



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE **UPV** INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN

Diseño, validación experimental y resintonización de filtros en guía onda con Aggressive Space Mapping (ASM)

Autor: Javier Ossorio García

Director 1: Vicente Boria Esbert

Director 2: Marco Guglielmi

Fecha de comienzo: 01/09/2016

Lugar de trabajo: Grupo de Aplicaciones de las Microondas

RESUMEN

En este trabajo se pretende aplicar la técnica de optimización conocida como Aggressive Space Mapping (ASM) a aspectos prácticos y profesionales relacionados con el sector de las comunicaciones espaciales; y más concretamente con el de los filtros de microondas que se emplean en las cargas útiles de los satélites. En concreto, la citada técnica ASM se utilizará para el proceso de diseño de los citados filtros (pudiendo incluir los postes metálicos redondeados que se suelen emplear en estos filtros para corregir a posteriori errores de las tolerancias asociadas al proceso de fabricación). Esta nueva técnica de diseño se validará mediante la realización de un prototipo y de las correspondientes medidas experimentales. A su vez, la técnica de ASM se empleará de forma práctica para ayudar al proceso de re-sintonización manual del filtro fabricado (mediante el ajuste de las penetraciones de los tornillos de sintonía empleados).

RESUM

En este treball es pretén aplicar la tècnica d'optimització coneguda com Aggressive Space Mapping (ASM) a aspectes pràctics i professionals relacionats amb el sector de les comunicacions espacials; i més concretament amb el dels filtres de microones que s'empren en les càrregues útils dels satèl·lits. En concret, la citada tècnica ASM s'utilitzarà per al procés de disseny dels esmentats filtres (podent incloure els postes metàl·lics arredonits que se solen emprar en estos filtres per a corregir a posteriori errors de les toleràncies associades al procés de fabricació). Esta nova tècnica de disseny es validarà per mitjà de la realització d'un prototip i de les corresponents mesures experimentals. Al seu torn, la tècnica d'ASM s'emprarà de forma pràctica per a ajudar al procés de resintonització manual del filtre fabricat (per mitjà de l'ajust de les penetracions dels postes de sintonia empleats).

ABSTRACT

In this paper, we intend to apply the optimization technique known as Aggressive Space Mapping (ASM) to practical and professional aspects related to the space communications sector. Specifically, to microwaves filters that are used in the satellite payloads. The ASM technique will be used for the design process of the filters including the rounded metal posts that are usually employed in these filters to correct errors associated with the manufacturing process. This new design technique will be validated through the realization of a prototype and corresponding experimental measurements. In addition, the ASM technique will be used in a practical way to assist the process of manual tuning of the fabricated filter.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción	4
1.1.	Estado del arte y motivación	4
1.2.	Objetivos.....	6
1.3.	Metodología de trabajo	7
2.	Desarrollo del diseño teórico.....	8
2.1.	Requisitos de diseño	8
2.2.	Diseño del filtro en FEM3D	9
2.3.	Diseño del filtro en HFSS.....	14
2.4.	Metodología de trabajo y Aggressive Space Mapping.....	16
2.4.1.	Base teórica	16
2.4.2.	Modelos de baja precisión	17
2.4.3.	Aplicación del ASM	18
2.4.4.	Aplicación práctica	22
2.4.4.1.	Canal a 13 GHz	23
2.4.4.2.	Canal a 12 GHz	25
2.4.4.3.	Canal a 11 GHz	26
2.5.	Simulación exhaustiva del diseño.....	27
3.	Desarrollo del prototipo	30
3.1.	Optimización de dimensiones.....	30
3.2.	Generación del prototipo	32
3.3.	Medidas en laboratorio	33
4.	Primeros resultados	35
4.1.	Canal a 13 GHz.....	35
4.2.	Canal a 12 GHz.....	37
4.3.	Canal a 11 GHz.....	38
4.4.	Reconfigurar el ancho de banda de canal	40
4.5.	Estudio de la simetría de los parámetros S_{11} y S_{22}	41
5.	Plateado y últimos resultados	43
6.	Resumen, análisis y conclusiones	45
6.1.	Repaso de objetivos	45
6.2.	Análisis y valoración de resultados	45
6.3.	Líneas futuras	46
7.	Bibliografía.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura de un filtro de orden 4 en guía rectangular en FEST3D.	9
Fig. 2. Respuesta del filtro rectangular ideal inductivo para una frecuencia de 13 GHz.	10
Fig. 3. Estructura del filtro inductivo con esquinas rectas y postes de sintonización.	10
Fig. 4. Optimizador de FEST3D para recuperar la respuesta ideal del filtro con postes.	11
Fig. 5. Respuesta del filtro con esquinas rectas y postes a 13 GHz en FEST3D.	11
Fig. 6. Respuesta del filtro con esquinas rectas y postes a 12 GHz en FEST3D.	12
Fig. 7. Respuesta del filtro con esquinas rectas y postes a 11 GHz en FEST3D.	12
Fig. 8. Estructura del filtro en HFSS con esquinas redondeadas a 13 GHz.	14
Fig. 9. Respuesta del filtro en HFSS con valores de penetración de FEST3D a 13 GHz.	15
Fig. 10. Modelo de inversores de impedancia y líneas de transmisión del filtro.	17
Fig. 11. Respuesta ideal del filtro con el modelo de inversores de impedancia.	17
Fig. 12. Respuesta del filtro en HFSS con los valores de penetración de FEST3D a 12 GHz.	18
Fig. 13. Comparativa de las 8 iteraciones del ASM para el modelo de inversores de impedancia. .	18
Fig. 14. Comparativa del resultado de 1 iteración con la respuesta ideal de FEST3D.	19
Fig. 15. Cavity sin perturbar (izq.) y perturbada con un pequeño volumen (der).	20
Fig. 16. Comparativa del efecto de aumentar 40 micras el poste de entrada en ambos modelos.	20
Fig. 17. Comparativa del efecto de 40 micras disminuir el poste de entrada en ambos modelos. ...	21
Fig. 18. Ejemplo de iteración de ASM.	22
Fig. 19. Optimización de la respuesta inicial para 13 GHz.	23
Fig. 20. Respuesta en HFSS del filtro a 13 GHz para la iteración 1.	24
Fig. 21. Respuesta en HFSS del filtro a 13 GHz para la iteración 2.	24
Fig. 22. Respuesta en HFSS a 12 GHz con los valores de penetración de FEST3D.	25
Fig. 23. Respuesta en HFSS del filtro a 12 GHz para la iteración 1.	25
Fig. 24. Respuesta en HFSS a 11 GHz con los valores de penetración de FEST3D.	26
Fig. 25. Respuesta en HFSS del filtro a 11 GHz para la iteración 1.	26
Fig. 26. Respuesta en HFSS del filtro a 11 GHz para la iteración 2.	26
Fig. 27. Estructura completa del filtro en HFSS simulando aluminio.	27
Fig. 28. Primera simulación del filtro completo en HFSS.	27
Fig. 29. Interfaz de optimización de postes en FEST3D.	28
Fig. 30. Respuesta deseada del filtro en HFSS para 13 GHz.	28
Fig. 31. Respuesta del filtro en HFSS con el criterio de exactitud en la simulación.	31
Fig. 32. Respuesta en HFSS con el criterio de exactitud en la simulación recuperado.	32
Fig. 33. Prototipo del filtro rectangular inductivo en aluminio.	33
Fig. 34. Ejemplo de montaje de medida en laboratorio.	34
Fig. 35. Primera respuesta del filtro a la frecuencia de canal de 13 GHz. Imagen generada en Matlab con los datos obtenidos de las medidas en el VNA.	35
Fig. 36. Segunda respuesta del filtro sintonizado a la frecuencia de canal de 13 GHz.	36
Fig. 37. Respuesta del filtro sintonizado a la frecuencia de canal de 12 GHz.	37
Fig. 38. Primera respuesta del filtro sintonizado a la frecuencia de canal de 11 GHz.	38
Fig. 39. Segunda respuesta del filtro para la frecuencia de canal de 11 GHz.	39
Fig. 40. Respuesta a 12.5 GHz y un ancho de banda de canal de 300 MHz.	40
Fig. 41. Primera medida de los parámetros a una frecuencia central de canal de 12 GHz.	41
Fig. 42. Segunda medida de los parámetros a una frecuencia central de canal de 12 GHz.	41
Fig. 43. Respuesta de los parámetros con la sintonización del canal a 12 GHz.	42
Fig. 44. Filtro rectangular de aluminio con plateado.	43
Fig. 45. Respuesta del filtro a 12 GHz después del plateado.	44

1. Introducción

En este primer capítulo vamos a tratar de resumir cuál ha sido la principal motivación para la realización de este trabajo de fin de máster (TFM), comentando en líneas generales la situación actual y el estado del arte de las telecomunicaciones, concretamente en el campo de las telecomunicaciones por satélite y cuáles pueden ser los intereses y beneficios derivado del estudio que vamos a abordar.

También expondremos una lista de objetivos que deseamos lograr con el planteamiento y el estudio de este trabajo. Nos marcaremos también los pasos que debemos recorrer, desarrollando y explicando de esta forma la metodología de trabajo que seguiremos, intentando, de esta forma, ser lo más claro y eficiente posible a lo largo de la duración del estudio.

1.1. Estado del arte y motivación

En la actualidad, no cabe duda que las telecomunicaciones han definido en gran medida el estilo de vida moderna y la forma en que las personas se relacionan tanto con otras personas como con su entorno [1]. Es difícil imaginarse que hace menos de un siglo las noticias llegaban varios días más tarde de que ocurrieran los hechos o que la información o divulgación científica se limitase solamente a las conferencias o reuniones que se realizaban una vez al año. La invención de la radio y el avance de las telecomunicaciones a lo largo de los años permitieron una transformaron del mundo a una velocidad nunca vista antes. En este marco de desarrollo de las tecnologías de telecomunicación y de meta por alcanzar una comunicación global e inmediata aparecen las comunicaciones por satélite como solución ideal. En el año 1962 se pone en órbita el Telstar, considerado el primer satélite de comunicaciones cuyo objetivo era transmitir señal de televisión.

Desde esa fecha, y hasta la actualidad, los satélites de telecomunicaciones han demostrado su versatilidad, ya sea por la variedad de servicios que pueden ofrecer como por su calidad y cobertura, pudiendo, con la utilización de las orbitas geoestacionarias, conseguir una cobertura global con tan solo tres satélites.

A día de hoy, aun con el avance y desarrollo de otros tipos de tecnología de telecomunicaciones (la fibra óptica o los servicios inalámbrico como el Wi-Fi) puede preverse que las comunicaciones por satélites seguirán siendo de gran importancia [2], no solamente por su gran ventaja en el tipo de cobertura que pueden ofrecer si no como respaldo de las comunicaciones terrestres actuales, para el uso y desarrollo de nuevas aplicaciones espaciales o para usos en investigación para pequeñas empresas con los llamados pico-satélites o cube-sats.

Sin embargo, también cabe destacar que el desarrollo y evolución de los satélites actuales se empieza a encontrar con las limitaciones tecnologías intrínsecas a la propia estructura de los mismos, encontrándonos, en este contexto, una saturación de las órbitas de mayor interés, la insuficiencia del espectro disponible para la gran variedad de servicios planteados o la limitación tecnológica en cuanto a ancho de banda y velocidad de transmisión disponible. Además, por supuesto, todo ello relacionado con lo rentable que puede ser desde el punto de vista empresarial poner en órbita un sistema de comunicaciones por satélites y el mantenimiento que ello conlleva.

Por ello, el principal problema de este tipo de comunicaciones es el alto coste que se debe asumir para poner un satélite en órbita, y el posterior riesgo que conlleva que pueda dejar de funcionar más tarde por algún error en alguno de los múltiples dispositivos que lo componen.

Bajo estas premisas, la principal preocupación en el desarrollo de los dispositivos que permiten las comunicaciones por satélites se basa en abaratar directamente o indirectamente los costes de despliegue y mantenimiento de los mismos, abordando este problema desde diversos puntos de vista como pueden ser: reducción del tamaño de los dispositivos, mejora de la fiabilidad y duración de sus ciclos de funcionamiento pleno o la inclusión de nuevas funcionalidades en un mismo dispositivo.

En las aplicaciones espaciales las cargas útiles (el conjunto de instrumentos que permiten al satélite realizar sus funciones de envío y recepción de señales) emplean habitualmente en alguna parte de su estructura la tecnología basada en guías de onda (de sección transversal tanto rectangular como circular) para implementar, entre otros tipos de dispositivos, filtros de canal con respuesta tipo paso-banda, así como multiplexores basados en dichos filtros de canal. Permitiendo de esta forma aprovechar lo máximo posible el espectro disponible para la comunicación.

Es debido a la importancia de la presencia de esta tecnología y la necesidad de abaratar costes, que el buen diseño y la optimización de estos tipos de filtros de canal embarcados en los satélites de telecomunicación siempre haya sido de gran interés en el campo de las microondas. Los estudios en este campo se han centrado sobre todo en conseguir reducir el tamaño de los propios dispositivos, consiguiendo que cada vez fueran más ligeros y por tanto reducir de forma significativa su masa, lo que conlleva de forma directa reducir los costes, tanto de fabricación del dispositivo como, principalmente, la puesta en órbita y mantenimiento del satélite en el espacio.

A pesar de esto, los estudios no solamente se han dedicado en la reducción del tamaño, si no en conseguir una gran eficiencia en el comportamiento de los dispositivos, exigiéndoles altas prestaciones junto con una elevada fiabilidad una vez embarcado en el satélite. Para ello, se hace necesario, no solamente mejorar el dispositivo sino el proceso de desarrollo y fabricación del mismo, buscando encontrar metodologías o diseños que permitan adaptar y desarrollar de forma rápida filtros con distintas necesidades de funcionamiento.

Tradicionalmente, estos componentes pasivos se diseñan con respuestas de características (frecuencia central y ancho de banda) fijas, pero sería deseable (por la posible solución de defectos en el mecanizado de las piezas, o para dar respuesta a las futuras necesidades del sector en cuanto a cargas útiles reconfigurables) poder disponer de soluciones sencillas que permitan re-sintonizar o reconfigurar las respuestas de los citados dispositivos (filtros, diplexores y multiplexores).

Por esta razón queremos dar especial importancia en la necesidad de encontrar metodologías de diseño eficientes y fiables para el desarrollo de los distintos tipos de filtros que se puedan dar, según las necesidades, tanto de espacio, como de funcionamiento y características del satélite.

1.2. Objetivos

Con el objetivo de dar solución a este tipo de problemas el trabajo se centrará en la investigación de novedosas soluciones (sencillas de implementar y con los menores posibles efectos nocivos) para diseñar, reconfigurar o re-sintonizar las respuestas de filtros paso-banda basados en guías de onda.

Concretamente, en este documento estudiaremos el desarrollo y la implementación efectiva del “Aggressive Space Mapping” [3] (ASM en las sucesivas apariciones en el documento) para varios diseños de filtros basados en resonadores con estructuras típicas en las comunicaciones por satélite. En mayor medida nos centraremos en el ejemplo concreto del diseño, desarrollo y medida de un filtro inductivo en guía rectangular que proporcione la misma respuesta (en términos de orden y selectividad) que un filtro clásico con el objetivo de poder utilizarlos para implementar OMUXes en los satélites de comunicaciones que presenten una banda de trabajo estrecha y un gran ajuste en la precisión de la respuesta de los mismos.

A través del uso del método ASM intentaremos transformar un diseño común de filtro de satélite fijo en uno que pueda ser re-sintonizado, así como capaz de cambiar sus características de trabajo para dotar de mayor versatilidad al funcionamiento de la estructura. Para ello modificaremos el diseño clásico añadiendo postes de sintonización tanto en las cavidades de la estructura como en las ventanas de acoplo entre ellas.

Investigaremos de esta forma la efectividad de la metodología ASM para el diseño del filtro, además de ver de esta forma las posibles ventajas e inconvenientes de su utilización en el campo profesional y empresarial.

Para diseñar las diferentes topologías novedosas de estos filtros y multiplexores con respuestas reconfigurables con la metodología ASM se hará uso de dos programas comerciales de simulación electromagnética, como son FEST3D¹ y HFSS².

Por último, para verificar el estudio teórico de los resultados obtenidos se fabricará un prototipo del filtro. De esta forma dispondremos de un dispositivo que deberemos sintonizar, utilizando ASM como referencia y del cual obtendremos los resultados relacionados con este diseño, que nos servirá para ver el impacto y la fiabilidad del método ASM no tan sólo para el diseño de los filtros sino para la propia sintonización de los dispositivos fabricados.

¹ La versión actual de FEST3D es herencia de anteriores herramientas de software FEST3D desarrollados por la ESA / ESTEC. En particular, las versiones anteriores FEST3D como FEST 2.0, 2.2 y 3.0 y herramientas de software como DUMAS y el WIND pueden considerarse precursores del presente software. Actualmente, AURORASAT es el único desarrollador y distribuidor de FEST3D en todo el mundo. Página web: <http://www.fest3d.com/index.php>

² Actualmente HFSS es propiedad de ANSYS. Página web: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>

1.3. Metodología de trabajo

Para lograr el objetivo propuesto dividiremos esta meta en tareas más simples y que se pueden enmarcar dentro de un mismo campo, con la visión puesta en poder tener una línea de trabajo y una metodología clara y rápida para desarrollar la investigación descrita en este documento.

En la lista siguiente se exponen los puntos que nuestra investigación debería completar para alcanzar de forma correcta nuestro principal objetivo:

- Diseño y desarrollo del filtro inductivo en guía rectangular en FEST3D [4]: FEST3D es un programa de análisis electromagnético para componentes pasivos cuya solución se obtiene a través de métodos modales y del método de los momentos, más adelante explicaremos con más detalle el método y uso del programa. Este programa nos permite diseñar y analizar de forma rápida y sencilla el filtro con el que vamos a trabajar en este documento. De esta forma tendremos un primer diseño, con el que nos podremos hacer una idea de las dimensiones de nuestro dispositivo y del tipo de respuesta que obtendremos.
- Diseño y desarrollo del filtro en HFSS [5]: HFSS es un programa de análisis electromagnético basado en elementos finitos ampliamente utilizado en el mundo de las microondas para el análisis de componentes pasivos, dónde podemos obtener una respuesta tan precisa como sea necesario, al igual que FEST3D. Posteriormente explicaremos con más detalle las características y uso del mismo. Basándonos en el diseño previo obtenido con FEST3D, diseñaremos de la forma más exacta posible nuestro filtro real considerando el material del dispositivo, pérdidas de inserción, errores de fabricación... para lograr un diseño final con las mayores garantías de funcionamiento.
- Implementación del ASM: Con la mirada puesta en ahorrar un gran tiempo de simulación y de procesado, aquí es donde implementaremos y comenzaremos a usar el método ASM (Aggressive Space Mapping), que explicaremos con detalle en el capítulo siguiente exponiendo las razones y metodología empleada que nos acompañará en las sucesivas tareas que vamos a desarrollar.
- Fabricación del prototipo y medida en laboratorio: Una vez conseguido el diseño final de nuestro filtro fabricaremos un prototipo, y realizaremos las medidas necesarias para verificar que el diseño desarrollado cumple con los requisitos marcados, y se trata realmente de una alternativa a los diseños actuales para conseguir un filtro resintonizable, simple y barato de producir, ayudándonos para la sintonización del método ASM.
- Análisis de resultados y generación de documentos: Por último, analizaremos los resultados obtenidos, valoraremos las características obtenidas y evaluaremos el diseño con el objetivo de disponer de forma clara y resumida de los resultados del estudio realizado.

2. Desarrollo del diseño teórico

Después de explicar el objetivo del trabajo y la metodología que vamos a seguir llegamos al capítulo 2, dónde explicaremos detalladamente los pasos que hemos seguido para llevar a cabo el estudio y diseño del citado dispositivo.

En la primera parte detallaremos cuáles deben ser los requisitos que este tipo de dispositivos deben cumplir para poder operar una vez embarcados en los satélites de telecomunicaciones.

Aquí también encontraremos el desarrollo del diseño del filtro, primeramente, en el programa FEST3D y posteriormente en HFSS. Como hemos comentado, explicaremos en qué consiste la metodología Agressive Space Mapping (ASM) y nos basaremos en ella para alcanzar la respuesta y dimensiones adecuadas de nuestro diseño y ahorrarnos de esta forma simulaciones innecesarias.

2.1. Requisitos de diseño

El filtro que vamos a estudiar en este trabajo es un filtro inductivo en guía rectangular de orden cuatro. Para que nuestro dispositivo disponga de las condiciones necesarias para trabajar en el espacio las características y condiciones que debe cumplir se listan en la tabla siguiente:

REQUISITOS DEL FILTRO	
Frecuencia central del canal inferior	11 GHz
Frecuencia central del canal superior	13 GHz
Ancho de banda de canal	200 MHz
Pérdidas de retorno en banda	20-25 dB

Tabla I. Requisitos de diseño del filtro.

El filtro dispondrá de una guía de entrada y de salida rectangular estándar del tipo WR-75 (frecuencias: 10 GHz a 15 GHz, dimensiones: 19.05 x 9.525 mm).

Por otra parte, dado que uno de los objetivos del trabajo es reducir lo máximo posible el coste de desarrollo de este tipo de productos, tendremos en cuenta aspectos como el material de fabricación y los defectos de mecanizado. Por tanto, diseñaremos nuestro dispositivo tomando el aluminio (un material fácil de trabajar y poco costoso con conductividad eléctrica = $3,78 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) y unas esquinas redondeadas de 2 mm de radio en las cavidades, abaratando de esta forma los costes de una posible producción del filtro.

2.2. Diseño del filtro en FESTA3D

Lo primero que realizaremos para comenzar el desarrollo de nuestro diseño es basarnos en la estructura clásica de filtro en guía rectangular. Para ello, y gracias a que el programa de simulación FESTA3D dispone de un asistente automático de diseño de filtros, solamente debemos indicar qué tipo de respuesta deseamos conseguir y obtendremos la estructura correspondiente. Dado que el objetivo principal de este documento es centrarnos en explicar los pasos seguidos en el desarrollo y estudio de este TFM, obviaremos los pasos necesarios para generar y simular una estructura de filtro en FESTA3D y HFSS respectivamente en el desarrollo de este capítulo.

Debemos tener en cuenta que estas primeras aproximaciones al diseño final que vamos a realizar con FESTA3D no tienen en cuenta aspectos como las pérdidas debidas al material ni efectos no lineales. Se trata por tanto de diseños ideales que nos sirven de base para fabricar nuestro dispositivo final, ya que las dimensiones no variarán mucho respecto a este primer diseño.

También tomaremos en consideración que nuestro objetivo final es el de conseguir un filtro que sea sintonizable en un amplio rango de frecuencias y que, por tanto, los postes, a medida que penetren en la estructura provocarán que la frecuencia de sintonización baje, por tanto, nuestro primer diseño será para la frecuencia superior indicada en las especificaciones de la Tabla I.

Teniendo en cuenta todos los aspectos comentados y haciendo uso del sintetizador, obtenemos la siguiente estructura clásica (ver Fig.1) para este tipo de filtros inductivos en guía rectangular:

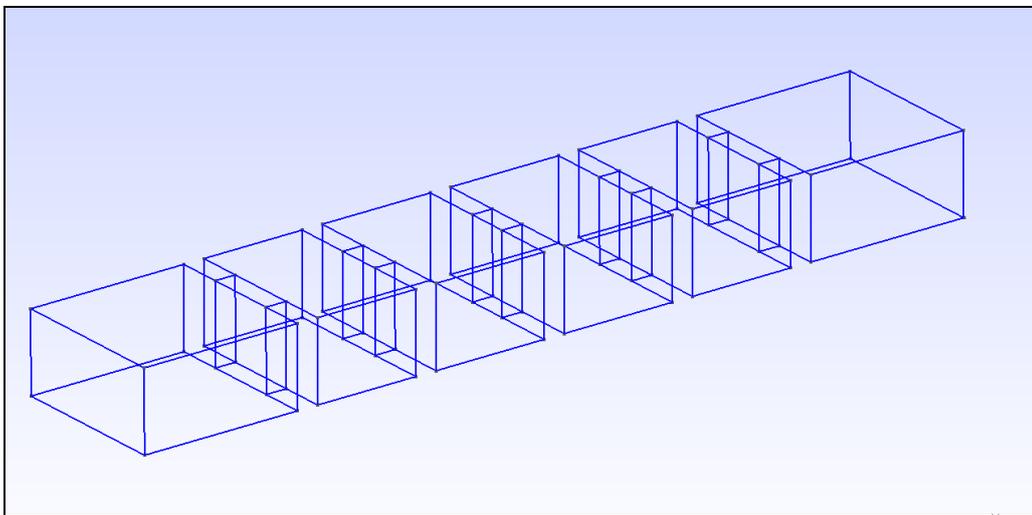


Fig. 1. Estructura de un filtro de orden 4 en guía rectangular en FESTA3D.

Como podemos observar en la Fig.1 tenemos una estructura clásica de filtro inductivo ideal. Este tipo de filtros presenta un diseño de ventanas y cavidades con esquinas rectas que provocan que el modo propagado TE_{10} acabe comportándose y teniendo un tipo de respuesta ideal como el que podemos observar en la Fig. 2.

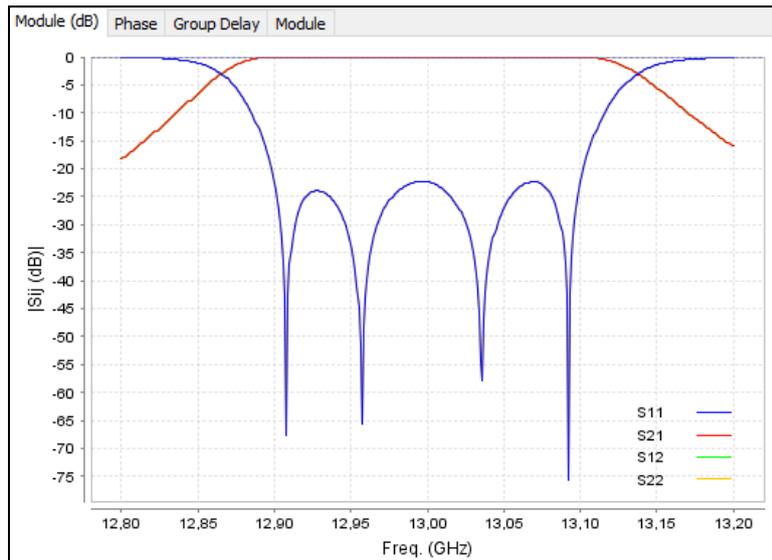


Fig. 2. Respuesta del filtro rectangular ideal inductivo para una frecuencia de 13 GHz.

Nuestra tarea, para seguir avanzando en el diseño del dispositivo será el de añadir los postes de sintonía a las ventanas y cavidades del filtro. De esta forma pretendemos conseguir un diseño que una vez fabricado, además de poder corregir las posibles desviaciones en la respuesta debidos a los errores del proceso de fabricación, también se pueda sintonizar en toda la banda especificada en la Tabla I.

Debemos tener en cuenta que FEST3D no nos permite simular cavidades con ventanas de esquinas redondeadas, por tanto, tendremos que partir en este diseño desde unas ventanas y cavidades ideales con esquinas rectas como las proporcionadas en la Fig.1. Por otro lado, vamos a simular los tornillos de las ventanas como secciones cilíndricas de 1mm de radio que ocuparán casi la totalidad de la sección de las ventanas. En la siguiente figura (Fig. 3) se puede observar cual es el nuevo diseño generado:

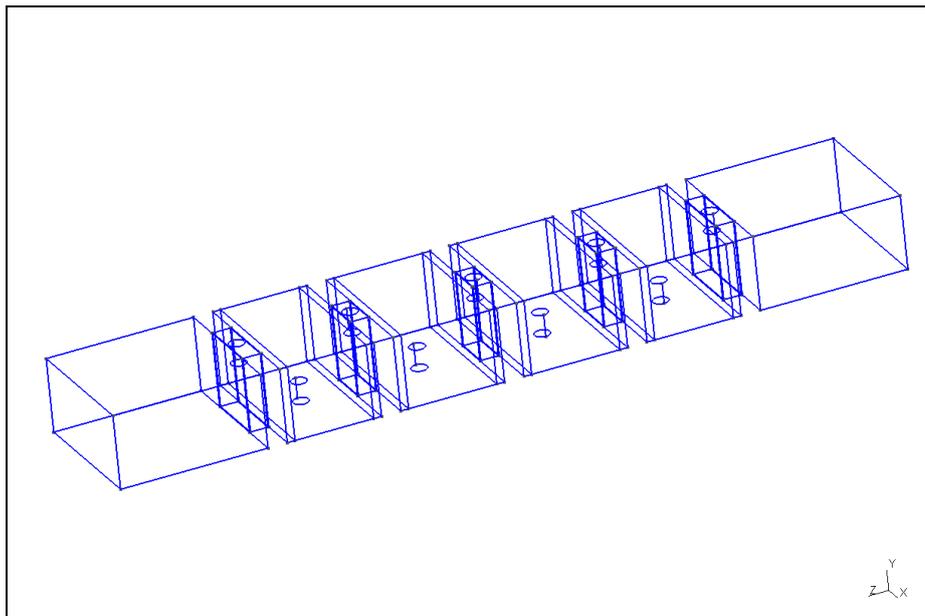


Fig. 3. Estructura del filtro inductivo con esquinas rectas y postes de sintonización.

Como cabe esperar, dado que hemos modificado el diseño inicial, introduciendo postes en las cavidades y ventanas, la respuesta que obtendremos de este diseño variará respecto a la inicial. Por tanto, para recuperar la respuesta ideal que buscamos en el dispositivo haremos uso del optimizador disponible en FEST3D (Fig. 4) para que modifique automáticamente el tamaño de las ventanas y mantenga una penetración alrededor de 0,5 mm de los postes para conseguir recuperar la respuesta que teníamos previamente.

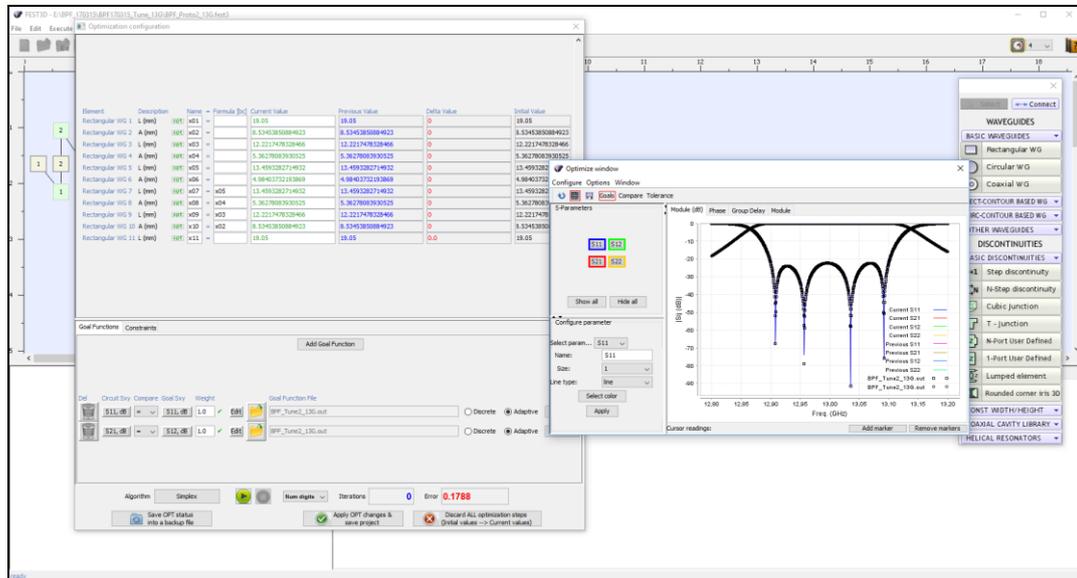


Fig. 4. Optimizador de FEST3D para recuperar la respuesta ideal del filtro con postes.

Dado que todavía nos encontramos con un diseño mayormente ideal, este proceso tendrá un bajo coste de computación. Ya que nuestro ancho de banda de trabajo está definido entre 11 – 13 GHz, tomaremos estas dos frecuencias y una central a 12 GHz como la referencias para realizar las simulaciones, asumiendo que las frecuencias comprendidas entre estas tres serán también sintonizables variando únicamente la penetración de los postes de sintonización. Finalmente obtendremos para las tres frecuencias las respuestas mostradas en las Fig. 5, 6 y 7:

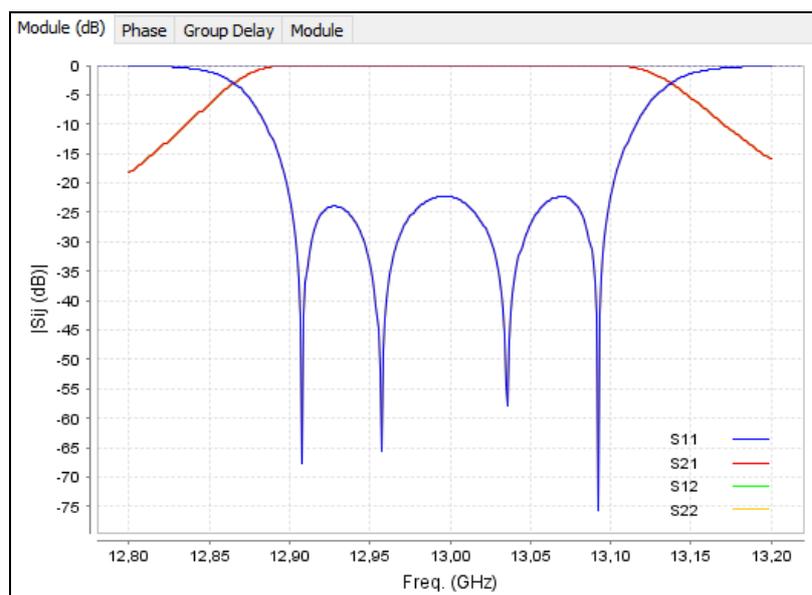


Fig. 5. Respuesta del filtro con esquinas rectas y postes a 13 GHz en FEST3D.

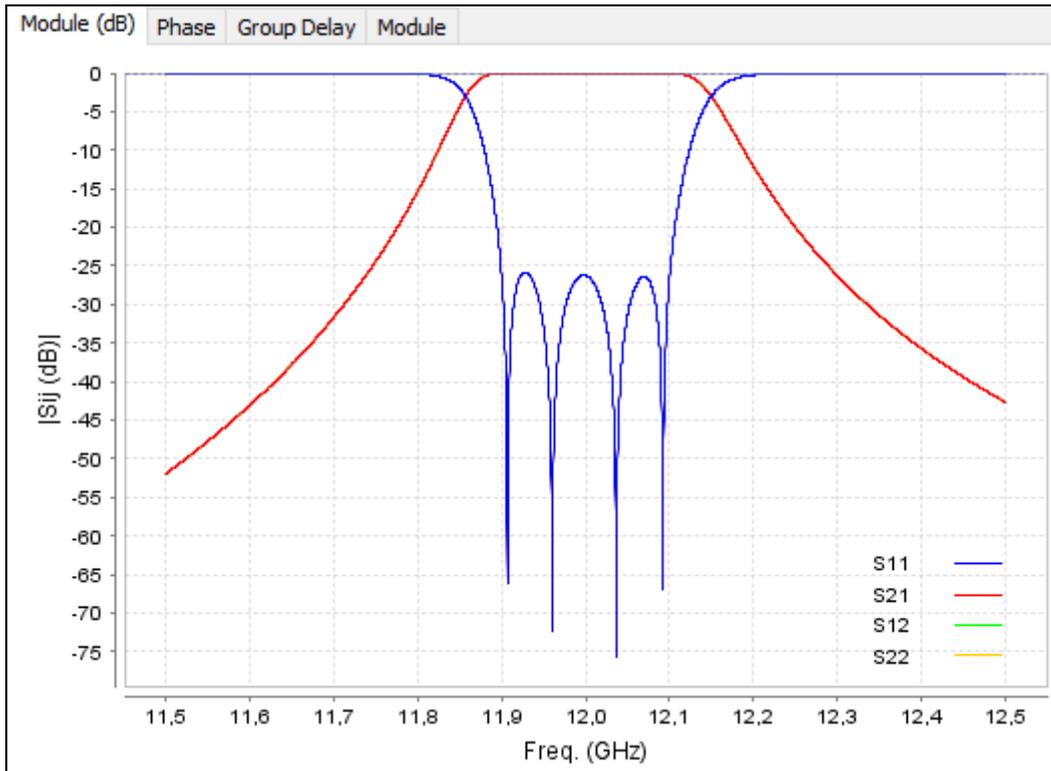


Fig. 6. Respuesta del filtro con esquinas rectas y postes a 12 GHz en FEST3D.

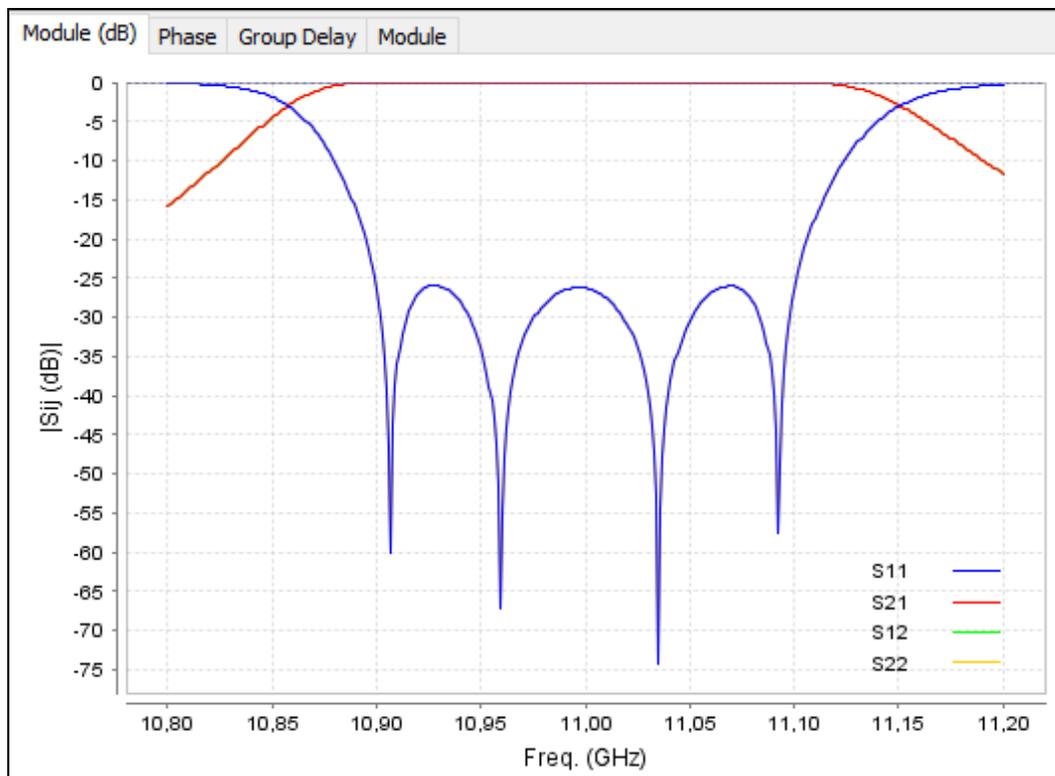


Fig. 7. Respuesta del filtro con esquinas rectas y postes a 11 GHz en FEST3D.

Como podemos observar en las figuras anteriores la respuesta del filtro se ajusta a los requisitos establecidos en el punto anterior. La diferencia entre la respuesta para la frecuencia inferior y la frecuencia superior de trabajo es tan sólo la penetración de los distintos postes que configuran la estructura del dispositivo (Tabla II).

TORNILLOS	11 GHZ	12 GHZ	13 GHZ
1	2.52	1.97	0.50
2	3.47	2.55	0.50
3	2.74	2.11	0.50
4	3.71	2.73	0.50
5	2.73	2.07	0.50
6	3.71	2.73	0.50
7	2.74	2.11	0.50
8	3.47	2.55	0.50
9	2.52	1.97	0.50

Tabla II. Penetraciones de los postes en FEST3D para las distintas frecuencias del filtro en milímetros.

Con esto ya tenemos una primera aproximación a las dimensiones del dispositivo, pero debemos verificar de forma más rigurosa que podremos mantener la respuesta que necesitamos una vez el filtro ha sido fabricado. Para ello debemos averiguar cuál debe ser el tamaño real de las ventanas de acoplo si se presentan esquinas redondeadas y tolerancias en la fabricación, así como la diferencia en la penetración de los tornillos entre la frecuencia menor y la frecuencia mayor de trabajo, para asegurarnos, entre otros aspectos que no aparecen resonancias perjudiciales en el rango de trabajo, o que no se excitan de ninguna forma modos superiores que puedan desviar completamente la respuesta que deseamos.

Verificar con un alto grado de fiabilidad la penetración de los postes y tamaño de la ventanas del filtro es extremadamente importante en el diseño final, ya que si estos valores son muy altos podemos llegar a tener un problema geométrico dentro del filtro (es decir, que los postes no puedan penetrar más en las ventanas al llegar a la pared opuesta y por tanto generemos un cortocircuito o que las ventanas sean menos anchas que el diámetro de los postes) y por tanto el diseño pueda resultar no realizable en la práctica.

2.3. Diseño del filtro en HFSS

El siguiente paso que vamos a tomar, una vez obtenidos los resultados vistos en FEM3D, es el de diseñar esta estructura en HFSS incluyendo primeramente en este apartado las esquinas redondeadas y por último para verificar el diseño final, añadiremos el material y las pérdidas a la estructura y realizaremos un análisis exhaustivo de los resultados (ver apartado 2.5).

También debemos tener presente a la hora de definir los modos que vamos a analizar en HFSS de añadir en la guía todos aquellos modos de orden superior que puedan estar en corte, pero que puedan influir de forma relevante en la respuesta final de los parámetros de dispersión debido a reflexiones u otros efectos³. Recordemos que las simulaciones en HFSS pretenden ser lo más cercanas a la respuesta que tendrá el dispositivo una vez fabricado.

La estructura, una vez dibujadas en HFSS, quedan de la siguiente forma:

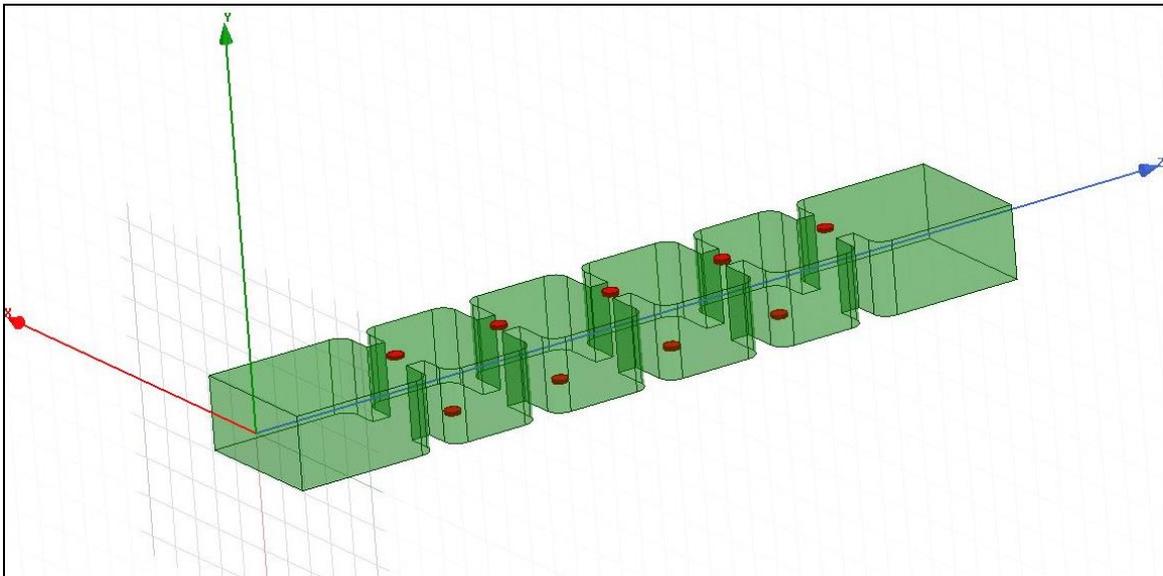


Fig. 8. Estructura del filtro en HFSS con esquinas redondeadas a 13 GHz.

³ En este caso de estudio concreto se han definido un total de tres modos superiores para el análisis del filtro completo. Una comparativa posterior a esta simulación ha demostrado que tan solo definiendo el modo fundamental obtenemos los mismos resultados en la respuesta de los parámetros S. Por tanto, podemos decir que esta estructura no se ve afectada por resonancias o reflexiones de modos superiores, dentro de la banda de trabajo definida.

Que nos proporciona, aplicando los mismos valores que teníamos en FEST3D la siguiente respuesta:

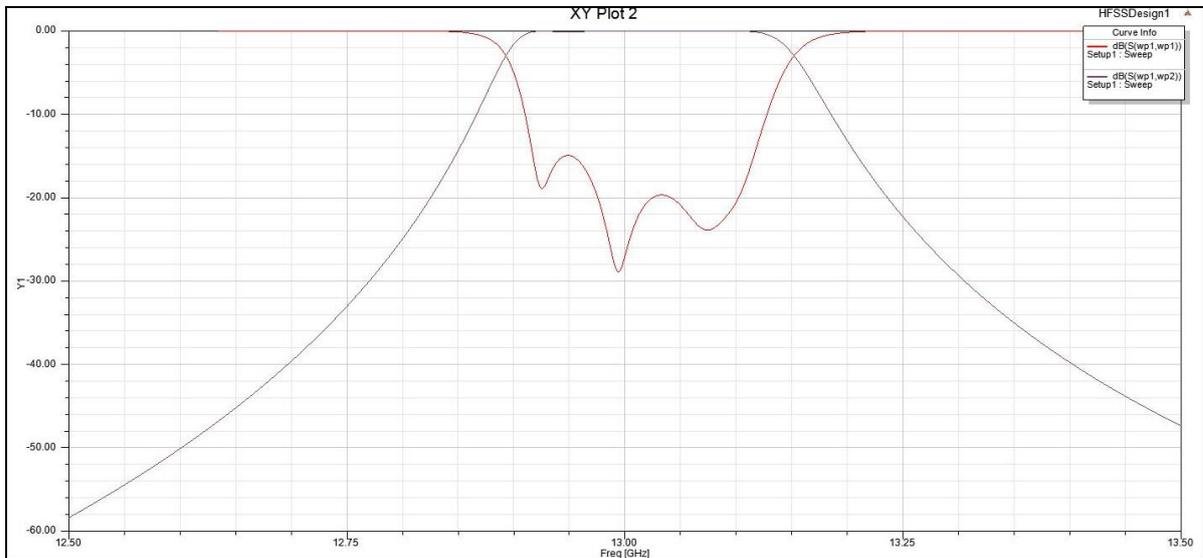


Fig. 9. Respuesta del filtro en HFSS con valores de penetración de FEST3D a 13 GHz.

Como podemos observar, el resultado obtenido se ha desviado de la respuesta ideal que queremos conseguir con el diseño del filtro. Nos hará falta en este punto algún procedimiento de optimización para conseguir recuperar la respuesta. En el siguiente punto veremos cuál va a ser la metodología seguida para solucionar este tipo de problemas.

2.4. Metodología de trabajo y Aggressive Space Mapping

2.4.1. Base teórica

En este punto y viendo los resultados obtenidos en HFSS podemos ver que vamos a requerir para esta parte del diseño del uso de un método de optimización de la estructura para poder recuperar de forma exacta la respuesta ideal obtenida en FEST3D. De esta forma podremos averiguar con mayor grado de precisión cuales deben ser las dimensiones correctas de las ventanas de nuestro filtro y la penetración de los postes que lo conforman.

Clásicamente este proceso se realizaría en el mismo programa de simulación en el cuál queremos obtener los resultados precisos, empleando los métodos implementados en él. Esto, generalmente, nos llevaría a invertir una gran cantidad de tiempo en procesos de cálculos y optimización por parte del programa, que alargaría en gran medida el diseño del desarrollo del dispositivo. En este trabajo vamos a abordar una nueva metodología que se basará en la teoría desarrollada en el “Aggressive Space Mapping” [3] o ASM por cuál haremos uso tanto del programa FEST3D, dónde disponemos de la respuesta ideal e implementa procesos de optimización rápidos, y HFSS, dónde queremos obtener la respuesta ideal para conocer tanto las dimensiones como las penetraciones de la forma más realista y precisa posible.

Para entender cuál es el proceso en el cual nos vamos a basar es importante tener claros los conceptos más simples y la aplicación tanto del ASM como de la teoría perturbacional, que justificarán nuestras elecciones y procedimientos seguidos en el desarrollo del trabajo.

El método de Space Mapping (SM) publicado por John Bandler [6] se basa principalmente en el concepto de disponer de dos espacios de simulación, uno con resultados muy precisos, pero con unos costes de procesamiento y cálculo elevados y otro espacio de simulación que se caracteriza por ser muy rápido en los cálculos, optimizaciones y en mostrar resultados, pero que ofrece resultados poco precisos.

Bajo esta premisa, Bandler ofrece una metodología que se basa en simular mediante el espacio preciso y realizar las optimizaciones necesarias en el espacio de simulación rápida dejando el espacio preciso para validar los resultados obtenidos en él y ahorrando de esta forma un gran tiempo de computación. Para ello su estudio se basa en encontrar la matriz que interrelaciona las variables de los distintos espacios.

En sucesivas publicaciones posteriores varios autores han aplicado este tipo de metodología en distintos campos y usos. Nosotros haremos especial uso de la actualización de Bandler a través de las ecuaciones de Broyden [3]. Esta metodología, que se sirve de este tipo de ecuaciones para realizar las sucesivas iteraciones en las que se basa el proceso es lo que conocemos como el Aggressive Space Mapping y conseguir la matriz que relacione los dos espacios que se están utilizando. Además, como hemos dicho, el ASM nos sirve para relacionar variables de espacios de aplicación totalmente distintos. Este hecho es especialmente potente ya que si se cumplen las condiciones especificadas en [7] para los dos sistemas que queremos aplicar ASM llegaremos a la respuesta deseada como máximo en un número de iteraciones igual o menor al número de variables con las que estamos trabajando.

2.4.2. Modelos de baja precisión

La forma más básica de obtener una primera aproximación para el diseño de un filtro que queremos desarrollar es realizar un modelo de líneas de transmisión con inversores de impedancia como el que se puede ver en la Fig. 10.

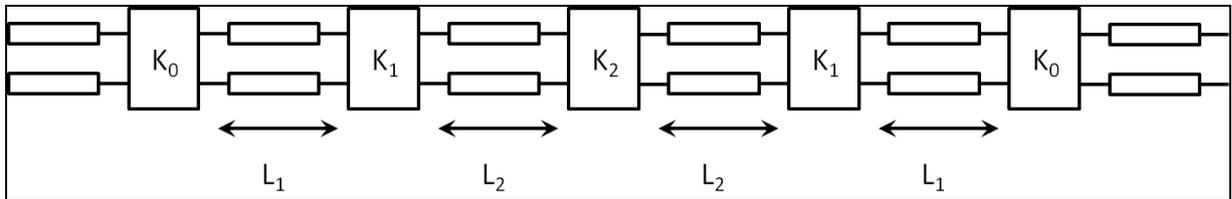


Fig. 10. Modelo de inversores de impedancia y líneas de transmisión del filtro.

Modificando los valores de estos componentes podemos conseguir la respuesta ideal de nuestro filtro deseado (Fig. 11).

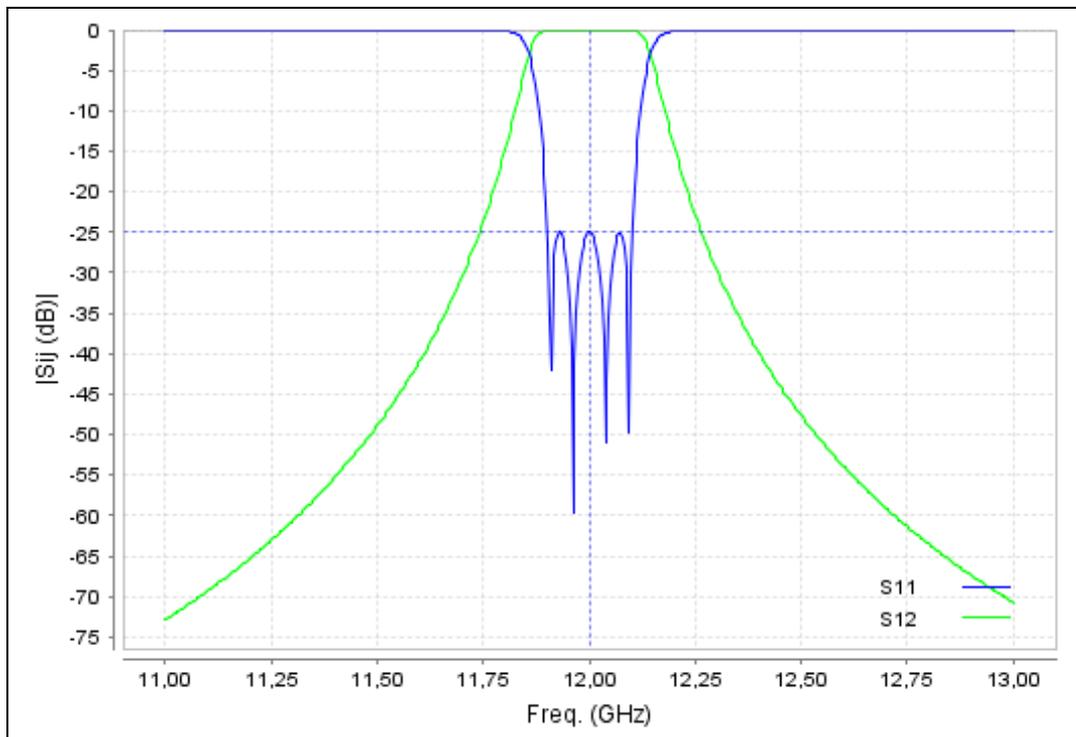


Fig. 11. Respuesta ideal del filtro con el modelo de inversores de impedancia.

Por otro lado, como hemos visto en el apartado 2.2, podemos conseguir la misma respuesta en FEM3D simulando una estructura próxima a la que tendrá el dispositivo final que será fabricado. La simulación de este dispositivo también se realizará de forma rápida debido al bajo nivel de los parámetros de simulación especificados, por tanto, al igual que con el modelo de la Fig. 10 tendremos un modelo de poca precisión de nuestro filtro.

2.4.3. Aplicación del ASM

Una vez disponemos de los modelos de baja precisión y de nuestro diseño en HFSS (alta precisión) vamos a aplicar la metodología ASM a estos dos modelos en baja precisión, para estudiar su comportamiento y averiguar la mejor forma de implementarlo y acelerar el proceso de optimización del filtro.

Para ambos procesos partiremos de la respuesta obtenida para la frecuencia central de trabajo del filtro aplicando los valores de penetración de los postes indicados por FEST3D y expuestos en la Tabla II.

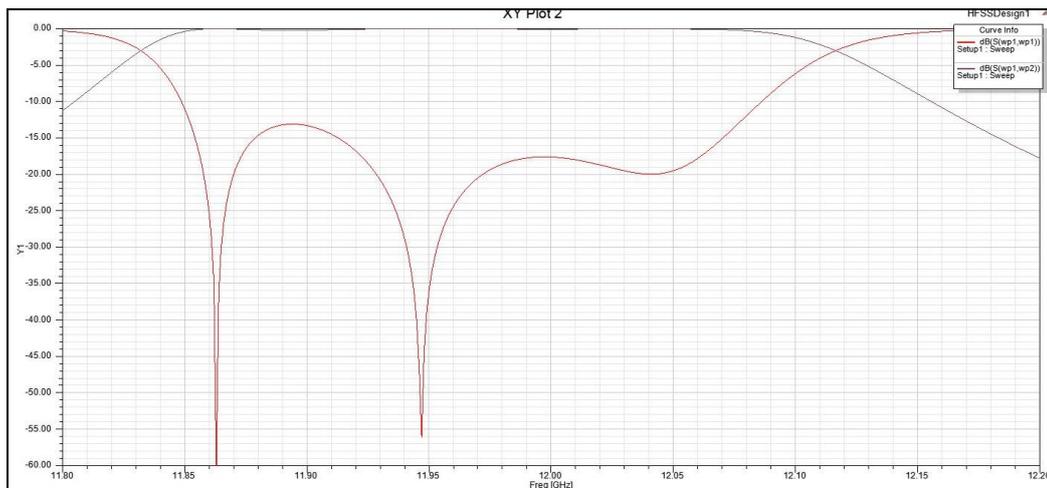


Fig. 12. Respuesta del filtro en HFSS con los valores de penetración de FEST3D a 12 GHz.

Para el caso de aplicación del ASM con el modelo de líneas de transmisión e inversores de impedancia hemos necesitado un total de 8 iteraciones para conseguir recuperar la respuesta de nuestro filtro en el modelo de HFSS, en los cuales se ha ido actualizando la matriz de Broyden como se explica en [3] y se han relacionado los parámetros de los inversores de impedancia y la longitud de las líneas de transmisión con las penetraciones de los distintos postes que componen el diseño en HFSS.

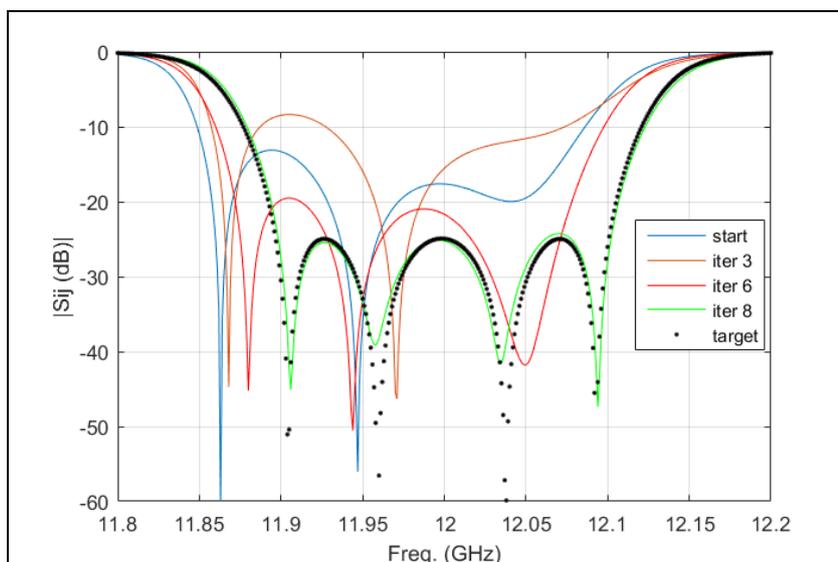


Fig. 13. Comparativa de las 8 iteraciones del ASM para el modelo de inversores de impedancia.

En el caso de nuestro modelo de baja precisión basado en el diseño de FEST3D hemos logrado obtener la respuesta ideal tan solo con una iteración del modelo ASM.

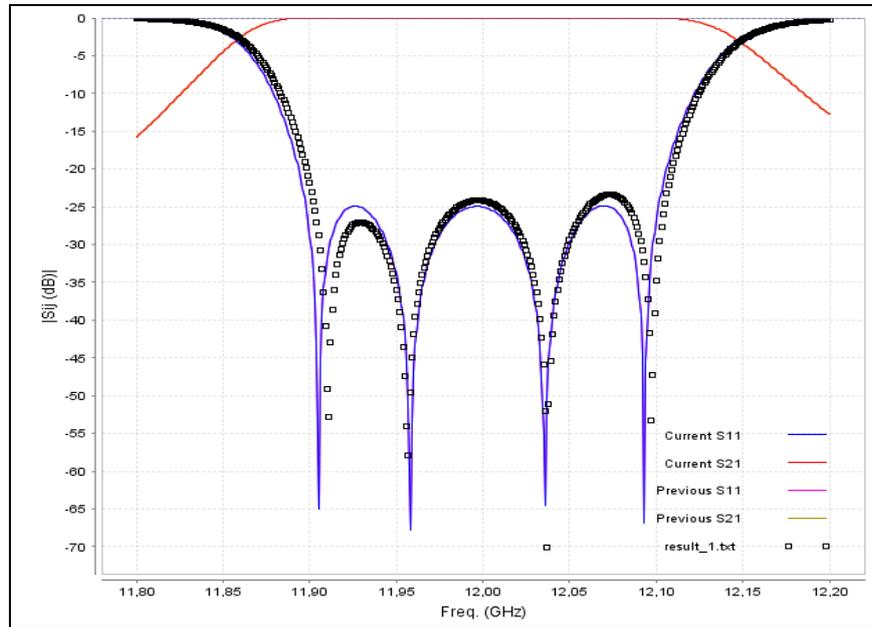


Fig. 14. Comparativa del resultado de 1 iteración con la respuesta ideal de FEST3D.

Como podemos ver, aplicando ASM con ambos modelos hemos ahorrado muchísimo más tiempo que si hubiéramos intentado realizar una optimización directamente en HFSS (ya que el proceso tendría que haber simulado la estructura completa cada vez que se realizara un cambio en las dimensiones de la misma).

Aun así, hemos podido comprobar, que partiendo desde el modelo de FEST3D en tan solo una iteración de ASM hemos conseguido recuperar la respuesta ideal de nuestro filtro en el modelo de HFSS. Este excepcional comportamiento se puede explicar gracias a la teoría perturbacional.

La teoría perturbacional aplicada a guía de ondas nos indica que si introducimos una pequeña variación de volumen dentro de una cavidad provocará un cambio en la frecuencia de resonancia de la cavidad definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{\Delta W_m - \Delta W_e}{W_m + W_e} \quad (1)$$

dónde ΔW_m y ΔW_e representan la energía eléctrica y magnética contenida en el volumen dV . (Fig. 15)

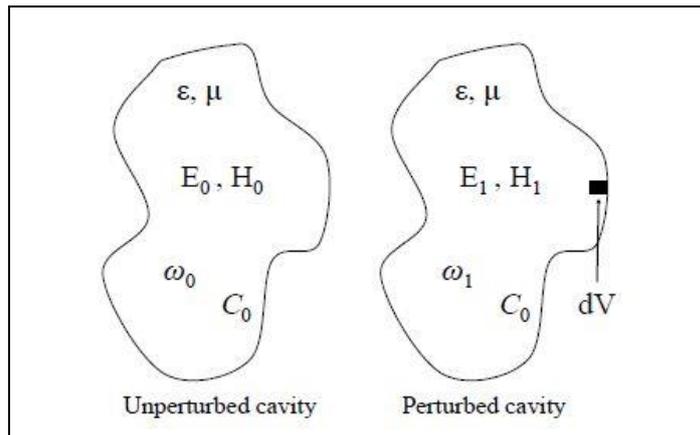


Fig. 15. Cavidad sin perturbar (izq.) y perturbada con un pequeño volumen (der).

En este contexto, podemos ver el filtro que estamos diseñando como una cavidad compleja de microondas y los postes como pequeñas perturbaciones que introducimos en ella. Por tanto, nuestro filtro debe seguir el comportamiento descrito por la teoría perturbacional en cavidades y respetar la Ecuación 1.

Es decir, la simulación de nuestro modelo en FEST3D y nuestro modelo en HFSS se basan en la simulación de la cavidad que estamos desarrollando. Las cavidades son idénticas, pero tienen distinto valor en las penetraciones de los postes, por tanto, la aplicación de una misma perturbación en ambos modelos debe provocar el mismo cambio (ya que el cambio de la energía almacenada debe ser la misma). Es por esta razón, que, bajo estas condiciones, aplicando ASM entre el modelo en FEST3D y el modelo en HFSS (que tienen el mismo tipo de variables) conseguimos en tan solo una iteración recuperar la respuesta ideal de nuestro filtro. Pues la energía total almacenada cuando logramos la respuesta ideal debe ser la misma, sin importar si las dimensiones de los distintos modelos son distintas.

Para ilustrar este comportamiento, partiendo de la respuesta ideal conseguida para ambos modelos (Fig. 13 y 14) se muestra la comparativa de la simulación del efecto de aumentar y disminuir la penetración de un mismo poste para las dos estructuras. (En azul la respuesta resultante en HFSS y en rosa la respuesta obtenida en FEST3D).

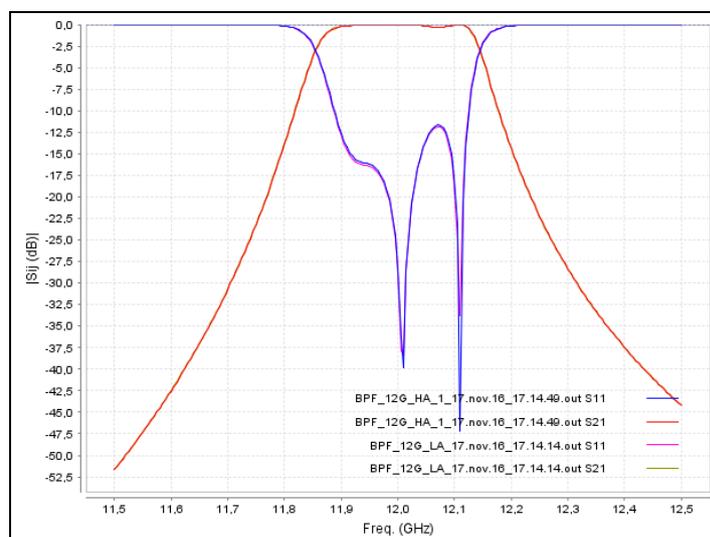


Fig. 16. Comparativa del efecto de aumentar 40 micras el poste de entrada en ambos modelos.

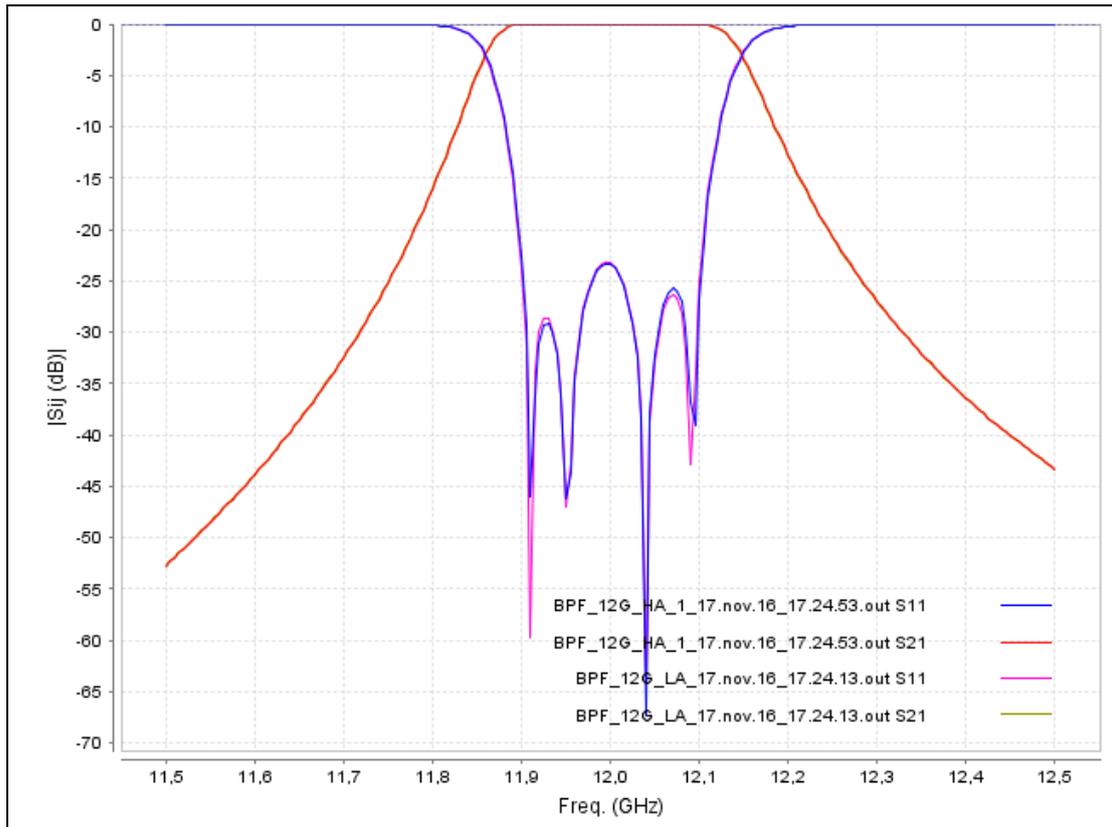


Fig. 17. Comparativa del efecto de 40 micras disminuir el poste de entrada en ambos modelos.

Como podemos ver con este sencillo experimento, tenemos el mismo tipo de comportamiento para ambos modelos.

2.4.4. Aplicación práctica

Una vez tenemos la base teórica y hemos visto que cumplimos los criterios para poder aplicar la metodología ASM, procedemos a realizar los pasos que siguen a continuación para aplicar correctamente el ASM y llegar hasta el resultado deseado, que ha sido siempre conseguir un diseño real y fiable de nuestro filtro inductivo rectangular.

Los pasos que realizaremos para aplicar ASM en las distintas frecuencias de estudio siempre serán los mismos, ya que mantendremos siempre los mismos espacios de simulación FEST3D y HFSS al que les haremos pequeñas modificaciones. Así pues, los pasos a seguir serán:

1. Dibujar en FEST3D y HFSS la estructura.
2. Simular en HFSS la estructura.
3. Simular y optimizar en FEST3D para llevar la respuesta ideal a la respuesta extraída de la simulación en HFSS.
4. Aplicar los cambios propuestos (de forma inversa) en la estructura en HFSS.

Estos tres últimos pasos conforman una iteración de la metodología ASM que vamos a aplicar, esto deberemos aplicarlo todas las iteraciones que sean necesarias hasta que obtengamos en HFSS la respuesta deseada. Aunque como hemos visto en el apartado 2.4.3, teóricamente sólo necesitaremos de una iteración para alcanzar nuestra respuesta ideal.

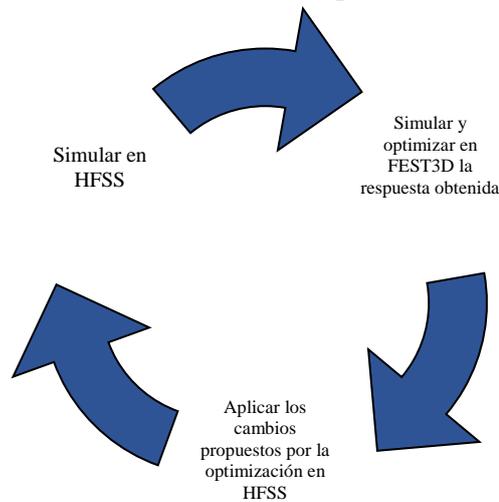


Fig. 18. Ejemplo de iteración de ASM.

Es importante destacar en este punto que esto se cumplirá siempre que apliquemos un gran nivel de convergencia a nuestro modelo de HFSS. De forma práctica se ha reducido un poco esta exigencia, pasando de tener un modelo “muy preciso” a tener un modelo “mayormente preciso” con el objetivo de agilizar las simulaciones en HFSS. Esto de forma práctica nos obliga, como veremos a continuación, a realizar en algunos casos dos iteraciones ASM en lugar de una, como se define teóricamente, pero se ha comprobado de forma práctica que esto es más rápido computacionalmente que realizar tan solo una simulación con un modelo muy preciso.

Con todo esto, vamos a proceder a aplicar la metodología ASM a los resultados que obtenemos en HFSS (nuestro espacio preciso). A continuación, podemos ver el método ASM aplicado a las 3 frecuencias definidas en el capítulo anterior que estamos analizando y los resultados de las sucesivas iteraciones aplicadas.

2.4.4.1. Canal a 13 GHz

Como ya hemos visto en el apartado 2.3, disponemos de nuestro diseño en HFSS completo con las penetraciones de los postes dadas por la simulación en FEST3D. Para esta configuración obtenemos la respuesta vista en la Fig. 9.

Tomaremos esta respuesta como el punto inicial para aplicar la metodología ASM. Por tanto, debemos llevar esta respuesta a FEST3D y optimizarla para conseguir que la respuesta ideal de FEST3D se adapte a esta nueva respuesta obtenida en HFSS.

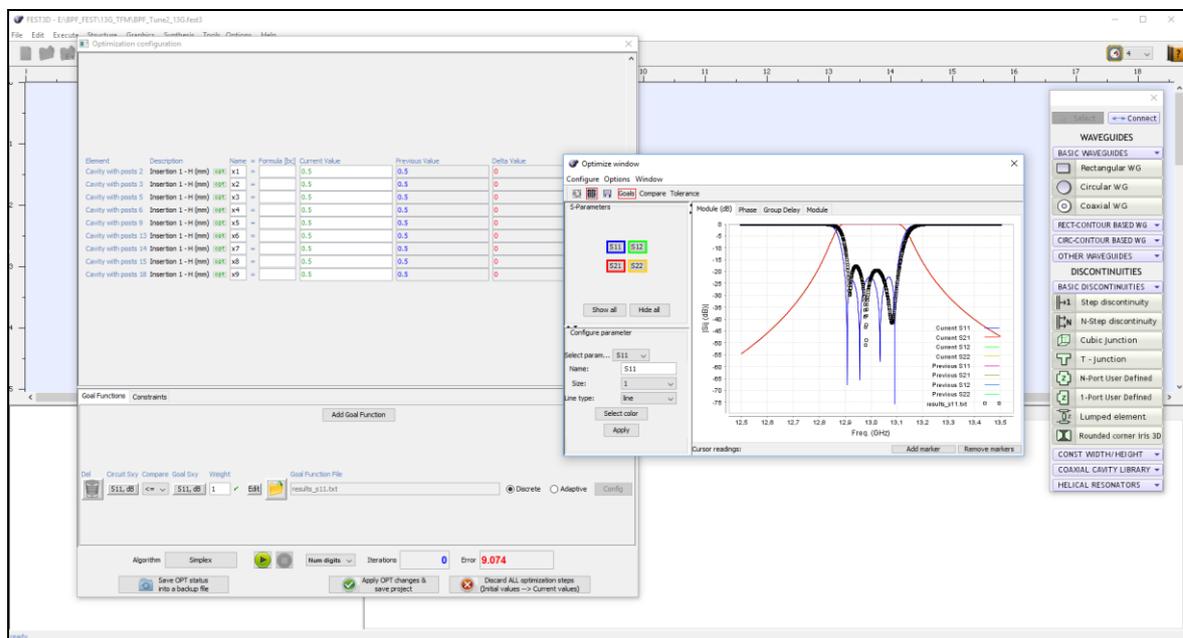


Fig. 19. Optimización de la respuesta inicial para 13 GHz.

Una vez ha conseguido optimizar la respuesta como vemos en la Fig. 19 obtendremos unos valores “delta” de cambios que debemos aplicar para que se produzca este cambio en la respuesta. Son estos valores los que aplicaremos a HFSS, pero de signo contrario ya que lo que queremos es ir de la respuesta obtenida en HFSS a la respuesta ideal de FEST3D.

Tras aplicar los cambios simulamos de nuevo en HFSS el filtro completo y obtenemos la siguiente respuesta para la iteración 1 del método ASM:

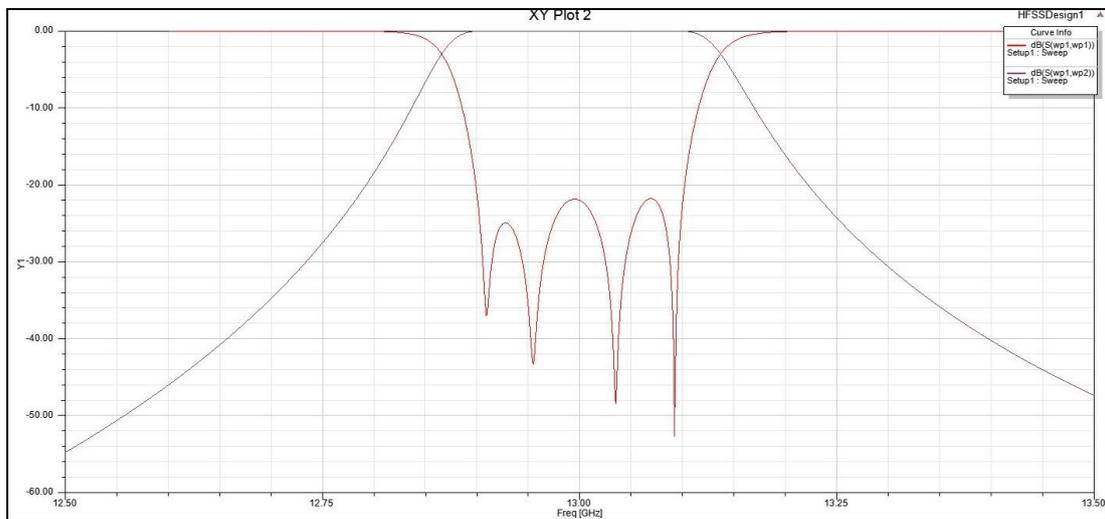


Fig. 20. Respuesta en HFSS del filtro a 13 GHz para la iteración 1.

Con esto habremos terminado una iteración completa de la metodología ASM. Como hemos detallado en el punto anterior, en algunos casos nos será necesaria una segunda iteración para alcanzar la respuesta ideal dado que hemos reducido un poco el criterio de convergencia en HFSS para agilizar las simulaciones. En la Tabla IV podemos ver la comparativa entre una simulación “muy precisa” y una “mayormente precisa”.

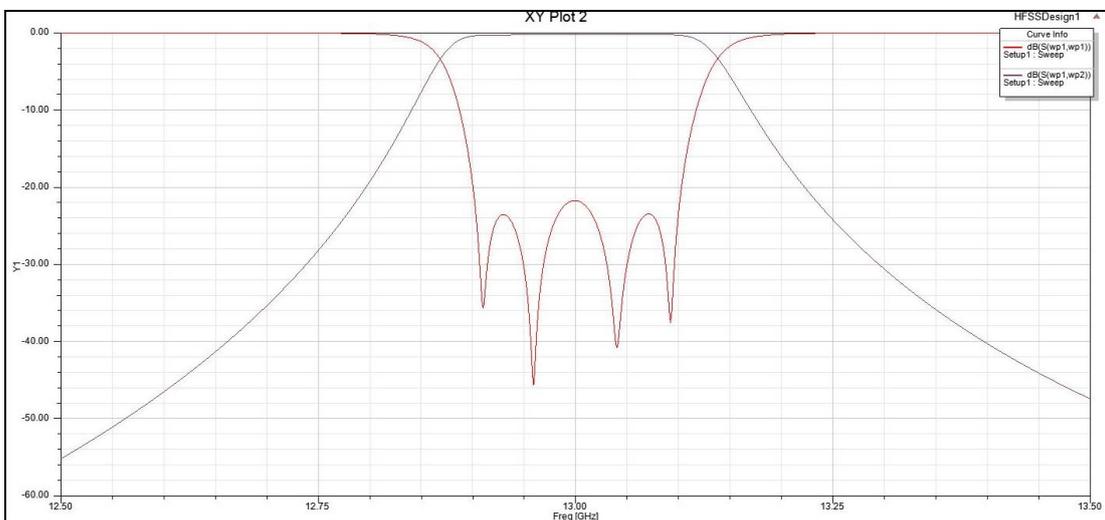


Fig. 21. Respuesta en HFSS del filtro a 13 GHz para la iteración 2.

Una vez hecho esto, hemos obtenido la respuesta ideal en HFSS y, por tanto, tendremos con un gran nivel de exactitud las dimensiones de las ventanas y penetraciones de los postes que necesitaremos en el filtro real.

2.4.4.2. Canal a 12 GHz

Al igual que en el caso anterior, vamos a aplicar la metodología ASM para recuperar la respuesta ideal de nuestro filtro para un canal de 12 GHz.

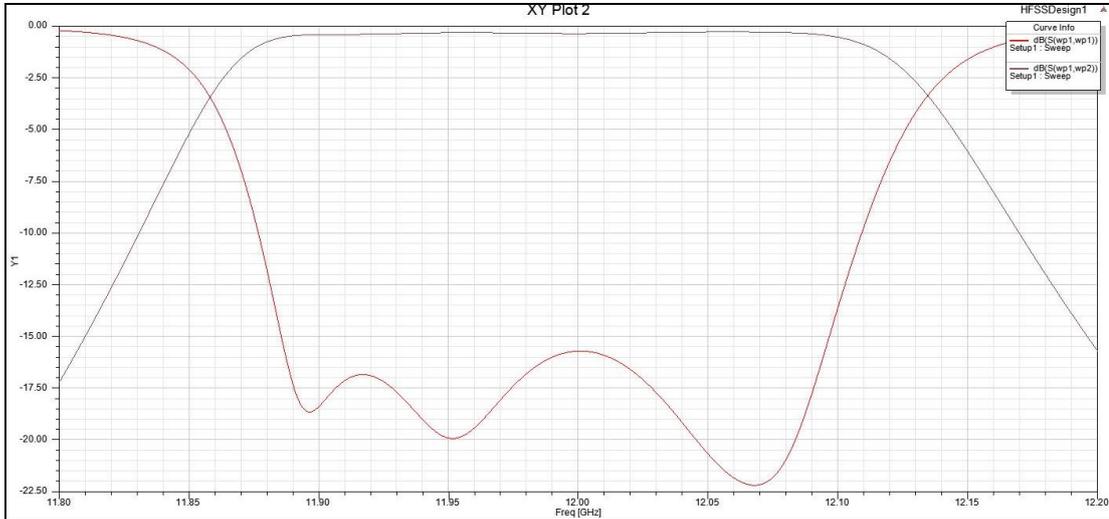


Fig. 22. Respuesta en HFSS a 12 GHz con los valores de penetración de FEST3D.

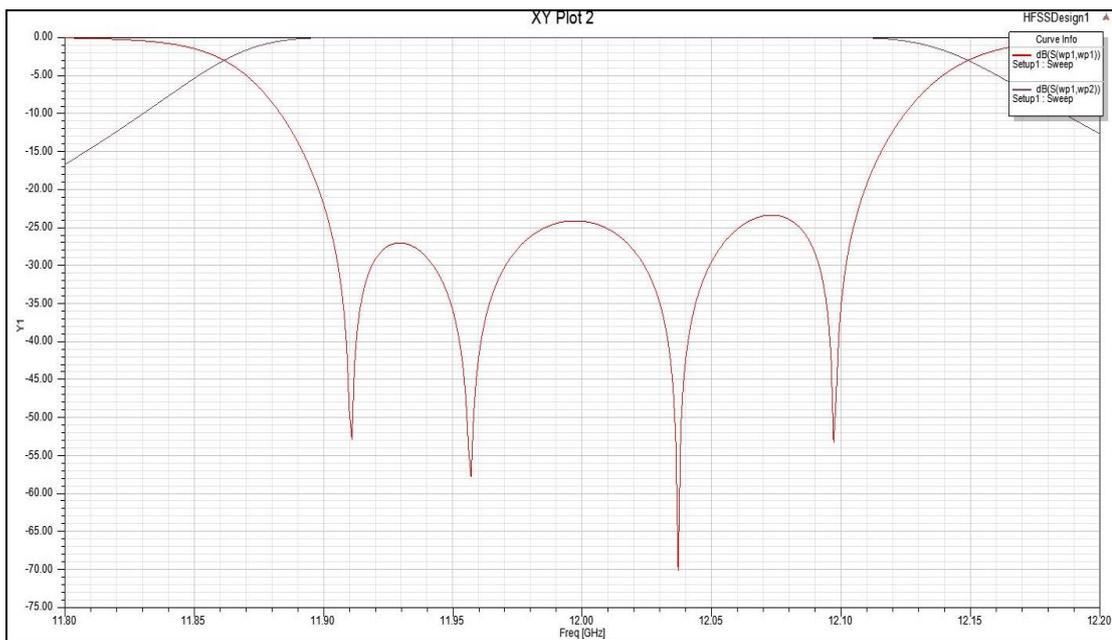


Fig. 23. Respuesta en HFSS del filtro a 12 GHz para la iteración 1.

2.4.4.3. Canal a 11 GHz

Por último, como en los dos casos anteriores procedemos a recuperar la respuesta ideal aplicando la metodología ASM a la respuesta inicial obtenida al aplicar las penetraciones iniciales dadas por FEST3D.

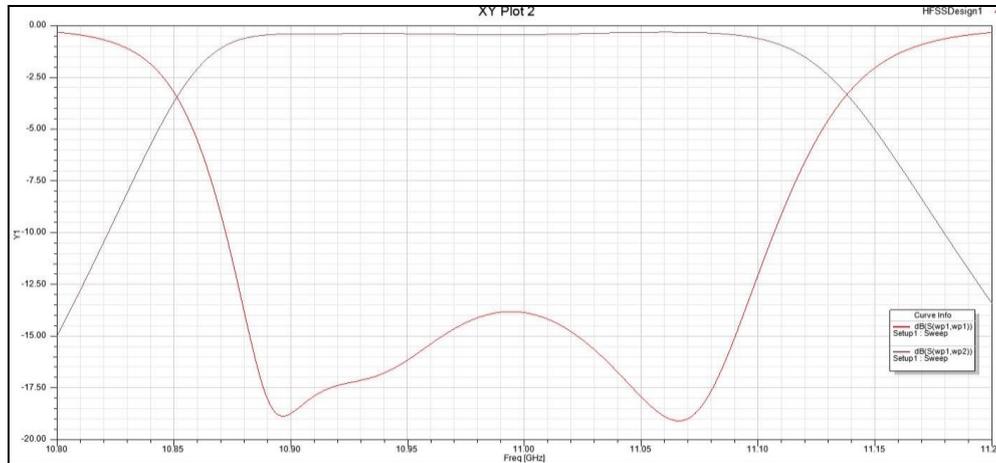


Fig. 24. Respuesta en HFSS a 11 GHz con los valores de penetración de FEST3D.

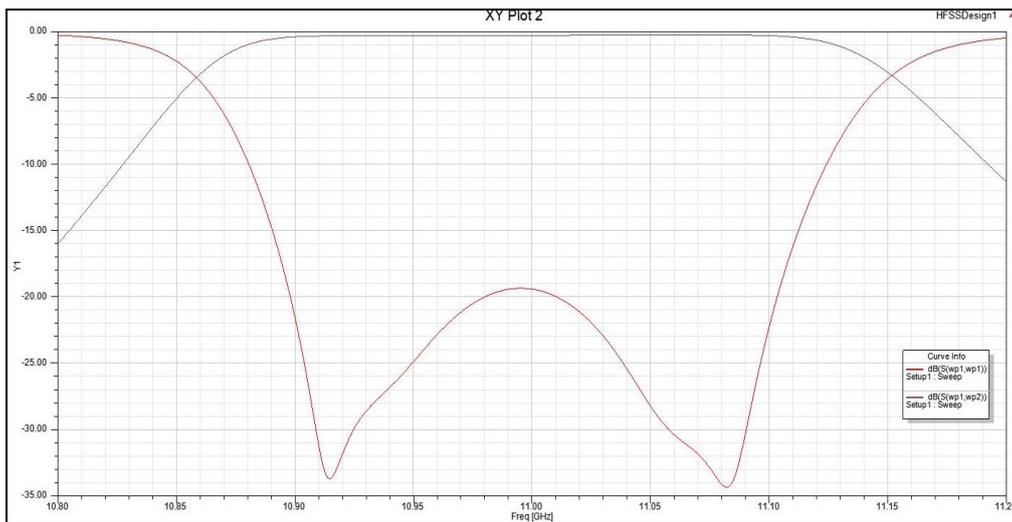


Fig. 25. Respuesta en HFSS del filtro a 11 GHz para la iteración 1.

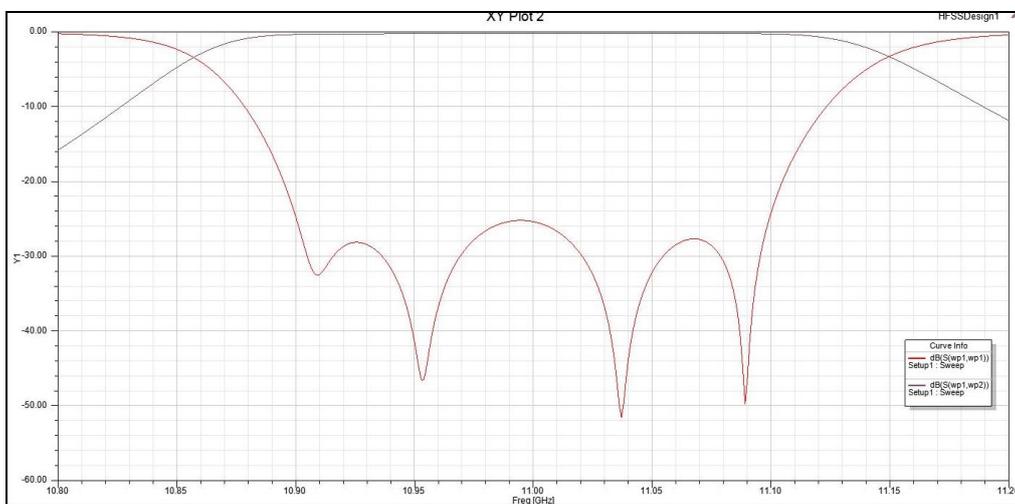


Fig. 26. Respuesta en HFSS del filtro a 11 GHz para la iteración 2.

2.5. Simulación exhaustiva del diseño

Una vez terminado el trabajo de análisis de las estructuras, y habiendo conseguido para las distintas frecuencias marcadas una respuesta ideal del filtro a través del ASM, ya estamos en disposición de asegurar que el filtro, con las dimensiones obtenidas tendrá un comportamiento cercano al que deseamos, y que además las variaciones que puedan sufrir los postes para corregir errores y desviaciones tanto en módulo como de la fase de los parámetros de dispersión son asumibles por la estructura.

Aun así, nos es de gran interés tener una referencia aproximada de cuál va a ser el comportamiento completo de nuestro dispositivo una vez sea fabricado, y para ello vamos a simularlo por completo en HFSS, asumiendo como material de la estructura el aluminio. También nos servirá para tener una referencia muy próxima de la posición inicial real de los postes de sintonización.

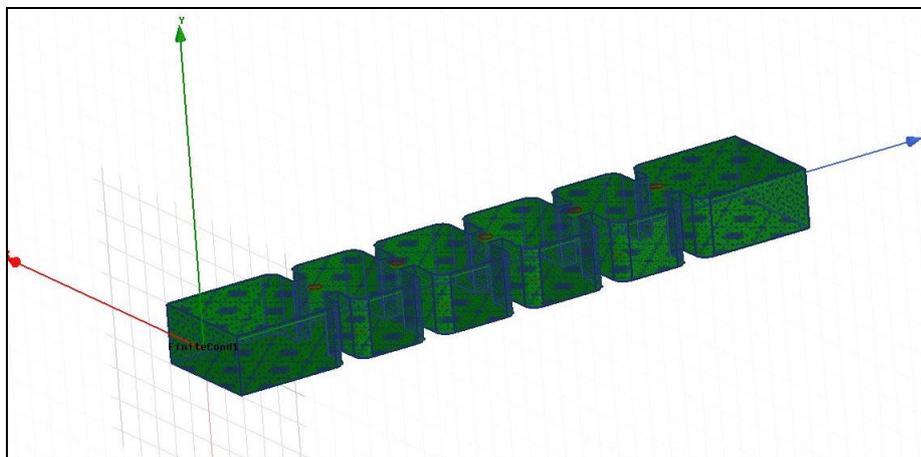


Fig. 27. Estructura completa del filtro en HFSS simulando aluminio.

De la simulación con pérdidas debemos esperar obtener una respuesta próxima a la ideal, como la que ya habíamos conseguido en las simulaciones anteriores, además no debería estar desviada en frecuencia y los ajustes que nos dará el método ASM deberían ser de unas cuantas decenas de micras como máximo. En la siguiente imagen se muestra el resultado de la simulación realizada.

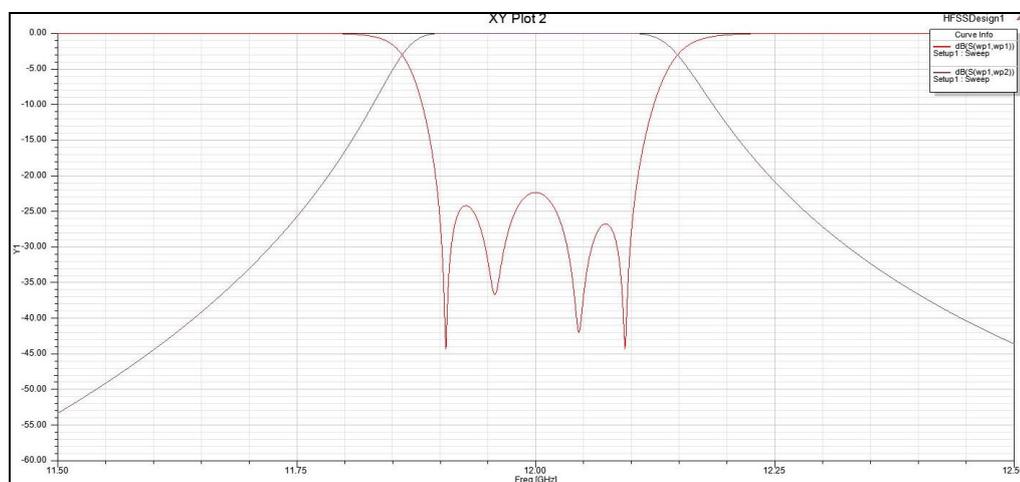


Fig. 28. Primera simulación del filtro completo en HFSS.

En este punto, al igual que en los pasos anteriores, nos es de gran utilidad el uso de método ASM ya que debemos corregir un total de 10 postes de sintonización (coloreados en rojo en la Fig. 8) para conseguir recuperar la respuesta deseada con la simulación de HFSS y esto lo lograremos en tan solo 1 iteración.

Por tanto, llevaremos la respuesta obtenida en la Fig. 28 a FEST3D y realizaremos la optimización de las penetraciones que luego aplicaremos a la estructura en HFSS.



Fig. 29. Interfaz de optimización de postes en FEST3D.

Tras una simulación realizando el proceso descrito por el ASM, obtenemos la respuesta deseada con el mayor número de consideraciones posibles para simular el comportamiento real que tendrá nuestro filtro.

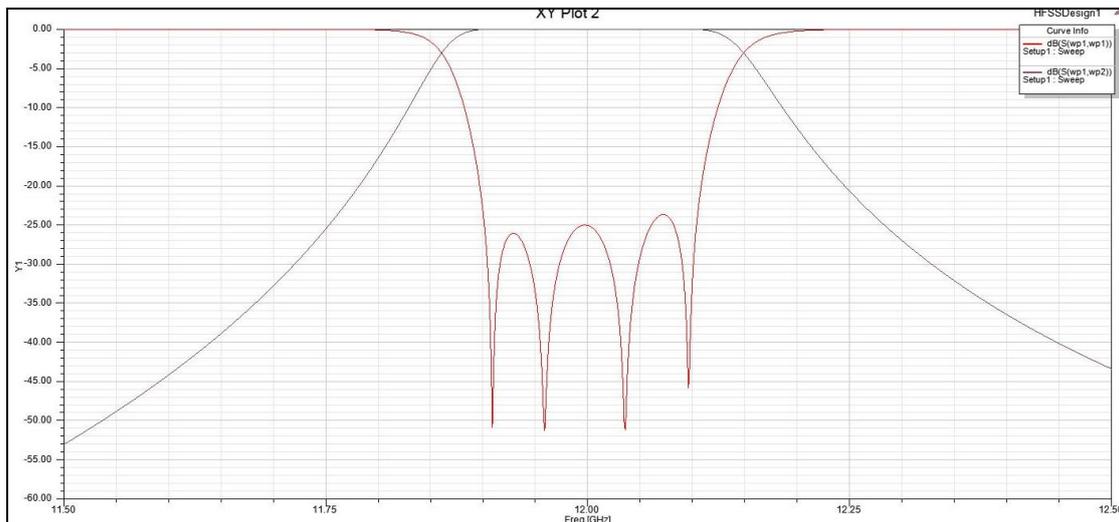


Fig. 30. Respuesta deseada del filtro en HFSS para 13 GHz.

Este proceso lo realizaremos con las tres frecuencias que estamos analizando, consiguiendo igualmente la respuesta ideal que teníamos en FEST3D con un pequeño nivel de pérdidas provocado por el aluminio de la estructura.

Por último, en la Tabla III se puede observar las dimensiones y las penetraciones que debemos aplicar a nuestro dispositivo para funcionar tanto a 11 GHz como a 12 GHz y a 13 GHz.

POSICIÓN DE LAS PENETRACIONES DE LOS POSTES DEL FILTRO (mm)			
Estructura	11 GHz	12 GHz	13 GHz
Primera ventana	3.60	2.73	0.42
Primera cavidad	3.41	2.49	0.47
Segunda ventana	3.85	2.90	0.50
Segunda cavidad	3.66	2.69	0.49
Tercera ventana	3.76	2.70	0.50
Tercera cavidad	3.66	2.71	0.50
Cuarta ventana	3.84	2.59	0.60
Cuarta cavidad	3.42	2.59	0.47
Quinta ventana	3.59	2.34	0.41

Tabla III. Penetración de los postes del filtro en HFSS para las distintas frecuencias.

Si observamos la Tabla III vemos que los datos obtenidos tienen el comportamiento esperado, además, como era de esperar es distinta a los valores que observábamos en la Tabla II. Para frecuencias menores los postes de las ventanas deben penetrar más para aumentar, de esta forma, el acoplo. De igual modo, a mayor frecuencia, debemos sacar los postes de acoplo de la estructura para compensar el menor acoplo necesario.

3. Desarrollo del prototipo

En este capítulo vamos a explicar los pasos que hemos seguido para realizar un esquema de fabricación del dispositivo que estamos estudiando con el objetivo de obtener y fabricar un filtro real y comprobar que, dentro de los márgenes que se han definido para este dispositivo, se cumplen o no las especificaciones de partida.

Veremos cuál debe ser el proceso a seguir para verificar el diseño en el programa HFSS, así como cuáles son los pasos que debemos seguir para generar los archivos necesarios para mandar a su fabricación del filtro diseñado.

Una vez hecho esto también se explicará el proceso y la metodología seguida para poder medir la respuesta del dispositivo en un laboratorio equipado con las herramientas necesarias para este fin, cómo son el uso de un analizador de redes (VNA). Se expondrán los pasos seguidos y la forma en la que se ha ajustado el filtro y el VNA para conseguir los resultados que se mostrarán en el siguiente capítulo.

3.1. Optimización de dimensiones

Hasta este momento hemos seguido unos criterios de simulación que podemos considerar como poco exigentes. Esto nos ha ayudado a poder realizar una gran cantidad de simulaciones y pruebas sin tener que invertir mucho tiempo de procesamiento de cálculo.

A pesar de ello, podíamos considerar que los resultados aportados por los programas tenían cierta fiabilidad, ya que, en mayor o menor medida, la respuesta de un filtro real tendrá una respuesta próxima a éstas. Esto nos ha servido para tener una idea aproximada de cómo sería nuestro dispositivo.

Ahora que queremos llevar a cabo la fabricación del prototipo de nuestro dispositivo debemos asegurar, bajo un criterio muy estricto que las dimensiones y penetraciones de los tornillos definidos darán, considerando las tolerancias de fabricación, la respuesta deseada.

Para ello vamos a aumentar de forma significativa los criterios de simulación y convergencia de HFSS. En la siguiente tabla se observa las diferencias entre los dos tipos de simulaciones empleadas:

Propiedades en HFSS	Mayor velocidad de simulación	Mayor exactitud de la respuesta
Maximum Delta S	0.02	0.001
Minimum Number of Passes	1	5
Maximum Numer of Passes	10	30
Minimum Converged Passes	1	3
Tiempo medio de simulación	10-15 minutos	2-3 horas

Tabla IV. Diferencia de criterios de simulación en HFSS.

Debemos tener también en consideración que estos pasos de aproximación al comportamiento real del filtro, que hemos estado realizando poco a poco, ha sido con el objetivo de no perder en ningún momento la referencia de la respuesta ideal que queremos obtener, ya que, de esta forma, conseguíamos que en cada paso la respuesta no se desviara mucho de la ideal. Como hemos visto, ASM nos hubiera permitido pasar del diseño ideal en FEST3D al más completo y complejo en HFSS y obtener la respuesta ideal en este último tras algunas iteraciones, pero hubiera sido complejo mantener aspectos de diseño externos a la propia respuesta del filtro, como, por ejemplo, mantener la penetración a 0,5mm de los postes para la frecuencia superior.

El objetivo por tanto en este punto será el de verificar que obtenemos la respuesta ideal bajo estos criterios de simulación y en el caso de ser necesarios, realizar una pequeña optimización y ajustes sobre las dimensiones del filtro utilizando el método ASM nuevamente.

En la Fig. 31 se observa el resultado de simular nuestro filtro con un alto nivel de convergencia.

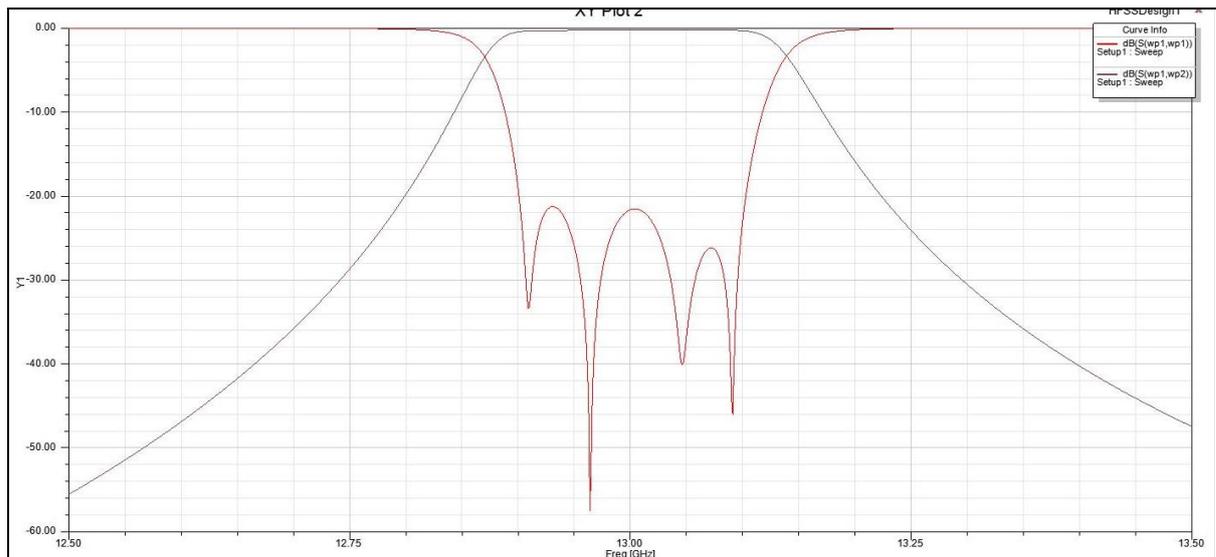


Fig. 31. Respuesta del filtro en HFSS con el criterio de exactitud en la simulación.

Como podemos observar, la respuesta del filtro bajo estos criterios de simulación se ha desviado ligeramente de la ideal que estamos buscando. Por tanto, procedemos a realizar una última iteración empleando el método ASM entre FEST3D y HFSS para ajustar los postes a su posición correcta y más exacta.

De esta forma conseguiremos finalmente una respuesta deseada (ver Fig. 32) que podremos recuperar con total seguridad en el prototipo fabricado ajustando los tornillos de sintonización presentes en la estructura.

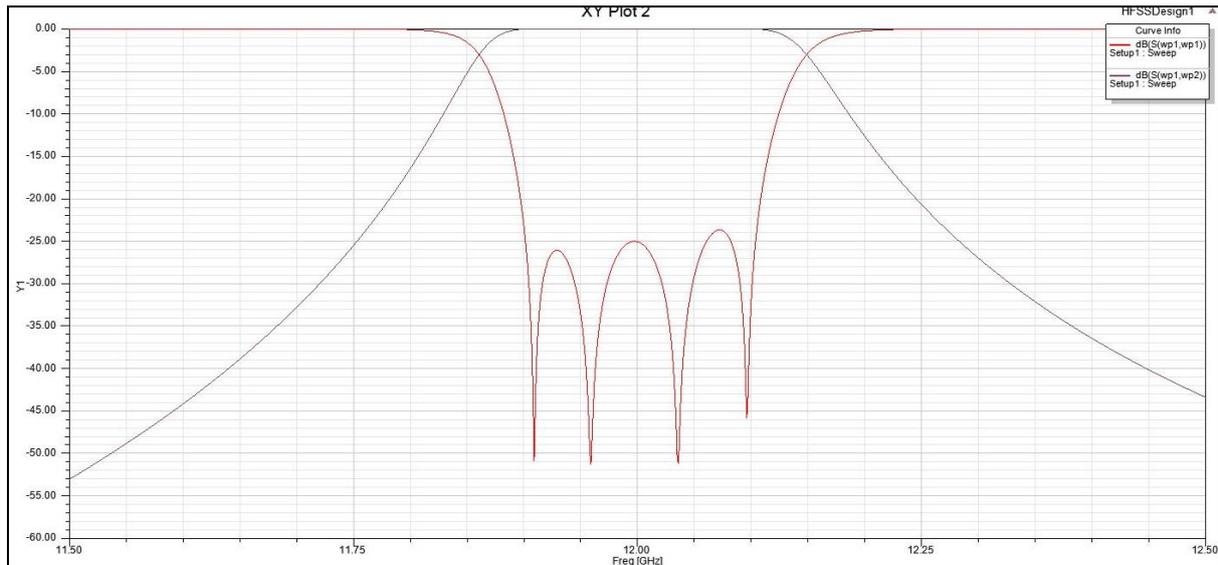


Fig. 32. Respuesta en HFSS con el criterio de exactitud en la simulación recuperado.

Una vez realizados todos estos pasos, y comprobado que tenemos la respuesta deseada estamos en condición de poder generar la documentación y archivos necesarios para realizar la fabricación del dispositivo.

3.2. Generación del prototipo

Una vez que hemos verificado que nuestro diseño teórico tiene unas dimensiones que asegura la posible recuperación de la respuesta una vez fabricado el dispositivo debemos generar los archivos necesarios para su correcta fabricación.

Para ello nos basaremos en la norma ISO 10303-21 [8]; la cual define el mecanismo de codificación para representar en un documento un esquema o figura en 3D dado y que puede ser leído por las máquinas de fabricación de estos tipos de dispositivos que utilizan las empresas.

Estos tipos de archivos son conocidos por la terminación `.STEP` o `.STP`. Al tratarse de un estándar ampliamente utilizado nos asegurará que no habrá problemas de compatibilidad o errores en el diseño una vez sea mandado a fabricar.

Tanto el programa FEST3D como el HFSS disponen de la generación automática de este tipo de documentos a partir del esquema realizado, por tanto, los pasos de generación de los archivos de fabricación del prototipo no nos supondrán un gran problema.

Una vez generado este archivo, en HFSS, ya que se trata de nuestro diseño final, si deseamos verificar que el diseño es el correcto nosotros mismos podemos importar el archivo con FEST3D o con HFSS y verificar que no contiene ningún problema ni error de dimensiones. También es posible utilizar cualquier programa que disponga de visualizador de archivos `.STEP` como pueden ser los programas CAD o STEPViewer (Windows) o FreeCAD (Linux) para verificar el archivo generado.

3.3. Medidas en laboratorio

Una vez fabricado el prototipo y recibido, tendremos que medir con un analizador de redes vectorial (Vectorial Network Analyzer, VNA) para intentar recuperar la respuesta deseada mediante el ajuste de los postes.

En la siguiente imagen podemos ver cómo queda el prototipo fabricado en aluminio (ver Fig. 33).



Fig. 33. Prototipo del filtro rectangular inductivo en aluminio.

Para realizar estas medidas de respuesta eléctrica, vamos a realizar un montaje para el cuál utilizaremos las siguientes herramientas presentes en un laboratorio experimental de circuitos de microondas:

- Analizador de Redes Vectorial.
- Kit de calibración para guías WR-75.
- Llave dinamométrica.
- Cables de conexión tipo SMA.
- Tornillos de fijación y llave de Allen.

Una vez tenemos preparadas las herramientas necesarias debemos asegurarnos de realizar el montaje de forma correcta, esto es, posicionar el filtro en un lugar accesible y evitar que los cables de conexión al VNA tengan grandes curvaturas. También es muy importante asegurarse que fijamos correctamente tanto los cables SMA con los kits de calibración con las transiciones a nuestro dispositivo, de esta forma evitaremos posibles fluctuaciones de la señal debido a malas conexiones.

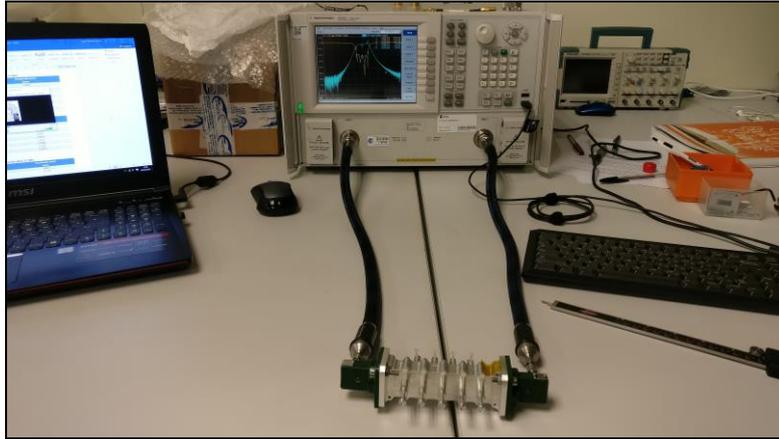


Fig. 34. Ejemplo de montaje de medida en laboratorio.

Por último, y después de asegurarnos que todo el proceso anterior se ha realizado correctamente, es necesario calibrar y configurar el VNA para que las medidas sean lo más precisas posibles.

Para ello, en este caso hemos definido una ventana de barrido de 10.5-13.5 GHz. Debemos recordar que a pesar de que nuestra frecuencia de trabajo para este dispositivo es entre los 11-13 GHz es importante ampliar el rango de frecuencias para la calibración. Además, el kit de calibración WR-75 está definido para trabajar entre los 10-15 GHz por tanto no podremos ir más lejos de los 10 GHz para realizar medidas en frecuencias inferiores.

Dado que hemos seleccionado un ancho de banda de calibración de 3 GHz definiremos en el analizador un mínimo de 3200 puntos con el objetivo de tener al menos 1 MHz de resolución en la respuesta del filtro. Con esto terminaremos la configuración y podremos realizar la calibración.

Para este caso, una vez realizada la calibración correctamente mediante el uso del kit, se define una ventana de 1 GHz alrededor de la frecuencia central de cada canal que vamos a intentar medir, con el objetivo de poder visualizar correctamente la respuesta en el canal de interés.

Como hemos definido en las características de nuestro dispositivo, centraremos las medidas del dispositivo en tres frecuencias específicas, 11, 12 y 13 GHz.

Las medidas del dispositivo se harán de forma manual, ayudándonos de las penetraciones previas dadas por HFSS y modificando posteriormente la penetración de los postes de sintonización y ajustándolos mediante la ayuda de unos tornillos de fijación de plástico presentes en la estructura del filtro. Es importante, por tanto, tener especial cuidado para no forzar el dispositivo y evitar que los postes se puedan doblar o encajar en el filtro.

Por último, una vez realizadas esta serie de medidas, intentaremos ampliar el ancho de banda de trabajo de nuestro dispositivo, observando dónde encontramos los límites de sintonización del mismo modificando la penetración de los postes. También comprobaremos si es posible ajustar el ancho de banda de cada canal, verificando de esta manera todos los objetivos marcados en el capítulo 1.

4. Primeros resultados

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos de las primeras medidas realizadas con el prototipo fabricado.

En esta sección se observarán las respuestas obtenidas a lo largo del ancho de banda de trabajo del filtro, además de otras medidas que nos servirán para verificar los resultados de simulación obtenidos en el capítulo 2. Además, se explicará brevemente cada resultado que servirá de base para el análisis y las conclusiones obtenidas que se describen en el último capítulo.

4.1. Canal a 13 GHz

En la primera de nuestras medidas nos hemos centrado en el canal que hemos definido a mayor frecuencia dentro de la banda de trabajo de nuestro dispositivo. Si recordamos, teóricamente, todos los postes estarán alrededor de una penetración de 0,5 mm por tanto será el canal más fácil de sintonizar ya que los cambios que tendremos que aplicar serán menores. Dado que los ajustes de sintonización se realizan de forma manual se pueden observar en distintas medidas como varía la respuesta de nuestro filtro.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este primer canal en concreto (ver Fig. 35).

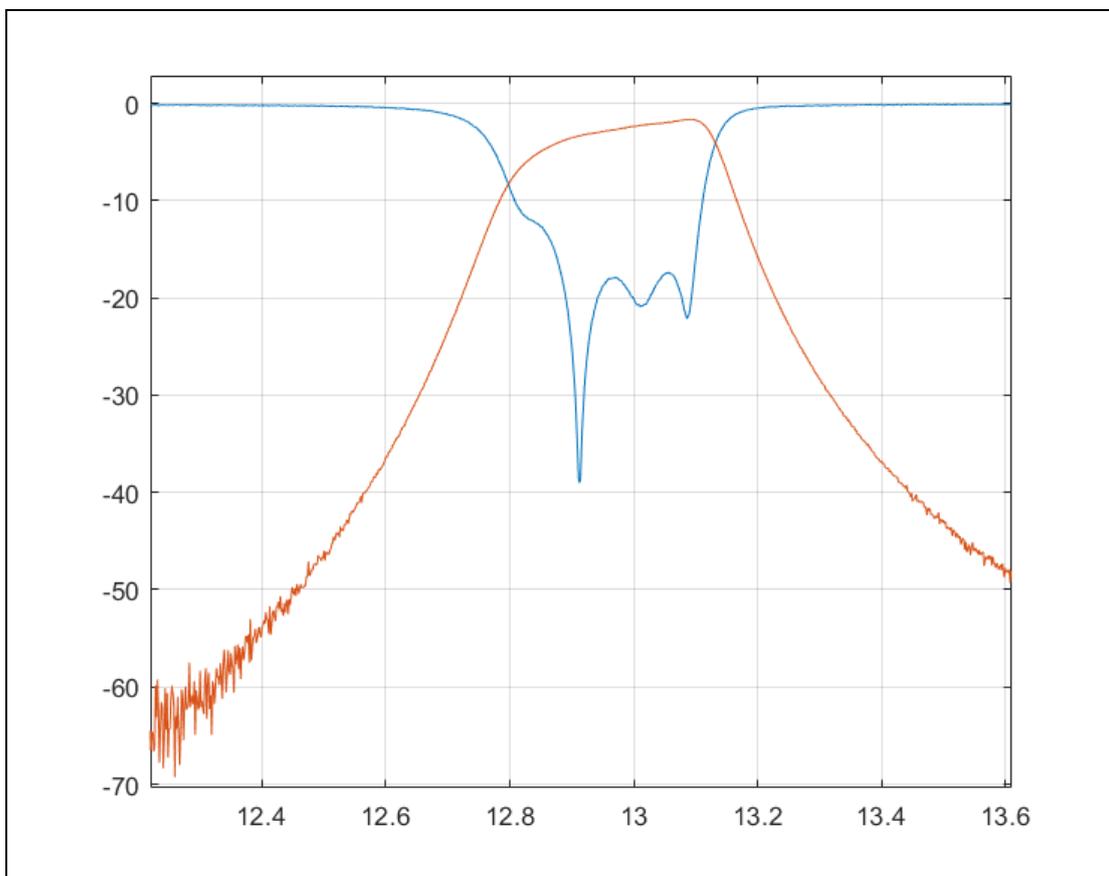


Fig. 35. Primera respuesta del filtro a la frecuencia de canal de 13 GHz. Imagen generada en Matlab con los datos obtenidos de las medidas en el VNA.

Observamos que, en la primera medida, con todos los postes con una penetración a 0,5 mm no se ha conseguido sintonizar del todo el canal, por tanto, como hemos dicho anteriormente, la sintonización correcta final se hará de forma manual ajustando cada poste para lograr la respuesta ideal. Como hemos comentado en el capítulo 2, el método ASM nos puede servir para tener una referencia de cuál debe ser el movimiento de los postes en el filtro para lograr sintonizarlo correctamente, esto es, usando como espacio preciso la medida del VNA y como espacio poco preciso el programa FEST3D para recuperar la respuesta. Con todo ello y tras el ajuste correspondiente nos queda una segunda medida como la mostrada en la Fig. 36.

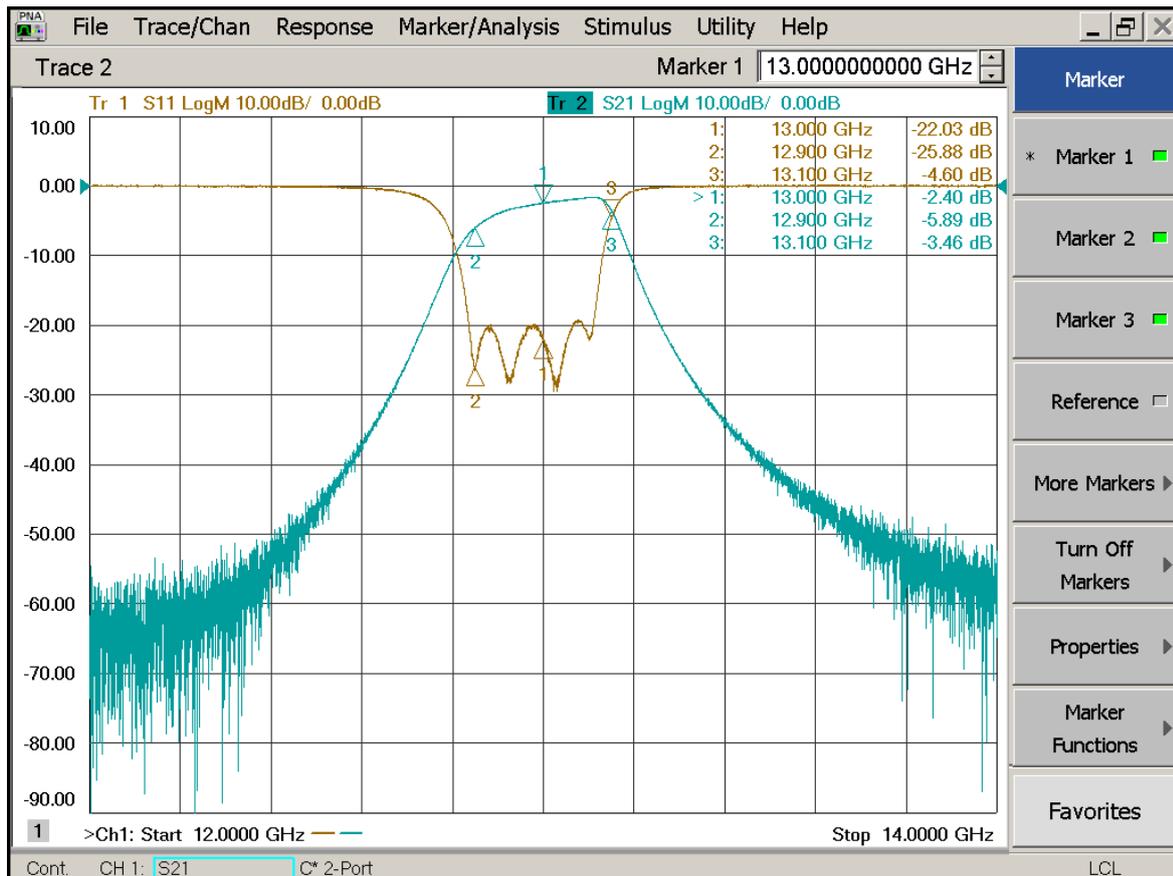


Fig. 36. Segunda respuesta del filtro sintonizado a la frecuencia de canal de 13 GHz.

Como podemos observar, en la Fig. 36 hemos conseguido sintonizar el canal correctamente y aumentar las pérdidas de retorno para que llegue hasta los 20dB, además hemos ampliado el rango de frecuencias de barrido para observar que es lo que ocurre fuera del canal de interés. Podemos observar que en el parámetro S_{12} a medida que nos alejamos de la frecuencia central disminuye el nivel y no aparece ninguna resonancia extraña en la estructura, justo como esperábamos. También observamos que existe una pendiente en las pérdidas de inserción que afecta en mayor medida a la parte baja de las frecuencias del canal sintonizado. Esto es posible que se deba al efecto de las pérdidas en la estructura y el acoplo que provoca que penetren en la estructura.

También se observa, además de la citada pendiente, que el filtro presenta un gran nivel de pérdidas de inserción (2,4 dB en la parte central del canal) y que por tanto, para que sea utilizable en el sector espacial deberemos estudiar cómo mejorar este aspecto.

Por otro lado, el parámetro S_{11} se comporta correctamente, pudiendo visualizar sin problema los 4 polos y llegando hasta un nivel de pérdidas de retorno de al menos 20 dB en toda la banda de trabajo del canal.

4.2. Canal a 12 GHz

Para verificar que nuestro dispositivo tiene la capacidad de ser sintonizado en todo el rango de trabajo definido, recuperaremos la respuesta de un canal intermedio entre el de mayor y el de menor y frecuencia.

A continuación, se muestra el resultado de esta sintonización:

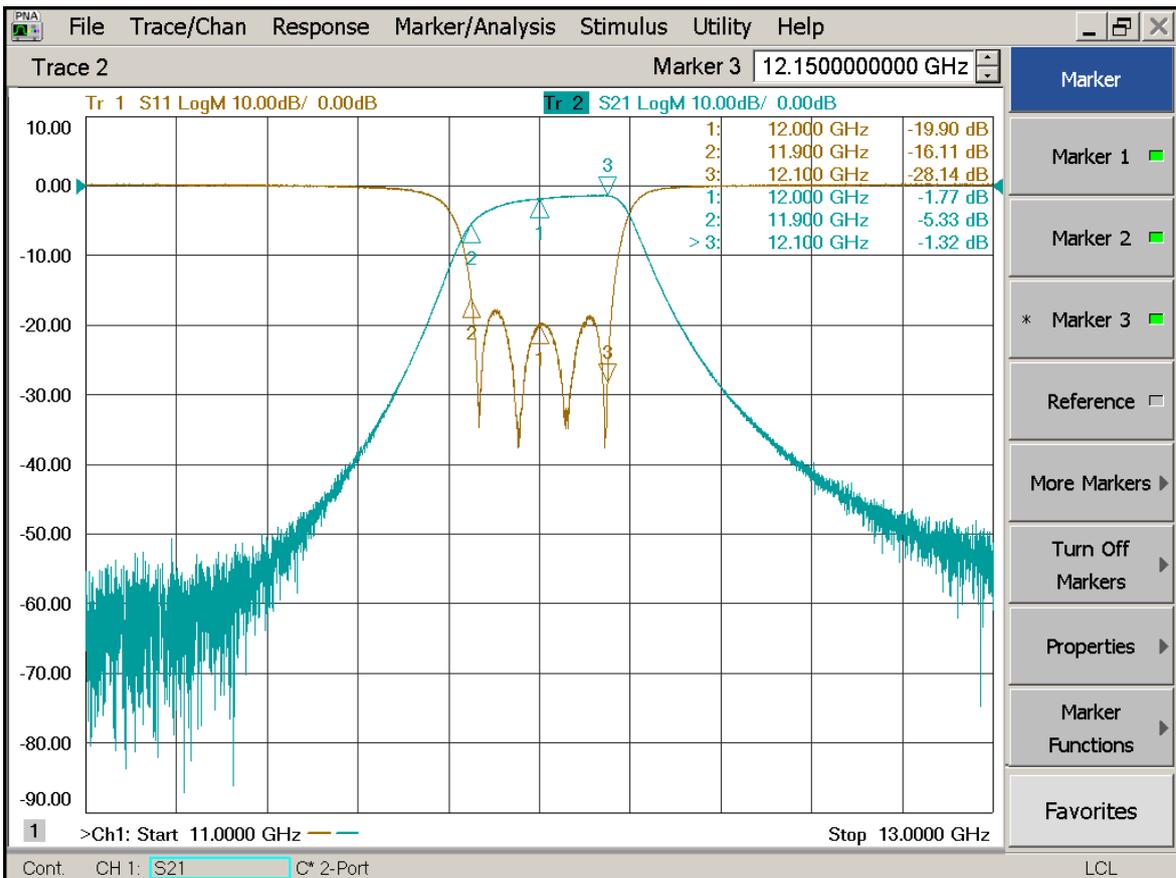


Fig. 37. Respuesta del filtro sintonizado a la frecuencia de canal de 12 GHz.

Como se puede observar, al igual que en el caso anterior, cumplimos tanto el requisito de ancho de banda como de pérdidas de retorno. Se observa de nuevo el comportamiento en pendiente de las pérdidas de inserción, aunque esta vez presenta un total de 1,7 dB en la parte central del canal.

Esto puede ser debido a la ventaja que tenemos al encontrarnos en la parte central de trabajo para el cual se ha diseñado el dispositivo, ya que los postes penetran una distancia razonable y no nos encontramos en los límites de funcionamiento que puede ofrecer la estructura. Aun así, estos niveles siguen siendo demasiado altos y como veremos en el siguiente capítulo este aspecto debemos mejorarlo.

4.3. Canal a 11 GHz

Una vez medidos los dos canales anteriores, solamente queda comprobar que nuestro filtro es capaz de sintonizarse a la menor frecuencia de trabajo para el cual lo hemos diseñado, esto es, a 11 GHz.

En las siguientes figuras se pueden observar las respuestas conseguidas:

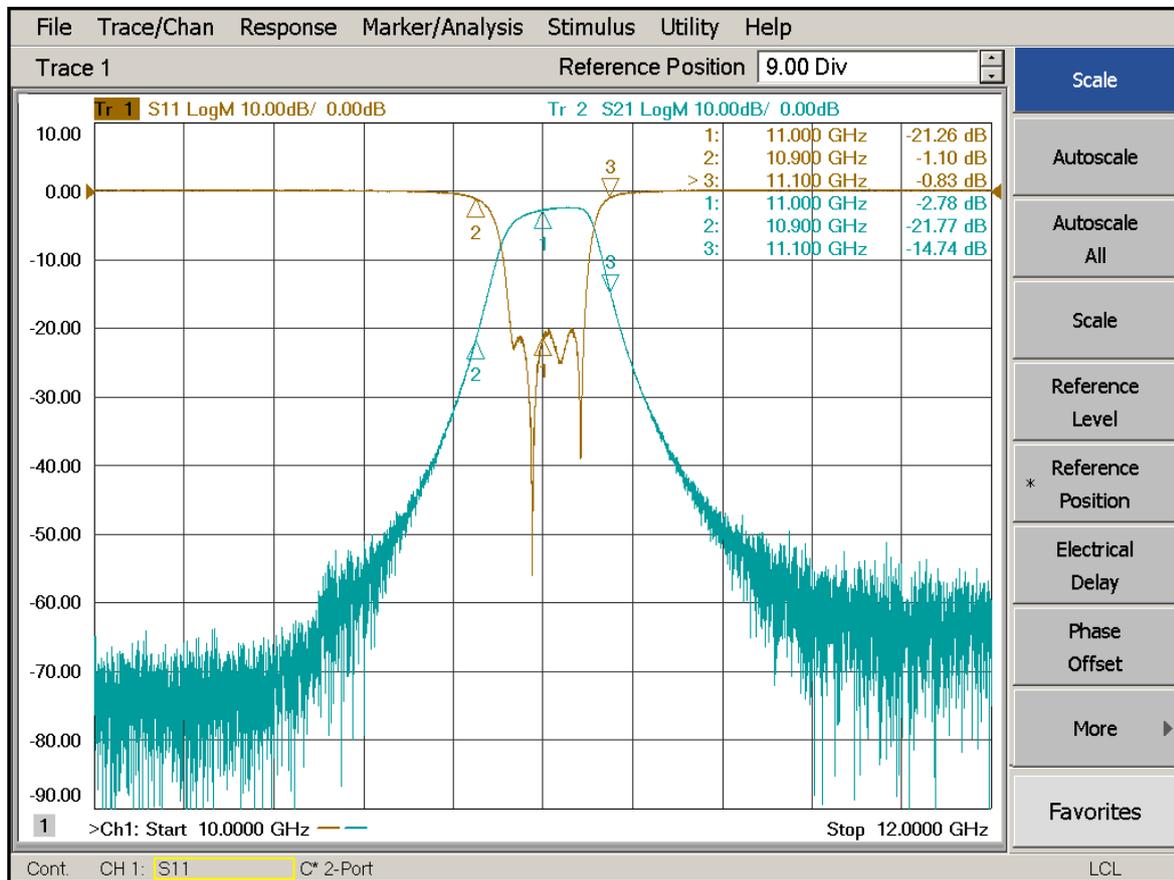


Fig. 38. Primera respuesta del filtro sintonizado a la frecuencia de canal de 11 GHz

Como podemos observar, en este caso también cumplimos los requisitos que habíamos definido al configurar el filtro. A pesar de ello podemos observar que presenta demasiadas pérdidas de inserción respecto a los casos anteriores. Por ello, podemos intentar mejorar la respuesta mediante un pequeño ajuste de los tornillos de sintonización.

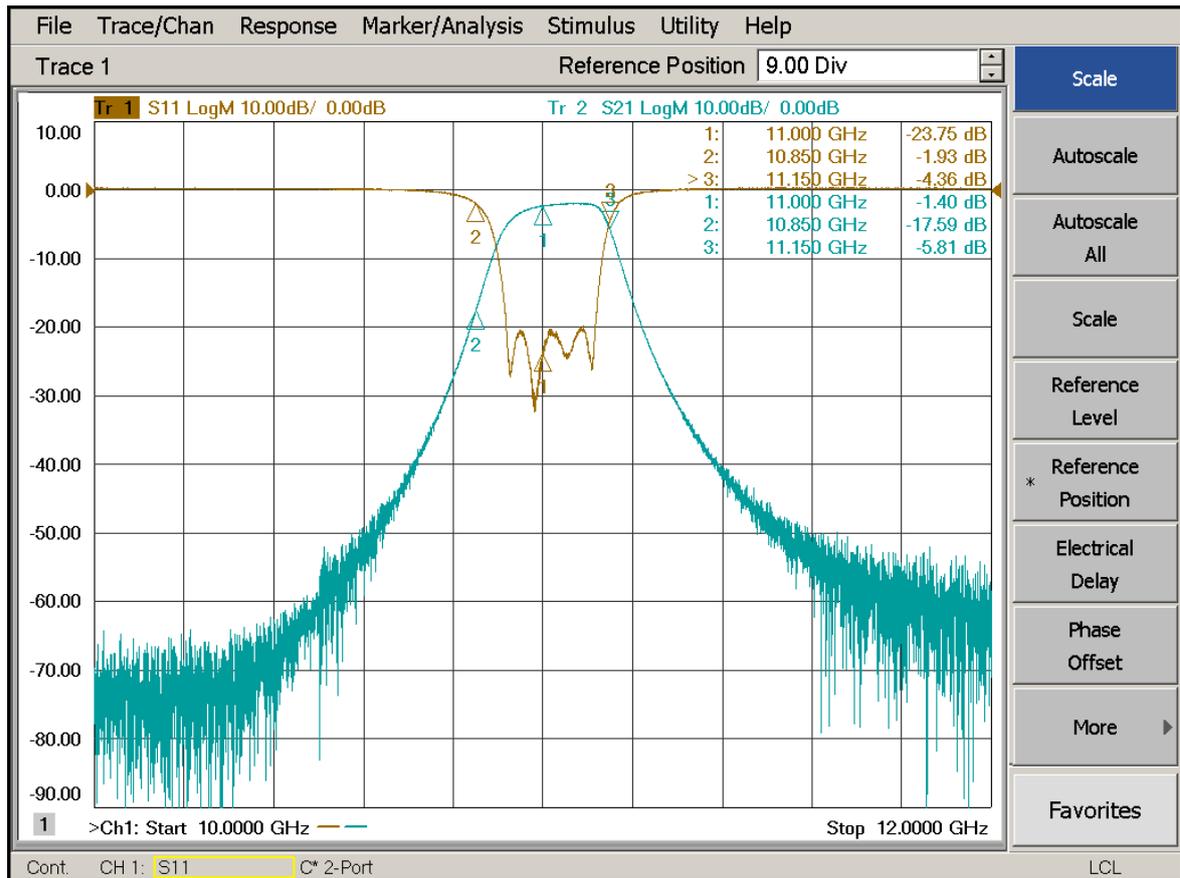


Fig. 39. Segunda respuesta del filtro para la frecuencia de canal de 11 GHz.

Aquí se puede observar cómo hemos mejorado en 1 dB las pérdidas de inserción. Esto nos demuestra que los postes del filtro son bastante sensibles a pequeños cambios, ya que nos encontramos con el mismo tipo de respuesta que en la Fig. 38, pero con un mejor comportamiento de las pérdidas de inserción habiendo ajustado un poco mejor los postes en la estructura.

Al igual que en los dos casos comentados anteriormente, el filtro se comporta de forma correcta y se puede sintonizar a lo largo del ancho de banda de trabajo definido, pero presenta además de una pronunciada pendiente unas grandes pérdidas de inserción que debemos reducir.

4.4. Reconfiguración del ancho de banda de canal

Como ya hemos dicho anteriormente, uno de los objetivos del diseño de este tipo de filtros es comprobar que, mediante la inclusión de los tornillos de sintonización en las ventanas del dispositivo, podemos modificar el ancho de trabajo de cada canal.

Por ello, vamos a realizar unas medidas en las que hemos modificado el ancho de canal mediante el ajuste de estos postes.

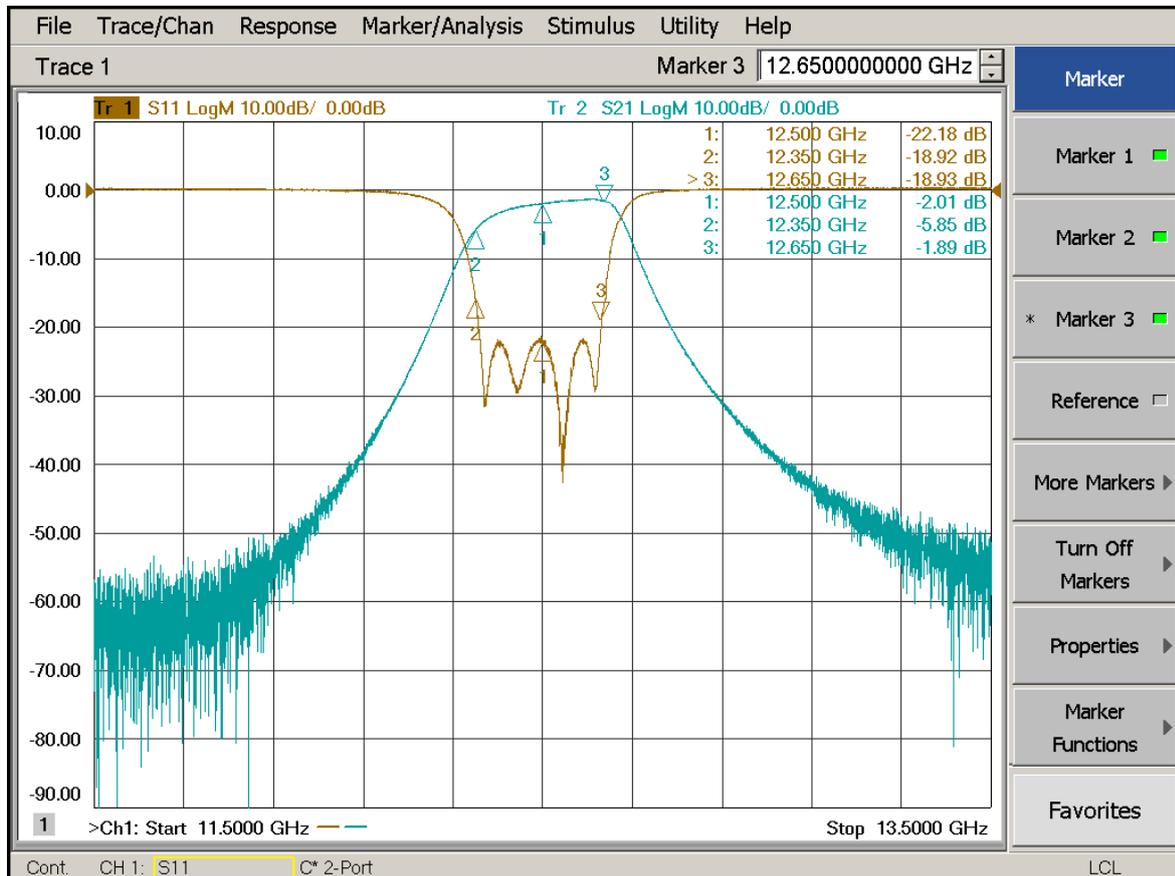


Fig. 40. Respuesta a 12.5 GHz y un ancho de banda de canal de 300 MHz.

Como podemos ver en la Fig. 40, hemos logrado una respuesta que cumple con las especificaciones dadas para el filtro y que hemos conseguido que además tenga 300 MHz de ancho de canal (100 MHz más que las especificaciones iniciales).

De nuevo podemos observar que el comportamiento del filtro es bueno pero las pérdidas de inserción son demasiado elevadas para su uso en aplicaciones espaciales.

4.5. Estudio de la simetría de los parámetros S_{11} y S_{22}

Una vez vistas las sintonizaciones de los distintos canales y observado el comportamiento que hemos obtenido de la estructura fabricada, nos queda estudiar cuales son las posibles implicaciones de tener unas elevadas pérdidas de inserción, y qué efectos pueden provocar la pendiente que presenta en frecuencia el parámetro S_{12} .

Por ello, vamos a situarnos de nuevo en la frecuencia de 12 GHz (ya que al estar en la parte central será el que mejor comportamiento deberíamos experimentar) y mostraremos los cuatros parámetros de dispersión que definen el comportamiento eléctrico completo del filtro.

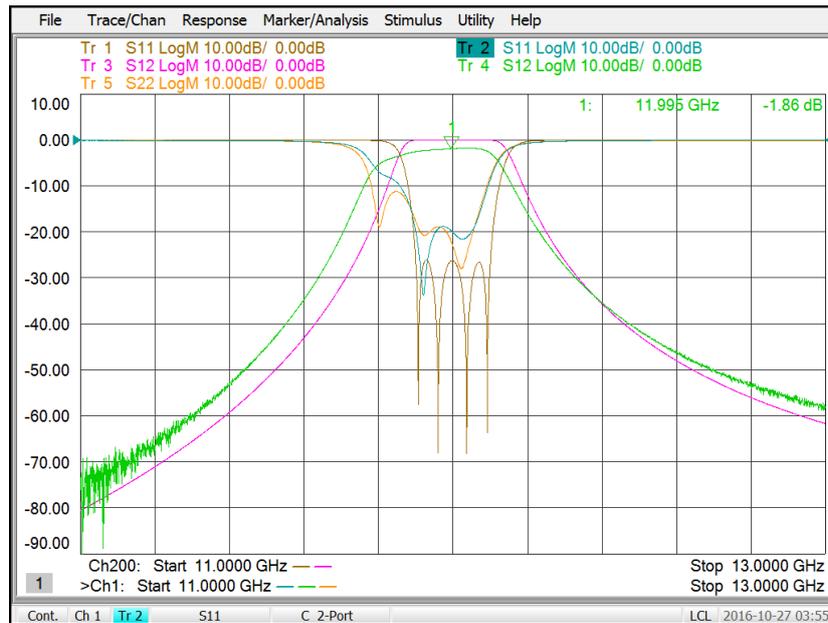


Fig. 41. Primera medida de los parámetros a una frecuencia central de canal de 12 GHz.

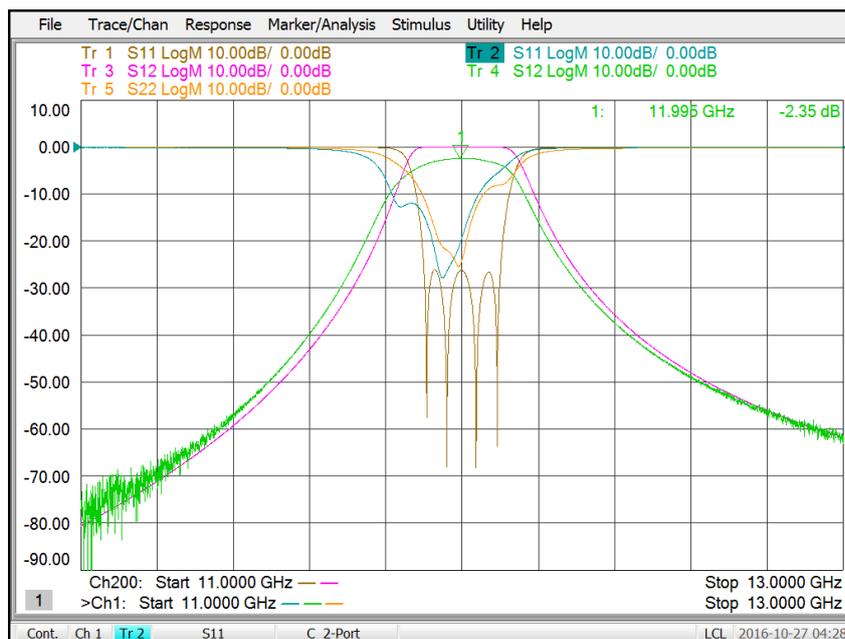


Fig. 42. Segunda medida de los parámetros a una frecuencia central de canal de 12 GHz.

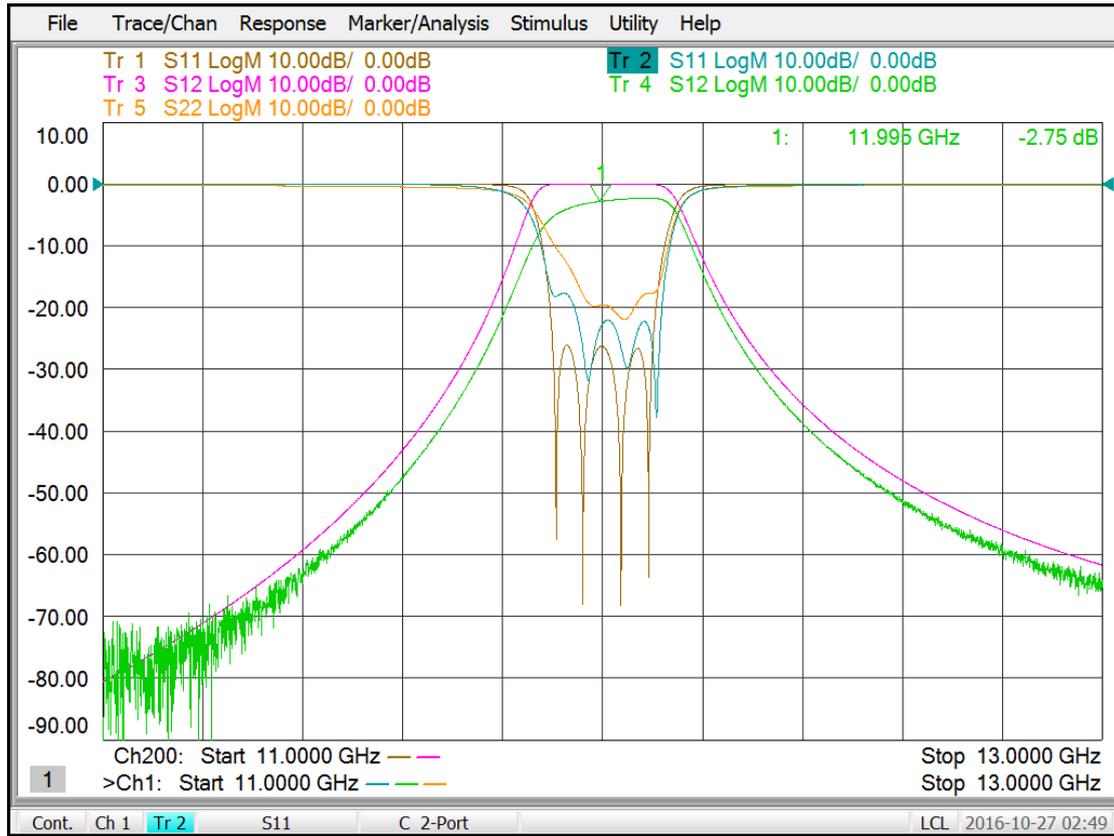


Fig. 43. Respuesta de los parámetros con la sintonización del canal a 12 GHz.

Como se puede observar tanto en la Fig. 41 como en la Fig. 42, los parámetros S_{11} y S_{22} (traza azul [TR2] y traza naranja [TR5]) se encuentran totalmente en asimetría, siendo más evidente en aquellos puntos donde la estructura presenta mayores pérdidas de inserción.

En la Fig. 43, donde se encuentra sintonizado el canal a 12 GHz observamos el mismo comportamiento. Esto provoca que sea más difícil de sintonizar el filtro, y que además una vez sintonizado solo pueda usarse en un sentido de trabajo. Este comportamiento no es nada deseable para un filtro de canal como el que hemos diseñado, y por tanto debemos conseguir bajar las pérdidas de inserción de la estructura y mejorar la simetría del mismo.

5. Plateado y últimos resultados

Como hemos observado en el capítulo anterior, el filtro estudiado y fabricado presentaba un buen comportamiento de sintonización de los distintos canales para los que había sido diseñado.

A pesar de ello, se observaba que la estructura presentaba altas pérdidas de inserción (2-3 dB) (Fig. 40), que para el uso en sistemas de comunicaciones por satélite no son asumibles. Además, esto provocaba que los parámetros S_{11} y S_{22} del filtro presentaran una alta asimetría provocando que cuando se sintonizaba correctamente un canal siguiendo, por ejemplo, el parámetro S_{11} , el parámetro S_{22} presentara muy mala respuesta (Fig. 43).

Con el objetivo de mejorar estos aspectos del filtro se ha procedido a platear completamente el filtro y los postes que conforman la totalidad de la estructura, esperando mejorar en gran medida las pérdidas de inserción y por tanto la asimetría del dispositivo.

Esta técnica es común en la fabricación de dispositivos pasivos embarcados en satélite, ya que mejoran en gran medida las características y respuestas electromagnéticas de los dispositivos (la plata es el mejor conductor metálico actual, conductividad eléctrica = $6,30 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$). Consiste en añadir una fina capa de plata al dispositivo en toda la estructura mejorando de esta forma su comportamiento.

El dispositivo una vez plateado queda de la siguiente forma:

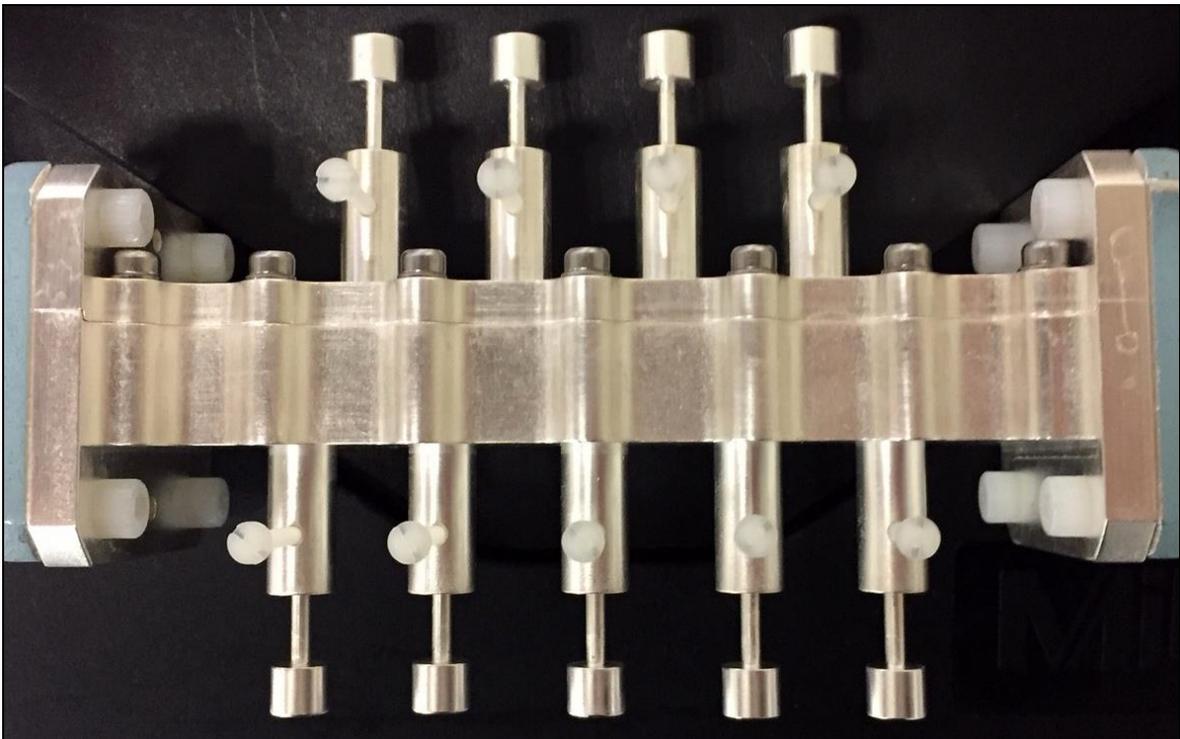


Fig. 44. Filtro rectangular de aluminio con plateado.

Y obtenemos la siguiente respuesta para la sintonización del canal de 12 GHz:

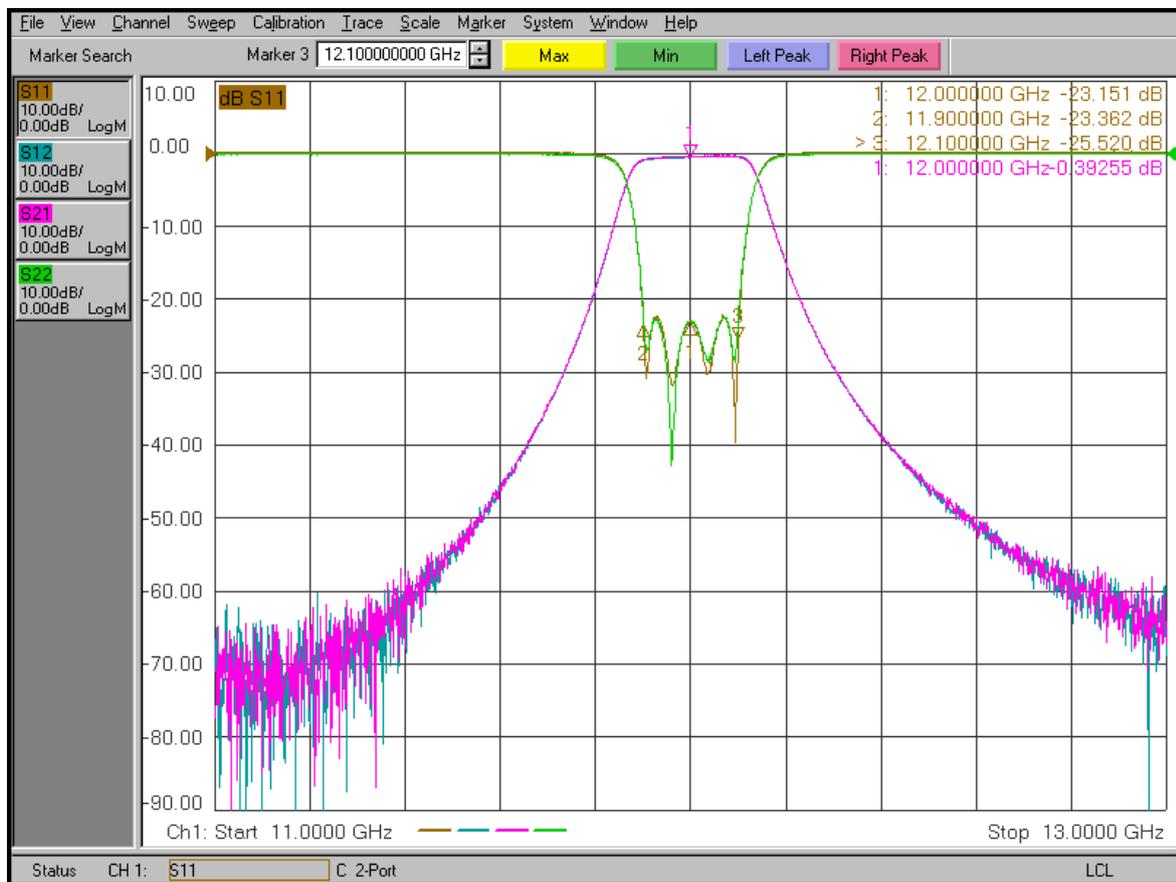


Fig. 45. Respuesta del filtro a 12 GHz después del plateado.

Como podemos observar una vez hemos sintonizado el canal a 12 GHz, y el filtro presenta unas pérdidas de inserción en el centro de la banda de 0,4 dB. Aunque se observa que sigue existiendo una pequeña pendiente en las pérdidas de inserción los valores varían entre 0,3 dB en su nivel más bajo a 0,5 dB en su nivel más alto dentro de la banda de trabajo del canal. Por tanto, podemos decir que el plateado ha mejorado en gran medida las prestaciones que ofrecía la estructura en cuanto a pérdidas de inserción.

Pero no solamente las pérdidas de inserción han mejorado con el plateado. Como se puede observar, tanto el parámetro S_{11} (trazo naranja) como el parámetro S_{22} (trazo verde) se encuentran totalmente en simetría, haciéndose difícil diferenciar un trazo del otro. Además, por otro lado, también han mejorado las pérdidas de retorno, llegando hasta valores de 23-24 dB dentro de la banda de trabajo.

Podemos decir por tanto que el plateado ha sido un gran acierto a la hora de mejorar las prestaciones del dispositivo, acercando su comportamiento muy próximo al obtenido en las simulaciones realizadas en FEST3D y HFSS mediante el uso del ASM.

6. Resumen, análisis y conclusiones

Llegamos al capítulo 6 donde expondremos un breve resumen de lo visto en los capítulos anteriores de este documento, haciendo especial énfasis en los objetivos que nos habíamos marcado para la realización de este proyecto. De esta forma, analizaremos los resultados obtenidos y cuál ha sido el grado de éxito de nuestra investigación.

Posteriormente se expondrán las conclusiones que podemos sacar de toda la información obtenida y plantearemos las posibles líneas de trabajo futuro para este proyecto, tanto para mejorarlo como para dar pie a nuevas investigaciones.

6.1. Repaso de objetivos

Como se ha detallado en el capítulo 1, el principal objetivo de este trabajo de investigación era lograr diseñar un filtro de canal con los requisitos de los dispositivos embarcados en los satélites de comunicaciones, que además pudiera tener una respuesta reconfigurable y por tanto cambiar sus características de trabajo, todo ello basando el diseño, estudio teórico y sintonización posterior del prototipo utilizando la metodología de ASM.

A pesar de que en la actualidad se pueden encontrar multitud de diseños de filtros con respuesta reconfigurable, estos suelen ser costosos de realizar o no cumplen los requisitos marcados. El objetivo del proyecto era investigar un diseño fácil y rápido de fabricar y por tanto económico, que además cumpliera con las altas exigencias de este tipo de dispositivos para su uso en el espacio.

Por otro lado, el segundo objetivo principal del trabajo era investigar las posibilidades de aplicación del método ASM para el diseño y desarrollo de filtros, fijándonos en las ventajas de su utilización para la optimización y recuperación de las respuestas ideales con las que se diseñan los dispositivos.

6.2. Análisis y valoración de resultados

Como se puede observar en el capítulo anterior, podemos afirmar que nuestro dispositivo se ajusta a los resultados obtenidos en las simulaciones de FEM3D y HFSS y que, además, como podemos comprobar en la Fig. 45, se cumple con los requisitos marcados para este tipo de dispositivos especificados en la Tabla I.

También se ha demostrado que es posible reconfigurar el ancho de banda de trabajo del canal del dispositivo (Fig. 40), variando para ello los postes de sintonía de las ventanas de acoplo.

Podemos decir, por tanto, que en el campo de funcionamiento del dispositivo, hemos logrado conseguir un diseño que cumple con las especificaciones dadas para trabajar en un satélite de comunicaciones, que presenta un gran ancho de banda de trabajo (en el cual podemos sintonizar el canal deseado cambiando la penetración de los distintos postes de sintonización que hemos añadido a la estructura y que además, en caso de ser necesario, podemos variar el ancho de banda de cada canal según las necesidades en cada momento).

Por otro lado, debemos tener en cuenta los inconvenientes que presenta el diseño y que sería deseable que se mejorasen.

El primero de ellos es indudablemente las pérdidas de inserción que presenta el dispositivo sin ser plateado. A pesar de que no se encontraba dentro de nuestros requisitos en el diseño del filtro es aconsejable mantener el nivel de pérdidas de inserción lo menor posible (entre 0,5-1 dB). Como hemos podido observar en las simulaciones del programa HFSS (ver Fig. 30), en el que si hemos especificado que el material sería aluminio y que por tanto tuviera en cuenta las pérdidas en la simulación, el nivel se mantenía teóricamente debajo de 1 dB, pero como podemos comprobar en los resultados de las medidas experimentales si el filtro no se encontraba plateado siempre hemos tenido un nivel entre 1 y 3 dB de pérdidas de inserción.

Aunque debemos tener en cuenta que este efecto es posible que sea debido al método de medida utilizado, en el cuál los tornillos de fijación de teflón de los postes de sintonización no estaban correctamente fijados para facilitar el movimiento de los postes. Además, debemos tener en cuenta otros factores que pueden contribuir a esta pérdida de nivel de la señal, como pueden ser los malos contactos de las uniones o el estado de los cables de conexiones o también una calibración poco exigente en el VNA.

También se ha observado que existía una alta asimetría en los valores de los parámetros S_{11} y S_{22} y que por tanto el dispositivo no cumplía con la característica de reciprocidad, esperable para este tipo de estructuras.

Aun así, con el plateado del dispositivo todos estos aspectos se han solucionado limitando las pérdidas de inserción alrededor de los 0,5 dB de media para todos los canales. Por tanto, queda justificado el plateado del dispositivo y el pequeño encarecimiento del filtro debido a ello.

En cuanto al método ASM, hemos comprobado que se verificaba la teoría perturbacional en la que basamos nuestra hipótesis vistas en el capítulo 2. La metodología ASM nos ha sido de gran utilidad para modificar, diseñar y sintonizar tanto en HFSS como experimentalmente en el laboratorio el dispositivo con el que estábamos trabajando. Todo ello reduciendo en gran medida el número de iteraciones necesarias para optimizar el diseño y convirtiendo el proceso más costoso computacionalmente, como es la optimización y recuperación de la respuesta, al que generalmente es necesario invertir horas de proceso computacional y cálculos, a tan solo unos minutos.

6.3. Líneas futuras

Una vez repasados los objetivos que teníamos marcados, analizado los resultados obtenidos y valorado los aspectos positivos y negativos del prototipo, estamos en disposición de plantear las posibles mejoras o aplicaciones que podrían enriquecer el trabajo realizado hasta la fecha.

Por una parte, hemos visto cómo los resultados obtenidos nos dejan ver que el diseño permite el cambio en el ancho de canal, pudiendo reconfigurar el filtro según las necesidades establecidas en cada momento. Sería de especial interés para el desarrollo de este tipo de diseños investigar (al igual que hemos hecho con la banda total de trabajo)

cuales son los límites de reconfiguración de cada canal dentro de una banda de frecuencias establecidas. Disponer de un dispositivo capaz de trabajar con una gran variedad de anchos de banda de canal incrementaría en gran medida el interés por este tipo de tecnología.

Por otra parte, respecto al problema de las pérdidas de inserción del dispositivo previo al plateado de la estructura, se podría estudiar el material base del filtro (cobre, por ejemplo) o el uso de postes y tornillos de fijación distintos a los usados en el prototipo, lo que podría también mejorar este aspecto.

Sería muy interesante para este tipo de tecnologías que la reconfiguración del filtro se hiciera de forma rápida y fiable.

Por último, hemos podido comprobar que el método ASM aplicado a filtros y bajo las condiciones expuestas conseguía en tan solo un paso recuperar la respuesta ideal en un simulador muy preciso (como es HFSS) convirtiendo el paso de optimización de la estructura en algo sencillo y rápido de implementar.

Por tanto, analizados todos los puntos expuestos se proponen varias líneas de investigación que podrían servirse de este trabajo y avanzar en sus posibilidades.

- Desarrollar un método automático de reconfiguración del filtro ayudándose del programa FEST3D, haciendo uso del método ASM. En este caso nuestro modelo preciso serían las medidas reales del filtro y nuestro modelo rápido en el cual realizar las optimizaciones la simulación del dispositivo en FEST3D. De esta forma, se conseguiría de forma rápida y sencilla cuáles son los cambios que debemos aplicar a los postes de sintonización para lograr la respuesta deseada.
- Investigar la utilización del método ASM para distintos tipos de filtros y dispositivos bajo las mismas condiciones estudiadas, y comprobar la eficacia de la implementación de la metodología seguida en la línea normal de desarrollo de este tipo de dispositivos.
- Utilizar tornillos en lugar de postes lisos para la sintonización del filtro y de esta forma tener un mayor control en la precisión de la penetración de cada uno de ellos.
- Instalar motores de precisión en los postes, para evitar realizar los cambios en las alturas de los postes de sintonización de forma manual y tener un bajo nivel de error ($\pm 1 \mu\text{m}$) al realizar los cambios.

Estas líneas de trabajo estarían muy relacionadas entre ellas ya que, recordemos, el objetivo final sería poder realizar de forma precisa la reconfiguración del filtro (tanto de cambio de frecuencia de canal como de ancho de banda de trabajo) una vez el dispositivo se ha embarcado en un satélite y está operando (a cientos o miles de kilómetros de distancia).

7. Bibliografía

- [1] Carlos Rosado, *Comunicaciones por Satélite: Principio, Tecnologías y Sistemas*, 2ª Edición, 2008.
- [2] Gerald Maral, *Sattellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, 5th Edición. Wiley 2009.
- [3] John W. Bandler, *Electronimagnetic Optimization Exploiting Aggressive Space Mapping*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 43, No.12, December 1995.
- [4] www.fest3d.com
- [5] <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [6] John W. Bandler, *Space Mapping Technique for Electronimagnetic Optimization*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Vol.. 42, No.12, December 1994.
- [7] H. Y. Huang, *Unified Approach to Quadrically Convergent Algorithms for Function Minimization*. Journal of Optimization Theory and Applications, June Vol. 5 Nr. 6 Pag. 405-423.
- [8] SCRA, *STEP Application Handbook ISO 10303 Version 3*. 5300 International Boulevard North Charleston, 2006.