades de las nuevas cavidades .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2. Análisis experimental .....</b>	<b>41</b>
5.2.1. Análisis detallado de una cavidad.....	41
5.2.2. Comparación de resultados .....	44
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO A: Simulación de los campos eléctrico y magnético para otros modos de trabajo de las cavidades .....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO B: Simulaciones del acoplamiento magnético.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO C: Tipos de acoplamientos .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO D: Planos y medidas de los prototipos fabricados.....</b>	<b>64</b>

# INTRODUCCIÓN

El filtrado de las señales en un sistema de comunicaciones es cada vez más importante dada la creciente saturación del espectro radioeléctrico debido al incremento de información que se transmite por enlaces radiados. Por esa razón, se persigue la fabricación de filtros con una respuesta lo más cercana a la ideal.

Este proyecto se basa en el análisis de todos los requerimientos previos para el diseño de un filtro con pérdidas elaborado con cavidades que tenga la misma selectividad que un filtro ideal pero con unas pérdidas de inserción mayores. En primer lugar, se desarrollarán unas pautas cualitativas sobre la conducta de los resonadores que formarán el filtro sometido a diferentes variaciones de su geometría y del material, y en segundo lugar, a partir de los datos extraídos de la primera parte del proyecto, se diseñarán, fabricarán y medirán cavidades resonantes para evaluar la viabilidad de la tecnología propuesta y la fiabilidad de las simulaciones. Este TFC debe entenderse como un primer paso para un posterior diseño de un filtro combline en banda C con pérdidas para su uso en satélites espaciales.

La estructura del proyecto consiste en cuatro capítulos basados en la introducción y análisis del filtro combline con tecnología de cavidades y de los resonadores que lo forman, un quinto capítulo con el desarrollo experimental y un sexto con las conclusiones finales del proyecto

En el primer capítulo se introducen los conceptos más relevantes que afectan a la teoría de filtros y al análisis de éstos.

El segundo capítulo se basa en la caracterización de una sola cavidad. Se estudiará la distribución de los campos en su interior (modo) y se variarán elementos como las dimensiones de la cavidad o el material de ésta para obtener los primeros datos cualitativos.

El tercer capítulo se centra en el análisis de los diferentes acoplamientos necesarios para el diseño final del filtro: el acoplamiento electromagnético entre dos cavidades y el acoplamiento externo a la entrada y a la salida.

En el cuarto capítulo se añadirán elementos auxiliares como tornillos o cilindros de distintos materiales y longitudes con la finalidad de diseñar un mecanismo que permita sintonizar la frecuencia de resonancia y modificar el factor de calidad.

En el quinto capítulo se presentará una comparación entre los resultados prácticos obtenidos en el laboratorio y los resultados teóricos obtenidos mediante las simulaciones elaboradas con el software HFSS.

Finalmente, en el sexto capítulo, se recogerán las conclusiones de los diferentes estudios que se han realizado y se comentarán las posibles líneas futuras que se pueden extraer de este proyecto.

## CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS

### 1.1. Resonadores: factor de calidad y frecuencia de resonancia

Tanto en física como en ingeniería el factor de calidad de un resonador es un parámetro adimensional que compara la energía almacenada en un resonador con la potencia disipada, por lo tanto es un parámetro cuya función es cuantificar la calidad del resonador. El factor de calidad es definido, para régimen senoidal permanente, como:

$$Q = \varpi \cdot \frac{\text{Energía media almacenada en el resonador}}{\text{Potencia media disipada en el resonador}} \quad (1.1)$$

donde  $\varpi$  es la frecuencia angular del sistema ( $\varpi = 2\pi f$ ) y la energía almacenada y la potencia disipada son parámetros propios del sistema.

El parámetro del que dependen las pérdidas en un resonador es el factor de calidad descargado, cuyo valor depende de las pérdidas que se producen en los diferentes materiales que lo forman. En general, éstas suelen ser: las pérdidas del conductor, las pérdidas del sustrato y las pérdidas por radiación, por lo tanto:

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{rad}} \quad (1.2)$$

donde  $Q_0$  el factor de calidad descargado y  $Q_c$ ,  $Q_d$  y  $Q_{rad}$  son los factores de calidad del conductor, del sustrato y por radiación, respectivamente.

Cuando el resonador está conectado a una fuente y a una carga, es decir es un bipuerto, el factor de calidad viene definido por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext1}} + \frac{1}{Q_{ext2}} \quad (1.3)$$

donde  $Q_L$  es el factor de calidad cargado y los  $Q_{ext}$ , los factores de calidad de los puertos de entrada y salida de la cavidad.



### 1.1.1. Cálculo del factor de calidad descargado $Q_0$

Partiendo de la ecuación 1.3, para calcular el factor de calidad descargado nos interesa, a priori, eliminar la aportación de los factores de calidad externos, es decir, desacoplar el resonador de las cargas externas en la entrada y la salida. El proceso práctico para conseguir que los valores resultantes de  $1/Q_{ext}$  sean aproximadamente 0, es disminuir las pérdidas de inserción de la estructura resonante por debajo de los -20dB.

$$S_{21} < -20dB \Rightarrow Q_{ext1}, Q_{ext2} \gg \gg \Rightarrow \frac{1}{Q_{ext1}} \approx \frac{1}{Q_{ext2}} \approx 0 \quad (1.4)$$

Con estas pérdidas de inserción, como podemos ver en la ecuación 1.4, podemos considerar que los puertos de entrada y salida de la cavidad no afectan al valor del factor de calidad descargado y por lo tanto, podemos expresar la ecuación 1.3, como:

$$\frac{1}{Q_L} \approx \frac{1}{Q_0} \quad (1.5)$$

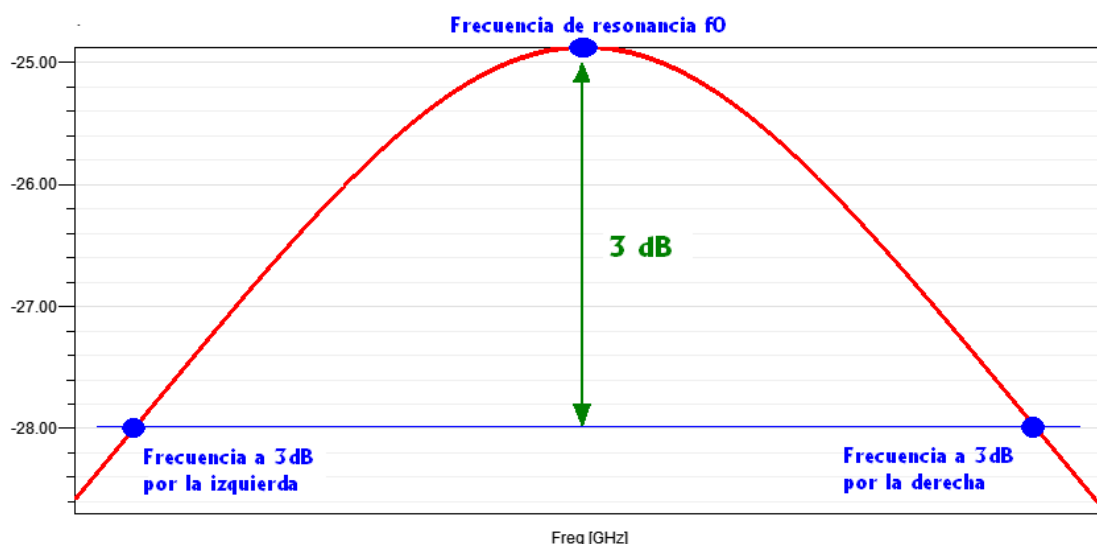
Si el sistema con el que trabajamos no permite disminuir las pérdidas de inserción por debajo de los -20dB, deberemos utilizar las siguientes expresiones para extraer el factor de calidad descargado incluyendo los factores de calidad exteriores:

$$Q_0 = Q_L \cdot (1 + 2\beta) \quad (1.6)$$

$$\beta = \left| \frac{S_{21}}{2 \cdot (S_{21} - 1)} \right| \quad (1.7)$$

donde  $S_{21}$  es el valor de la potencia de las pérdidas de inserción a la frecuencia de resonancia del sistema.

Sin embargo, si el diseño nos permite descartar los factores de calidad externos mediante 1.4, podemos calcular el factor de calidad descargado a partir de la gráfica de la respuesta frecuencial correspondiente a las pérdidas de inserción (Fig. 1.1).



**Fig. 1.1** Pérdidas de inserción de un sistema cualquiera

Los valores que debemos extraer de la gráfica son la frecuencia de resonancia a la que trabaja la estructura ( $f_0$ ) y la frecuencia a -3dB de la frecuencia de resonancia por la derecha y por la izquierda. Finalmente, con dichos valores encontramos el valor del factor de calidad que aproximamos al valor descargado de éste utilizando la siguiente expresión:

$$Q_0 \approx Q_{-3dB} = \frac{f_0}{f_{2(-3dB)} - f_{1(-3dB)}} = \frac{f_0}{\Delta f_{-3dB}} \quad (1.8)$$

**Nota:** A lo largo del proyecto utilizaremos este proceso para el cálculo de los diferentes factores de calidad descargados.

## 1.2. Teoría de filtros

El método de diseño de filtros con resonadores se basa principalmente en el estudio de los factores de acoplamiento de los resonadores y el factor de calidad externo de la entrada y la salida del resonador, en nuestro caso, de la cavidad.

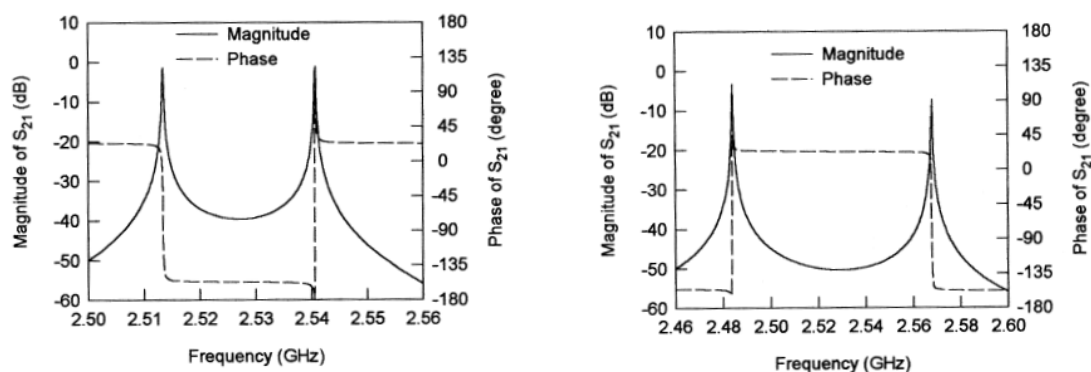
### 1.2.1. Acoplamientos entre resonadores

Los métodos y ecuaciones para extraer el coeficiente de acoplamiento ( $k$ ) pueden derivar de la aplicación de un campo eléctrico, un campo magnético o los dos a la vez para circuitos síncronos o asíncronos. No obstante, todas las fórmulas resultantes se pueden representar mediante una formulación universal [15];

$$k = \pm \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \quad (1.9)$$

donde  $f_{pi} = \omega_i/2\pi$  para  $i = 1, 2$ . La formulación de la ecuación 1.9 puede ser usada para extraer el factor de acoplamiento de un sistema resonador síncrono, sin importar si el acoplo es eléctrico, magnético o mezclado.

Por otro lado, la importancia del signo del factor de acoplamiento en el diseño de filtros es relativa. En el análisis de un sistema resonante, si asociamos un acoplamiento particular a uno de los signos del factor de acoplamiento, implica que los acoplamientos con signo contrario al asociado podrán ser identificados porque tendrán la fase inversa (ver figura 1.2).



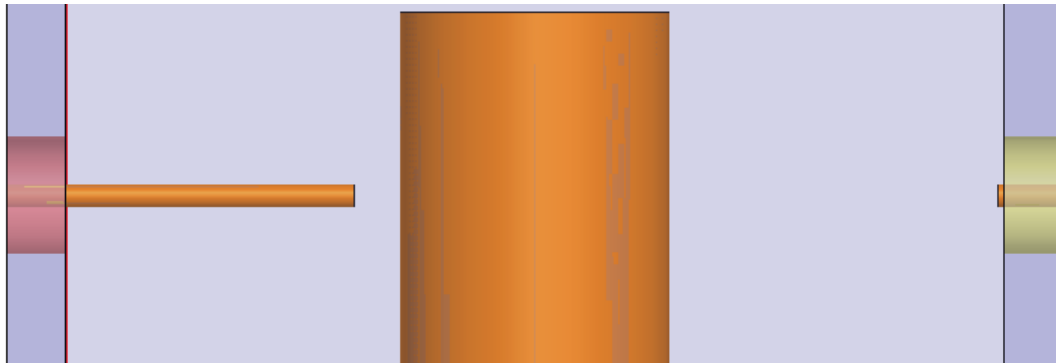
**Fig. 1.2** Fases de los acoplamientos electromagnéticos. Como hemos comentado, si consideramos que la fase de la primera imagen corresponde a un acoplo eléctrico, implica que la fase de la segunda imagen corresponda a un acoplo magnético. [17]

Como observamos en la figura 1.2, la fase que nos permite determinar el signo del factor de acoplamiento se obtiene a través de los parámetros S que lo definen.

### 1.2.2. Acoplamientos externos

El método para estudiar el acoplamiento externo y extraer el factor de calidad externo es aplicar un gran acoplamiento al conector de entrada y reducir todo lo posible el acoplamiento derivado del conector de la salida. De esta forma, al analizar las pérdidas de inserción del sistema y extraer el factor de calidad, solo obtendremos el de un puerto, es decir, el externo.

En el caso de una cavidad resonante, como se aprecia en la figura 1.3, para analizar el acoplamiento externo, aumentaremos lo máximo posible el conector de entrada y reduciremos hasta el extremo el conector de salida.



**Fig. 1.3** Método para determinar el acoplamiento externo de un sistema de cavidades resonantes.

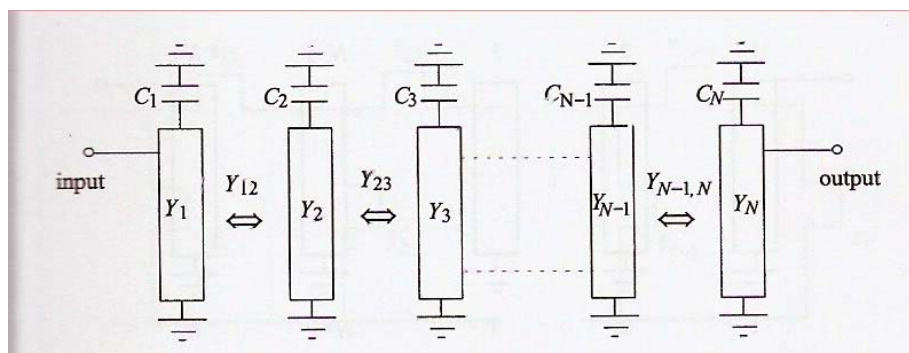
Entonces, el factor de calidad externo puede ser extraído a partir de la ecuación 1.10 [15]:

$$Q_{ext} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{-3dB}} = \frac{f_0}{f_{-3dB_{izq}} - f_{-3dB_{der}}} \quad (1.10)$$

donde, como se observa, es la relación entre la frecuencia de resonancia del sistema resonante y la diferencia entre las frecuencias a 3 dB por la derecha y por la izquierda.

### 1.3. Filtros combline

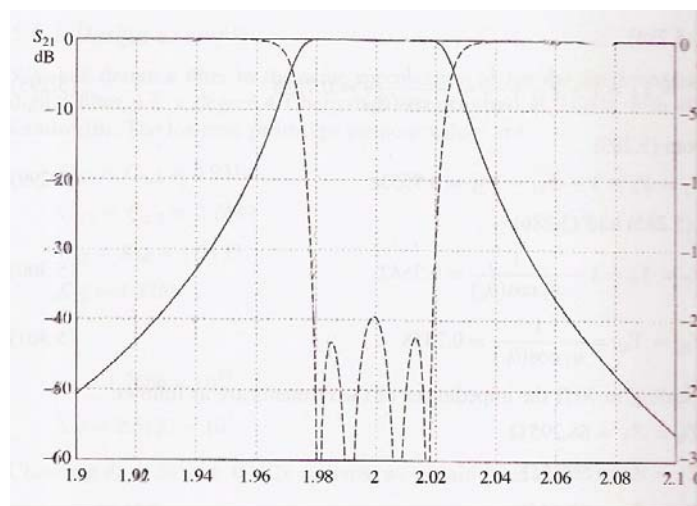
Los filtros combline consisten en un array de líneas acopladas trabajando en modo TEM con acoplamientos obligados a estar entre resonadores vecinos. Como se puede observar en la figura 1.5, todas las líneas están acabadas, por un extremo en circuito cerrado, y por el otro, están cargadas con capacidades conectadas a tierra.



**Fig. 1.5.** Filtro combline [6]

El funcionamiento de los filtros combline se basa en el aumento de las capacidades de los condensadores, ya que las líneas de transmisión se comportan como elementos inductivos y resuenan con los condensadores a una frecuencia por debajo del cuarto de onda. De esta forma se consigue que el filtro combline sea compacto suprimiendo así desventajas como: los resonadores pueden ser más cortos que un cuarto de onda y los tornillos de sintonización se pueden colocar en el mismo plano.

Finalmente, en la figura 1.6 podemos observar la respuesta frecuencial de las pérdidas de retorno y de inserción de un filtro combline ideal Chebyshev de orden cuatro



**Fig. 1.6.** Pérdidas de retorno e inserción de un filtro combline [7]

### 1.3.1. Filtros con pérdidas

El efecto de las pérdidas de los resonadores en un filtro provoca:

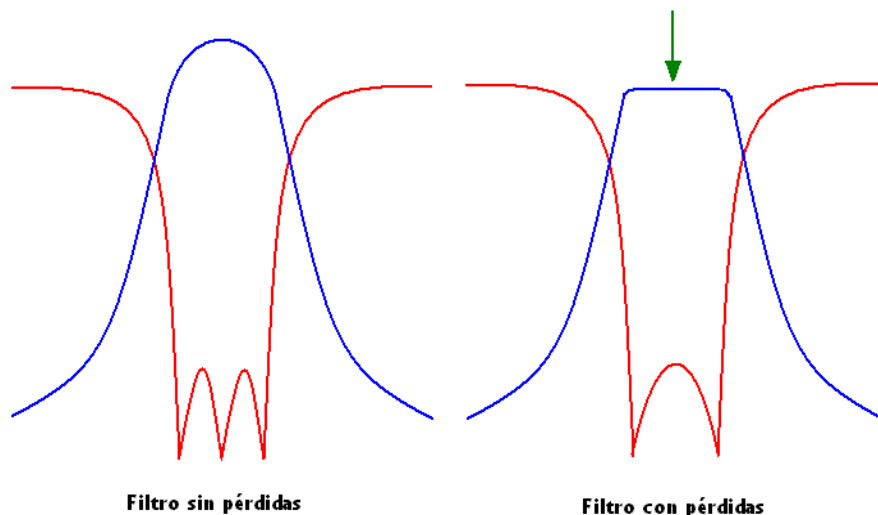
- 1.-Las pérdidas de inserción dejan de ser cero en la banda de paso
- 2.-La respuesta del filtro se redondea en los extremos de la banda de paso del filtro disminuyendo la selectividad del mismo

Con el objetivo de reducir el tamaño de los filtros, lo que implica poder usar resonadores de un factor de calidad bajo pero con respuesta frecuencial más parecida a la ideal, es decir con la parte superior de las pérdidas de inserción recta y no cóncava, se desarrollaron diferentes técnicas de síntesis que ya tienen en cuenta las pérdidas de los resonadores.. Las técnicas más desarrolladas y estudiadas son las llamadas “adaptive predistorsion” y recientemente los “lossy filters”.

#### 1.3.1.1. Adaptive predistorsion

La base de la técnica de predistorsión es hacer que la potencia que pasa de un puerto a otro se refleje en el puerto de entrada, es decir que aumenten las pérdidas de retorno, ya que de esta forma se consigue una pérdida de potencia en la respuesta de las pérdidas de inserción que gráficamente se traduce en el aplanamiento de ésta.

Utilizar la predistorsión implica un empeoramiento de las pérdidas de retorno, como se muestra en la figura 1.7:



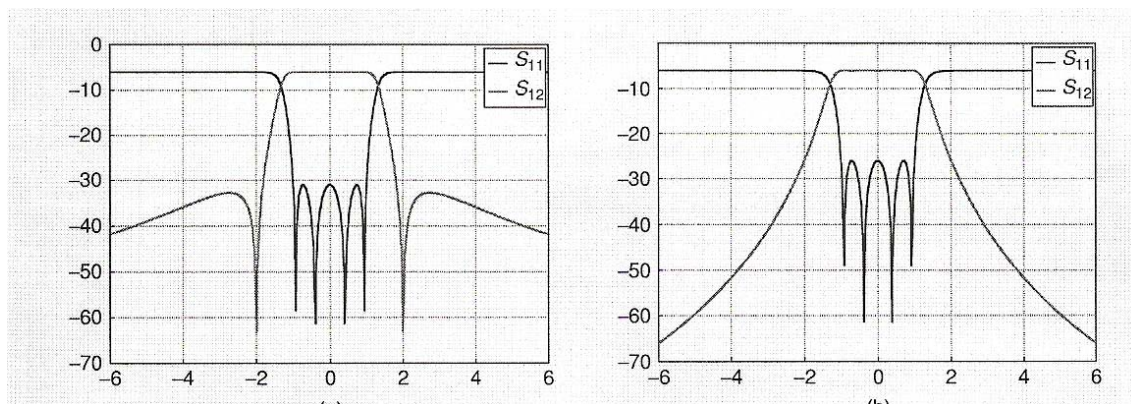
**Fig. 1.7** Comparación entre la respuesta de un filtro sin pérdidas y un filtro con pérdidas utilizando el método “adaptive predistorsion”.

El inconveniente de esta alternativa es que para intentar compensar las malas pérdidas de retorno, estos filtros son conectados con dispositivos no recíprocos como aisladores o circuladores.

#### 1.3.1.2. Lossy filters

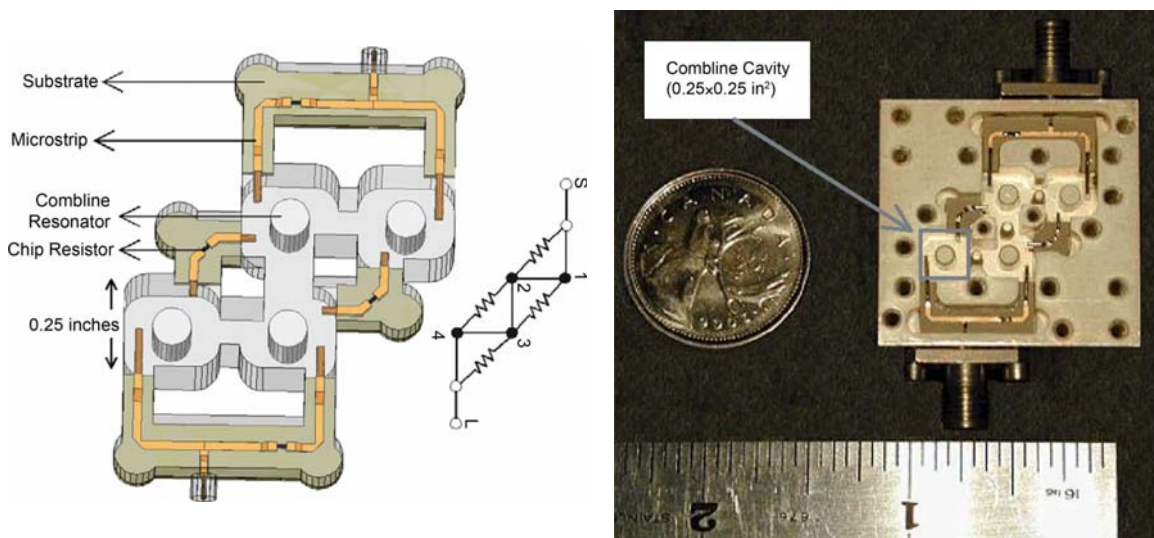
La técnica para diseñar “lossy filters” utiliza una disipación no uniforme y modifica la topología del dispositivo con elementos acopladores con pérdidas, para realizar filtros de un factor de calidad bajo con unas pérdidas de inserción

muy planas en la banda de paso (“high flatness”) y un buen funcionamiento de las pérdidas de retorno como podemos ver en las respuestas frecuenciales de la figura 1.8.



**Fig. 1.8** Pérdidas de retorno e inserción utilizando la técnica “lossy filtros” [13]

Los acoplamientos con pérdidas son, usualmente, acopladores resistivos, cuyas resistencias son usadas para disipar la potencia necesaria y conseguir el objetivo inicial. Un ejemplo de filtro combline con acopladores resistivos es el mostrado en la figura 1.9 [14]:



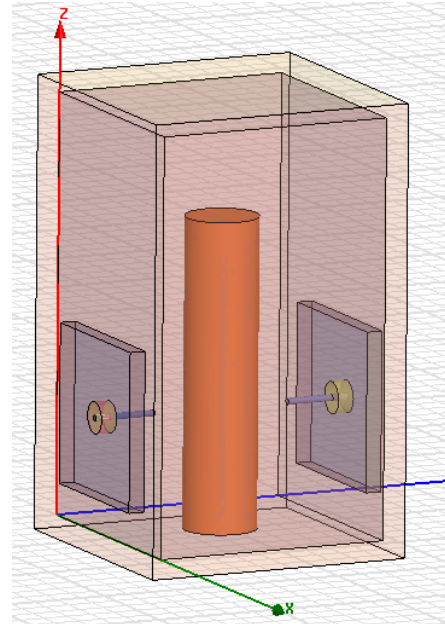
**Fig. 1.9** Modelo de un filtro con pérdidas con el uso de acoplamientos resistivos.

## CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE UNA CAVIDAD

Como ya indicamos en la introducción del proyecto, el filtro combline se diseñará con tecnología de cavidades. En los diferentes análisis elaborados a continuación se estudian la mayor parte de las características de la cavidad, no obstante, es preciso indicar sus propiedades iniciales fijadas durante todo el proyecto.

La cavidad que usaremos, como se puede observar en la figura 2.1, se compone de una caja con una base cuadrada de aluminio, un cilindro central conductor de cobre, dos conectores a la entrada y a la salida de la caja, también de cobre y un cable de teflón envolviendo los conectores. Una vez finalizado el diseño, esta caja se cerrará con una tapa de aluminio de las mismas dimensiones que la base.

Es importante aclarar que, a lo largo del proyecto, se hablará básicamente del vaciado de la cavidad en lugar de la caja, ya que, las dimensiones de éste son las que determinarán la respuesta del filtro.



**Fig 2.1** Cavidad coaxial

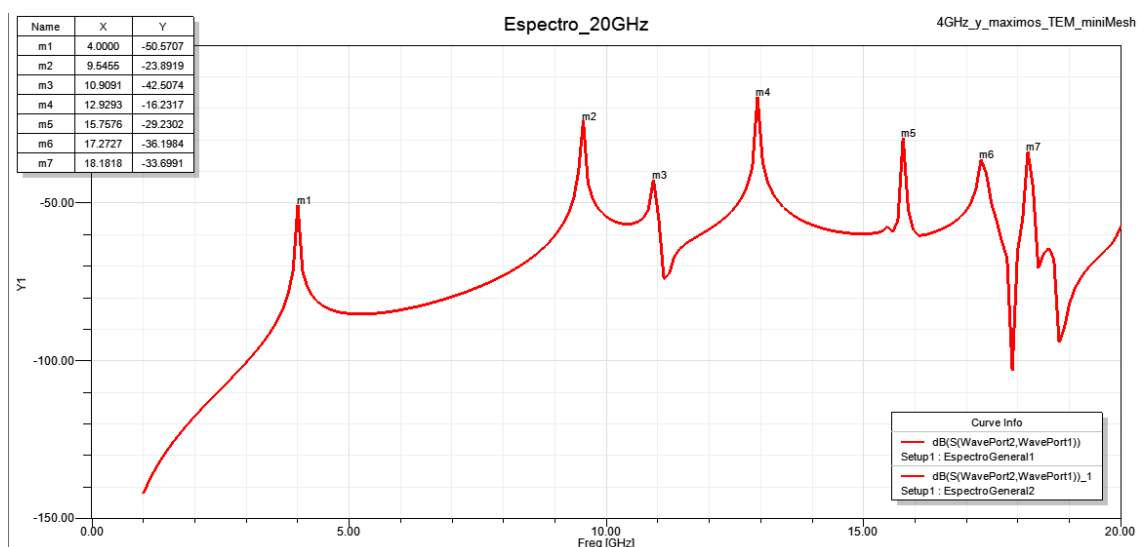
### 2.1. Modo de trabajo TEM de una cavidad coaxial

Lo primero que hay que decidir en el diseño de una cavidad resonante es el modo de resonancia que se utilizará. El modo de trabajo de un resonador se identifica a partir de la configuración de los campos eléctrico y magnético que aparecen en la estructura.

En las cavidades que haremos en este proyecto se trabajará con el modo TEM propio de un coaxial pues, como ya hemos introducido, nuestra cavidad consiste en un poste metálico rodeado por conductor (Figura 2.1).

Como se puede ver en la figura 2.2, la respuesta frecuencial de la cavidad inicial que hemos elegido para empezar a realizar los estudios que incorpora este proyecto, presenta múltiples picos a lo largo de todo el espectro, es decir diferentes modos de resonancia. No obstante solo hay una frecuencia de resonancia propia de la cavidad para el modo TEM.

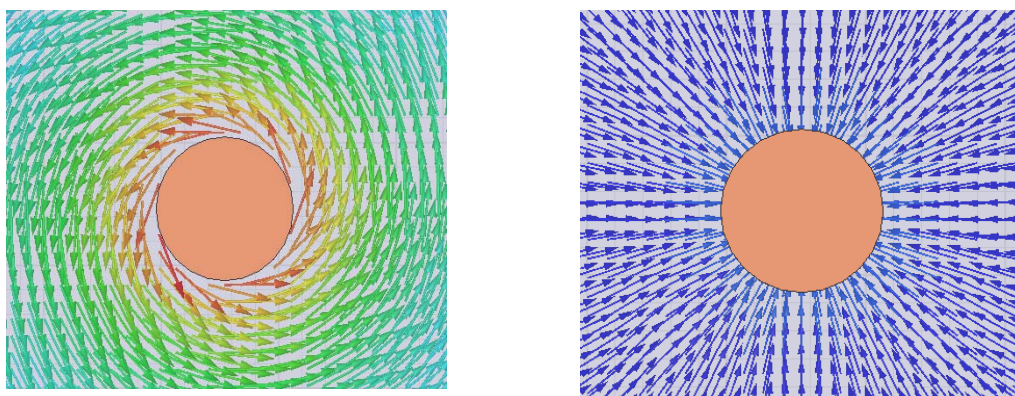




**Fig. 2.2** Respuesta frecuencial de la cavidad en todo el espectro

En el modo TEM (transversal eléctrico y transversal magnético) el campo eléctrico resultante y el campo magnético deben de ser perpendiculares a la dirección de propagación

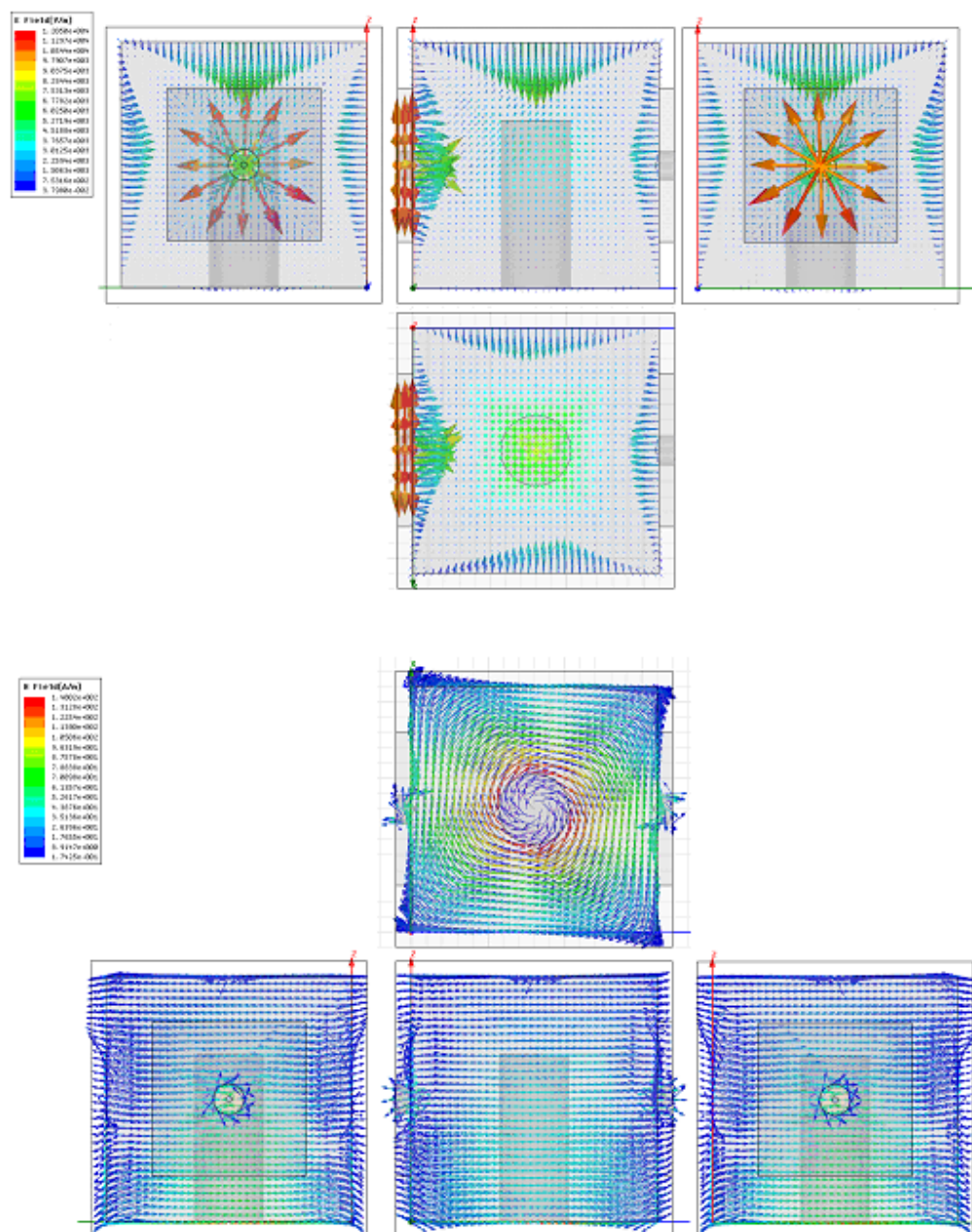
Los campos electromagnéticos en la cavidad se observan en la figura 2.3, en donde el círculo naranja representa un corte transversal del cilindro central conductor de la cavidad.



**Fig. 2.3** Propagación de los campos electromagnéticos respecto el cilindro central de la cavidad. La primera figura corresponde al campo magnético, y la segunda corresponde al campo eléctrico.

Una vez determinados los diferentes picos que encontramos en la respuesta frecuencial de la cavidad a lo largo del espectro, o lo que es lo mismo, los diferentes modos con los que puede trabajar la cavidad, solo nos resta observar los campos electromagnéticos que se generan para cada uno de ellos y determinar para qué frecuencia, los campos electromagnéticos coinciden con el modo TEM.

Como podemos observar en la figura 2.4, la configuración de los campos electromagnéticos en la cavidad trabajando a la frecuencia de resonancia correspondiente al primer pico coincide perfectamente con la imagen 2.3. Por lo tanto, acabamos de encontrar la zona frecuencial con la que trabajaremos a lo largo del proyecto.



**Fig. 2.4** Simulación de la propagación de los campos electromagnéticos alrededor de la cavidad para el primer pico de la figura 2.1. La primera figura corresponde a la configuración del campo eléctrico y la segunda figura a la configuración del campo magnético

Por otro lado, en la figura 2.4 también se puede apreciar la variación de los campos electromagnéticos en la zona que separa la parte superior del cilindro

con la parte superior de la caja exterior. Esta variación en la propagación del campo resulta de la capacidad parásita que se genera entre estas dos plataformas conductoras.

Finalmente, si observamos el anexo A, correspondiente a las simulaciones de la propagación de los campos electromagnéticos para los otros picos del espectro, las direcciones de los campos en alguna de las paredes de la caja no son las esperadas, además se pierde el paralelismo entre el suelo de la cavidad y el sentido de los campos, así como la uniformidad y simetría de la que gozaba la simulación de la imagen 2.4.

## 2.2. Mayado óptimo de la cavidad con HFSS

Durante los análisis y simulaciones previas al desarrollo del proyecto, observamos que algunas gráficas no presentaban la coherencia que se esperaba (como se podrá apreciar en el capítulo siguiente donde se estudia el acoplamiento electromagnético entre dos cavidades).

A raíz de este suceso, se estudió de donde provenía el problema. Después de diferentes pruebas con las cavidades en el simulador HFSS, pudimos llegar a la conclusión de que el origen del problema era el mayado que se le aplicaba al diseño. Por defecto, el software aplicaba un mayado muy pobre para la precisión que buscábamos en las respuestas frecuenciales.

Para solucionar este problema se realizó un análisis de las respuestas frecuenciales con diferentes tipos de mayado con la finalidad de determinar el mayado óptimo aplicable a las cavidades para obtener una precisión suficiente en posteriores simulaciones. Un mayado óptimo sería aquel que permitiese obtener resultados que no variasen demasiado respecto de la respuesta con un mayado infinito con un tiempo de simulación que no fuese muy elevado, es decir que el número de tetraedros del mayado no fuese muy grande.

Para encontrar ese mayado óptimo definimos una primera condición: la relación entre la frecuencia obtenida con un mayado infinito y la obtenida con el nuevo mayado debería ser menor o igual al 1%:

$$Af_0 = 4 \cdot \frac{1}{100} = 0.04GHz \Rightarrow Af_0 = 40MHz \quad (2.1)$$

En primer lugar, empezamos aplicando un cierto mayado escogido al azar tanto en el vaciado de la cavidad (espacio vacío en el interior de la cavidad) como en todos sus elementos conductores. Analizando las respuestas frecuenciales, observamos como, aumentando el mayado del vaciado de la cavidad, se converge, aunque con ciertas fluctuaciones, a una frecuencia de resonancia entre los 4.17GHz y los 4.18GHz, por lo que escogimos la mas grande como frecuencia ideal. Ahora que teníamos dicha frecuencia, calculamos el error posible y determinamos la frecuencia de resonancia límite (como se expresa en

la ecuación 2.2) para encontrar el mínimo mayado con el que obtener dicho resultado:

$$f_{0(\min)} = f_{0(\text{ideal})} - \Delta f_0 \Rightarrow f_{0(\min)}(\text{GHz}) = 4.18 - 0.04 = 4.14\text{GHz} \quad (2.2)$$

Una vez obtenido este parámetro fijo y establecido el margen de error, fuimos disminuyendo el mayado del vaciado de la cavidad dejando fijos los mayados interiores y analizando las respuestas frecuenciales resultantes para determinar si entraban dentro del margen.

Como se puede observar en la figura 2.5, los resultados de los diferentes mayados del vaciado de la cavidad que incluían el mayado interior eran satisfactorios con lo que, con el objetivo de disminuir el tiempo de simulación, eliminamos el mayado interior y simplemente empezamos a trabajar con el mayado del vaciado.

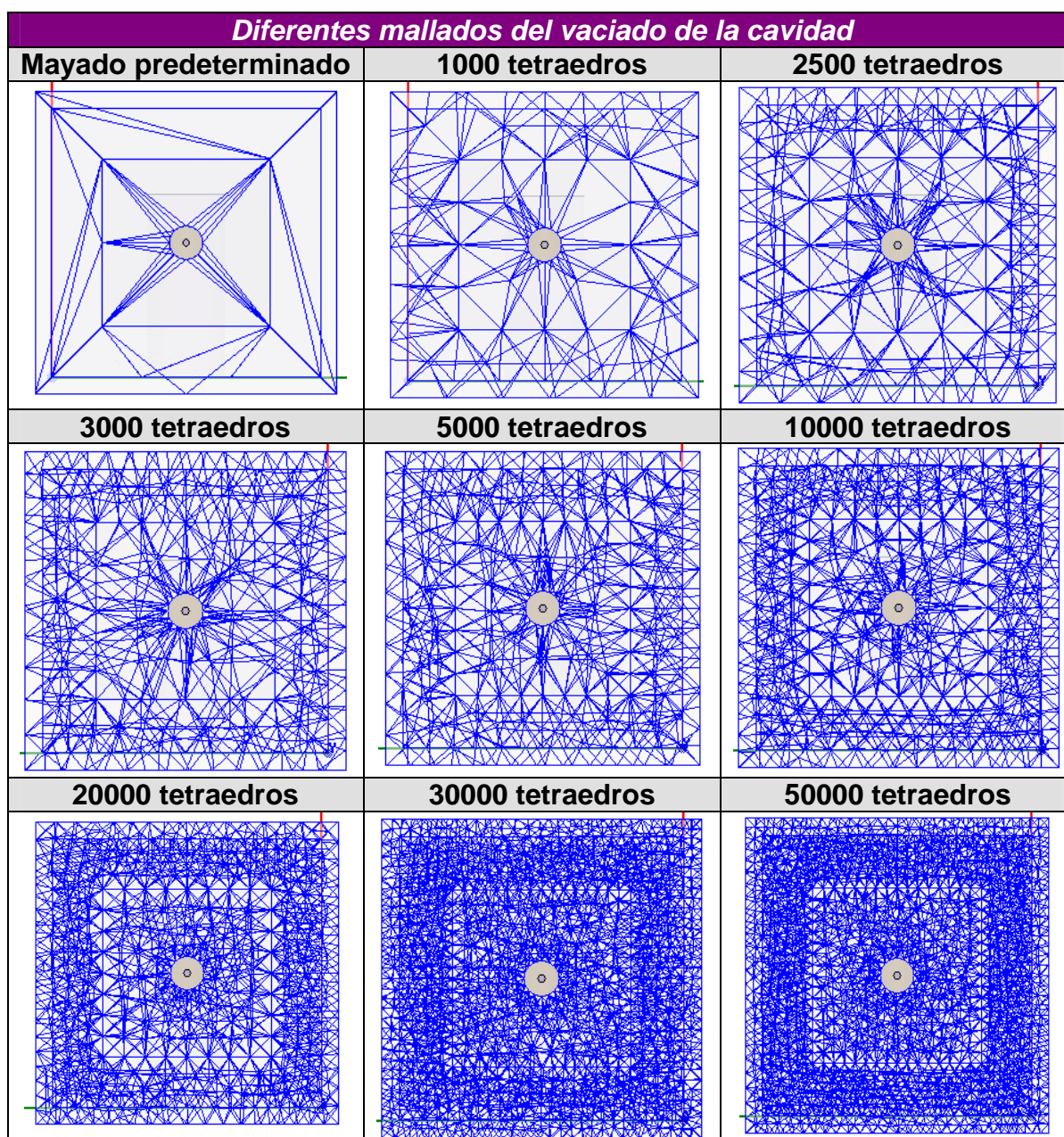
Mayado del vaciado (on + inside)	Otros mayados	Frecuencia de resonancia (GHz)	Diferencia (freq.res - freq)	Error (%)
0	0	3,991739	188261000	4,707
2000	0	4,093076	86924000	2,173
6000	0	4,1184327	61567347	1,539
7000	0	4,123239	56760975	1,419
8000	0	4,1244714	55528571	1,388
9000	0	4,1303388	49661224	1,242
9500	0	4,1369862	43013793	1,075
10000	0	4,1382837	41716327	1,043
15000	0	4,1318143	48185714	1,205
18000	0	4,1377327	42267347	1,057
19000	0	4,1401379	39862069	0,997
20000	0	4,1409041	39095918	0,977
40000	0	4,1412429	38757143	0,969
60000	0	4,1592959	20704082	0,518
1000	1000	4,18355	3550000	0,089
2000	1000	4,184502	4502000	0,113
10000	1000	4,17975	250000	0,006
20000	1000	4,18405	4050000	0,101
50000	1000	4,177637	2363000	0,059
100000	1000	4,174868	5132000	0,128

**Fig. 2.5** Tabla de resultados con los diferentes mayados analizados

Como vemos, en un principio, con mayados muy pequeños del vaciado se obtuvieron resultados insatisfactorios, ya que las frecuencias de resonancia distaban mucho del valor fijado. No obstante, a medida que se iba aumentando

el mayado, el resultado se aproximaba al de convergencia. De esta manera, determinamos que el mayado óptimo para analizar el resto de parámetros del diseño con el objetivo de tener el error mínimo esperado estaba entre los 19000 y los 20000 tetraedros, con lo que finalmente fijamos los 20000 tetraedros como valor final del mayado del vaciado de la cavidad.

En la figura 2.6, se puede apreciar como a medida que aumentamos el mayado de la cavidad, los tetraedros que se forman se reorganizan de una forma más simétrica dejando el mínimo espacio libre y por lo tanto realizando un análisis más fino del comportamiento de la cavidad.



**Fig. 2.6** Representación gráfica de los diferentes mayados aplicados al vaciado de la cavidad

### 2.3. Diseño de cavidades combline

Este apartado está dedicado a un estudio genérico del comportamiento de una cavidad: factor de calidad y frecuencia de resonancia, cambiando diferentes parámetros como son las dimensiones de la caja o el radio del cilindro central, entre otros.

No obstante, para empezar a realizar estos análisis, hemos tenido que diseñar una primera cavidad con unas dimensiones aleatorias y condicionarla para que trabajase a una frecuencia de resonancia de 4GHz, con el objetivo de tener un punto de referencia.

Hemos usado una cavidad de 21.6mm de lado y un cilindro central conductor con una cierta altura. Para sintonizar la frecuencia de resonancia debemos variar la altura del cilindro central, con lo que una vez obtenida la frecuencia correspondiente a esa altura hemos usado la ecuación 2.3 para reajustarla hasta obtener la frecuencia de resonancia a la que queremos que trabaje la cavidad: 4GHz.

$$h_{final} = h_{inicial} \cdot \frac{f_{inicial}}{f_{necesaria}} \Rightarrow f_{necesaria} = 4GHz \quad (2.3)$$

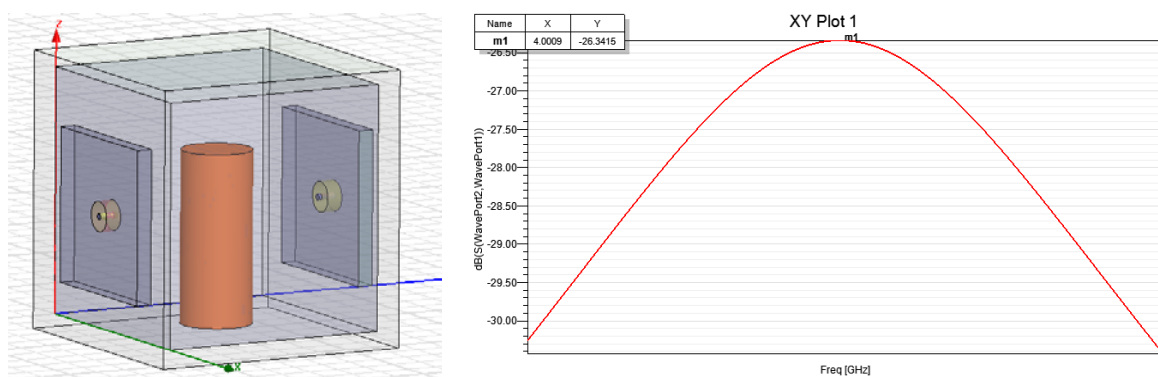
**Nota:** La primera altura que se ha fijado ha sido la de la caja para una vez encontrada una altura asequible para su posterior fabricación, modificar únicamente la del cilindro central hasta encontrar los 4GHz.

Finalmente, las variables resultantes de esta primera cavidad de referencia son las expuestas en la figura 2.7:

<b>Dimensiones del vaciado de la cavidad (mm)</b>		<b>Dimensiones del cilindro central (mm)</b>	
XSize	19.05	Radio	2.921
YSize	19.05	Altura	14.17
ZSize	20.16		

**Fig. 2.7** Dimensiones del diseño de la cavidad de referencia

Y la cavidad, así como sus pérdidas de inserción donde observamos la frecuencia de resonancia presenta la forma siguiente:



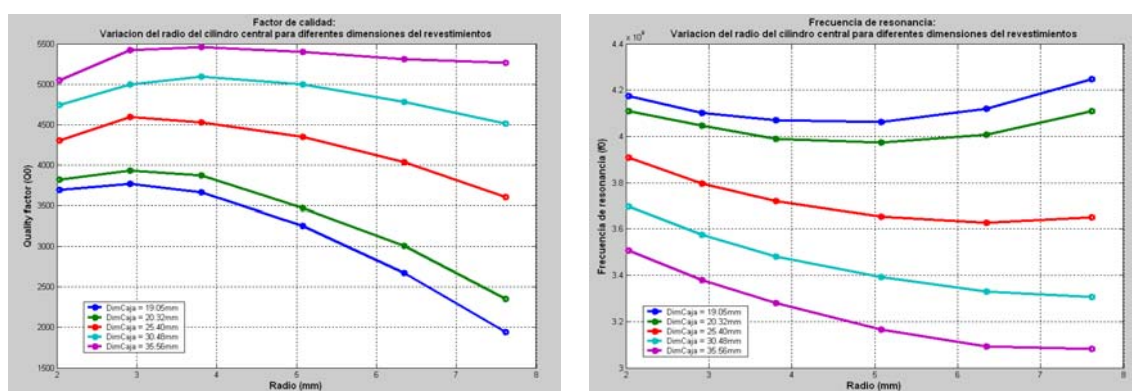
**Fig. 2.8** Imagen en 3D de la cavidad y pérdidas de inserción obtenidas de la simulación con HFSS.

Una vez obtenida una cavidad inicial, procederemos al análisis del factor de calidad y la frecuencia de resonancia variando todos los parámetros posibles, tanto de la caja exterior como del cilindro conductor, a excepción de las alturas.

El objetivo principal de los análisis que proceden a continuación es tener una idea general del comportamiento de las dos variables comentadas y escoger tres cavidades para un estudio más exhaustivo y una posible fabricación.

### 2.3.1. Variación del radio del cilindro conductor respecto las dimensiones de la caja exterior fijas

Para realizar este primer análisis se ha variado el diámetro del cilindro central de cobre para unas dimensiones de la caja fijas con el objetivo de observar la variación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia.



**Fig. 2.9** Gráficas correspondientes al factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función del radio del cilindro conductor

Como se puede apreciar en la figura 2.9, tanto el factor de calidad como la frecuencia de resonancia siguen un mismo modelo en función del radio del

cilindro para diferentes dimensiones de caja, pero con valores mayores o menores dependiendo de la dimensión de la caja exterior. Las conclusiones que podemos extraer de estas primeras gráficas son:

- De la figura 2.9, observamos que a medida que la dimensión de la cavidad crece, el factor de calidad crece y la frecuencia de resonancia disminuye, por lo tanto:

**+ Dimensión vaciado → + factor de calidad**

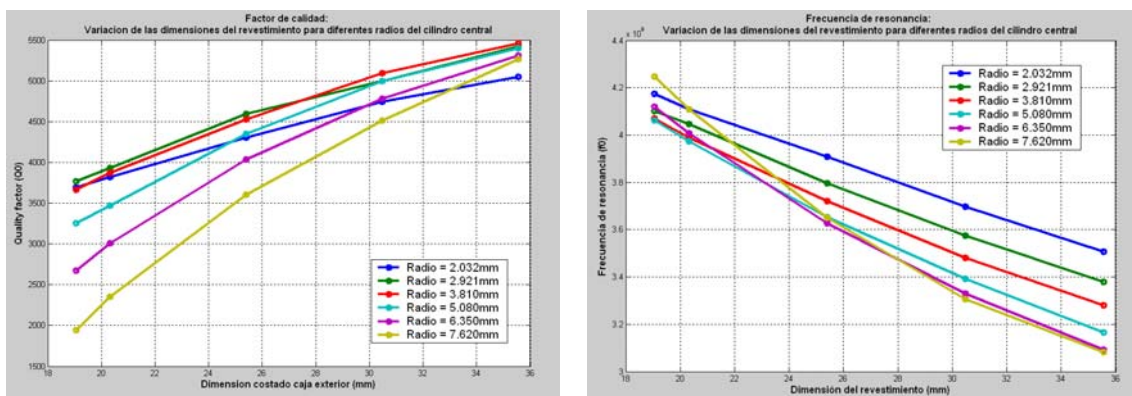
**+ Dimensión vaciado → - frecuencia de resonancia**

- Las curvas de factor de calidad muestran un máximo en todas las cavidades con radios de entre 2.921 mm y 3.810 mm.
- En la primera gráfica de la figura 2.9, observamos que la variación del factor de calidad entre el radio mínimo y el máximo aumenta a medida que disminuimos las dimensiones del vaciado de la cavidad pero a la vez, los resultados cuantitativos son los mas bajos:<sup>1</sup>

**- Dimensión vaciado → + rango de variación del factor de calidad**

### 2.3.2. Variación de las dimensiones del vaciado respecto a radios del cilindro central fijos

Para realizar este segundo análisis se han variado las dimensiones del vaciado de aluminio de la cavidad para unos radios del cilindro central fijos con el mismo objetivo que el apartado anterior.



**Fig. 2.10** Gráficas correspondientes al factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función de la dimensión del vaciado de la cavidad

Como podemos observar, la figura 2.10 presenta la misma información que la figura 2.9 del apartado anterior pero desde otro punto de vista. Hemos utilizado

<sup>1</sup> Para corregir este error de frecuencia en las distintas cavidades con las que trabajamos únicamente deberíamos modificar la altura del cilindro central como haremos mas adelante.



esta nueva perspectiva para acabar de analizar la dimensión del vaciado y el radio del cilindro conductor y extraer nuevas conclusiones:

- En la primera gráfica de la figura 2.10, podemos observar como, a excepción del caso en que se utiliza el radio menor, la variación del factor de calidad es mayor a medida que el radio del cilindro aumenta. Además, los valores del factor de calidad tienden a un máximo al aumentar las dimensiones de la caja que es aproximadamente el mismo para todos los radios:

**+ Radio  $\rightarrow$  + rango de variación del factor de calidad**  
**Máximas Dimensiones cajas = factor de calidad máximo aprox.**

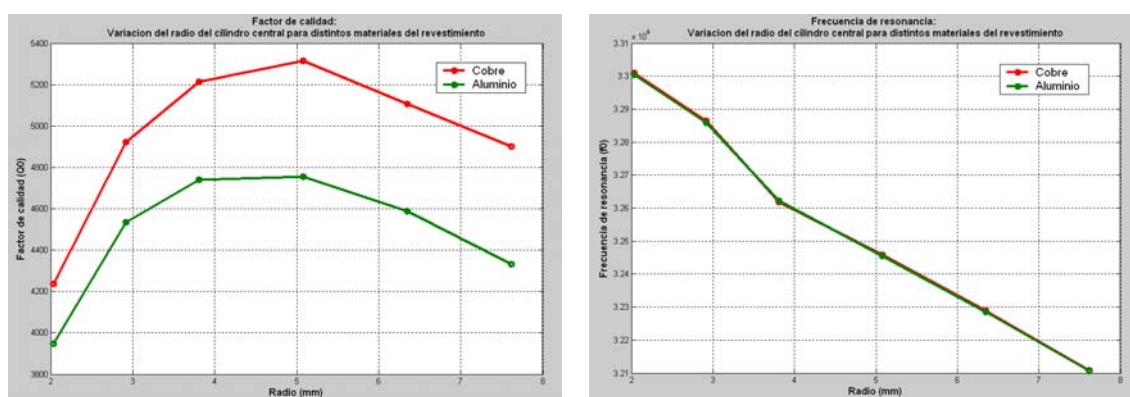
- En la segunda gráfica de la figura 2.10, podemos observar como para dimensiones del vaciado pequeñas, las frecuencias de resonancia son parecidas para los diferentes radios del cilindro conductor analizados, en cambio, a medida que las dimensiones aumentan, la frecuencia de resonancia disminuye conforme aumenta el radio del cilindro central:

**- Dimensión vaciado  $\rightarrow$  +/- radio  $\rightarrow$  = frecuencia de resonancia**  
**+ Dimensión vaciado  $\rightarrow$  + radio  $\rightarrow$  - frecuencia de resonancia**

### 2.3.3. Efecto del material de la cavidad

Para decidir con que material diseñar la cavidad se hicieron simulaciones con cobre y aluminio.

Obtuvimos los resultados de la figura 2.11:



**Fig. 2.11** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función del material de la caja exterior y el radio del cilindro.

Como se puede observar en la figura 2.11, ambos tipos de cavidad presentan un máximo en su curva de Q y una gráfica idéntica para la frecuencia de resonancia. La diferencia entre el comportamiento de los dos materiales es que

el uso del cobre como material de la caja aumenta el factor de calidad en un 10 % aproximadamente debido a la mayor conductividad del mismo.

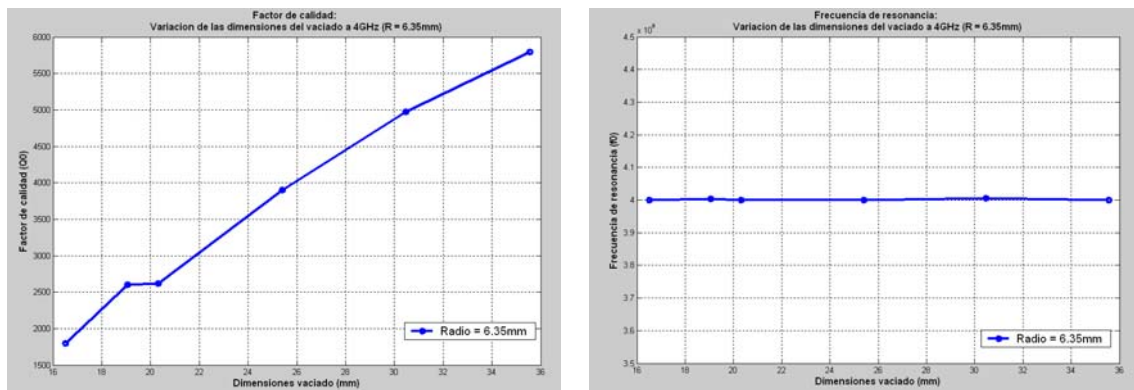
**Cobre caja exterior → + factor de calidad → = comportamiento**

No obstante, en nuestro diseño y a lo largo del proyecto, seguiremos utilizando una caja de aluminio por su bajo peso y su facilidad de mecanización aunque mantendremos los cilindros centrales de cobre al ser elemento que más afecta en las pérdidas de la cavidad total.

#### 2.3.4. Variación del vaciado con el radio fijo trabajando a 4GHz

El objetivo de este último análisis es determinar la variación del factor de calidad en cavidades que estén diseñadas para trabajar a 4GHz y así deshacer el efecto que el cambio en frecuencia tiene sobre las curvas del factor de calidad como se observa en la ecuación 1.1.

Para realizar esta prueba se fijó el radio del cilindro central y la altura del vaciado de la cavidad. De esta forma las variables que nos quedaban libres eran: la dimensión de la base del vaciado y la altura del cilindro conductor, que utilizaríamos para sintonizar la frecuencia de resonancia a 4GHz.



**Fig. 2.12** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia con distintas cavidades trabajando a 4GHz

Como se puede apreciar en la segunda imagen de la figura 2.12, todas las cavidades trabajan a la frecuencia de resonancia esperada y como era predecible, el factor de calidad aumenta al aumentar las dimensiones de la cavidad. Incluso el margen de variación de Q es mayor que el observado en la figura 2.10 para la curva realizada con el mismo radio de 6.35 mm de cilindro central.

Por otro lado, en la tabla de la figura 2.13 se muestran los valores de las variables más relevantes del análisis. A partir de estos valores se puede extraer una última conclusión en cuanto a dimensiones:

<b>Dimensión del vaciado (mm)</b>	<b>Factor de calidad (aprox.)</b>	<b>Altura del cilindro (mm)</b>
16.51	1796	15.2841
19.05	2631	14.2379
20.32	2619	14.2595
25.40	3902	12.1450
30.48	4974	11.9987
35.56	5793	9.0995

**Fig. 2.13** Tabla de valores más relevantes del análisis

- Para obtener una misma frecuencia de resonancia, al aumentar la dimensión del vaciado de la cavidad, la altura del cilindro conductor debe disminuir:

**+ Dimensión caja → + factor de calidad → - Altura del cilindro**

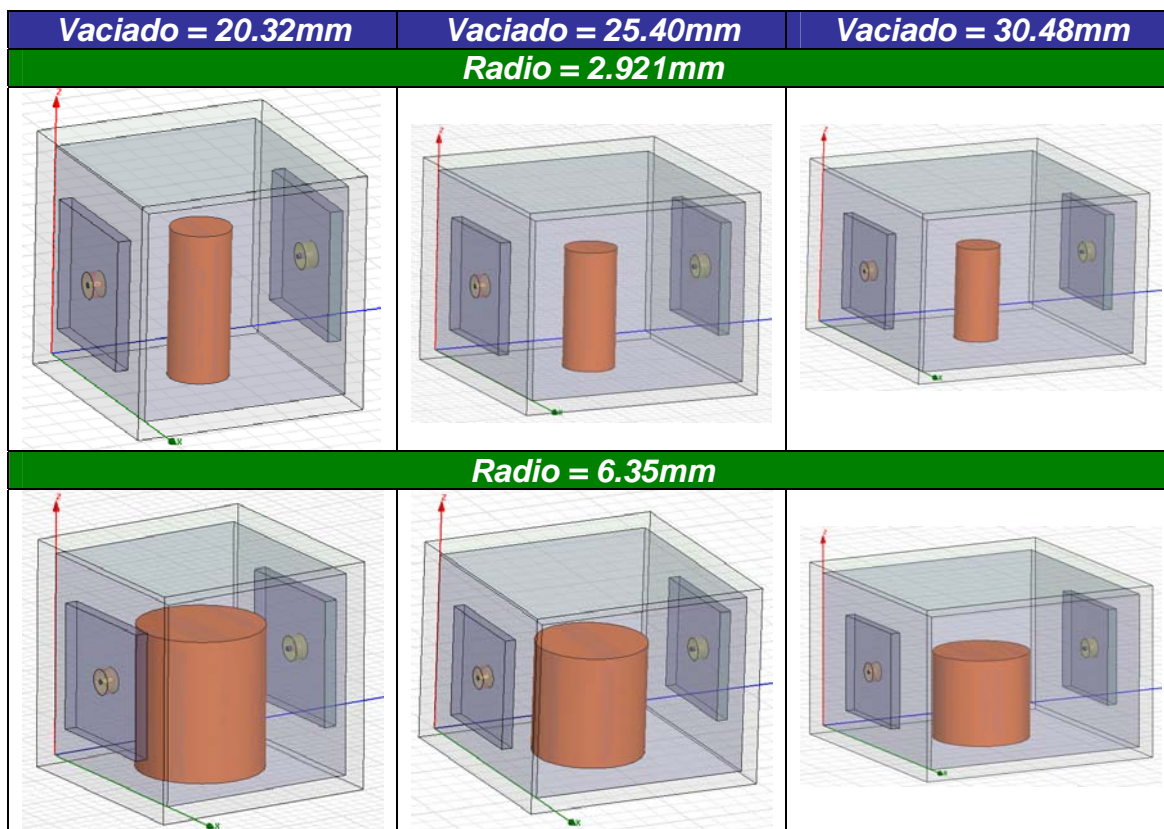
### 2.3.5. Conclusiones del estudio preliminar

Este apartado está destinado a resumir las diferentes conclusiones que se han ido extrayendo durante todo el estudio preliminar del comportamiento de una cavidad. De esta forma finalizaremos la caracterización escogiendo tres de los ejemplos estudiados para análisis que veremos en capítulos posteriores.

Las conclusiones que podemos extraer sobre el comportamiento cualitativo de una cavidad variando sus parámetros principales se resumen en los siguientes puntos:

- **- Dimensión vaciado → + rango de variación del factor de calidad → - factor de calidad → + frecuencia de resonancia**
- **+ Radio → + rango de variación del factor de calidad → = factor de calidad máximo aprox.**
- **- Dimensión vaciado → +/- radio → = frecuencia de resonancia**
- **+ Dimensión vaciado → + radio → - frecuencia de resonancia**
- **Caja de cobre → + factor de calidad → = comportamiento en frecuencia que aluminio**
- **A 4GHz → + Dimensión caja → + factor de calidad → - Altura del cilindro**

Finalmente, a raíz de los análisis elaborados y las conclusiones extraídas, se ha decidido trabajar con tres tipos de cavidades y dos cilindros centrales diferentes, con lo que obtenemos un total de seis cavidades diferentes:



**Fig. 2.14** Representación de las seis cavidades elegidas para los posteriores análisis

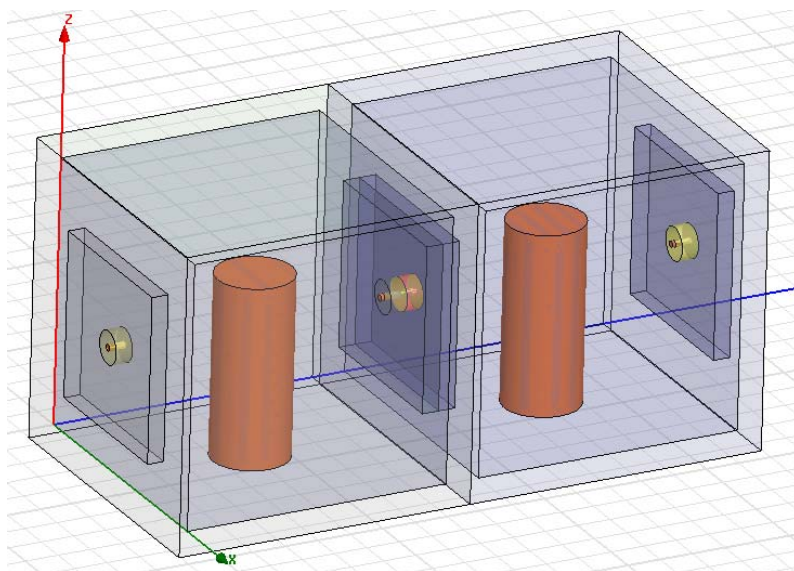
Como podemos observar en la figura 2.14, las dimensiones del vaciado de las tres cavidades con las que trabajaremos son: 20.32 mm, 25.40 mm y 30.48 mm, por ser las cavidades con las que hemos obtenido los resultados más equilibrados; y las dimensiones del radio del cilindro central serán: 2.92 mm y 6.35 mm. Por un lado, hemos elegido el radio de 2.92 mm, ya que en el apartado 2.3.1 se ha comprobado que ofrece un máximo en el valor el factor de calidad en todas las cavidades; y por el otro, hemos elegido el radio de 6.35 mm, ya que en el apartado 2.3.2 se ha comprobado que ofrece uno de los mayores rangos del factor de calidad.

## CAPÍTULO 3. ACOPLAMIENTOS EN CAVIDADES

### 3.1. Acoplamiento electromagnético

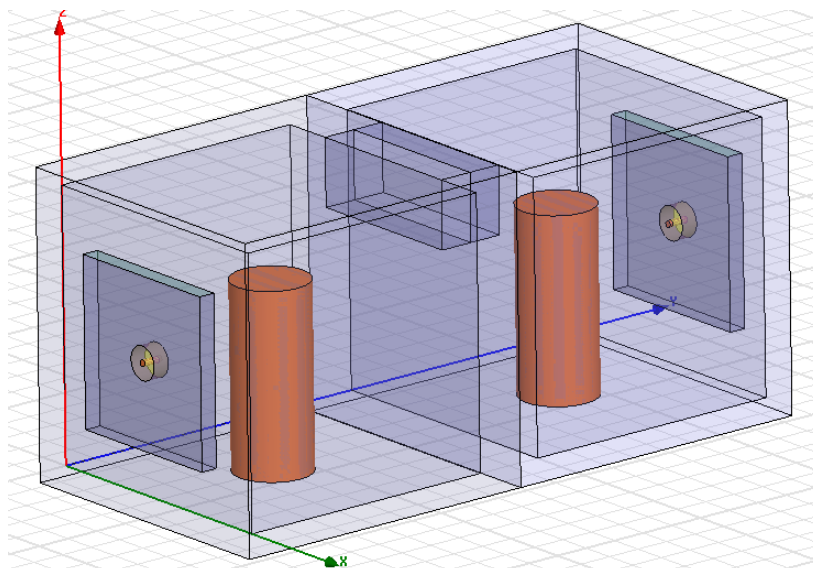
El filtro que se pretende diseñar en este proyecto consta de un conjunto de cavidades unidas entre si, por lo tanto, una vez definidos los parámetros básicos para caracterizar una sola cavidad, el siguiente estudio a realizar es el comportamiento de los acoplamientos entre dos cavidades.

Por un lado, estudiaremos el tipo de acoplamiento que se genera al unir las dos cavidades a través del conector de salida de la primera con el conector de entrada de la segunda (ver figura 3.1):



**Fig. 3.1** Representación de la unión entre dos cavidades a través de los conectores.

Por otro lado, estudiaremos el acoplamiento que se genera al unir las dos cavidades a través de una ranura colocada en la parte lateral de la caja, variando parámetros como la dimensión o la posición de ésta (ver figura 3.2):



**Fig. 3.2** Representación de la unión entre dos cavidades a través de una ranura.

Con el análisis a través de los conectores solo podremos obtener un tipo de acoplamiento, eléctrico o magnético, ya que ésta conexión es única. Sin embargo, el análisis a través de ranuras será mas extenso y es posible encontrar los dos tipos de acoplamientos dependiendo de la variación en los parámetros anteriormente citados.

Para realizar dicho estudio utilizaremos dos de las tres cavidades elegidas en el apartado 2.5 con uno de los cilindros conductores, como se muestra en la tabla de la figura 3.3. No hemos realizado los análisis pertinentes con las seis cavidades, ya que supondría mucho tiempo de simulación con HFSS y a causa del mayado utilizado, lo único que pretendemos es tener una idea cualitativa del comportamiento de estos acoplamientos.

	<b>Dimensión vaciado (mm)</b>	<b>Radio cilindro central (mm)</b>
<b>Cavidad 1</b>	20.32	2.921
<b>Cavidad 2</b>	30.48	2.921

**Fig. 3.3** Parámetros de las cavidades utilizadas para el estudio del acoplamiento electromagnético

Finalmente, en relación a la ranura entre las cavidades, realizaremos tres tipos de modificaciones: en la longitud (eje Z) y la anchura (eje X); en la posición a lo largo del eje X; y en la posición a lo largo del eje de las Z (concretamente en la parte superior y en la parte inferior del vaciado de la cavidad).

En este capítulo utilizaremos el llamado factor de acoplamiento y el ancho de banda. El factor de acoplamiento se define como se muestra en la ecuación 3.1

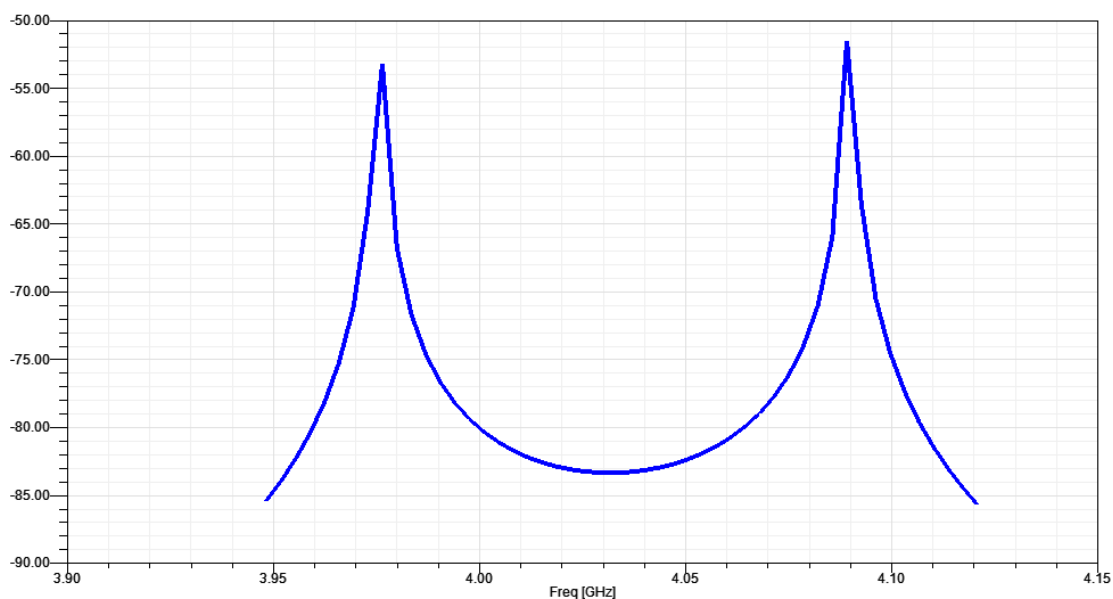
y el ancho de banda (que en realidad es el ancho de banda del filtro diseñado) se muestra en la ecuación 3.2:

$$k = \frac{f_{\max}^2 - f_{\min}^2}{f_{\max}^2 + f_{\min}^2} \quad (3.1)$$

$$BW = f_{\max} - f_{\min} \quad (3.2)$$

El factor de acoplamiento siempre será inferior a 1 y las frecuencias que aparecen en la ecuación son las correspondientes a los dos máximos que se generan a causa del acoplamiento entre las dos cavidades (figura 3.4). Uno de los conceptos más importantes relacionados con el acoplamiento es el siguiente:

**resonadores + juntos → + acoplo → picos + separados**



**Fig. 3.4** Pérdidas de inserción del acoplamiento entre dos cavidades

El objetivo de este análisis es encontrar una pauta en el acoplamiento para poder determinar la ranura necesaria para obtener cualquier factor de acoplamiento.

**Nota:** Los posteriores análisis con los distintos tipos de acoplamiento están realizados sin el mayado óptimo con lo que algunos resultados distan de la exactitud. No obstante, este estudio tiene como objetivo tener una visión cualitativa del comportamiento del acoplamiento.

### 3.1.1. Unión a través de los conectores

En este análisis se estudia el comportamiento del acoplamiento utilizando los conectores como punto de unión entre las dos cavidades.

En la tabla de la figura 3.5 podemos observar los datos obtenidos del factor de acoplamiento y los anchos de banda en función de las dos cavidades usadas.

Dimensión del vaciado de la cavidad (mm)	Factor de acoplamiento	Ancho de banda (MHz)
20.32	0.01209621953	47.84
30.48	0.00488836762	19.54

**Fig. 3.5** Resultados del análisis del acoplamiento eléctrico

El factor de acoplamiento, así como el ancho de banda disminuyen a medida que las dimensiones del vaciado aumentan, por lo tanto:

**+ Dimensión vaciado → - Factor de acoplamiento → - Ancho de banda → picos mas juntos → - acoplamiento**

Como se puede observar en el anexo C, en todos los análisis realizados con dicha unión se obtiene un solo tipo de fase. Asignaremos esta fase a un acoplamiento eléctrico, por lo tanto, en las simulaciones donde aparezca la fase inversa el acoplamiento será magnético.

### 3.1.2. Unión a través de las ranuras

Como se ha comentado al inicio del apartado, el estudio del acoplamiento utilizando ranuras como punto de unión entre las cavidades es más extenso, ya que en este caso, se podrán variar las características de ésta.

En este apartado se realizará el análisis del acoplamiento magnético para una cavidad con un vaciado de 20.32mm y la ranura en la parte superior de éste. Constará de tres partes, cada una de ellas dedicada a la modificación de una de las dimensiones de la ranura<sup>2</sup>

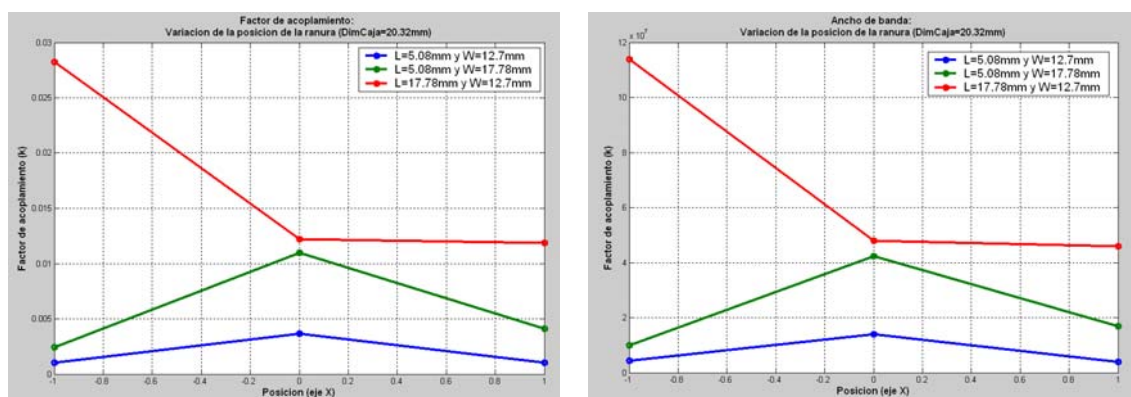
#### 3.1.2.1. Vaciado de 20.32mm y ranura en la parte superior

En la figura 3.7 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación del factor de acoplamiento y el ancho de banda de trabajo del dispositivo en

<sup>2</sup> En el anexo B se puede encontrar el análisis del acoplamiento magnético para las cavidades restantes con las que se ha realizado el análisis del acoplamiento eléctrico con la ranura colocada tanto en la parte inferior como en la parte superior del vaciado.



función de la posición de la ranura en el eje X. Por lo tanto, -1 se corresponde con la izquierda, 0 sería el centro y 1 la derecha de la cavidad.



**Fig. 3.7** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la posición de la ranura

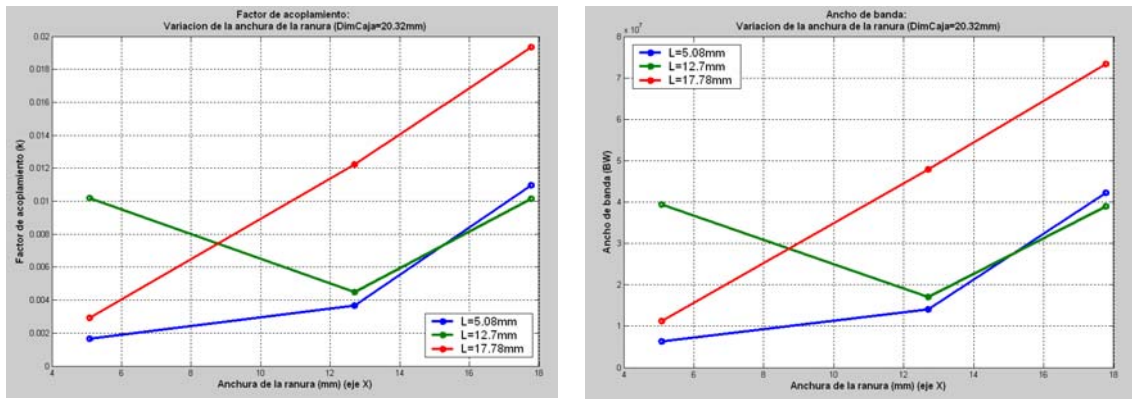
La conclusión que se puede extraer de estas dos gráficas es que colocando la ranura, independientemente de las dimensiones de éstas, en la parte central de la cavidad se obtiene un aumento del factor de acoplamiento y por lo tanto un ancho de banda mayor que en los extremos derecho e izquierdo:

***Posición central  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento  $\rightarrow$  + ancho de banda***

No obstante notar que para la ranura de longitud 17.78 mm no se obtiene el mismo resultado si la ranura se coloca en la izquierda o en la derecha. Este resultado no es coherente pues la cavidad es simétrica. Atribuimos esta divergencia a que el muestreo con el que se están realizando las simulaciones no es suficiente para dar resultados cuantitativamente correctos. No obstante si que nos permite obtener resultados cualitativos.

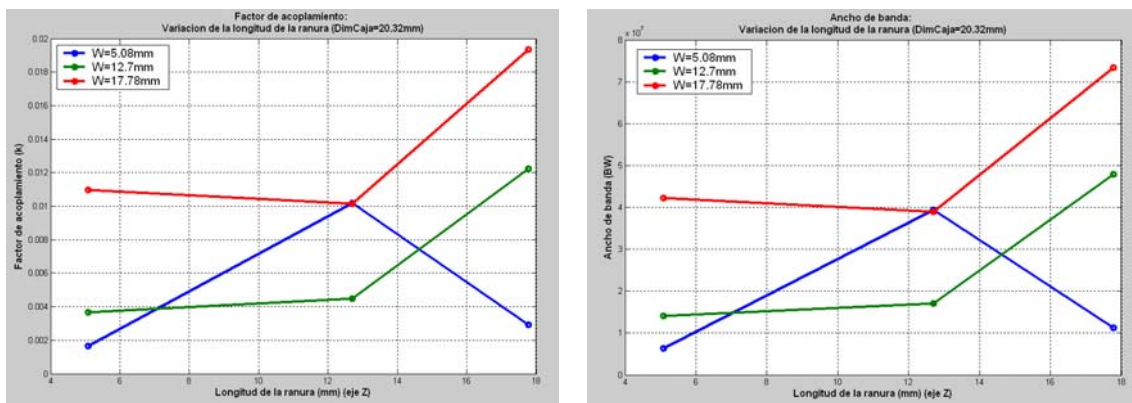
En la figura 3.8 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la anchura de la ranura, o lo que es lo mismo, del eje X. La conclusión que se puede extraer es que, cualitativamente, a medida que la anchura de la ranura aumenta, también lo hacen el factor de acoplamiento y el ancho de banda, por lo tanto:

***+ Anchura  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento  $\rightarrow$  + Ancho de banda***



**Fig. 3.8** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la anchura de la ranura

Finalmente, en la figura 3.9 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la longitud de la ranura, es decir del eje Z.

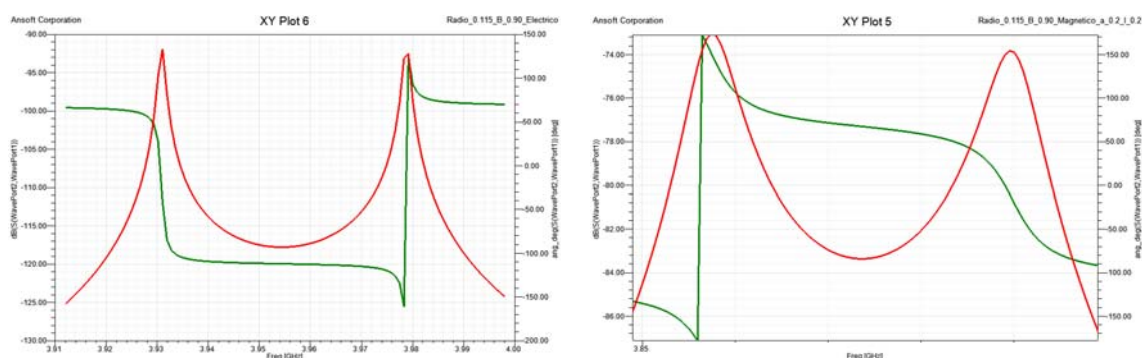


**Fig. 3.9** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la longitud de la ranura

En este caso, podríamos interpretar que para longitudes inferiores a 13 mm, el factor de acoplamiento permanece igual o que el aumento es ínfimo, pero en cambio, a partir de esa longitud, dicha variable aumenta considerablemente; por lo tanto:

***Longitud < 13mm → = factor de acoplamiento → = ancho de banda***  
***Longitud > 13mm → + factor de acoplamiento → + ancho de banda***

En cuanto a la fase, si volvemos a observar el anexo C, observamos que para todos los casos en que se ha utilizado una ranura como unión entre dos cavidades, la fase es inversa a la obtenida en el apartado 3.1.1, por lo tanto llegamos a la conclusión de que el acoplamiento que se obtiene cuando se usan ranuras es el magnético. En la figura 3.6 se puede observar la diferencia de fases entre el acoplamiento eléctrico obtenido mediante los conectores y el acoplamiento magnético obtenido mediante las ranuras



**Fig. 3.6** Fases de los acoplamientos electromagnéticos

La primera imagen muestra la fase asignada al acoplamiento eléctrico y la segunda la asignada al acoplamiento magnético. Con esta demostración se corrobora la teoría explicada en el apartado 1.2.1 del capítulo 1, y por lo tanto, si asociamos una fase a un signo concreto del factor de acoplamiento, la fase inversa corresponderá al signo contrario.

### 3.1.2.2. Conclusiones del estudio

Como en el apartado 2.3 del capítulo 2, en este caso también realizaremos un resumen de todas las conclusiones extraídas de los diferentes análisis realizados.

Cabe recordar que el mado utilizado para el desarrollo de las simulaciones no era el óptimo y algunos valores podrían ser incorrectos. Es por eso que las conclusiones presentadas son del tipo cualitativo y simplemente nos dan una idea global del comportamiento de las cavidades frente a los acoplamientos electromagnéticos.

Las conclusiones comunes que se han podido extraer de las simulaciones anteriores se resumen en los siguientes puntos<sup>3</sup>:

Respecto al acoplamiento eléctrico:

- **+ Dimensión vaciado → - Factor de acoplamiento → - Ancho de banda**

Respecto al acoplamiento magnético:

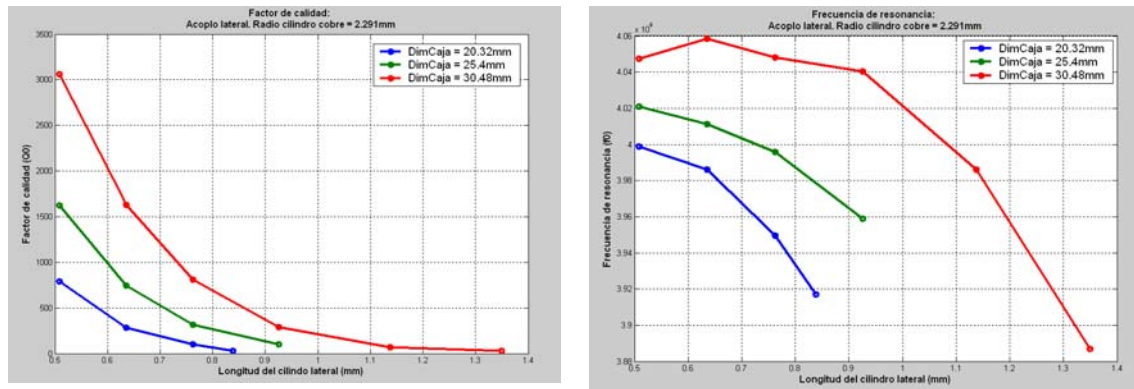
- **Posición central → + factor de acoplamiento → + ancho de banda**
- **+ Anchura → + factor de acoplamiento → + Ancho de banda**
- **Longitud < 13mm → + factor de acoplamiento → + ancho de banda**

<sup>3</sup> Cabe destacar que estas conclusiones son un resumen y además solo se han elegido las que se repetían con más frecuencia a lo largo de las simulaciones, por lo tanto, cada caso es levemente diferente y tendrá que ser estudiado con detenimiento.

- **Longitud > 13mm → - factor de acoplamiento → - ancho de banda**

### 3.2. Acoplamiento externo

Para realizar el análisis del efecto que provoca en la cavidad el factor de calidad externo se ha utilizado el método explicado en el apartado 1.2.2 del capítulo 1, utilizando distintas longitudes en el conector de entrada:



**Fig. 3.19** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función de la longitud del conductor lateral

Como se puede observar en la primera gráfica de la figura 3.19, el comportamiento del factor de calidad externo presenta una forma claramente exponencial, independientemente de las dimensiones del vaciado. Por otro lado, también podemos concluir que para longitudes muy largas del conector (rozando el cilindro central), el factor de calidad es muy pequeño.

**+ Longitud → + acoplamiento → - factor de calidad externo**

Finalmente, se puede apreciar como los valores máximos del factor de calidad y la frecuencia de resonancia, y los márgenes de estas dos variables son mayores a medida que aumenta la dimensión del vaciado:

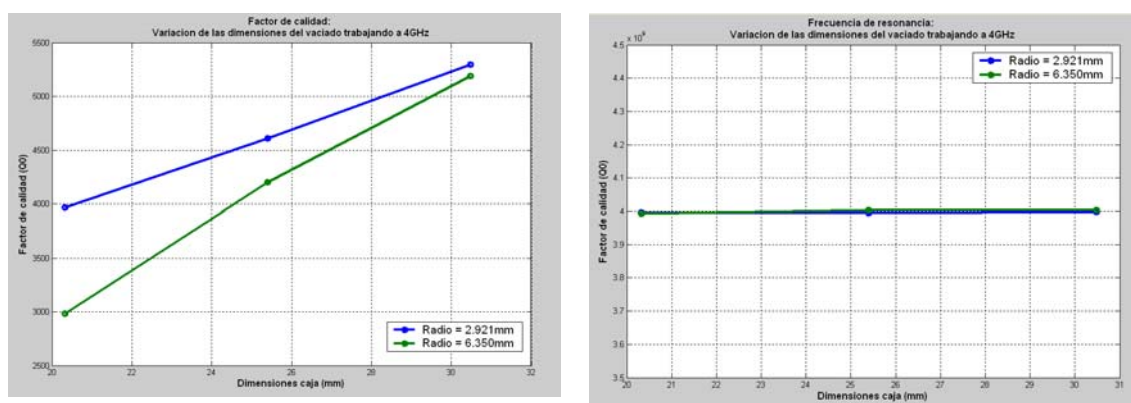
**+ Dimensión vaciado → + variación del factor de calidad → + variación de la frecuencia de resonancia**

## CAPÍTULO 4. PROTOTIPOS DE RESONADORES

### 4.1. Factor de calidad a 4GHz

En este apartado iniciaremos un estudio mas fino de las cavidades que elegimos en el apartado 2.5 del capítulo 2. En primer lugar determinaremos el factor de calidad de cada una de las cavidades trabajando a 4GHz.

Como vimos en secciones anteriores, para sintonizar la frecuencia de resonancia de una cavidad a partir de unas dimensiones fijas, tenemos que variar la altura del cilindro central. En la figura 4.1 podemos observar las gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia de las cavidades trabajando a 4GHz.



**Fig. 4.1** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función de las dimensiones de la cavidad trabajando a 4GHz.

En la figura 4.1, observamos que las cavidades trabajan a 4GHz y corroboramos que el factor de calidad aumenta con el aumento del vaciado como vimos en el apartado 2.3.4.

Por otro lado, en primer lugar, apreciamos que la diferencia entre los factores de calidad en función del radio del cilindro conductor disminuye cuanto más grande es la dimensión del vaciado, y en segundo lugar, que con un radio del cilindro más pequeño obtenemos una variación del factor de calidad más grande.

- + Dimensión vaciado → - acoplamiento → + factor de calidad
- Diámetro del cilindro central → + variación en el factor de calidad

El ajuste de la altura de los cilindros conductores para que la cavidad trabaje a 4GHz está realizado para un error menor al 1% respecto la frecuencia de resonancia ideal, es decir que el error máximo es de 40MHz. En la tabla de la

figura 4.2 podemos observar los datos de las alturas del cilindro central encontradas:

<b>Dimensión del vaciado (mm)</b>	<b>Radio del cilindro central (mm)</b>	<b>Altura del cilindro central (mm)</b>
20.32	2.921	14.41
25.40	2.921	13.42
30.48	2.921	12.37
20.32	6.35	14.25
25.40	6.35	12.73
30.48	6.35	11.36

**Fig. 4.2** Datos de las cavidades trabajando a 4GHz con el mayado óptimo

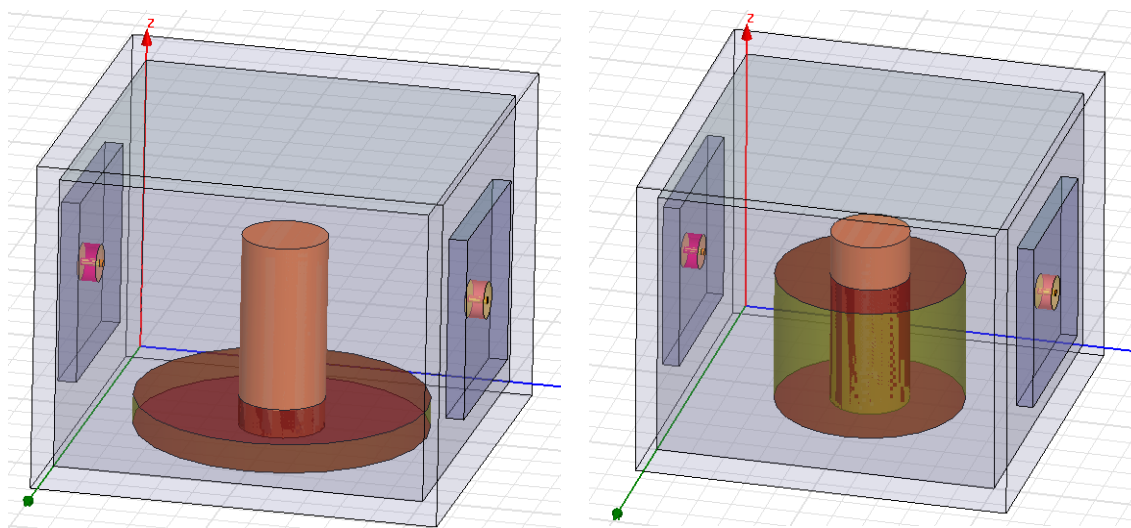
## 4.2. Mecanismos de control del factor de calidad

En este apartado se estudiarán los diferentes efectos que puede producir la adición de elementos externos en el factor de calidad y la frecuencia de resonancia, con el objetivo de encontrar algún mecanismo con el que poder controlar el factor de calidad. El control del factor de calidad es una de las técnicas clave en el diseño de filtro con pérdidas [11]

Los mecanismos utilizados han sido concretamente dos: en primer lugar un aro cilíndrico de un material llamado Styrofoam (material con permitividad relativa prácticamente uno y tangente de pérdidas  $10^{-4}$ ), envolviendo el cilindro conductor; y en segundo lugar, un cilindro de nylon en diferentes posiciones de la cavidad y de diferentes dimensiones con el fin de encontrar la óptima para nuestros fines.

### 4.2.1. Aro cilíndrico de Styrofoam

Como hemos introducido, el primer mecanismo que se ha estudiado con el objetivo de un futuro reajuste del factor de calidad ha sido la adición de un aro cilíndrico de distintas dimensiones y radios alrededor del cilindro central (figura 4.3):



**Fig. 4.3** Representación de la cavidad junto con la adición del aro cilíndrico de Styrofoam

El material que se ha elegido para el aro cilíndrico ha sido el llamado Styrofoam ya que tiene una permitividad similar a la del vacío y por tanto la frecuencia de resonancia no debería de modificarse mucho respecto de la cavidad en el vacío.

A continuación, en la tabla de la figura 4.4, se muestran los valores resultantes de las simulaciones realizadas. Las conclusiones cualitativas que se pueden extraer de estos valores son: en primer lugar, la tendencia del factor de calidad respecto el aumento de la altura del aro cilíndrico es decreciente; en segundo lugar, cuanto menor es el radio del aro, mayores son los valores del rango del factor de calidad; y en tercer lugar, el rango del factor de calidad es muy bajo, obteniendo una variación máxima de aproximadamente un 10% en el caso en que el radio del aro es mayor.

- + Altura del aro cilíndrico → - factor de calidad
- + Radio del aro cilíndrico → - factor de calidad
- Mecanismo aro cilíndrico → baja variación del factor de calidad

Este estudio ha sido realizado con la cavidad cuyo vaciado es de 25.40mm y el cilindro conductor cuyo radio es de 2.921mm.

Radio del aro (mm)	Altura del aro (mm)	Factor de calidad	Frecuencia de resonancia (GHz)
4	2	4731	3.981777
4	10	4604	3.996632
7	2	4654	3.982270
7	10	4391	3.991328
9	2	4667	3.996130
9	10	4319	3.975139

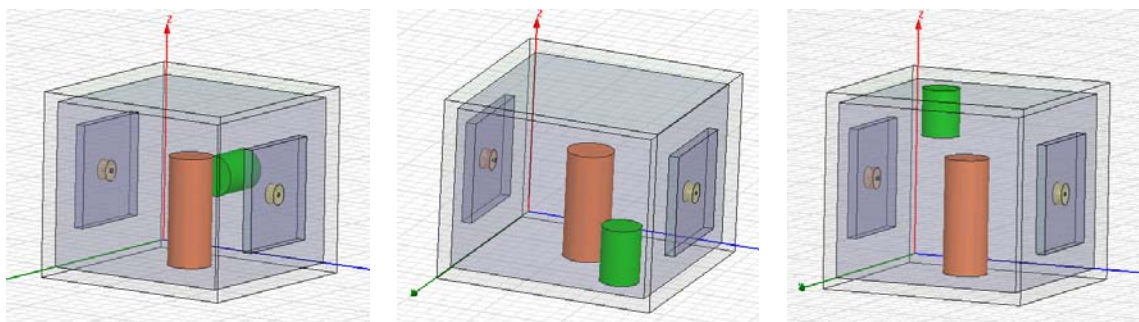
10	2	4599	3.984790
10	10	4236	3.961420

**Fig. 4.4** Valores del factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función de las dimensiones del aro cilíndrico

En cuanto a las frecuencias se observa que en todos los casos se mantiene constante dentro del error atribuido al mayado.

#### 4.2.2. Cilindro de Nylon

En este apartado se estudiará el efecto que produce añadir un cilindro de nylon de diferentes tamaños y en diferentes posiciones del vaciado de la cavidad con el mismo objetivo que el apartado anterior<sup>4</sup>.



**Fig. 4.5** Representación de la cavidad junto con la adición del cilindro de nylon en diferentes posiciones

Como se puede ver en la figura 4.5, el primer análisis que hemos realizado ha sido el efecto que produce la adición de un cilindro de nylon con dos longitudes diferentes en tres posiciones de la cavidad: en la parte superior, en uno de los laterales y en la parte inferior. Al obtener tan solo dos puntos para cada posición se ha optado por mostrar los resultados con una tabla como la de la figura 4.6:

Posición	Longitud (mm)	Factor de calidad	Frecuencia de resonancia (GHz)
Parte Superior	1	4485	3.981883
Parte Superior	5.5	3442	3.980315
Parte Lateral	1	4431	3.981728
Parte Lateral	7	2246	3.967400
Parte Inferior	1	4598	3.991650

<sup>4</sup> Como el objetivo de este estudio es el mismo que el del apartado 4.2.1, las simulaciones se han realizado con los mismos elementos y dimensiones.



Parte Inferior	7	4308	3.990980
----------------	---	------	----------

**Fig. 4.6** Valores del factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función de las dimensiones de longitud y posición del cilindro de nylon

En primer lugar observamos que el aumento de la longitud del cilindro de nylon, cuya permitividad es 2.84, independientemente de la posición, produce una disminución del factor de calidad y de la frecuencia de resonancia como era de esperar al introducir un material con pérdidas y constante dieléctrica relativa de 2.1. Por otro lado, partiendo de un mismo valor inicial del factor de calidad (cuando la longitud del cilindro es muy pequeña), la variación de éste es máximo cuando el cilindro está colocado en la parte lateral y mínima cuando está en la parte inferior.

No obstante, la mejor posición para el cilindro de nylon es la parte superior, ya que obtenemos una buena variación del factor de calidad (aproximadamente 1000 unidades) y una variación de la frecuencia ínfima.

**Variación factor de calidad => Lateral > Superior > Inferior**

**Variación frecuencia resonancia => Lateral > Inferior = Superior**

Cabe recordar que lo que buscábamos era una variación del factor de calidad máxima y una variación de la frecuencia de resonancia mínima, por lo tanto:

**Posición óptima = Parte superior => variación Factor de calidad máximo  
→ variación Frecuencia de resonancia mínima**

A raíz de la conclusión anterior, analizamos el caso en que el cilindro de nylon se encontraba en la parte superior del vaciado de la cavidad pero con distintos radios.

Radio del cilindro de nylon (mm)	Longitud (mm)	Factor de calidad	Frecuencia de resonancia (GHz)
2.5	1	4485	3.9818
2.5	5.5	3442	3.9803
5	1	4431	3.9817
5	5.5	2246	3.9674

**Fig. 4.7** Valores del factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función del radio del cilindro de nylon en la parte superior de la cavidad

Como se puede observar en la tabla de la figura 4.7, la variación del factor de calidad aumenta considerablemente con el aumento del radio del cilindro de nylon, no obstante también aumenta la variación de la frecuencia de resonancia. Esto nos lleva a tener que estudiar el diseño particular y decidir que es lo más conveniente en función del uso que se le quiera dar o los

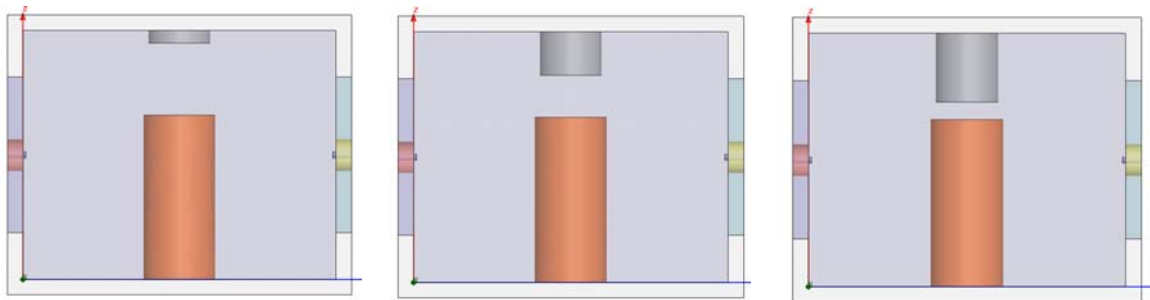
mecanismos de los que se dispone para neutralizar esa modificación en la frecuencia de resonancia del dispositivo.

**+ Radio cilindro nylon → + variación factor de calidad → + variación frecuencia de resonancia**

En definitiva, de los dos mecanismos de control del factor de calidad estudiados y analizados en el apartado 4.2 llegamos a la conclusión de que la adición del aro cilíndrico no sería tan efectiva como la adición de un cilindro de nylon en la parte superior de la cavidad.

### 4.3. Mecanismos de sintonización de la frecuencia de resonancia

En este apartado, se estudiará el efecto que produce en el factor de calidad y la frecuencia de resonancia la adición de un tornillo metálico en la parte superior del vaciado de la cavidad para sintonizar la frecuencia de resonancia. Por lo tanto, el objetivo de este mecanismo será el de restaurar la variación en la frecuencia de resonancia sufrida por la adición del cilindro de nylon.



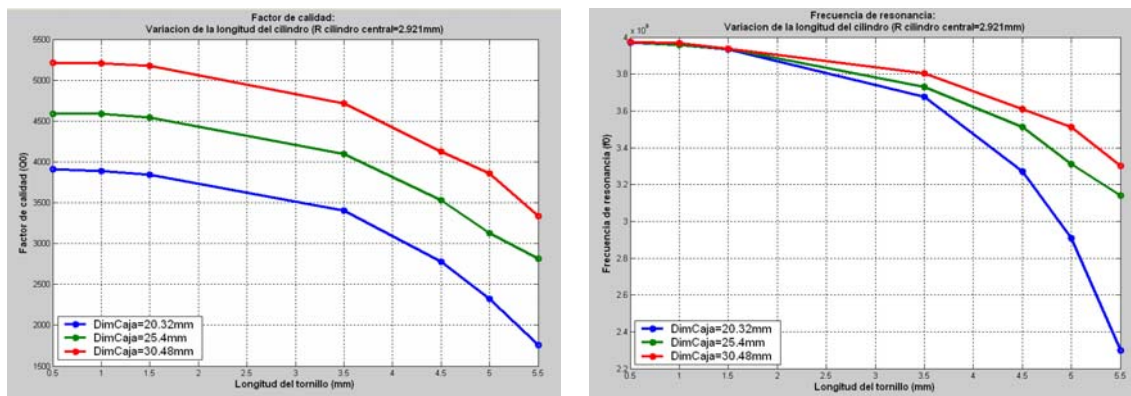
**Fig. 4.8** Representación de la cavidad junto con la adición del tornillo en la parte superior de la cavidad

#### 4.3.1. Tornillo en la parte superior de la cavidad

El desarrollo de este análisis se ha realizado con dos materiales diferentes, con propiedades semejantes, para observar y determinar cuál sería más eficaz en nuestro diseño final. Estos dos materiales son, en primer lugar, el acero inoxidable y en segundo lugar, el aluminio.

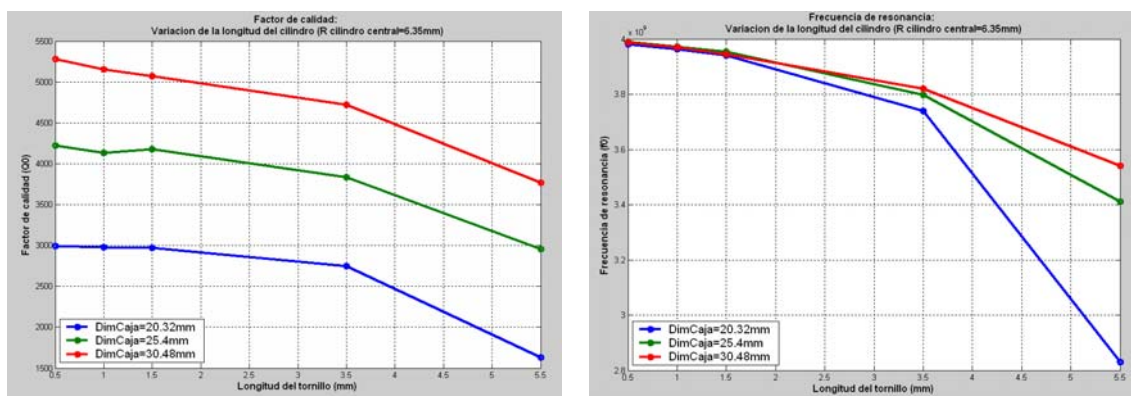
*Material: acero inoxidable*

En las figuras 4.9 y 4.10 podemos observar las gráficas de comportamiento del factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función de la longitud del tornillo y de las seis cavidades elegidas en apartados anteriores.



**Fig. 4.9** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función de la longitud del tornillo con un radio del cilindro central de 2.921 mm.

Las conclusiones que podemos extraer de estas gráficas son: en primer lugar, tanto el factor de calidad como la frecuencia de resonancia disminuyen con el aumento de la longitud del tornillo, es decir cuando el “gap” entre el tornillo de acero y el cilindro de cobre disminuye. No obstante, para longitudes pequeñas, el factor de calidad es casi invariable, comportamiento interesante para el objetivo de este estudio.

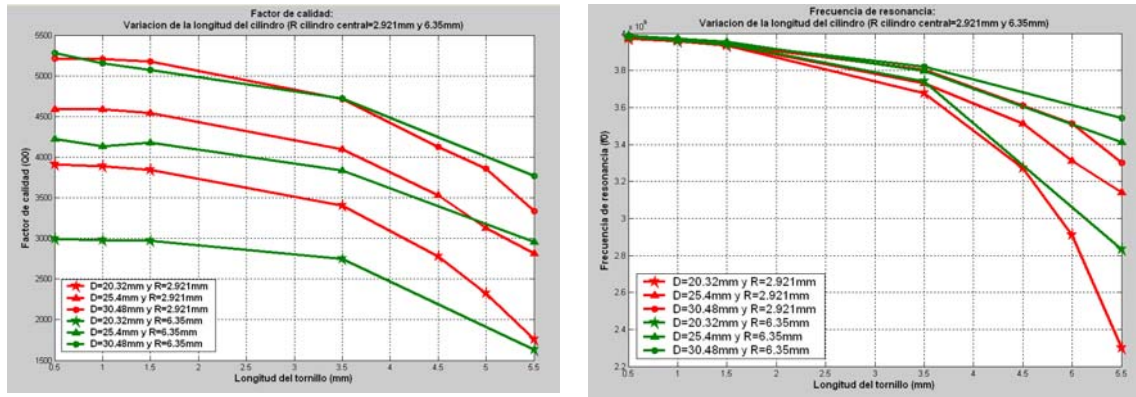


**Fig. 4.10** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función de la longitud del tornillo con un radio del cilindro central de 6.35mm.

En segundo lugar, cuanto mayor es la dimensión de la cavidad, mayores son los valores del rango de las dos variables, por lo tanto:

- + Longitud → - factor de calidad → - frecuencia de resonancia
- Dimensión vaciado → = variación factor de calidad → + variación frecuencia de resonancia
- Longitud baja → = factor de calidad

Finalmente, con el objetivo de determinar cuál de los dos radios nos aporta unos resultados más eficaces, hemos agrupado los valores de las figuras 4.9 y 4.10 en la figura 4.11:



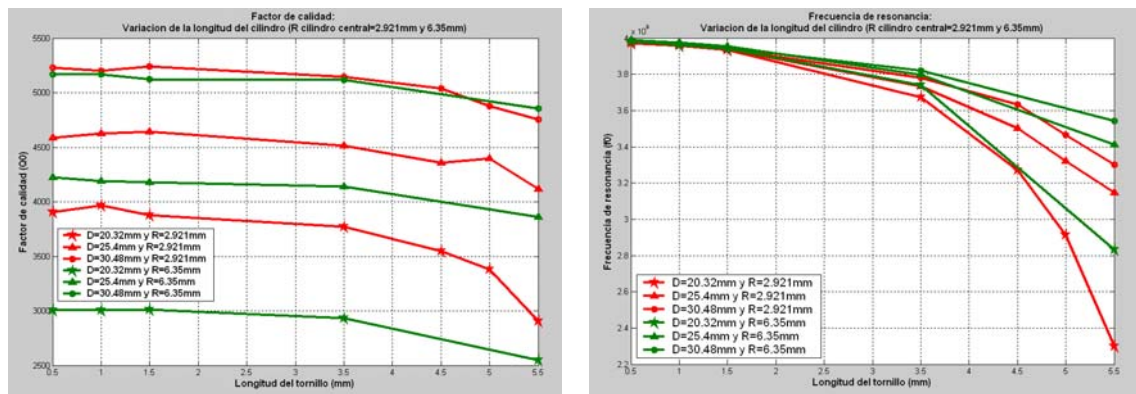
**Fig. 4.11** Comparación entre los resultados de las gráficas de las figuras 4.9 y 4.10

Como podemos observar, las respuestas asociadas a las cavidades con los diferentes radios son muy parecidas, no obstante, para longitudes del tornillo mas grandes, la variación del factor de calidad es menor utilizando un radio del cilindro conductor mayor.

- Longitud baja → +/- radio del cilindro central → = variación factor de calidad → = variación frecuencia de resonancia
- Longitud alta → + radio del cilindro central → - variación factor de calidad → - variación frecuencia de resonancia
- Longitud alta → - radio del cilindro central → + variación factor de calidad → + variación frecuencia de resonancia

*Material: aluminio*

Como podemos ver en la figura 4.12, las conclusiones cualitativas que se pueden extraer para este material son las mismas que para el acero inoxidable:

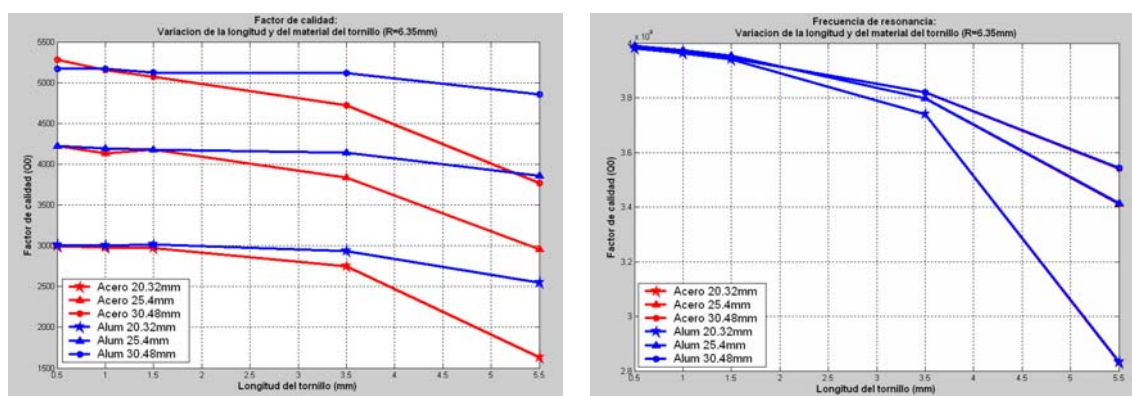


**Fig. 4.12** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función de la longitud del tornillo para los dos radios del cilindro central y comparación entre los dos resultados.

### *Acero inoxidable vs. Aluminio*

Finalmente, con el objetivo de determinar el material que usaremos para el diseño final, hemos unido los resultados obtenidos en los análisis de las cavidades con los radios mayores para cada uno de los dos materiales estudiados.

Como podemos observar en la figura 4.13, el comportamiento de la frecuencia de resonancia en función de la longitud del tornillo y las diferentes dimensiones del vaciado de la cavidad es exactamente igual, con lo que la variable determinante a la hora de elegir el material del tornillo será el factor de calidad:



**Fig. 4.13** Gráficas correspondientes al factor de calidad y a la frecuencia de resonancia en función de la longitud y del material del tornillo para un radio del cilindro central de 6.35mm.

Si analizamos la primera gráfica de la figura 4.13, vemos que para el aluminio, la variación del factor de calidad es mucho menor a lo largo de los diferentes valores de la longitud del tornillo.

Las conclusiones finales de este apartado se resumen en los siguientes puntos:

**Material: Aluminio**  
**Radio del cilindro central: Grande**  
**Dimensión de la cavidad: No influye**

## CAPÍTULO 5. MEDIDA DE CAVIDADES

Éste último capítulo consiste en la aplicación experimental de los análisis realizados en los capítulos anteriores. De esta forma podremos comparar los resultados obtenidos a partir de los dos métodos e identificar los márgenes de error.

Los parámetros que se extraerán de las medidas realizadas serán el factor de calidad y la frecuencia de resonancia de las seis cavidades escogidas en el apartado 2.3.5 del capítulo 2. No obstante, como a causa de algunas restricciones de fabricación, las medidas y las propiedades de los materiales han variado levemente, volveremos a realizar las simulaciones con los nuevos diseños.

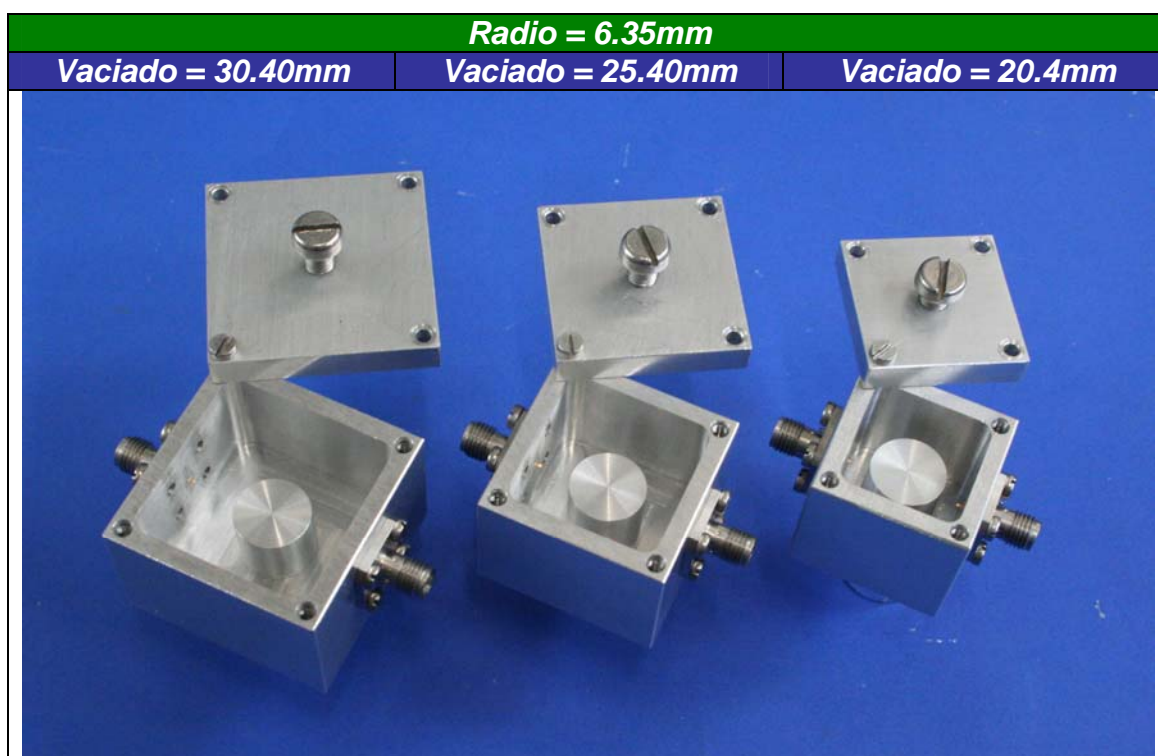
### 5.1. Propiedades de las nuevas cavidades

Las cavidades que utilizaremos para realizar las medidas experimentales están formadas por una caja y un cilindro conductor de aluminio. En primer lugar, la conductividad del aluminio será idéntica en los dos elementos, pero posteriormente deberemos cambiar la del conductor. El valor de la conductividad del aluminio que nos ha dado el fabricante es de  $2.7 \cdot 10^7 \text{ siemens/m}$ . Finalmente, la cavidad también estará formada por dos conectores de entrada y salida de cobre.

Con el objetivo de conseguir un proceso de fabricación más sencillo, optamos por redondear los valores de las dimensiones de las cavidades. Concretamente, como se observa en la figura 5.1, las dimensiones de los vaciados son: 20.4mm, 25.4mm y 30.4mm<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Para más información sobre el valor de las dimensiones de las cavidades, en el anexo D están expuestos los planos que se utilizaron para la fabricación de las cavidades.



**Fig. 5.1** Representación de las seis cavidades fabricadas para su posterior análisis experimental

## 5.2. Análisis experimental

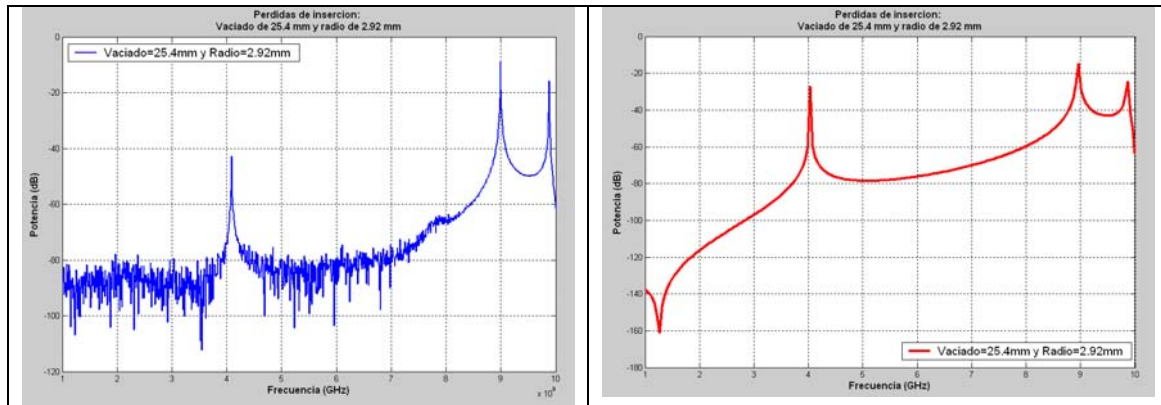
En esta sección se expondrán el tipo de análisis y medidas que se han extraído de las cavidades fabricadas. En primer lugar, presentaremos una descripción detallada del análisis de una de las cavidades y la compararemos con los resultados obtenidos mediante las simulaciones; y en segundo lugar, elaboraremos una tabla con los resultados del factor de calidad y la frecuencia de resonancia obtenidos en el laboratorio con la comparación pertinente al análisis teórico.

### 5.2.1. Análisis detallado de una cavidad

Para obtener las medidas realizadas en las cavidades se ha dispuesto de un analizador de redes del tipo *PNA-X de Agilent Technologies*. La cavidad elegida para el análisis detallado ha sido la de dimensión 20.8mm y radio del conductor de 2.92mm.

En primer lugar, realizamos la medida de las pérdidas de inserción a lo largo de un espectro suficiente como para poder observar los dos primeros modos de trabajo. Las características del aluminio que utilizamos inicialmente en el simulador eran las mismas en la caja y en el conductor, ya que no conocíamos la conductividad real del aluminio del conductor había usado el fabricante.

El resultado no fue satisfactorio. Por un lado, respecto a las pérdidas en función de la frecuencia, como vemos en la figura 5.2, obtuvimos unos resultados muy ajustados a las medidas experimentales; pero por otro lado, cuando extrajimos el factor de calidad equivalente al modo de trabajo, observamos que el margen de erro entre los dos métodos era demasiado grande para considerarse como aceptable (ver figura 5.3).



**Fig. 5.2** Representación gráfica de las pérdidas de inserción. La primera imagen corresponde a las pérdidas obtenidas en el laboratorio y la segunda a las obtenidas en el simulador con una conductividad del aluminio igual.

Cavidades		Simulador		Analizador de redes	
Dimensión vaciado (mm)	Radio del conductor (mm)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia (GHz)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia (GHz)
25.4	2.92	3525	4.0293	2578	4.0896

**Fig. 5.3** Tabla con la comparación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia entre los dos métodos de análisis.

Por ese motivo, utilizamos la ecuación 5.1, para intentar ajustar la conductividad del conductor a la del prototipo:

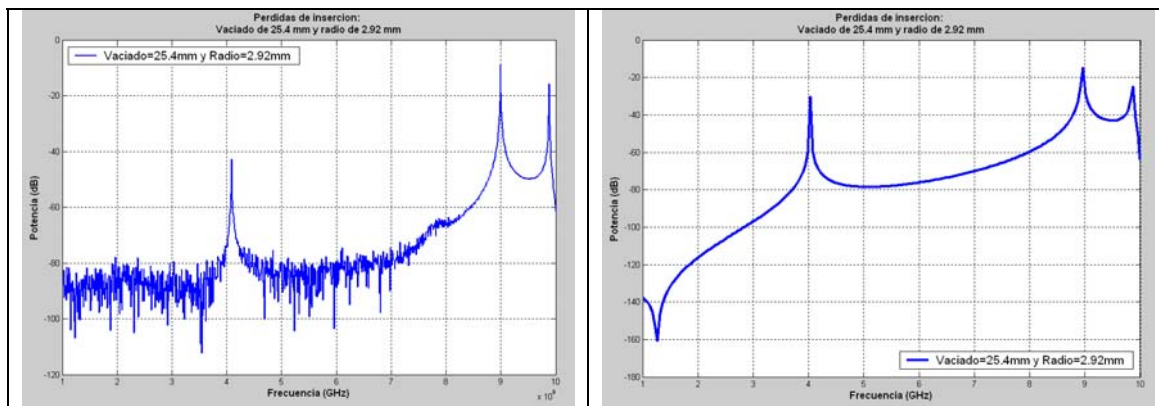
$$Q \propto \sqrt{\sigma} \tag{5.1}$$

Utilizando dicha relación, como el factor de calidad medida con el analizado de redes era de 2578, obtuvimos que la conductividad del aluminio aproximado del cilindro conductor era de  $6.65 \cdot 10^6 \text{ siemens} / m$ .

Una vez obtenida la nueva conductividad del aluminio del conductor, volvimos a realizar las mismas simulaciones para poderlas compararlas nuevamente con las medidas experimentales. Como podemos observar en la figura 5.4, al igual

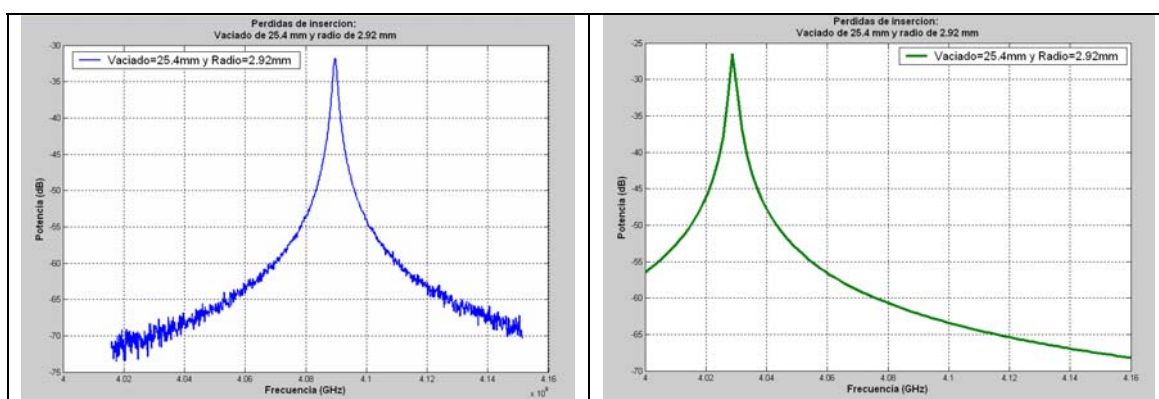


que en el caso anterior, las respuestas extraídas de los dos métodos son aproximadamente iguales, con lo que llegamos a la conclusión de que hasta aquí el cambio de la conductividad no ha causado estragos en los resultados.



**Fig. 5.4** Representación gráfica de las pérdidas de inserción. La primera imagen corresponde a las pérdidas obtenidas en el laboratorio y la segunda a las obtenidas en el simulador con una conductividad del aluminio diferente.

La segunda medida realizada ha sido las pérdidas de inserción centrándonos en la primera frecuencia de resonancia ya que es el modo de trabajo de la cavidad que definimos en el capítulo 2. Como se puede observar en la figura 5.5, donde se presenta la comparación entre las pérdidas obtenidas mediante los dos métodos, existe una leve diferencia entre las dos respuestas que definiremos posteriormente con un margen de error.



**Fig. 5.5** Representación gráfica de las pérdidas de inserción centradas en el modo de trabajo de la cavidad. La primera imagen se corresponde al método experimental y la segunda al teórico.

Finalmente, con los datos obtenidos calculamos el factor de calidad y la frecuencia de resonancia con el objetivo de determinar si el cambio de conductividad ha causada alguna mejora.

Cavidades		Simulador		Analizador de redes	
Dimensión vaciado (mm)	Radio del conductor (mm)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia (GHz)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia (GHz)
25.4	2.92	2263	4.0289	2578	4.0896

**Fig. 5.6** Tabla con la comparación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia entre los dos métodos de análisis.

Para calcular el margen de error entre los factores de calidad y las frecuencias de resonancia que se obtienen de los dos métodos de análisis consideraremos el extraído del experimental como valor de referencia, por lo tanto para calcular el error utilizaremos la ecuación 5.2:

$$|\varepsilon(\%)| = 100 - \left( \text{teorico} \cdot \frac{100}{\text{experimental}} \right) \quad (5.2)$$

Utilizando dicha ecuación obtenemos que para la cavidad analizada el error que obtenemos en el factor de calidad entre los dos métodos es de:

$$|\varepsilon(\%)| = 100 - \left( 2263.0396 \cdot \frac{100}{2578.2540} \right) \Rightarrow |\varepsilon(\%)| = 12.22 \quad (5.3)$$

Como el resultado se encuentra alrededor del 10%, consideramos que la conductividad aplicada al aluminio del conductor es aceptable y en la siguiente sección se aplicará la nueva característica en las otras cavidades.

### 5.2.2. Comparación de resultados

En esta sección se presentarán los resultados de todas las medidas realizadas con el analizador de redes y se compararan con los resultados obtenidos del simulador.

A continuación, en la figura 5.7 y en la figura 5.8 están expuestos los resultados obtenidos mediante los dos métodos de análisis para las seis cavidades definidas y el margen de error que existe entre éstos, tanto para el factor de calidad como para la frecuencia de resonancia.

Cavidades		Simulador		Analizador de redes	
Dimensión vaciado (mm)	Radio del conductor (mm)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia (GHz)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia (GHz)
20.4	2.92	1907	4.0200	2327	4.0593
25.4	2.92	2263	4.0289	2578	4.0896
30.4	2.92	2698	4.0577	3210	4.1145
20.4	6.35	1536	4.0007	1599	4.0223
25.4	6.35	2216	4,0214	2128	4,0528
30.4	2.92	2839	4.0303	2773	4.0572

**Fig. 5.7** Tabla con la comparación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia entre los dos métodos de análisis para todas las cavidades

Cavidades		Margen de error (%)	
Dimensión vaciado (mm)	Radio del conductor (mm)	Factor de calidad	Frecuencia resonancia
20.4	2.92	18,049	0,968
25.4	2.92	12,226	1,484
30.4	2.92	15,969	1,378
20.4	6.35	3,946	0,537
25.4	6.35	4,158	0,774
30.4	6.35	2,384	0,661

**Fig. 5.8** Tabla con el margen de error existente entre las medidas extraídas mediante las simulaciones y las obtenidas mediante el analizador de redes.

Como podemos observar, los resultados respecto a las frecuencias de resonancia ha sido muy satisfactorio, ya que para las cavidades con el conductor de radio pequeño se han obtenido márgenes de error por debajo del 2% y con las de radio grande, menor al 1%. No obstante, donde observamos unos resultados mas variados son los referentes al factor de calidad. Como se ve en la tabla de la figura 5.8, el margen de error varia mucho si comparamos las cavidades cuyos conductores tienen un radio pequeño y los que tienen uno grande. Se obtienen muy buenos resultados para el caso de los radios grandes y un resultado aceptable (alrededor del 10%) para radios pequeños.

La razón por la cual exista esta diferencia en el margen de error del factor de calidad es que probablemente el valor real de la conductividad del aluminio a estas frecuencias que se ha utilizado para simular la caja no sea exactamente la especificada por el fabricante. Para verificar esto, el siguiente paso a realizar debería ser modificar las conductividades, tanto del aluminio de la caja como el del conductor, hasta obtener en las simulaciones unos resultados aproximados a los reales.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A lo largo de la elaboración de este proyecto sobre el análisis y diseño de filtros combline confeccionados con cavidades, hemos extraído diversas conclusiones y relaciones dependiendo de parámetros como las dimensiones, el material o la adición de elementos externos entre otros.

En el primer estudio observamos la variación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función de las dimensiones de la caja de la cavidad y del cilindro conductor. Las conclusiones más relevantes que pudimos extraer fueron: en primer lugar, que un aumento de las dimensiones de la caja supone un aumento del factor de calidad y una disminución de la frecuencia de resonancia; y en segundo lugar, que dada una dimensión de cavidad fija existe siempre un radio del cilindro conductor óptimo que proporciona el máximo factor de calidad.

Por otro lado, también obtuvimos conclusiones sobre el material y el comportamiento de las cavidades a una frecuencia de resonancia concreta, ya que con una caja de cobre en vez de aluminio obteníamos un aumento del factor de calidad debido al incremento en la conductividad, pero en cambio la frecuencia de resonancia se mantenía constante. También como regla general se observa que un aumento de la dimensión de la caja comportaba una disminución de la altura del conductor para mantener la misma frecuencia de resonancia.

En el segundo estudio observamos los diversos acoplamientos que podíamos encontrar en cavidades. Respecto al acoplamiento a través de conectores coaxiales, el aumento de la dimensión del vaciado se asociaba a una disminución del factor de acoplamiento y el ancho de banda; y respecto al acoplamiento a través de ranuras, obtuvimos que la posición central del vaciado y que un aumento de la anchura provoca un aumento en el factor de acoplamiento. También analizamos el acoplamiento externo variando la longitud del conector de entrada de la cavidad. Las conclusiones principales fueron que los valores y la variación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia aumentaban con el aumento de las dimensiones del vaciado.

En el tercer estudio observamos la variación del factor de calidad y la frecuencia de resonancia en función de la adición de diferentes elementos externos con el objetivo de diseñar un sistema de sintonización de estos dos parámetros.

Respecto al control del factor de calidad llegamos a la conclusión de que el sistema óptimo consistía en la adición de un cilindro de nylon en la parte superior del vaciado, ya que obteníamos una variación del factor de calidad máximo en función de una variación de la frecuencia de resonancia mínima.

Respecto a la sintonización de la frecuencia de resonancia llegamos a la conclusión de que el sistema óptimo consistía en la adición de un tornillo de aluminio en la parte superior del vaciado (alineado con el conductor) y que, se

obtenían mejores resultados con un radio grande del conductor independientemente de las dimensiones del vaciado.

Finalmente, en el cuarto estudio, donde comparamos los resultados experimentales y teóricos de las cavidades estudiadas obtuvimos que las conductividades que utilizábamos para el aluminio de la caja y el conductor no eran correctas (son diferentes aleaciones de aluminio) pero si suficientemente aproximadas como para obtener unos márgenes de error aceptables entre los dos métodos de medida.

Una vez finalizado el proyecto hemos evaluado posibles líneas de futuro para continuarlo:

- Estudiar el acoplamiento resistivo entre cavidades para diseñar un filtro combline con pérdidas y obtener una mejora en la selectividad del filtro y en la planitud de sus pérdidas de inserción.
- Estudiar la aplicación del mapeo que realiza el software HFSS en los diseños para mejorar la precisión de las simulaciones.
- Diseñar un filtro combline con varias cavidades teniendo en cuenta el estudio sobre acoplamientos realizado en este proyecto.
- Estudiar con más detalle el comportamiento de las cavidades en función de la variación de las conductividades de un mismo material o la variación del material.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster. "Coupled Resonator Circuits". Chap. 8 en *Microstrip Filters for RF/Microwave applications*, pp. 244-263, Wiley Inter-Science, 2001.
- [2] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster. "Lowpass and Bandpass Filters". Chap. 5 en *Microstrip Filters for RF/Microwave applications*, pp. 133-147, Wiley Inter-Science, 2001.
- [3] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster. "Lowpass and Bandpass Filters". Chap. 5 en *Microstrip Filters for RF/Microwave applications*, pp. 133, Wiley Inter-Science, 2001.
- [4] David M. Pozar. "Microwave Engineering", John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1998.
- [5] Ian Hunter. "TEM transmission line filters". Chap. 5 en *Theory and design of microwave filters*, pp. 167-198, IEE Electromagnetic waves series 48, 2001.
- [6] Ian Hunter. "TEM transmission line filters". Chap. 5 en *Theory and design of microwave filters*, pp. 183, IEE Electromagnetic waves series 48, 2001.
- [7] Ian Hunter. "TEM transmission line filters". Chap. 5 en *Theory and design of microwave filters*, pp. 194, IEE Electromagnetic waves series 48, 2001.
- [8] Jordi Escoda I Ramon, "Estructures fractals de trèvol per ressonadors duals", Trabajo Final de Carrera UPC Castelldefels, 2008.
- [9] Mahmoud El Sabbagh, Kawthar A. Zaki, Hui-Wen Yao, Ming Yu. "Full-Wave Analysis of Coupling Between Combline Resonators and Its Application to Combline Filters With Canonical Configurations", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, VOL. 49, NO. 12, 2001.
- [10] Z. Zakaria, I.C. Hunter, A.C. Guyette. "Design of Coaxial Resonator Filter with Nonuniform Dissipation", *Institute of Microwaves and Photonics, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds*, 2008
- [11] Ming Yu, Wai-cheung Tang, Alastair Malarky, Van Dokas, Richard Cameron, Ying Wang. "Predistorsion Technique for Cross-Coupled Filters and Its Application to Satellite Communication Systems", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, VOL. 51, NO. 12, 2003.
- [12] Ming Yu, Vahid Miraftab, "Shrinking Microwave Filters", *IEEE microwave magazine*, October 2008.
- [13] Ming Yu, Vahid Miraftab, "Shrinking Microwave Filters", *IEEE microwave magazine*, pp. 46, October 2008.

[14] Ming Yu, Vahid Miraftab, "Shrinking Microwave Filters", IEEE microwave magazine, pp. 53, October 2008.

[15] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster. "Coupled Resonator Circuits". Chap. 8 en Microstrip Filters for RF/Microwave applications, pp. 257-258, Wiley Inter-Science, 2001.

[16] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster. "Coupled Resonator Circuits". Chap. 8 en Microstrip Filters for RF/Microwave applications, pp. 258-261, Wiley Inter-Science, 2001.

[17] Jia-Sheng Hong and Michael J. Lancaster. "Coupled Resonator Circuits". Chap. 8 en Microstrip Filters for RF/Microwave applications, pp. 266, Wiley Inter-Science, 2001.

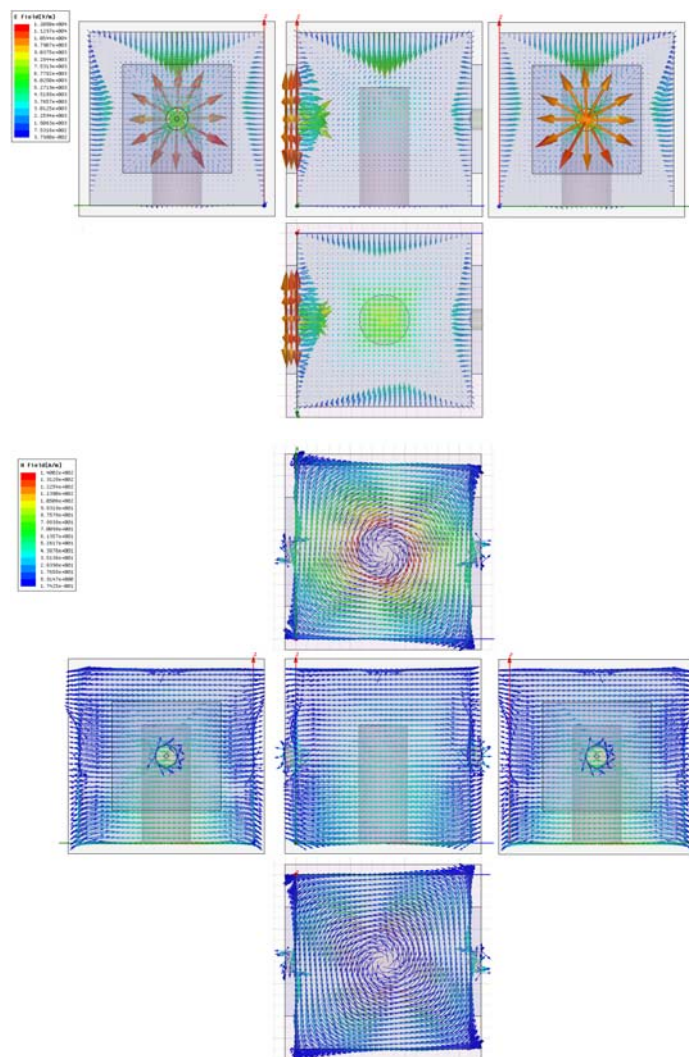
## ANEXO A

### Simulación de los campos eléctrico y magnético para otros modos de trabajo de las cavidades

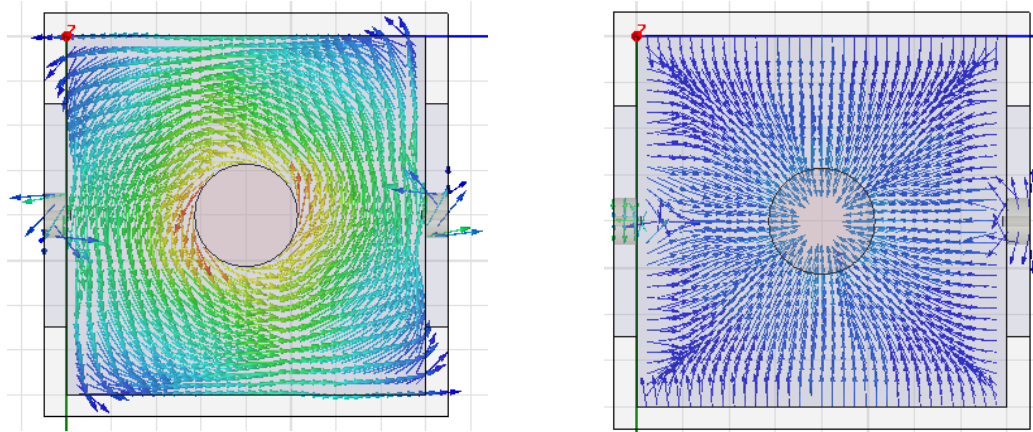
En este anexo se mostrarán las simulaciones de los campos eléctrico y magnético para todos los modos de trabajo de las cavidades encontrados en el capítulo 2. Concretamente en la figura 2.1 se observan las pérdidas de inserción de la cavidad a lo largo del espectro y podemos identificar los modos cuyos campos se expresan a continuación.

Para cada modo de trabajo, en primer lugar observaremos los campos alrededor de la cavidad y en segundo lugar, en un plano horizontal concreto situado en el punto medio de la cavidad. Como podremos observar, solo el modo de trabajo correspondiente a la primera frecuencia de resonancia presentará los campos indicados en la teoría.

#### ***Frecuencia de trabajo 1: 3.991739 GHz***



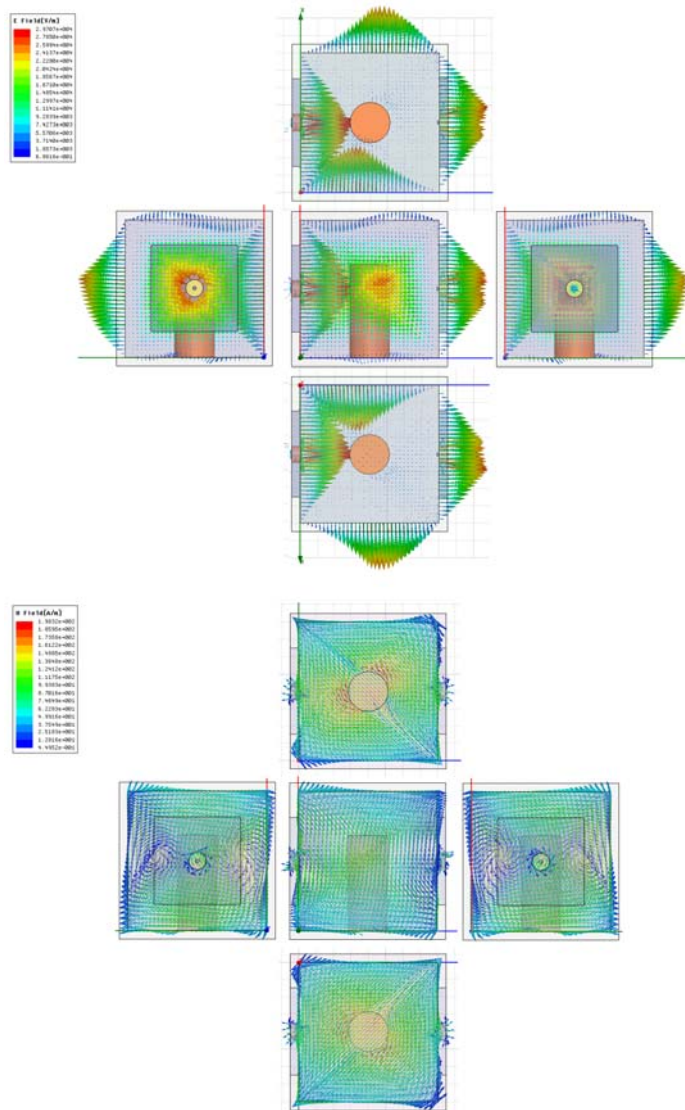


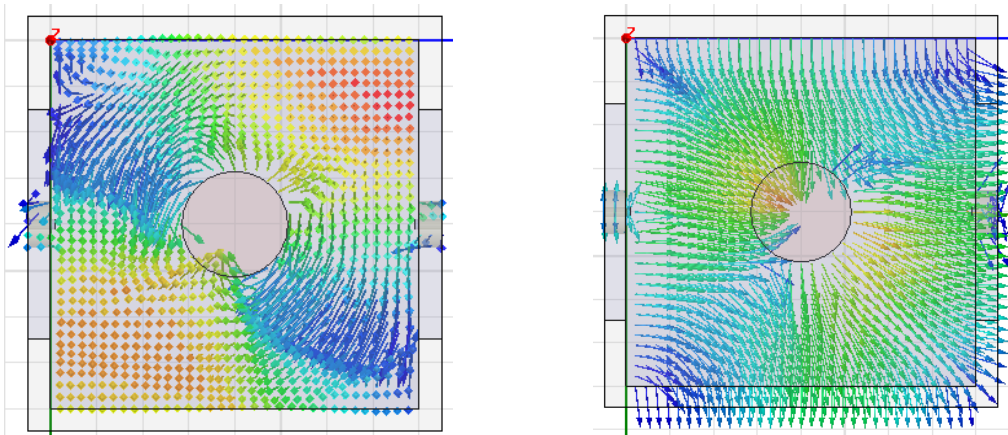


Campo magnético

Campo eléctrico

**Frecuencia de trabajo 2: 9.506474 GHz**

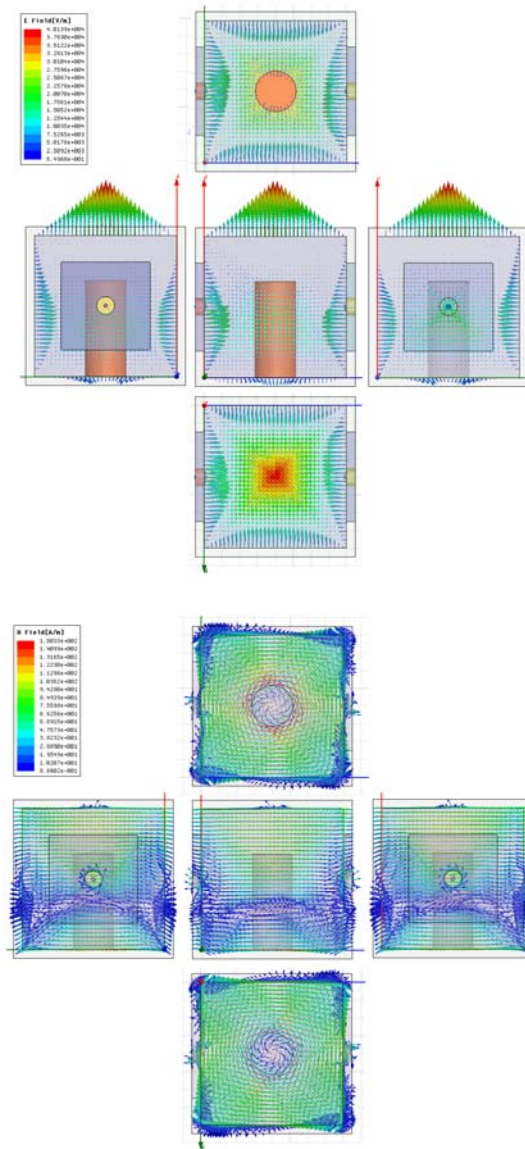


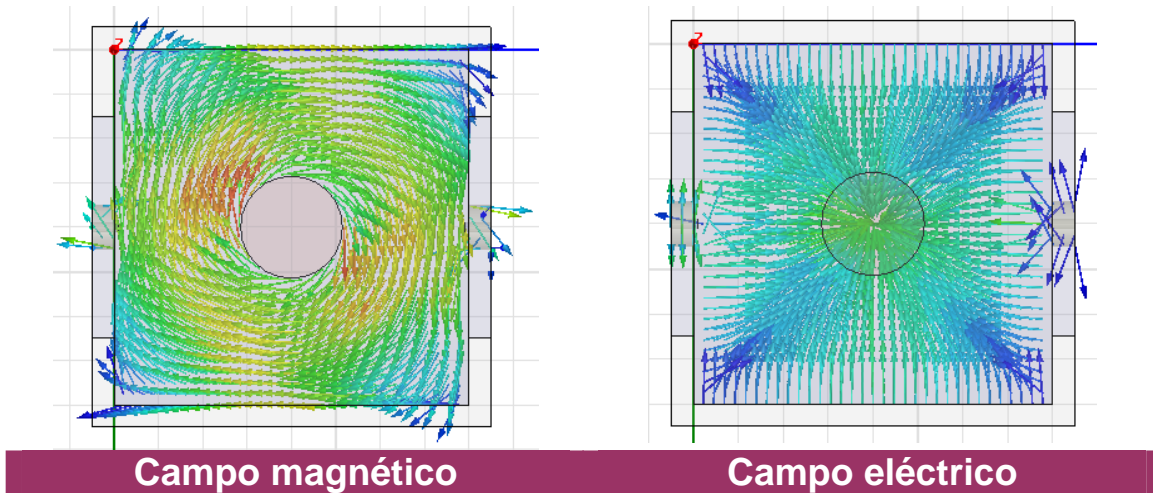


Campo magnético

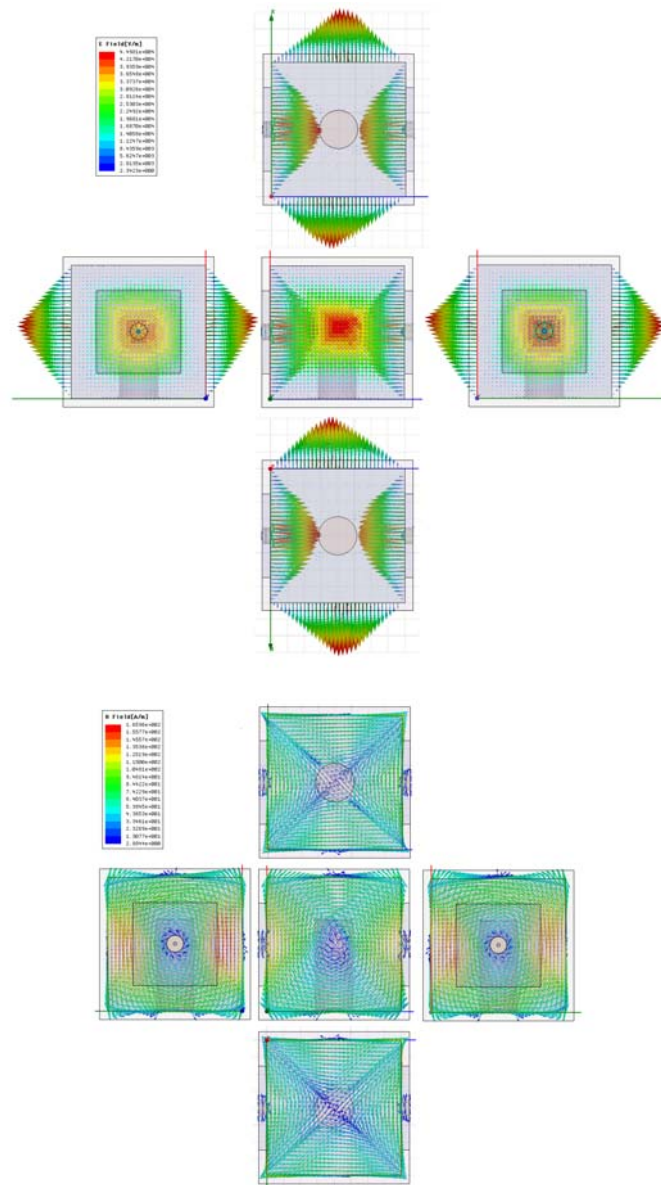
Campo eléctrico

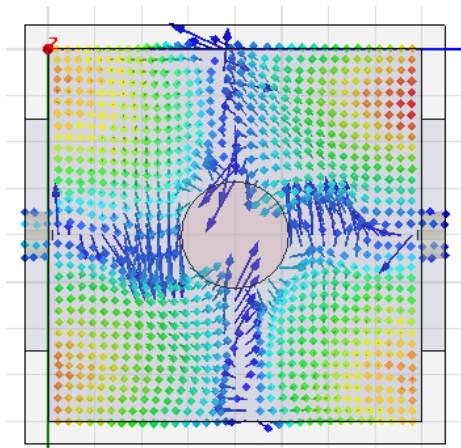
**Frecuencia de trabajo 3: 10.9391 GHz**



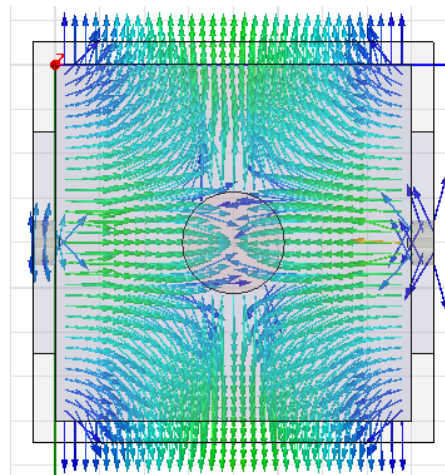


**Frecuencia de trabajo 4: 12.937097 GHz**





**Campo magnético**



**Campo eléctrico**

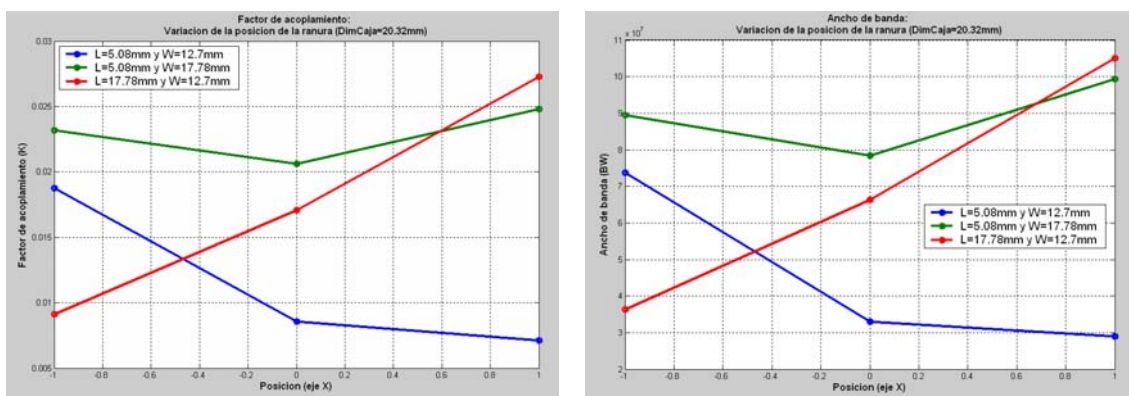
## ANEXO B

### Simulaciones del acoplamiento entre dos cavidades con la variación de las dimensiones y posición de la ranura

En este anexo se mostrarán otros tres análisis del acoplamiento entre dos cavidades mediante la inserción de una ranura. Los análisis están realizados con la ranura colocada en la parte superior y en la parte inferior del vaciado y con dos de las seis cavidades, ya que utilizaremos únicamente el radio de 2.92mm.

#### B1. Vaciado de 20.32mm y ranura en la parte inferior

En la figura B1 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación del factor de acoplamiento y el ancho de banda de trabajo en función de la posición de la ranura en el eje X.



**Fig. B1** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la posición de la ranura

La conclusión que se puede extraer de estas dos gráficas es que colocando la ranura, independientemente de las dimensiones, en la parte central de la cavidad se obtiene una disminución del factor de acoplamiento y del ancho de banda respecto los extremos derecho e izquierdo:

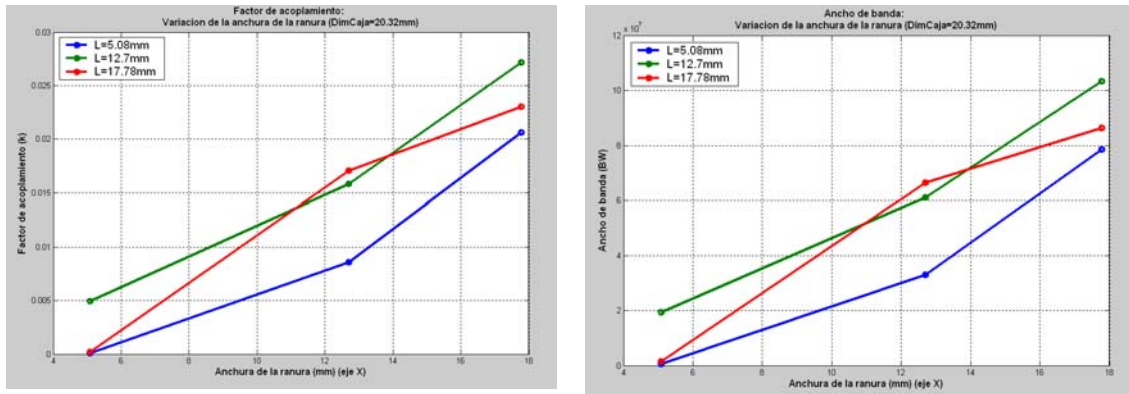
***Posición central → - factor de acoplamiento → - ancho de banda***

En realidad, cualitativamente, y a excepción de la traza roja, podríamos establecer la hipótesis de que el comportamiento de la cavidad es inverso a cuando la ranura se encuentra en la parte superior.

En la figura B2 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la anchura de la ranura. La conclusión que se puede extraer es que,

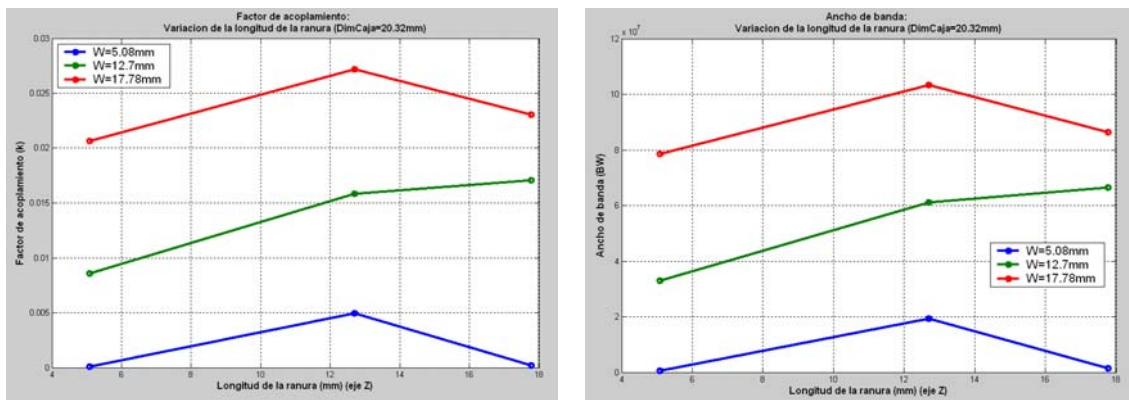
cualitativamente, a medida que la anchura de la ranura aumenta, también lo hacen el factor de acoplamiento y el ancho de banda, por lo tanto:

**+ Anchura  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento  $\rightarrow$  + Ancho de banda**



**Fig. B2** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la anchura de la ranura

Finalmente, en la figura B3 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la longitud de la ranura.



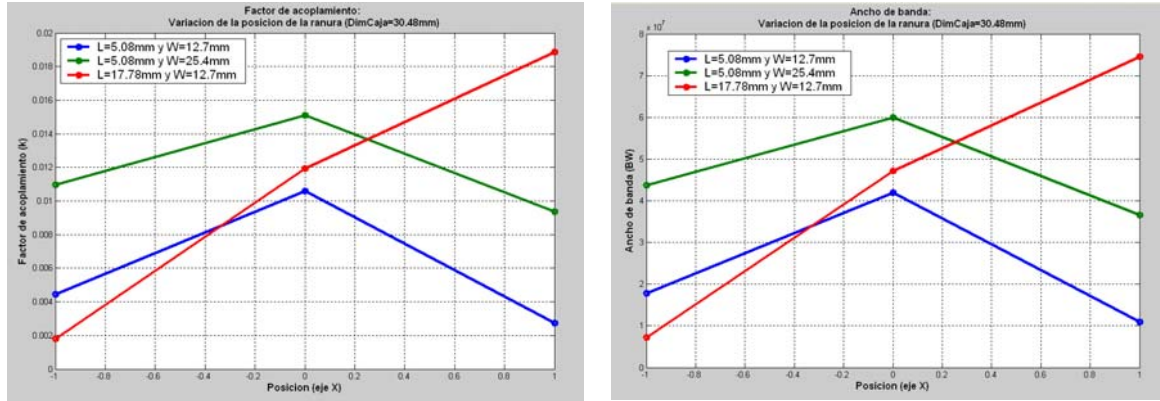
**Fig. B3** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la longitud de la ranura

En este caso, podríamos interpretar que para longitudes inferiores a 13mm, el factor de acoplamiento aumenta con el aumento de la dimensión, pero en cambio, a partir de esa longitud dicha variable disminuye con el aumento de ésta, por lo tanto:

**Longitud < 13mm  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento  $\rightarrow$  + ancho de banda**  
**Longitud > 13mm  $\rightarrow$  - factor de acoplamiento  $\rightarrow$  - ancho de banda**

## B2. Vaciado de 30.48mm y ranura en la parte superior

En la figura B4 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación del factor de acoplamiento y el ancho de banda en función de la posición de la ranura en el eje X.



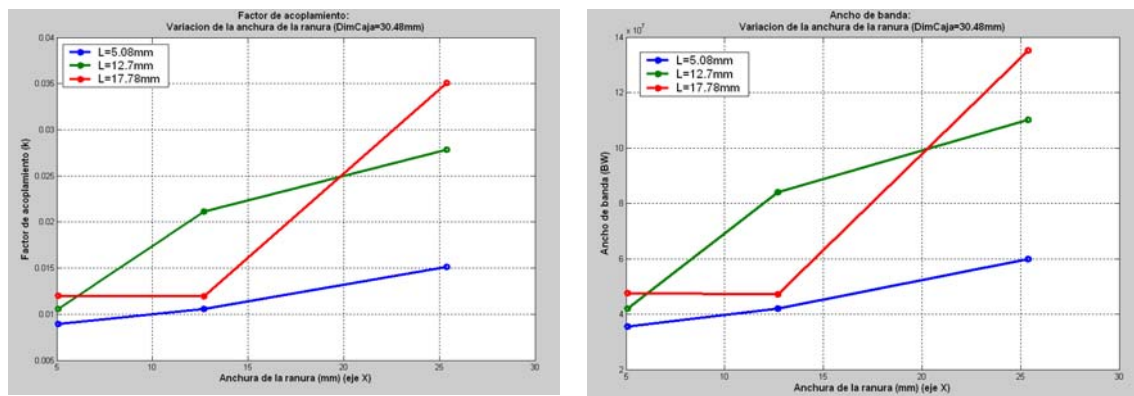
**Fig. B4** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la posición de la ranura

La conclusión que se puede extraer de la figura B4 es que colocando la ranura, independientemente de las dimensiones, en la parte central de la cavidad se obtiene un factor de calidad y un ancho de banda más elevados que en los extremos derecho e izquierdo (a excepción de la muestra roja):

***Posición central → + factor de acoplamiento → + ancho de banda***

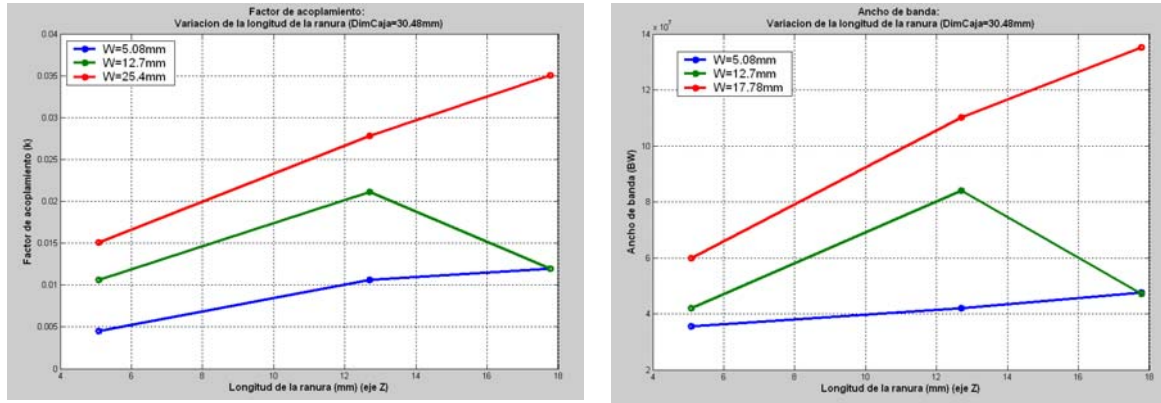
En la figura B5 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la anchura de la ranura. La conclusión que se puede extraer es que, cualitativamente, a medida que la anchura de la ranura aumenta, también lo hacen el factor de acoplamiento y el ancho de banda, por lo tanto:

***+ Anchura → + factor de acoplamiento → + Ancho de banda***



**Fig. B5** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la anchura de la ranura

Finalmente, en la figura B6 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la longitud de la ranura.



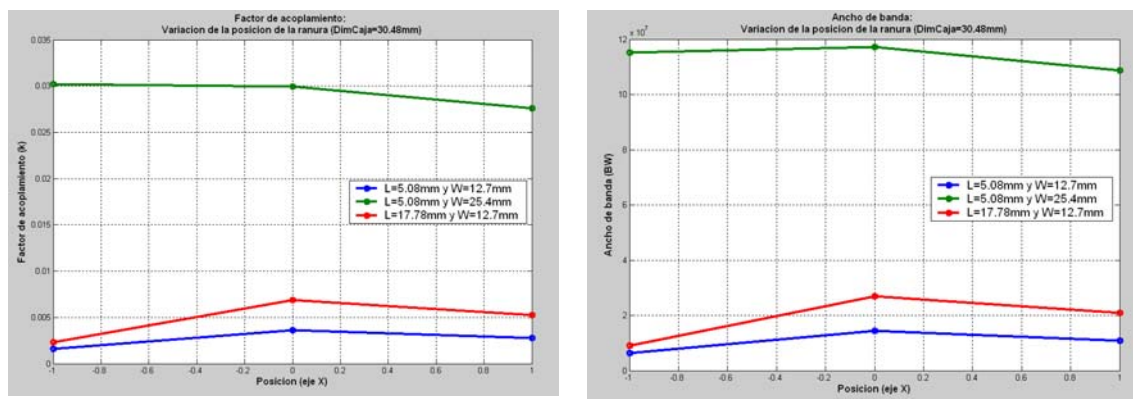
**Fig. B6** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la longitud de la ranura

En este caso, suponiendo que la muestra verde sigue el mismo comportamiento que las otras dos muestras, la conclusión que podemos extraer es que el aumento de la longitud de la ranura produce un aumento en el factor de calidad y en el ancho de banda, por lo tanto:

$$+ \text{Longitud} \rightarrow + \text{factor de acoplamiento} \rightarrow + \text{ancho de banda}$$

**B3. Vaciado de 30.48mm y ranura en la parte inferior**

En la figura B7 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación del factor de acoplamiento y el ancho de banda en función de la posición de la ranura en el eje X.





**Fig. B7** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la posición de la ranura

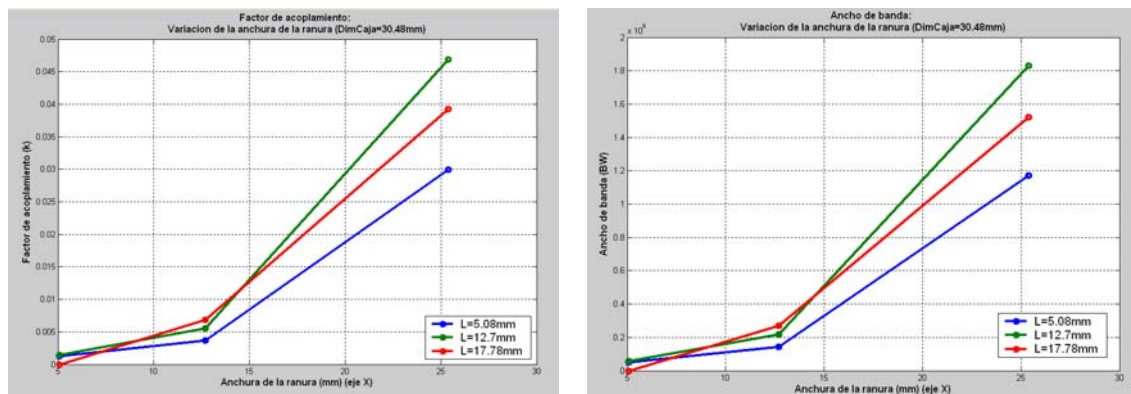
La conclusión que se puede extraer de la figura B7 es que colocando la ranura, independientemente de las dimensiones, en la parte central de la cavidad se obtiene un pequeño aumento del factor de calidad y del ancho de banda respecto los extremos derecho e izquierdo.

**Posición central  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento (leve)  $\rightarrow$  + ancho de banda**

Además observamos un aumento considerable de las variables al aumentar la anchura de la ranura.

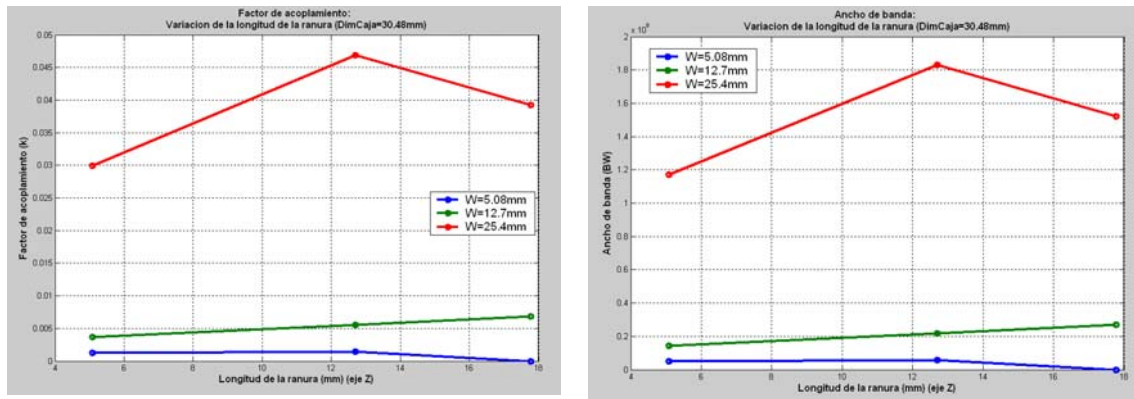
En la figura B8 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la anchura de la ranura. La conclusión que se puede extraer es que, cualitativamente, a medida que la anchura de la ranura aumenta, también lo hacen el factor de acoplamiento y el ancho de banda. No obstante, el aumento de las variables es más considerable a partir de los 13mm, por lo tanto:

**Anchura < 13mm  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento (leve)  $\rightarrow$  + Ancho de banda**  
**Anchura > 13mm  $\rightarrow$  + factor de acoplamiento (grande)  $\rightarrow$  + Ancho de banda**



**Fig. B8** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la anchura de la ranura

Finalmente, en la figura B9 podemos observar las gráficas correspondientes a la variación de la longitud de la ranura.



**Fig. B9** Gráficas correspondientes al factor de acoplamiento y al ancho de banda en función de la longitud de la ranura

En este caso, podríamos interpretar que para longitudes inferiores a 13mm, el factor de acoplamiento aumenta con el aumento de la dimensión (aunque levemente para anchuras pequeñas), pero en cambio, a partir de esa longitud dicha variable disminuye con el aumento de ésta, por lo tanto:

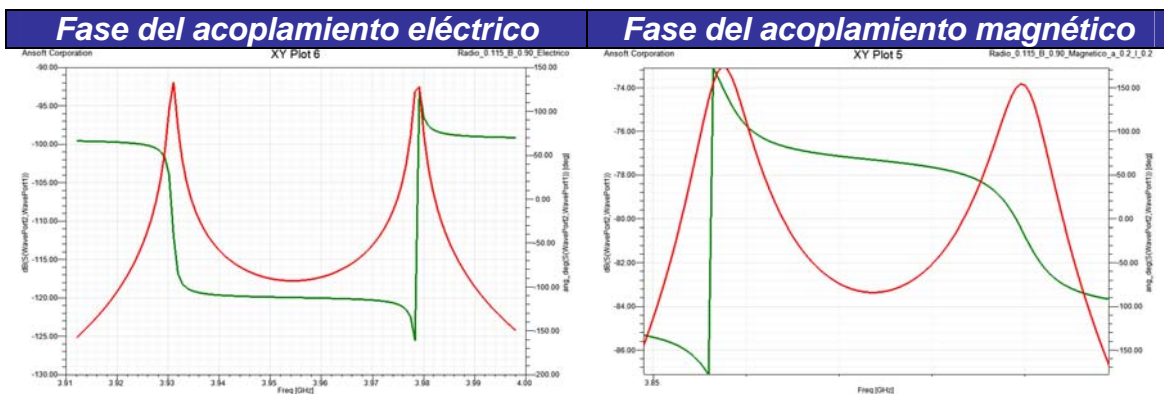
***Longitud < 13mm → + factor de acoplamiento → + ancho de banda***  
***Longitud > 13mm → - factor de acoplamiento → - ancho de banda***

# ANEXO C

## Tipos de acoplamientos

A continuación se puede observar el tipo de acoplamiento (eléctrico o magnético) de cada uno de los análisis con los que se han elaborado las diferentes gráficas tanto del capítulo 3 como del anexo B.

Podemos saber el tipo de acoplamiento que presenta cada elemento por la fase que presenta cada comportamiento. En general nos podremos encontrar con dos tipos de fase, una para cada acoplamiento:



Entonces, la tabla de asignación presenta la siguiente forma:

Dimensiones (mm)	Pos. ranura	Unión por conector			Acoplamiento (fase)	
					Eléctrico	Magnético
30.4	P. Superior	Unión por conector				
		Unión por ranura				
		Por longitud y ancho				
		Longitud (mm)	Ancho (mm)	Posición		
		5.08	5.08	Central		
		5.08	12.7	Central		
		5.08	1,0	Central		
		12.7	5.08	Central		
		12.7	12.7	Central		
		12.7	1,0	Central		
		17.78	5.08	Central		
		17.78	12.7	Central		
		17.78	1,0	Central		
		Por posición				
Longitud (mm)	Ancho (mm)	Posición				
5.08	12.7	Izquierda				
5.08	12.7	Central				

		5.08	12.7	Derecha			
		17.78	12.7	Izquierda			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	12.7	Derecha			
		5.08	1,0	Izquierda			
		5.08	1,0	Central			
		5.08	1,0	Derecha			
<b>Dimensiones (mm)</b>	<b>Pos. ranura</b>	<b>Unión por conector</b>					
30,4	P. inferior						
		<b>Unión por ranura</b>					
		<b>Por longitud y ancho</b>					
		<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Posición</b>			
		5.08	5.08	Central			
		5.08	12.7	Central			
		5.08	1,0	Central			
		12.7	5.08	Central			
		12.7	12.7	Central			
		12.7	1,0	Central			
		17.78	5.08	Central			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	1,0	Central			
		<b>Por posición</b>					
		<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Posición</b>			
		5.08	12.7	Izquierda			
		5.08	12.7	Central			
		5.08	12.7	Derecha			
		17.78	12.7	Izquierda			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	12.7	Derecha			
		5.08	1,0	Izquierda			
		5.08	1,0	Central			
		5.08	1,0	Derecha			
<b>Dimensiones (mm)</b>	<b>Pos. ranura</b>	<b>Unión por conector</b>					
20.4	P. Superior						
		<b>Unión por ranura</b>					
		<b>Por longitud y ancho</b>					
		<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Posición</b>			
		5.08	5.08	Central			
		5.08	12.7	Central			
		5.08	17.78	Central			
		12.7	5.08	Central			
		12.7	12.7	Central			
		12.7	17.78	Central			
		17.78	5.08	Central			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	17.78	Central			
		<b>Por posición</b>					
		<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Posición</b>			
		5.08	12.7	Izquierda			
		5.08	12.7	Central			

		5.08	12.7	Derecha			
		17.78	12.7	Izquierda			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	12.7	Derecha			
		5.08	17.78	Izquierda			
		5.08	17.78	Central			
		5.08	17.78	Derecha			
<b>Dimensiones (mm)</b>	<b>Pos. ranura</b>	<b>Unión por conector</b>					
20.4	P. Inferior						
		<b>Unión por ranura</b>					
		<b>Por longitud y ancho</b>					
		<b>Longitud (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Posición</b>			
		5.08	5.08	Central			
		5.08	12.7	Central			
		5.08	17.78	Central			
		12.7	5.08	Central			
		12.7	12.7	Central			
		12.7	17.78	Central			
		17.78	5.08	Central			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	17.78	Central			
		<b>Por posición</b>					
		<b>Longitud (in)</b>	<b>Ancho (in)</b>	<b>Posición</b>			
		5.08	12.7	Izquierda			
		5.08	12.7	Central			
		5.08	12.7	Derecha			
		17.78	12.7	Izquierda			
		17.78	12.7	Central			
		17.78	12.7	Derecha			
		5.08	17.78	Izquierda			
		5.08	17.78	Central			
		5.08	17.78	Derecha			

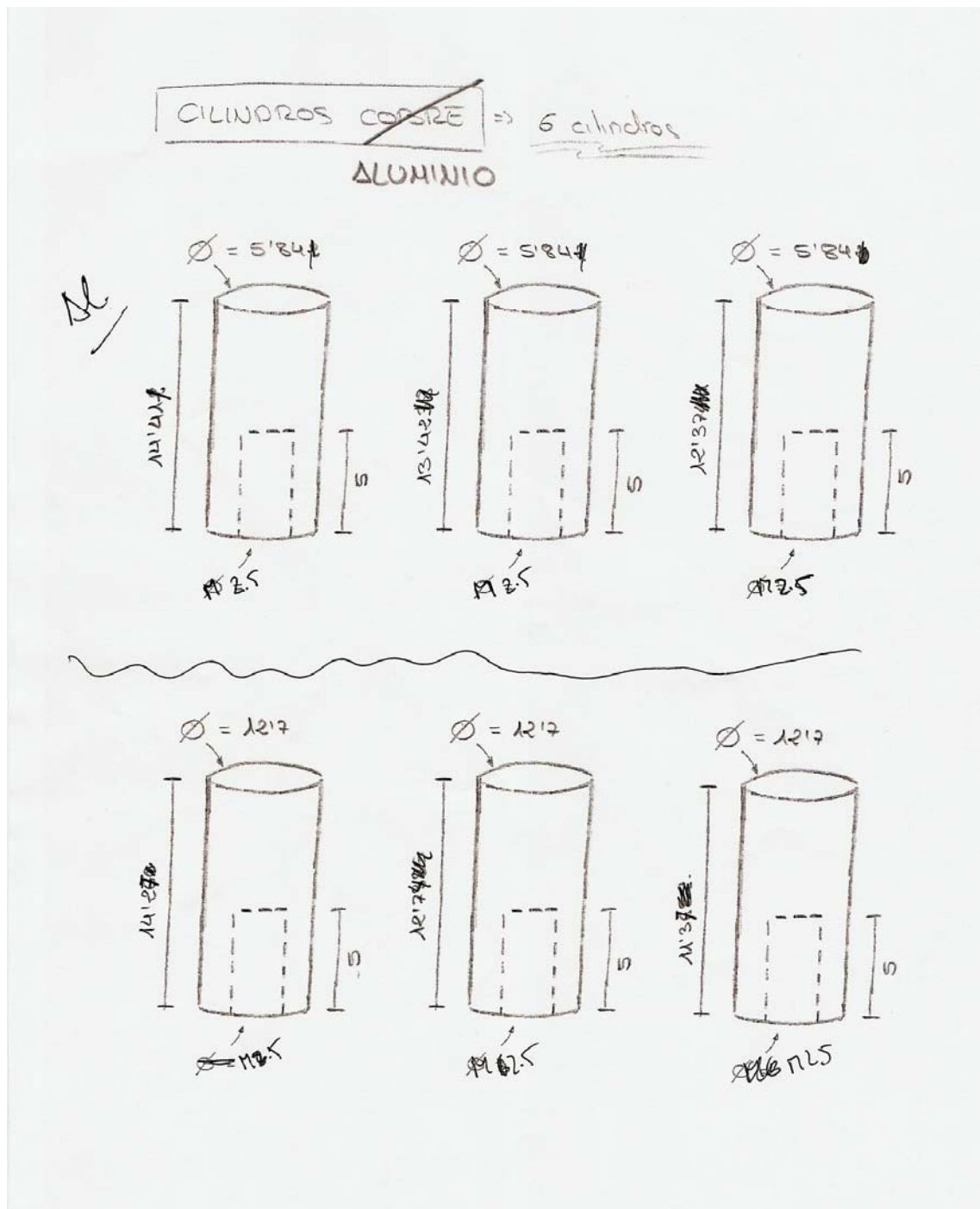
La conclusión que extraemos, como se ha escrito en el capítulo 3 del proyecto, es que si unimos las cavidades mediante los conectores de entrada y salida obtendremos un acoplamiento eléctrico entre éstas; en cambio, si la unión se realiza mediante una ranura, independientemente de la posición o dimensiones, obtendremos un acoplamiento magnético.

## ANEXO D

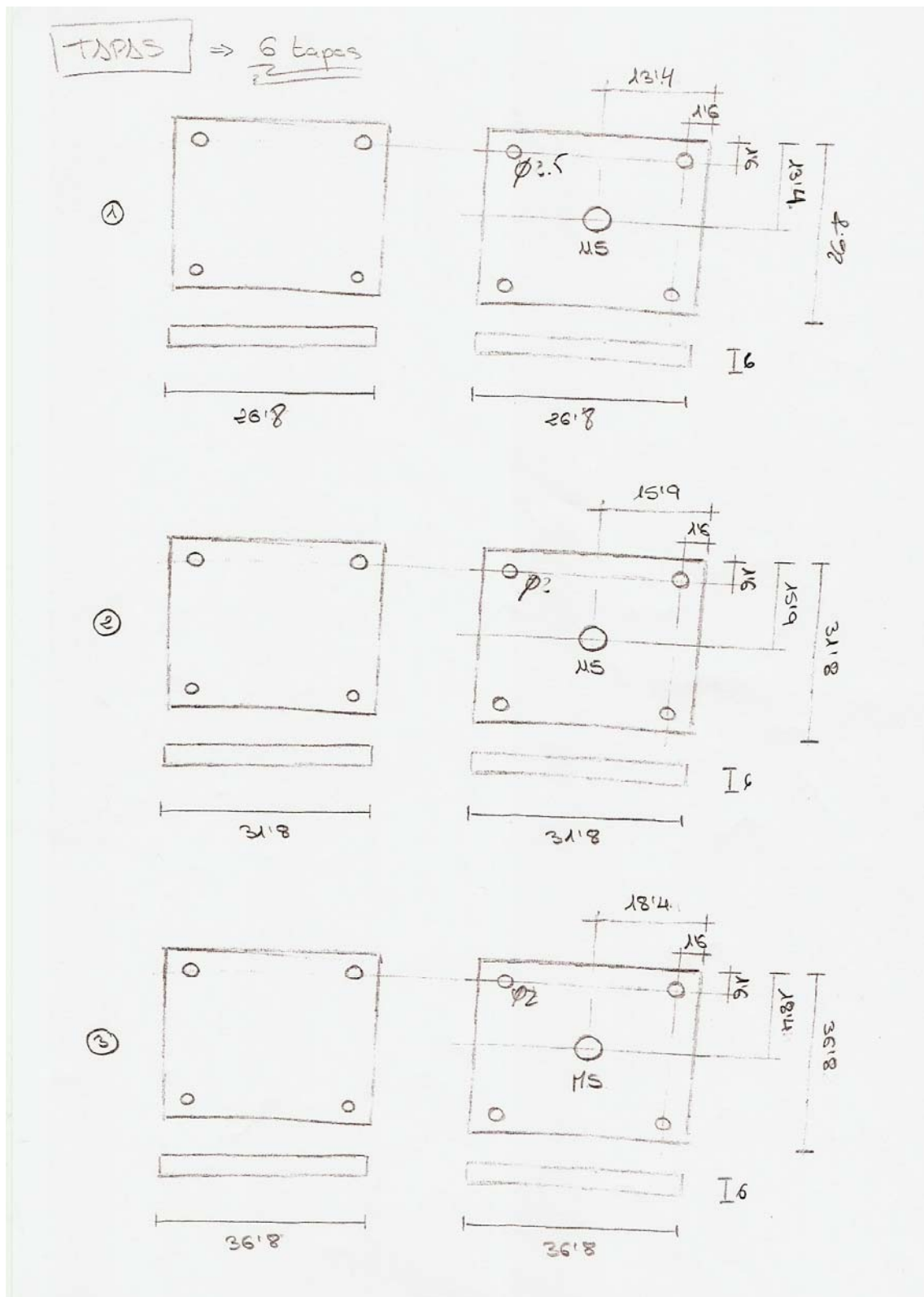
### Planos y medidas de los prototipos fabricados

En este anexo se mostrarán los planos entregados al fabricante con la estructura de las cavidades y las medidas correspondientes a cada una de ellas.

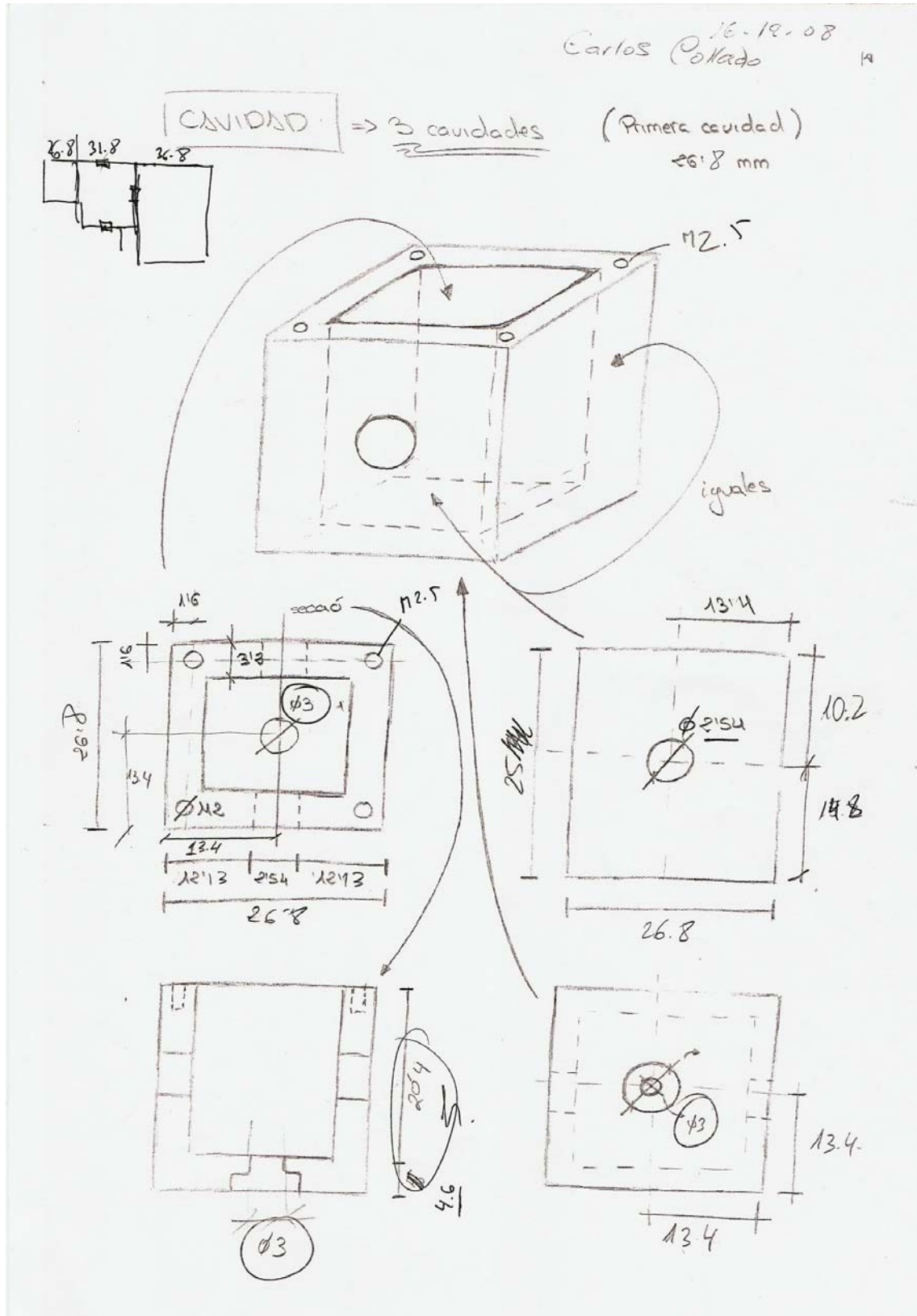
#### Cilindros de aluminio



### Tapas de aluminio de las cavidades

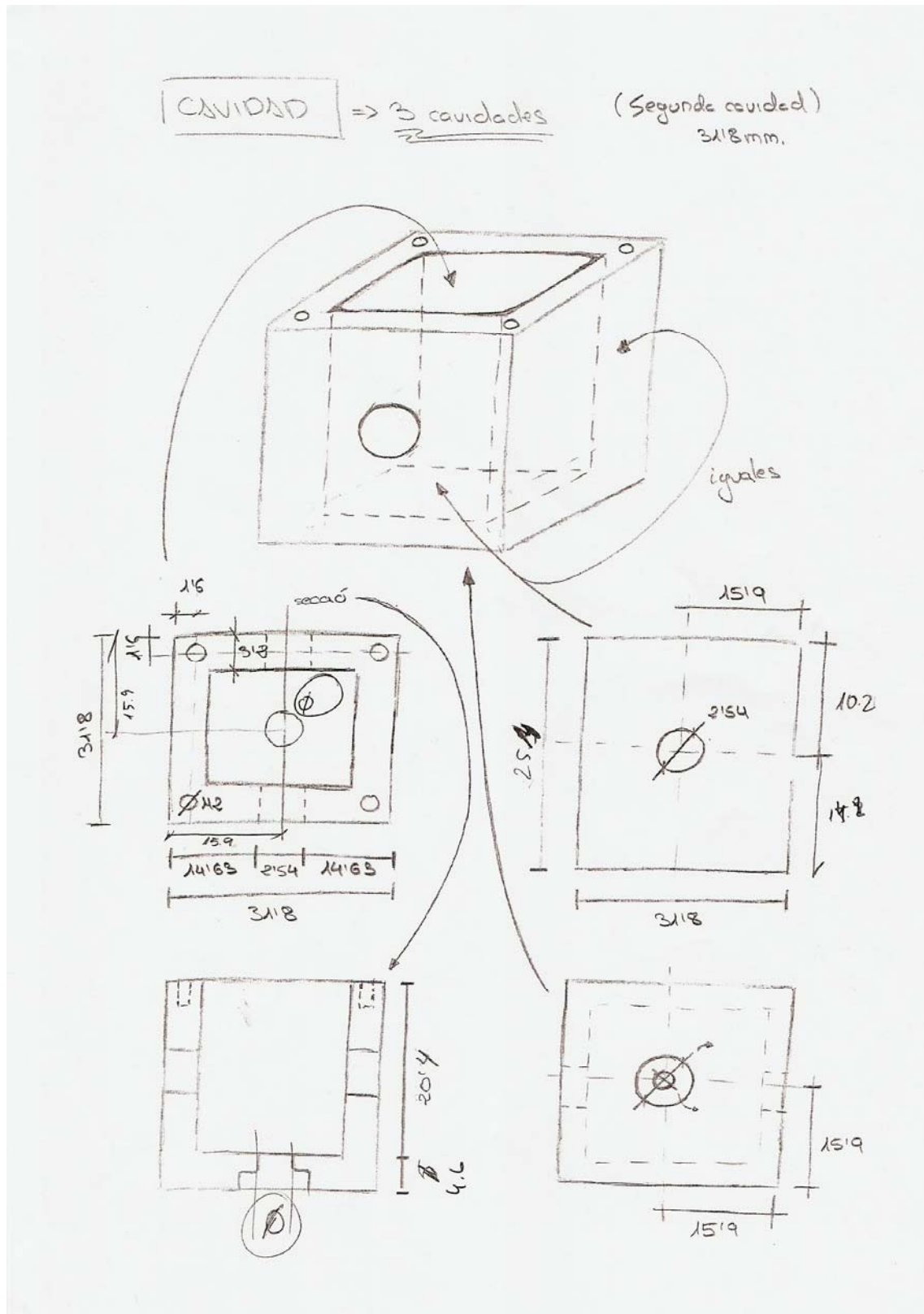


Cavidad pequeña (Dim. caja 26.8 x 26.8 x 25 mm)





Cavidad mediana (Dim. caja 31.8 x 31.8 x 25 mm)



Cavidad pequeña (Dim. caja 36.8 x 36.8 x 25 mm)

