



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

DEPARTAMENTO DE ELECTROMAGNETISMO Y TEORÍA DE CIRCUITOS

Resumen de la Tesis Doctoral:

CONTRIBUTION TO THE CAD OF  
MICROWAVE-MILLIMETERWAVE PASSIVE  
DEVICES BY MODE-MATCHING TECHNIQUES

CONTRIBUCIÓN AL CAD DE DISPOSITIVOS PASIVOS  
DE MICROONDAS-MILIMÉTRICAS MEDIANTE  
TÉCNICAS DE AJUSTE DE CAMPO

Autor:

Jorge Alfonso Ruiz Cruz

Director:

Prof. Jesús María Rebollar Machain

Defendida en Madrid, el 22 de Julio de 2005

(Sobresaliente *Cum Laude*)

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.3. Desarrollo . . . . .	5
1.4. Conclusiones . . . . .	6
<b>2. Originalidad del tema</b>	<b>7</b>
2.1. Antecedentes y contexto . . . . .	7
2.2. Nuevos métodos de análisis electromagnético . . . . .	7
2.3. Nuevas tecnologías de fabricación . . . . .	8
2.4. Nuevas estructuras de dispositivos . . . . .	9
<b>3. Resultados obtenidos</b>	<b>10</b>
3.1. Resultados relacionados con el análisis de estructuras . . . . .	10
3.2. Resultados relacionados con el diseño de estructuras . . . . .	11
<b>4. Aplicabilidad práctica del trabajo</b>	<b>13</b>
<b>A. Aportaciones de índole tecnológica relacionadas con la tesis</b>	<b>16</b>
<b>B. Trabajos publicados relacionados con la tesis</b>	<b>18</b>

## 1. Introducción

El marco de esta tesis es el Diseño Asistido por Ordenador (*Computer Aided Design* o CAD, en nomenclatura inglesa) de dispositivos pasivos de sistemas de comunicaciones. En particular, esta tesis versa sobre el análisis y diseño de componentes *hardware* en guía de onda en la banda de frecuencias de microondas-milimétricas. El objetivo es el diseño de varios dispositivos (véanse los ejemplos de la Fig. 1) con especificaciones de sistemas reales mediante técnicas de ajuste de campo (*mode-matching*). Los resultados obtenidos se han comparado con los de otras técnicas numéricas y con medidas sobre prototipos reales construidos. Esta visión general de la tesis se va a completar en los siguientes puntos con la motivación, objetivos, desarrollo y conclusiones a las que se ha llegado en el trabajo realizado.

### 1.1. Motivación

Los sistemas de comunicaciones en la banda de frecuencias de microondas y milimétricas han experimentado un gran desarrollo en los últimos años para dar soporte a aplicaciones muy diversas: desde televisión vía satélite para entretenimiento a sistemas radar de uso militar. Ejemplos de algunos de estos sistemas son las redes WLAN (*Wireless Local Area Networks*), los servicios GPS (*Global Positioning System*), las redes DBS (*Direct Broadcast Television Service*) y el sistema LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). En cuanto a servicios de telefonía celular se refiere, las generaciones 2.5G y 3G ofrecen paulatinamente servicios de mayor ancho de banda. La generación 2.5G permite transmisión de datos de baja velocidad, mientras que las 3G se han diseñado para posibilitar el acceso a Internet, la transmisión de datos multimedia y otras aplicaciones de banda ancha.

Esta demanda creciente de servicios y sistemas que los soporten se traduce en especificaciones más exigentes para los dispositivos *hardware* integrantes del sistema de comunicaciones en las tres facetas interdependientes a valorar en cualquier servicio o producto de ingeniería: calidad, tiempo de desarrollo y coste. La calidad está relacionada con las especificaciones eléctricas (número de canales del sistema, el espectro que se les asigna, máscara de pérdidas de retorno y de inserción para cada canal, niveles de potencia involucrados en las portadoras,...) y mecánicas (masa y volumen del dispositivo, materiales empleados, posiciones físicas de los interfaces,...). El coste y el tiempo de desarrollo vienen influidos por el número de prototipos experimentales que se construyen para verificar el funcionamiento de un diseño. Particularmente, la mayoría de los dispositivos estudiados en esta tesis tienen un coste muy elevado por unidad (requieren un mecanizado de alta precisión) y no siempre se pueden conseguir que cumplan las especificaciones eléctricas impuestas mediante ajuste experimental sobre un prototipo construido (lo que implica nuevos mecanizados y ajustes costosos).

Las herramientas CAD (*Computer Aided Design*) de diseño asistido por ordenador surgen en este contexto para facilitar el diseño de los dispositivos que componen los sistemas de comunicaciones, en este caso en la banda de frecuencias de microondas y milimétricas. El objetivo último de estas herramientas es proporcionar las dimensiones físicas de un dispositivo cuyo comportamiento cumpla unas determinadas especificaciones fijadas de antemano.

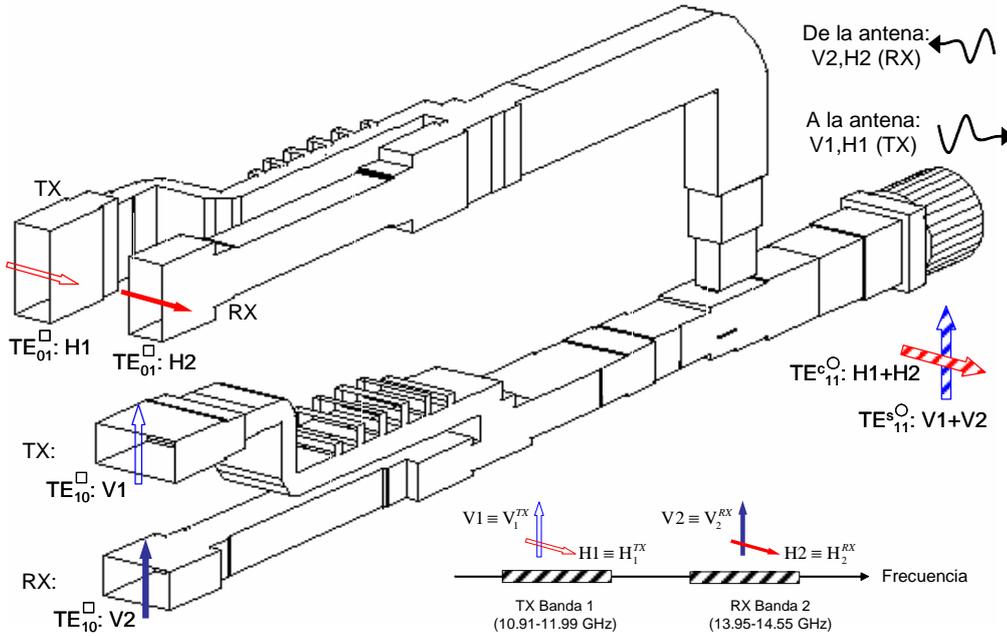


Figura 1: Sistema de microondas en doble polarización para comunicaciones por satélite compuesto de varios dispositivos pasivos en guía de onda: ortomodos, transiciones, codos y diplexores (a su vez formados por filtros y divisores de potencia).

Cuanto más precisa sea la herramienta, más se acortarán los posteriores procesos de prueba y error y de ajuste experimental en el laboratorio. Tanto los costes de fabricación como de desarrollo disminuirán por haberse reducido el número de prototipos y de ajustes experimentales. En resumen, las ventajas que aporta el CAD, cuando se dispone de él, son claras en cuanto a calidad, tiempo de desarrollo y coste.

La limitación de este enfoque reside en la disponibilidad de CAD de suficientes prestaciones para acometer cualquier tipo de diseño: no todos los dispositivos que se utilizan en la actualidad disponen de una herramienta CAD suficientemente eficiente para utilizarla en su diseño. Las herramientas CAD se distinguen por la forma de modelar un dispositivo, siempre pretendiendo que la caracterización del mismo sea lo más cercana a la realidad que se pueda (cuanto menos aproximaciones mejor) y usando los recursos de cálculo (rapidez, memoria utilizada,...) de la manera más eficiente posible. Ambos objetivos son difíciles de conseguir simultáneamente y en las herramientas CAD suele haber un compromiso entre la precisión de los resultados y los recursos que se utilizan para obtenerlos.

Dentro de los diferentes CAD de dispositivos pasivos de microondas-milimétricas, los basados en técnicas de ajuste de campo (empleados en esta tesis) son un buen ejemplo de métodos que consiguen aunar eficiencia y precisión. Su principal desventaja es que el conjunto de dispositivos que se pueden considerar mediante estos métodos no es tan amplio como en otros menos eficientes pero de aplicación más general. Ampliar ese conjunto es uno de los objetivos de la investigación que se ha llevado a cabo y es en este ámbito donde se enmarca la presente tesis: la *Contribución al CAD de dispositivos pasivos de microondas mediante técnicas de ajuste de campo* para conseguir un diseño óptimo de una serie de dispositivos.

## 1.2. Objetivos

La tesis tiene como objetivos la caracterización electromagnética eficiente y precisa de varios tipos de uniones en guía de onda y su posterior aplicación a estructuras reales. Se pretenden diseñar varios dispositivos pasivos de microondas-milimétricas usados de manera habitual en la industria y que no pueden ser diseñados de manera óptima usando software comercial o métodos descritos en la literatura existente.

En el texto de la tesis se hace una descripción detallada del estado del arte del CAD de dispositivos pasivos de microondas-milimétricas. En términos generales, los métodos de análisis se pueden clasificar en técnicas puramente numéricas y técnicas casi analíticas (existiría también un tercer grupo híbrido que combina los dos anteriores).

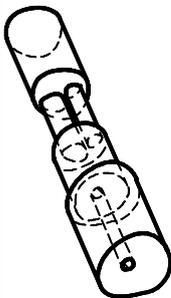
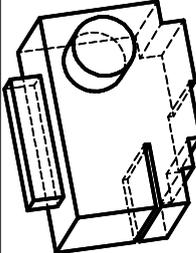
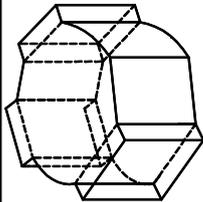
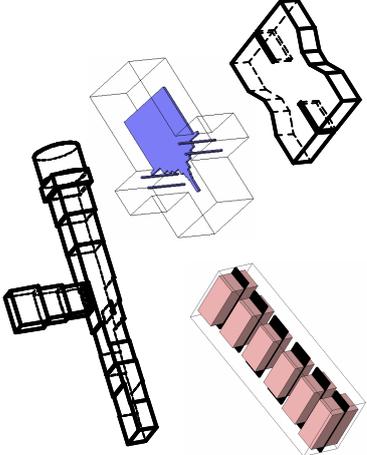
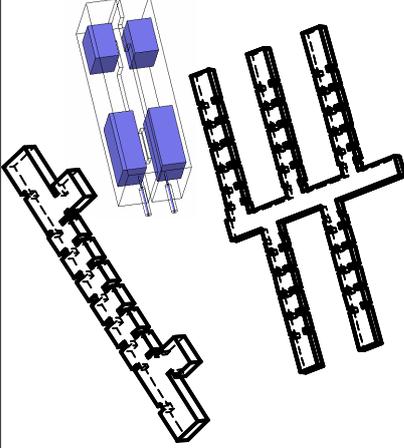
El primer grupo engloba técnicas tales como el Método de los Elementos Finitos (*Finite Element Method* o FEM) o las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (*Finite Differences Time Domain* o FDTD). Son técnicas muy versátiles que permiten el análisis de geometrías casi arbitrarias, pero su eficiencia y precisión depende fuertemente del problema analizado. Programas comerciales basados en estos métodos (por ejemplo HFSS y CST) incluyen ya un módulo optimizador en un primer intento de realizar diseño de dispositivos, pero la experiencia hasta el momento demuestra que no resultan eficientes para abordar algunos diseños de prestaciones muy exigentes.

En el segundo grupo se encuentran los métodos con una importante carga analítica desarrollados en los últimos años, entre los que se encontrarían las técnicas de ajuste de campo estudiadas en la tesis. En comparación con las técnicas puramente numéricas, los métodos de ajuste de campo se utilizan para resolver problemas con geometrías y materiales muy concretos. Sin embargo, en los problemas que pueden aplicarse, dan lugar a códigos muy rápidos y eficientes, permitiendo el desarrollo de dispositivos muy sofisticados. Esta es la razón por la que se han utilizado en este trabajo. De esta manera, los objetivos de la tesis se pueden reformular del siguiente modo:

- profundizar en el análisis electromagnético de uniones en guía de onda usando técnicas de ajuste de campo y ampliar el rango de problemas donde puedan utilizarse;
- aplicar estos métodos al diseño de dispositivos con especificaciones del estado del arte requeridos en muchos sistemas de comunicaciones de microondas-milimétricas.

La tesis tiene por tanto dos vertientes: análisis y síntesis. La primera está centrada en el modelado numérico. La segunda está enfocada a encontrar y diseñar nuevas estructuras o topologías de dispositivos, los cuales serán analizados con los métodos desarrollados. Los componentes que se piensan diseñar son acopladores, ortomodos, filtros y multiplexores.

En definitiva, se quiere desarrollar una herramienta CAD eficiente y precisa que permita el diseño óptimo de varios dispositivos, frente a la forma tradicional basada en el amplio conocimiento del diseñador y posterior ajuste experimental en el laboratorio.

1    Introducción	
<b>Analisis: bloques básicos (Caps. 2-5)</b>	
2	<p>Guías de onda homogéneas (GTR, BCMM)</p> 
3	<p>Discontinuidades en guía de onda (Mode-matching)</p> 
4	<p>Uniones cúbicas generalizadas (GAM-GC)</p> 
5	<p>Uniones cilíndricas con contorno arbitrario: uniones plano <math>E</math> y <math>H</math> (BCMM)</p> 
<b>Diseño: componentes en guía de onda (Caps. 6-7)</b>	
6	<p>Ortomodos (de tres y cuatro puertas) Acopladores (Riblet y en guía ridge)</p> 
7	<p>Filtros (en guía ridge, stripline, rectangular, elíptica), Multiplexores (con unión en T, manifold)</p> 
8    Contribuciones originales y conclusiones	

Cuadro 1: Organización de la tesis.

### 1.3. Desarrollo

De acuerdo a los objetivos anteriores, el desarrollo de la tesis ha plasmado las dos partes bien diferenciadas del trabajo de investigación: el análisis de varios tipos básicos de uniones en guía de onda y el diseño de dispositivos formados por la composición de esos bloques básicos o elementales.

La división en dos partes puede verse en el Cuadro 1. Los capítulos 2 a 5 se han centrado en el modelado de los bloques básicos que componen una parte muy importante de los dispositivos en guía de onda que se utilizan en los sistemas de comunicaciones. Una vez que se dispone de las herramientas de análisis, el diseño de los dispositivos se ha abordado en los capítulos subsiguientes 6 a 7, haciendo uso de esos métodos desarrollados. La introducción a la tesis se encuentra en el capítulo inicial. La exposición de las aportaciones originales del trabajo de investigación y las conclusiones a las que se ha llegado se describen en el capítulo final. La tesis se completa con una serie de apéndices de apoyo.

Cada uno de los capítulos del bloque de análisis aborda un tipo de estructura particular. Se distinguen varios tipos de problemas, desde los más sencillos (caracterización de modos de guías y discontinuidades transversales) al modelado de uniones en guía de onda (uniones cúbicas generalizadas y circuitos plano  $E$  y  $H$ ). En cada capítulo se va formulando la solución de cada uno de esos problemas mediante técnicas de ajuste de campo (en el Cuadro 1 se indican los acrónimos de las técnicas usadas).

Los dispositivos que se tratan en la tesis están compuestos por la conexión de varias estructuras de los tipos básicos anteriores. Para poder analizar el problema total en base a los resultados de las estructuras parciales, se utiliza el concepto de Matriz de Scattering Generalizada (*Generalized Scattering Matrix* o GSM). Cada estructura parcial se caracteriza por su GSM, y estas luego se conectan para dar la GSM global del dispositivo. Además de la GSM, otras representaciones multimodo como la GAM (*Generalized Admittance Matrix* o en su versión de impedancias, la GIM) resultan muy adecuadas para describir uniones en guía de onda.

Una vez que se tienen las herramientas de análisis, en la segunda parte de la tesis se aborda el diseño de algunos tipos de ortomodos, acopladores, filtros y multiplexores. En las herramientas CAD, la técnica de análisis suele complementarse con una de optimización. Para realizar un diseño de onda completa de los dispositivos propuestos, las rutinas de análisis se incorporarán a un proceso de optimización que dependiendo del problema puede ser método de gradiente, *simulated annealing*, algoritmos genéticos o métodos híbridos que combinen a los mencionados. Estos métodos se han usado como complemento a una estrategia de diseño secuencial. Se parte de modelos básicos pero muy rápidos de calcular y se termina con una optimización de onda completa teniendo en cuenta todas las interacciones de modos de orden superior dentro de la estructura.

## 1.4. Conclusiones

El trabajo de la tesis versa sobre el desarrollo de métodos numéricos de ajuste de campo y su posterior aplicación al análisis y diseño de dispositivos pasivos en guía de onda. Las posibilidades del CAD desarrollado y sus aportaciones novedosas se muestran con los una serie de prototipos construidos y con resultados experimentales. Ésta ha sido la manera de demostrar las posibilidades del CAD desarrollado. La motivación está clara: llevar a cabo el diseño óptimo de varios dispositivos demandados por la industria y cuyas especificaciones son cada vez más exigentes.

El enfoque que se ha seguido es completamente modular: los dispositivos a analizar se segmentan en módulos básicos que se caracterizan individualmente y que luego se combinan. Este ha sido el objetivo de la primera parte de la tesis. La segunda parte del trabajo ha versado sobre el proceso de diseño, que es también secuencial y se divide en varias tareas de carga computacional más reducida. El resultado ha sido el diseño de una serie de ortomodos, acopladores, filtros y multiplexores.

Este enfoque modular y secuencial está motivado por una idea más general. En opinión del autor, el estado del arte del CAD de dispositivos pasivos de microondas no permite el diseño de muchos componentes de altas prestaciones (como filtros de respuesta complicada o multiplexores de varios canales) usando un procedimiento basado exclusivamente en la optimización. El paradigma de este modelo es partir de una geometría inicial cualquiera que se optimiza hasta que las especificaciones se cumplen. Por el contrario, para diseños muy competitivos es muy importante dividir el proceso en tareas más simples que sucesivamente vayan guiando al diseñador al prototipo final. En esas etapas se utilizará la optimización como una herramienta que complementa las ideas del diseñador.

De hecho, el tipo de problemas que requieren un experto en diseño siempre estarán un paso por delante de los que se pueden resolver por pura optimización. En estos dispositivos de altas prestaciones, cuando la respuesta a sintetizar se puede considerar como estado del arte del dispositivo, tanto el análisis como el diseño deben aprovechar todo lo que se conoce sobre la estructura. Incluso cuando el análisis es muy eficiente, aspectos como la topología física del dispositivo no pueden ser sustituidos por un proceso de optimización.

Otra cuestión interesante es la selección de una herramienta de simulación de propósito general o desarrolladas ad hoc para un problema específico. En esta trabajo, la mayoría de los diseños se han comprobado con software comercial, lo que muestra que son capaces de competir en el análisis de estructuras. No obstante, en opinión del autor no son todavía suficientemente competitivos para el diseño de dispositivos de especificaciones muy exigentes. Sin embargo, hay que destacar que ya se usan para el diseño de ortomodos, acopladores y filtros, aunque su eficiencia es menor que la de códigos desarrollados específicamente para tales estructuras, como se ha hecho en la tesis.

A modo de breve resumen, el trabajo desarrollado surge en un contexto donde el estado del arte de las herramientas comerciales no es capaz de proporcionar una solución adecuada para el diseño óptimo de algunos dispositivos. El objetivo de este trabajo ha sido contribuir al CAD de estos componentes.

## 2. Originalidad del tema

### 2.1. Antecedentes y contexto

La eficiencia de un determinado CAD de dispositivos pasivos de microondas-milimétricas depende directamente del método de análisis. Tradicionalmente, el análisis de dispositivos en guía de onda se basaba en circuitos equivalentes aproximados de la estructura compuestos por líneas de transmisión para representar las regiones de guiado y elementos concentrados (bobinas, condensadores,...) para modelar las discontinuidades entre medios de transmisión diferentes. Muchos de los circuitos equivalentes que hoy en día siguen usándose fueron desarrollados en el *MIT Radiation Laboratory*. Estos modelos, junto a los avances en teoría de síntesis de circuitos, han permitido el diseño de multitud de dispositivos.

Sin embargo, los circuitos equivalentes tienen ciertas limitaciones. La más importante es que sólo se centran en el modelado del modo fundamental y no tienen en cuenta todas las interacciones electromagnéticas que se producen dentro de la estructura. De esta manera, la validez de los circuitos equivalentes está restringida a ciertos márgenes de las dimensiones del dispositivo y todo esto da lugar a discrepancias entre la respuesta teórica esperada y la medida real del dispositivo. Este efecto es más evidente cuanto más importante es la interacción de modos superiores. Por tanto, los prototipos diseñados de esta manera necesitan un gran esfuerzo de caracterización experimental y sintonizado manual. A medida que el sector industrial se torna más exigente, parece lógico complementar este enfoque con otras alternativas de diseño más precisas.

### 2.2. Nuevos métodos de análisis electromagnético

Como consecuencia del desarrollo de los ordenadores aparecen técnicas de análisis más avanzadas que permiten implementar métodos numéricos que hace unos años parecían inabordable por los recursos de cálculo que requerían. Con estos métodos se pueden resolver las ecuaciones de Maxwell del problema electromagnético asociado al dispositivo teniendo en cuenta muchos efectos que antes no podían ser considerados y obtener unas predicciones que coinciden apreciablemente con las medidas reales de los dispositivos.

Dentro de las diferentes ramas de métodos numéricos de análisis, esta tesis se enfoca en las técnicas casi-analíticas de ajuste de campo. El avance que se ha realizado en los últimos años en este área ha sido muy importante y se ha pasado de realizar aproximaciones muy burdas al problema a obtener una caracterización electromagnética bastante razonable de geometrías muy diversas.

En este sentido, la parte de análisis del trabajo pretende aportar nuevas formulaciones para mejorar la eficiencia en tiempos de cálculo y de recursos de computación de algunas técnicas de ajuste de campo como el *Boundary Contour Mode-Matching* method (BCMM) ó el análisis de uniones cúbicas generalizadas (ampliamente detallados en el texto de la tesis). Al mismo tiempo, se busca una caracterización precisa en términos de la GSM o de la GAM, que permita utilizar el enfoque modular: el análisis del dispositivo total se hace en base a la conexión de los resultados de sus bloques constituyentes.

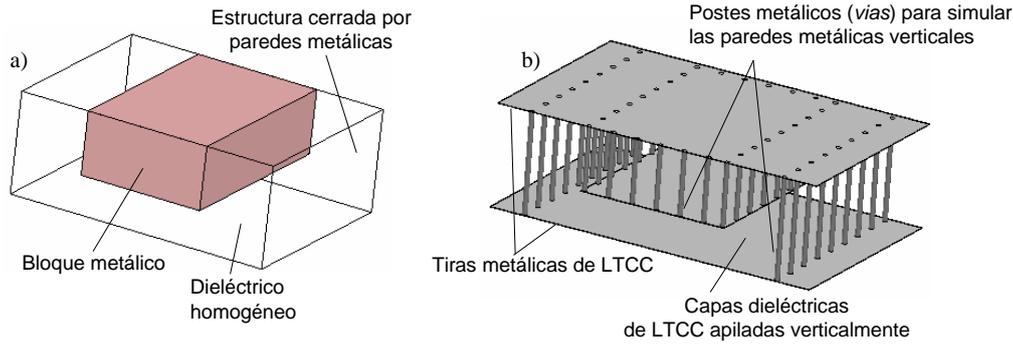


Figura 2: Implementación de guías de onda en tecnología *Low Temperature Cofired Ceramic* (LTCC): a) guía de onda tipo *ridge* convencional, b) fabricación en LTCC

### 2.3. Nuevas tecnologías de fabricación

El trabajo de la tesis está enfocado a dispositivos pasivos de microondas-milimétricas, fundamentalmente en guía de onda. En comparación con otras tecnologías de componentes pasivos como la planar, los dispositivos en guía son más voluminosos y de mayor peso. En cuanto a prestaciones eléctricas, las estructuras planares tienen pérdidas de inserción relativamente altas en comparación con los diseños en guía de onda, que tienen como mayor ventaja su alto factor de calidad ( $Q$ ) y que pueden soportar niveles de potencia más elevados. Su robustez es otra característica apreciada en sistemas embarcados en satélites. Ejemplos típicos de componentes en esta tecnología son acopladores, transformadores, polarizadores, ortomodos, divisores de potencia, filtros y multiplexores (ver la Fig. 1).

Además de la utilización de guías de onda metálicas, existen otras tecnologías de fabricación relacionadas con el trabajo de esta tesis. En concreto, los diseños de este trabajo también están enfocados a *Low Temperature Cofired Ceramic* (LTCC), tecnología que mediante un tipo especial de construcción con *vias* metálicos permite simular guías de onda en substratos cerámicos (ver la Fig. 2).

Las ventajas de la fabricación en LTCC son fundamentalmente dos. Primero, el tamaño del circuito resultante es mucho más pequeño y compacto que cuando se usan guías metálicas convencionales. Segundo, un dispositivo en esta tecnología es mucho más fácil de integrar con otros circuitos de microondas como los MIC y MMIC (*Microwave Integrated Circuits* y *Monolithic Microwave Integrated Circuits*, respectivamente). Además, desde un punto de vista eléctrico, aunque las pérdidas de inserción aumentan con respecto a la fabricación convencional, son todavía suficientemente competitivas frente a otras estructuras.

El modelado y diseño de los componentes en LTCC construidos de esta manera se hace de igual forma que para guías de onda metálicas. De hecho, esta tecnología abre una nueva categoría de problemas donde los métodos de este trabajo pueden aplicarse. Aunque en un entorno industrial los diseños están ligados muy estrechamente al tipo de implementación física que se va a utilizar, los conceptos e ideas que se han utilizado en ellos pueden aplicarse a otros problemas. Esto es lo que ha hecho con los diseños en LTCC, aplicar las ideas de guías de onda a un nuevo escenario.

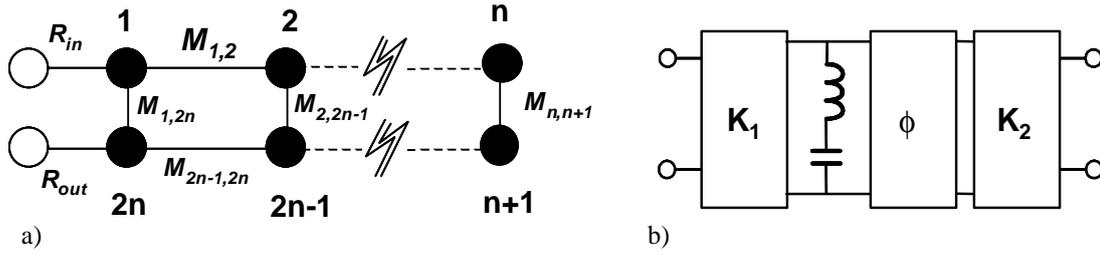


Figura 3: Procedimientos para sintetizar filtros con respuesta de tipo elíptico: a) red de acoplos cruzados entre resonadores; b) extracción de polos.

## 2.4. Nuevas estructuras de dispositivos

En la parte de diseño de la tesis, el trabajo está orientado a investigar nuevas configuraciones físicas de dispositivos. Esto se traduce en encontrar nuevas estructuras que aporten alguna ventaja nueva y que se analizarán con los métodos numéricos ya estudiados. Por ventajas se entiende alguna mejora en el aspecto eléctrico (incremento de selectividad, anchos de banda del dispositivo, reducción de pérdidas de inserción,...) o mecánico (estructuras más compactas, más fáciles de integrar,...).

En concreto, en el tema de filtros se ha trabajado en respuestas de tipo elíptico, que tienen la particularidad de que incorporan ceros de transmisión a frecuencias finitas y resultan ser muy selectivos en frecuencia. Existen dos métodos para realizar este tipo de respuesta: la red de acoplos cruzados entre resonadores y la extracción de polos en una red en escalera. Estos dos esquemas se presentan en la Fig. 3.a y b, respectivamente, y cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes.

En el trabajo de la tesis se investigan nuevas configuraciones de filtros que utilizan la red de acoplos cruzados, por ejemplo utilizando resonadores en guía *ridge*. La configuración tiene que ser suficientemente flexible para que el signo de los acoplos que se puedan conseguir sean tanto positivos como negativos (condición necesaria para conseguir ceros de transmisión). Esto implica entender perfectamente la configuración de campos electromagnéticos dentro de la estructura.

En relación al procedimiento de polos extraídos (Fig. 3.b), se estudian un tipo de estructuras que se comportan como un resonador a la frecuencia central de la banda de paso e introducen un cero de transmisión controlado en la banda de atenuación.

Dentro del tema de filtros, también se han investigado nuevas configuraciones que permitan el diseño de filtros de banda ultraancha, tanto en guía metálica como en LTCC. Además, en esta tecnología también se han diseñado acopladores de ramas en guía *ridge*. En el área de ortomodos se ha buscado modificar la estructura básica del dispositivo para mejorar alguno de sus parámetros característicos. Finalmente, también se han estudiado los multiplexores *manifold* en plano  $H$  para aprovechar las ventajas de este tipo de implementación (estructura simple y compacta, posibilidad de potencias muy elevadas,...).

### 3. Resultados obtenidos

Siguiendo el enfoque de la tesis, los resultados obtenidos se clasifican en dos conjuntos: las aportaciones asociadas a los nuevos métodos de caracterización electromagnética de estructuras (bloque de análisis) y las aportaciones asociadas a las nuevas configuraciones físicas de dispositivos (bloque de diseño).

#### 3.1. Resultados relacionados con el análisis de estructuras

**Análisis mediante BCMM.** Dentro de las ideas originales de la tesis, se destacaría en primer lugar las aportaciones en el contexto del método BCMM para el análisis de uniones en guía de onda. Esta técnica está basada en la descripción del campo en el interior de la unión como superposición de ondas cilíndricas y en la imposición de las condiciones de contorno en la frontera de la unión. Existen diversas variantes de este enfoque, que se han utilizado para el diseño de filtros, acopladores, etc...

En particular, en la tesis se ha propuesto una formulación basada en la *Fast Fourier Transform* (FFT) para acelerar el cálculo de los productos internos de esta técnica [J1],[J4]. Hasta este momento, los productos internos (integrales entre diferentes campos electromagnéticos) se calculaban mediante rutinas de integración numérica o desarrollos en serie de cada elemento de la matriz de forma individual.

Con la formulación propuesta todas esas integrales de los productos internos se hacen en bloque a través de operaciones de FFT que involucran a todos los elementos de las matrices simultáneamente. La mejora en tiempos de cálculo es sustancial. Otro resultado interesante en el BCMM ha sido la formulación del problema formado por varios postes metálicos dentro de una unión con contorno arbitrario y la segmentación de regiones para mitigar el problema de las zonas *entrantes*. Un esquema de los problemas que se pueden abordar mediante BCMM-FFT y un diseño real se muestran en la Fig. 4.

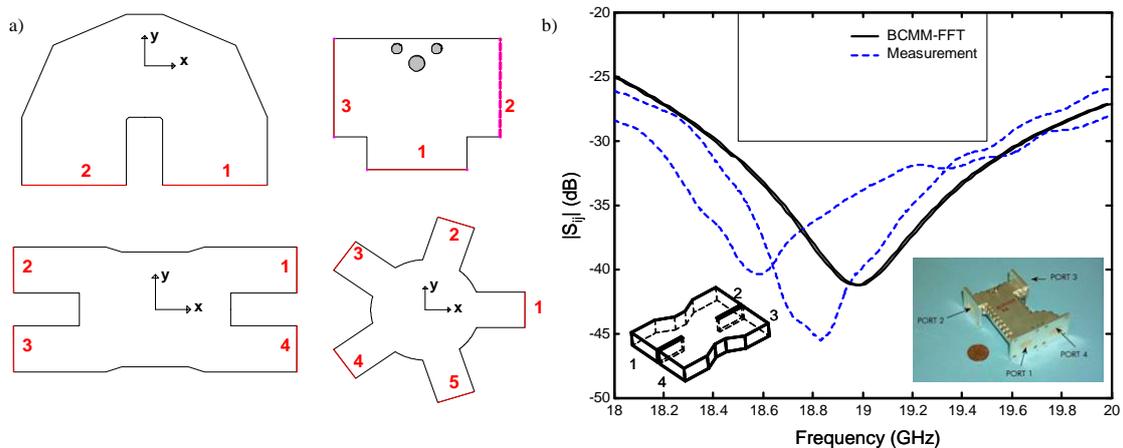


Figura 4: Caracterización de estructuras plano E y H mediante el método BCMM-FFT. a) geometrías de problemas que se pueden analizar mediante esta técnica; b) acoplador diseñado para validar la técnica (cortesía de Alcatel-Espacio, Madrid, [www.alcatel.es](http://www.alcatel.es), Proyecto [E6]).

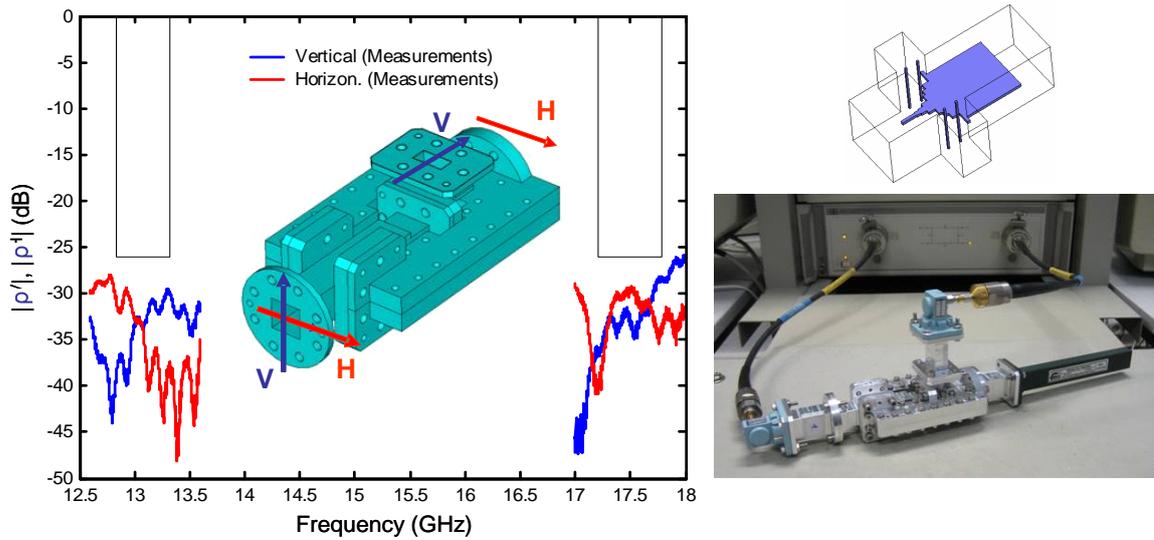


Figura 5: Ortomodo de cuatro puertas basado en la unión *Boifot*. Cortesía de EADS-CASA (Madrid, www.eads.com). Proyecto [E11].

**Análisis de uniones cúbicas generalizadas.** En segundo lugar, se ha formulado la caracterización de uniones cúbicas generalizadas en términos de la GAM. Los trabajos previos en este tema habían estudiado en profundidad la unión cúbica básica, que puede considerarse como un caso particular del tipo de problemas ahora tratados. Esta formulación se ha utilizado por primera vez para el análisis de uniones tipo *Boifot* [P1].

La GAM de una unión en guía de onda se puede calcular a partir de la resolución de una serie de problemas más sencillos. Éstos se forman cortocircuitando todas las puertas del problema excepto una, en la que se impone una excitación. Para uniones cúbicas generalizadas, los problemas parciales se pueden resolver eficientemente por técnicas de ajuste de campo, ya que se reducen a la concatenación de guías de onda a lo largo de un eje longitudinal. La formulación es una extensión de una técnica propuesta para uniones en  $T$  en guía *ridge*. En este trabajo, el método ha sido sistematizado y aplicado a varios problemas (uniones *Turnstile*, *stripline*, ortomodo,...), incluyendo el análisis de uniones Boifot y dando lugar al diseño de un ortomodo de cuatro puertas (ver la Fig. 5).

### 3.2. Resultados relacionados con el diseño de estructuras

**Nuevas estructuras de dispositivos.** Se han introducido diferentes configuraciones físicas para diseñar acopladores de banda ancha y filtros con respuesta elíptica. Tres configuraciones podrían considerarse asociadas a este trabajo: acopladores en guía *ridge* de varias ramas [P4], filtros en guía *ridge* con acoplos cruzados entre resonadores [J3],[P6],[P8] y filtros en guía rectangular con iris inductivos y capacitivos y excitación coaxial [P5].

La idea en estas configuraciones reside en la estructura física. Aunque acopladores de varias ramas se pueden hacer en muchos sistemas de transmisión, la implementación en guía *ridge* es una estructura nueva para aplicaciones de banda ancha.

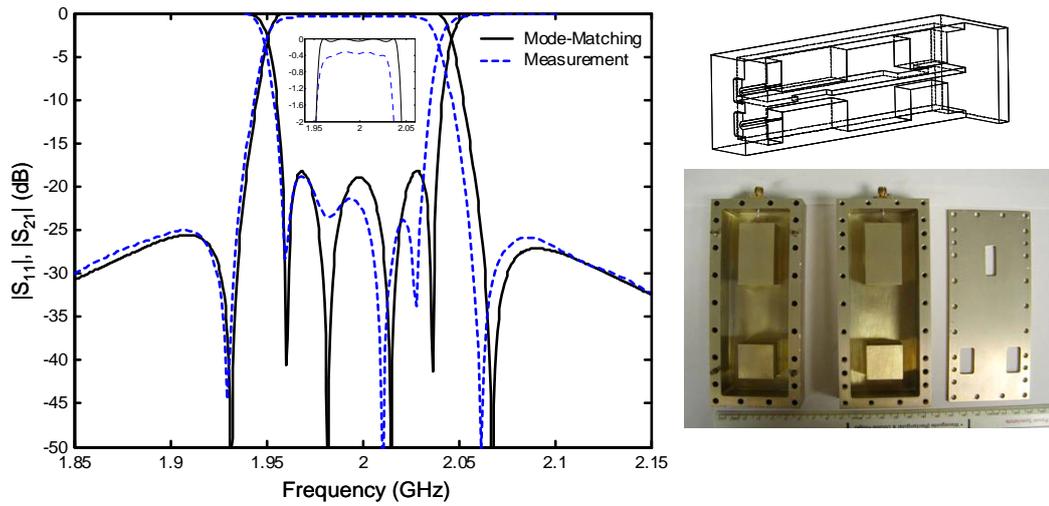


Figura 6: Filtro elíptico en guía ridge de orden cuatro. Cortesía de Scientific Microwave Corporation (Canada, [www.smcq.com](http://www.smcq.com)).

En los filtros, la aportación se encuentra en acoplar los resonadores de tal manera que se puedan sintetizar respuestas elípticas. Hay una gran variedad de maneras de implementar este tipo de respuestas. No obstante, es la primera vez que se diseñan, construyen y miden respuestas de tipo elíptico en guía *ridge* (ver la Fig. 6). En guía de onda rectangular, la configuración estudiada se ha usado por primera vez, aunque esta respuesta se puede obtener por otros medios ya descritos en la literatura. Estas estructuras de filtros propuestas se han validado con la construcción y medida de prototipos. Finalmente, se ha colaborado en el diseño de multiplexores *manifold* de tres [P9] y cinco canales [J6] en plano *H* (ver la Fig. 7).

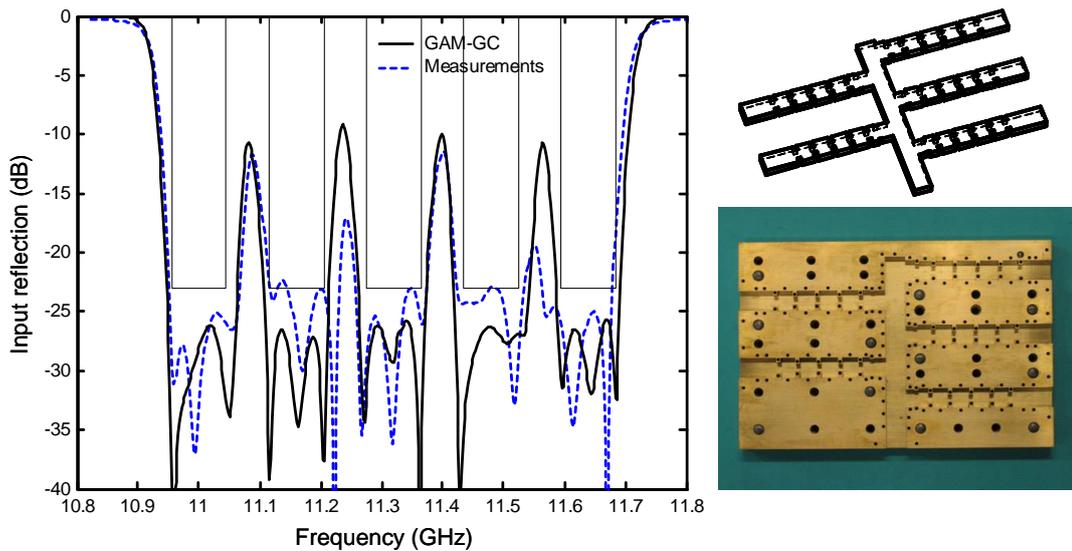


Figura 7: Multiplexor *manifold* de cinco canales en banda Ku. Proyecto CICYT [C1].

## 4. Aplicabilidad práctica del trabajo

Varios de los prototipos expuestos anteriormente en el apartado de resultados son fruto de diferentes colaboraciones con empresas del sector de los dispositivos pasivos de microondas-milimétricas, lo que de entrada sugiere una cierta aplicación práctica de las técnicas de análisis y diseño que se han desarrollado en la tesis. Pero lo que confirma la aplicabilidad del trabajo realizado es el hecho de que algunos de los dispositivos diseñados están formando parte de sistemas reales. En este apartado se van a exponer las características novedosas que han aportado estos diseños.

Los ortomodos de tres puertas que se muestran en la Fig. 8 son parte integrante de los satélites *Amazonas* e *Hispasat 1-D*, respectivamente. El ortomodo del *Amazonas* tiene la característica de funcionar en una banda cercana al máximo teórico de estos dispositivos. La respuesta del dispositivo en la Fig. 8.a incluye la transición a la antena de tipo bocina del satélite. El ortomodo del satélite *Hispasat 1-D* tiene una estructura con doble lámina que reduce la longitud del componente y proporciona una estructura muy compacta [J7].

En tecnología LTCC, el filtro de ancho de banda relativo del 100% de la Fig. 9 se ha desarrollado para un sistema radar de banda ultraancho. Para esta aplicación se han diseñado filtros con anchos de banda siempre mayores que el 50% [P7]. Este es un ejemplo de estructura que se ha diseñado siguiendo los pasos clásicos para dispositivos en guía de onda y que luego se ha construido de acuerdo a las ideas en la Fig. 2.

La Fig. 10 muestra un filtro de orden ocho con dos polos extraídos de acuerdo a la configuración introducida en [J5]. Este tipo de filtros representan una buena solución para muchas aplicaciones (se han diseñado ya varios para sistemas reales), puesto que son muy selectivos y a la vez fáciles de construir (son plano  $H$ ). En el caso de que se necesite sintonizado, se pueden utilizar tornillos para controlar cada cero de transmisión independientemente, lo que reduce la sensibilidad del dispositivo.

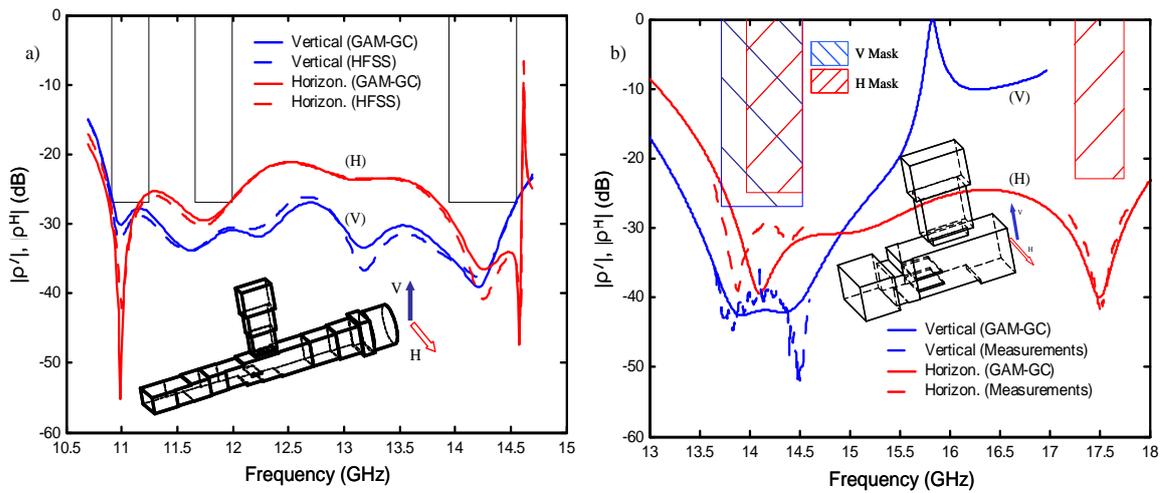


Figura 8: Ortomodos del satélite Amazonas (a) y del satélite Hispasat 1-D (b). Cortesía de EADS-CASA (Madrid, [www.eads.com](http://www.eads.com)). Proyectos [E4],[E7],[E8].

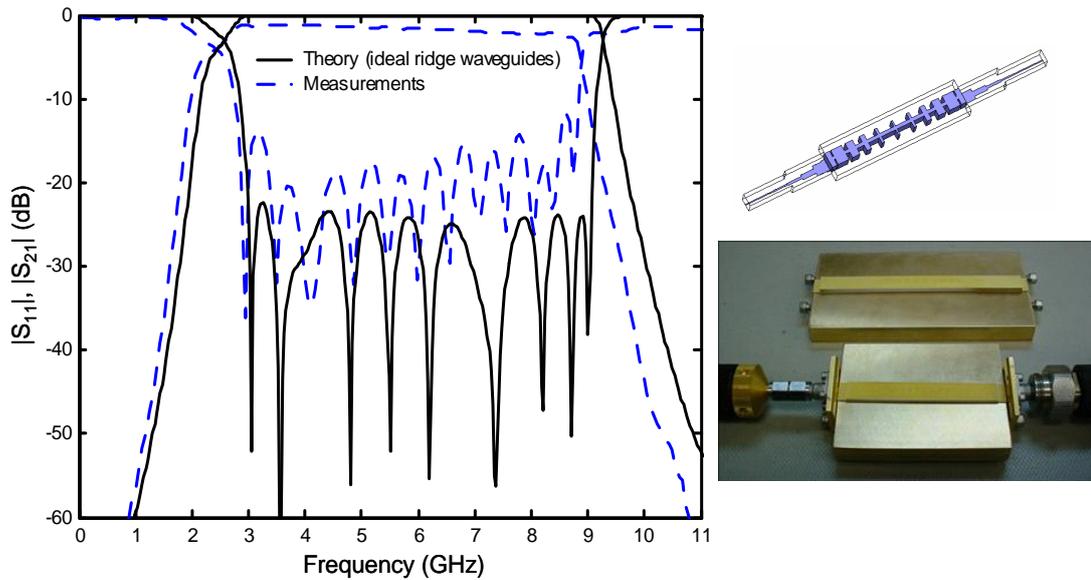


Figura 9: Filtro en guía ridge de ancho de banda relativo 100% implementado en tecnología *Low Temperature Cofired Ceramics* (LTCC). Cortesía de Kyocera (Estados Unidos, [www.kyocera.com](http://www.kyocera.com)).

El diplexor de la Fig. 11 se ha diseñado para un sistema LMDS. La topología del diplexor en este caso es muy clásica, pero hay que destacar que trabaja en banda K, con los problemas de tolerancias que eso conlleva. Para ahorrar tiempo y costes de fabricación, se han diseñado también diplexores con filtros de irises inductivos asimétricos.

Finalmente, cabría destacar la concordancia obtenida entre los resultados experimentales y la teoría en los dispositivos presentados. Las gráficas que se han expuesto en este resumen de la tesis relativas a dispositivos muestran dos tipos de curvas: las obtenidas mediante los métodos numéricos desarrollados en la tesis y las correspondientes a las medidas sobre el prototipo experimental construido.

En líneas generales se puede decir que la concordancia es muy buena y se cumple el objetivo propuesto en la tesis: desarrollar una herramienta CAD que permita el diseño óptimo de varios tipos de dispositivos pasivos en guía de onda de manera eficiente y precisa. La precisión se refleja en que los dispositivos medidos sólo han necesitado ajuste manual en los casos que había que compensar tolerancias de mecanizado a muy altas frecuencias. En todos los casos, los dispositivos medidos han cumplido las especificaciones fijadas de antemano, con el consiguiente ahorro de tiempo y coste en prototipos experimentales.

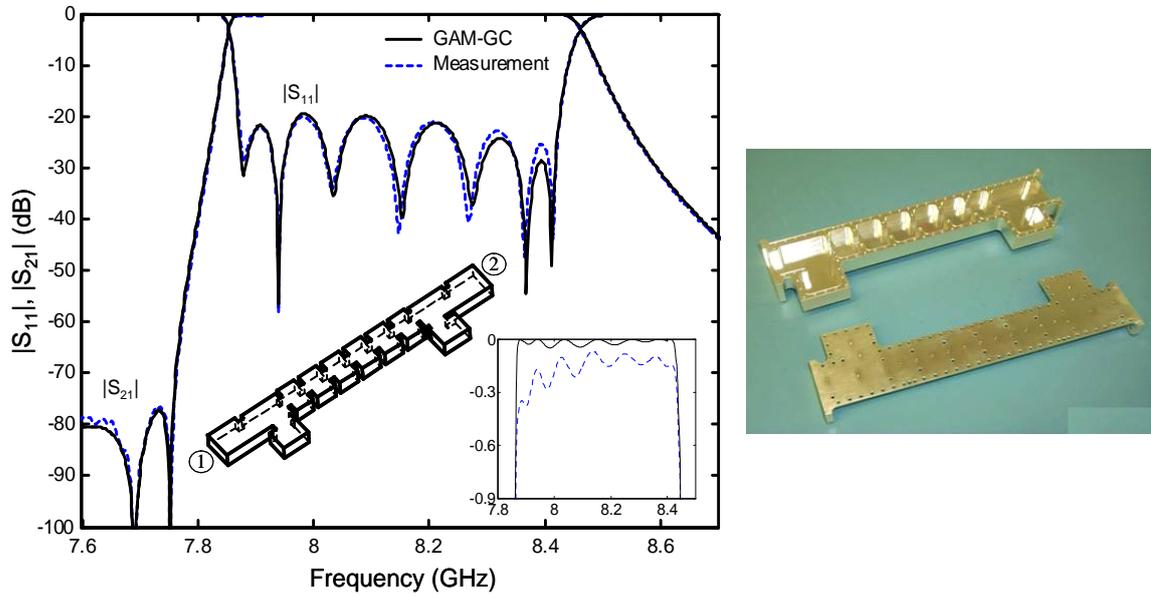


Figura 10: Filtro de orden ocho con dos polos extraídos. Cortesía de Alcatel-Espacio (Madrid, [www.alcatel.es](http://www.alcatel.es)). Proyecto [E9].

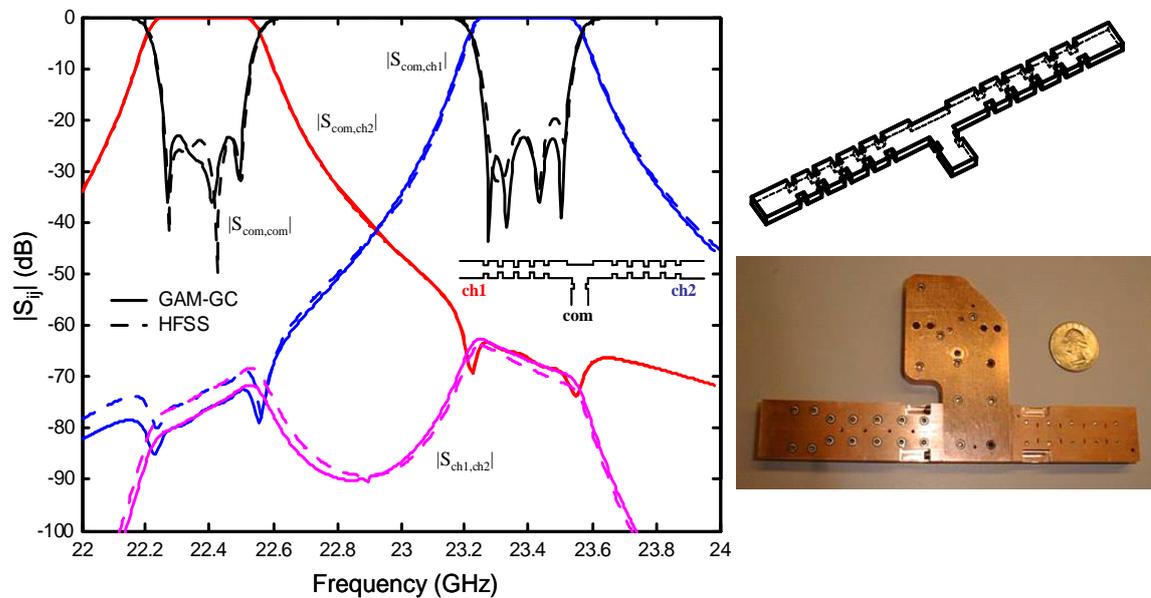


Figura 11: Diplexor plano  $H$  con divisores en  $T$  en banda K. Cortesía de Paratek (Estados Unidos, [www.paratek.com](http://www.paratek.com)). Proyectos [E1],[E2],[E3].

## A. Aportaciones de índole tecnológica relacionadas con la tesis

### Patentes

El trabajo de la tesis relacionado con los filtros en guía rectangular con polos extraídos en cooperación con Alcatel-Espacio ha dado lugar a la siguiente solicitud de patente:

- J. R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar, **J. A. Ruiz-Cruz**, I. Hidalgo-Carpintero, M. Padilla-Cruz, and A. Oñoro-Navarro, *Rectangular waveguide filter with extracted poles*.
  - Propietario: ALCATEL,
  - N° de solicitud: 03293113.1,
  - Estados de aplicación: AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR, USA, CA.

### Financiación de origen público

El trabajo de la tesis doctoral ha estado financiado por una beca de doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid (medio año) y una beca de Formación de Profesorado Universitario del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (tres años y medio). Con esta beca se ha realizado una estancia en el *Politecnico di Milano* (Milán, Italia) de cuatro meses y dos estancias en la *University of Maryland* (College Park, MD, Estados Unidos) de seis y cinco meses. Además, se ha formado parte de los siguientes proyectos de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyectos CICYT) en relación a la tesis:

- [C1] *Diseño de multiplexores para comunicaciones punto-multipunto y vía satélite en frecuencias milimétricas*. Responsable del Proyecto: José R. Montejo Garai. N° de investigadores: 3. Dic. 2001-Dic. 2004.
- [C2] *Diseño de multiplexores en configuración manifold con filtros de canal con respuesta elíptica y autoecualizada*. Responsable del Proyecto: José R. Montejo Garai. N° de investigadores: 3. Dic. 2004-Dic. 2007.

### Proyectos con empresas privadas

Los trabajos de investigación de la tesis doctoral que han estado vinculados con empresas privadas se exponen a continuación. Todos ellos están relacionados con el desarrollo de dispositivos pasivos de microondas-milimétricas para sistemas de comunicaciones y demuestran la aplicabilidad práctica de algunas técnicas presentadas en la tesis. La mayoría de los dispositivos diseñados y sus resultados están recogidos en el texto de la tesis y sus aportaciones han dado lugar a publicaciones que se detallan en el anexo B.

**Proyectos con empresas localizadas fuera de España**

- [E1] *Development of two software packages for the analysis of bandpass filters and diplexers based on Mode-Matching Technique.* Organismo que lo subvenciona: PARATEK Co. (USA). Ago. 2000 -Ene. 2001.
- [E2] *Development of SW packages to analyze diplexers with asymmetric inductive irises in rectangular waveguide.* Organismo que lo subvenciona: PARATEK Co. (USA). Sep. 2001 -Nov. 2001.
- [E3] *Design to specification of diplexer with asymmetric inductive irises.* Organismo que lo subvenciona: PARATEK Co. (USA). Sep. 2001 -Dic. 2001.

Además, durante las estancias breves en universidades fuera de España se ha colaborado con las empresas Kyocera America y Scientific Microwave, que han realizado prototipos experimentales de algunos diseños.

**Proyectos con empresas nacionales**

- [E4] *Diseño de OMT's y Diplexor de las antenas DBS del satélite Hispasat 1D.* Organismo que lo subvenciona: EADS-CASA-División Espacio. Oct. 2000 - May. 2001.
- [E5] *Diseño del routing de la antena alternativa del SAR.* Organismo que lo subvenciona: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (I.N.T.A.). May. 2001 - Jun. 2001.
- [E6] *Diseño de acoplador direccional en cara estrecha y puertas de acceso.* Organismo que lo subvenciona: Alcatel Espacio. Sep. 2002 - Nov. 2002.
- [E7] *Diseño de OMT's, diplexores y transiciones de las antenas del satélite AMAZONAS.* Organismo que lo subvenciona: EADS-CASA- División Espacio. Abr. 2002 - Jul. 2002.
- [E8] *Diseño de tres transiciones entre guía cuadrada y circular. Proyecto AMAZONAS.* Organismo que lo subvenciona: EADS-CASA- División Espacio. Sep. 2002 - Oct. 2002.
- [E9] *Software de diseño de filtros de polos extraídos en configuración plano H.* Organismo que lo subvenciona: Alcatel Espacio. Sep. 2003 - Dic. 2003.
- [E10] *Diseño del divisor de la antena alternativa del S.A.R.* Organismo que lo subvenciona: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (I.N.T.A.). Ene. 2004 - Dic. 2005.
- [E11] *Diseño de OMT de cuatro puertas. Banda Ku FSS+BSS.* Organismo que lo subvenciona: EADS-CASA- División Espacio. Ene. 2004 - Jul. 2004.
- [E12] *Diseño de filtros de canal con polos extraídos y autoecualización en configuración plano-H en la banda de 30 GHz.* Organismo que lo subvenciona: Alcatel Espacio. May. 2004 - Mar. 2005.

## B. Trabajos publicados relacionados con la tesis

### Artículos en Revistas Internacionales

- [J1] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. Esteban, and J. M. Rebollar, “An efficient boundary contour mode-matching method of  $H$ - and  $E$ -plane junctions by a Fast Fourier Transform Algorithm,” *IEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation*, vol. 150, no. 5, pp. 332–338, October 2003.
- [J2] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, and J. M. Rebollar, “Application of the simulated annealing for waveguide filters with complicated frequency response,” *WSEAS Transactions on Mathematics*, vol. 3, no. 4, pp. 807–812, October 2004.
- [J3] **J. A. Ruiz-Cruz**, M. E. Sabbagh, K. A. Zaki, J. M. Rebollar, and Y. Zhang, “Canonical ridge waveguide filters in LTCC or metallic cavities,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 1, pp. 174–182, January 2005.
- [J4] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Eigenmodes of waveguides using a Boundary Contour Mode-matching method with an FFT scheme,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering.*, vol. 15, no. 3, pp. 286-295, March 2005.
- [J5] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz**, J. M. Rebollar, M. J. Padilla-Cruz, A. Oñoro-Navarro, and I. Hidalgo-Carpintero, “Synthesis and Design of In-Line N-Order Filters with N Real Transmission Zeros by Means of Extracted Poles Implemented in Low Cost Rectangular  $H$ -Plane Waveguide,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 5, pp. 1636-1642, May 2005.
- [J6] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz**, and J. M. Rebollar, “Full-wave design of H-plane contiguous manifold output multiplexers using the fictitious reactive load concept,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 8, pp. 2628-2632, August 2005.
- [J7] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar, C. E. Montesano and M. J. Martín, “Very Compact ortho-mode transducers with double-septum configuration,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 4, pp. 765-767, April 2006.

## Artículos en Actas de Congresos Internacionales

### IEEE International Microwave Symposium (IEEE MTT-S)

- [P1] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar, C. E. Montesano, M. J. Martin, and M. Naranjo-Masi, “Computer Aided Design of Wideband Orthomode Transducers based on the Boifot Junction,” accepted for *Proc. 2006 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [P2] Y. Zhang, **J. A. Ruiz-Cruz**, and K. A. Zaki, “Ridge Waveguide Divider Junctions for Wide-Band Multiplexer Applications,” accepted for *Proc. 2006 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [P3] Y. Zhang, **J. A. Ruiz-Cruz**, and K. A. Zaki, “Ridge Waveguide Coupled Stripline Resonator Filters and Multiplexers,” accepted for *Proc. 2006 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [P4] **J. A. Ruiz-Cruz**, Y. Zhang, K. A. Zaki, A. J. Piloto, and J. M. Rebollar, “Ridge waveguide branch-line directional couplers for wideband applications and LTCC technology,” *Proc. 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [P5] **J. A. Ruiz-Cruz**, K. A. Zaki, J. R. Montejo-Garai, and J. M. Rebollar, “Design of elliptic filters in rectangular waveguide with capacitive and inductive irises and integrated coaxial excitation,” *Proc. 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [P6] M. M. Fahmi, **J. A. Ruiz-Cruz**, K. A. Zaki, and A. J. Piloto, “LTCC wide-band canonical ridge waveguide filters,” *Proc. 2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [P7] Z. M. Liu, **J. A. Ruiz-Cruz**, C. Wang, and K. A. Zaki, “An extremely wideband ridge waveguide filter,” *Proc. 2004 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 615–618.
- [P8] **J. A. Ruiz-Cruz**, M. E. Sabbagh, K. A. Zaki, and J. M. Rebollar, “Full-wave design of canonical ridge waveguide filters,” *Proc. 2004 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 603–606.

### Congresos Europeos

- [P9] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz**, and J. M. Rebollar, “Synthesis and design of a manifold triplexer implemented in a three layer rectangular H-plane waveguide,” *Proc. 2005 European Microwave Conference, Paris, France.*
- [P10] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz**, J. M. Rebollar, M. J. Padilla-Cruz, A. Oñoro-Navarro, and I. Hidalgo-Carpintero, “High power-low loss band pass rectangular waveguide H-plane filters with finite real frequency transmission zeros,” *Proc. 2004 Int. Workshop on Microwave Filters, CNES-ESA, Toulouse, France.*

- [P11] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Some properties of generalized matrices and their application to the Mode-Matching technique,” *Proc. 2000 International Mediterranean Microwave Symp., Tetuan, Morocco*, pp. 62–65.
- IEEE Antennas and Propagation Symposium (IEEE APS) and U.R.S.I. North American Radio Science Meeting**
- [P12] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar, C. E. Montesano, M. J. Martin, and M. Naranjo-Masi, “Relative Convergence Problem in the Mode-Matching Analysis of Stripline Interdigital Filters with Different Input-Output Coupling,” accepted for *Proc. 2006 U.R.S.I Meeting, Alburquerque, New Mexico*.
- [P13] Yunchi-Zhang, K. A. Zaki, and **J. A. Ruiz-Cruz**, “Dual mode bandpass filter with asymmetric transfer function,” *Proc. 2005 IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., Washington D.C.*
- [P14] **J. A. Ruiz-Cruz**, G. G. Gentili, and J. M. Rebollar, “Analysis of waveguide junctions by the Boundary Contour Mode-Matching Method with segmented regions,” *Proc. 2005 U.R.S.I Meeting, Washington D.C.*
- [P15] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Simple equivalent circuit of multi-aperture rectangular iris in rectangular waveguide,” *Proc. 2005 U.R.S.I Meeting, Washington D.C.*
- [P16] **J. A. Ruiz-Cruz**, K. A. Zaki, and J. M. Rebollar, “Mode-matching analysis of a coaxial-to-stripline discontinuity applied to the modelling of a coaxial probe,” *Proc. 2004 IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., Monterey, CA*, vol. 2, pp. 2139–2142.
- [P17] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Interpretation of resonance at inclined multi-aperture rectangular iris with arbitrary locations in rectangular waveguide,” *Proc. 2004 U.R.S.I Meeting, Monterey, CA*, p. 45.
- [P18] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “BCMM analysis of short-slot waveguide couplers with an FFT algorithm,” *Proc. 2003 IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., Columbus, OH*, vol. 2, pp. 1193–1196.
- [P19] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “An alternative interpretation of resonance of two-aperture irises in rectangular waveguide,” *Proc. 2003 U.R.S.I Meeting, Columbus, OH*, p. 226.
- [P20] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, and J. M. Rebollar, “Characterisation of waveguide discontinuities with finite wall conductivity,” *Proc. 2002 IEEE Antennas and Propagation Symp. Dig., San Antonio, TX*, vol. 4, pp. 428–431.

### Artículos en Actas de Congresos Nacionales

- [P21] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Nuevo método de diseño de multiplexores de salida en configuración manifold y estructura plano-H,” *Proc. 2005 U.R.S.I Symp., Gandia, Spain*
- [P22] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, and J. M. Rebollar, “Diseño y medida de un filtro dual-mode en cavidad elíptica,” *Proc. 2004 U.R.S.I Symp., Barcelona, Spain*
- [P23] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Cálculo de modos en guías de onda mediante un método BCMM basado en el uso de la FFT,” *Proc. 2003 U.R.S.I Symp., La Coruña, Spain.*
- [P24] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Análisis de uniones en guía de onda plano E y H mediante el método BCMM y el uso de la FFT,” *Proc. 2002 U.R.S.I Symp., Alcalá de Henares, Spain*, pp. 519–520.
- [P25] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Propiedades de la matriz de dispersión generalizada de uniones y discontinuidades en guía de onda,” *Proc. 2001 U.R.S.I Symp., Madrid, Spain*, pp. 9–10.
- [P26] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “C.A.D. de análisis de discontinuidades entre guías elípticas y rectangulares,” *Proc. 2000 U.R.S.I Symp., Zaragoza, Spain*, pp. 91–92.

### Reuniones de carácter científico

- [M1] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Implementación de filtros con cerros de transmisión mediante polos extraídos en tecnología plano-H,” *IV Encuentro Ibérico de Electromagnetismo Computacional, Portugal, September 2005.*
- [M2] **J. A. Ruiz-Cruz** and J. M. Rebollar, “Interpretación de las resonancias de iris multiapertura y su aplicación al diseño de filtros,” *III Encuentro Ibérico de Electromagnetismo Computacional, Sedano, December 2003.*
- [M3] J. R. Montejo-Garai, **J. A. Ruiz-Cruz**, and J. M. Rebollar, “Comparación entre diferentes técnicas para el cálculo de pérdidas de inserción en filtros,” *II Encuentro Nacional Sobre Electromagnetismo Computacional, Aracena, December 2001.*
- [M4] J. E. Page, P. Crespo, and **J. A. Ruiz-Cruz**, “Modelos circuitales para discontinuidades en guías de ondas: obtención y uso en diseño,” *II Encuentro Nacional Sobre Electromagnetismo Computacional, Aracena, December 2001.*
- [M5] **J. A. Ruiz-Cruz**, J. R. Montejo-Garai, and J. M. Rebollar, “CAD of dual-mode filters with elliptical cavities,” *11th International Travelling Summer School on Microwaves and Lightwaves, Madrid, July 2001.*

- [M6] J. M. Rebollar and **J. A. Ruiz-Cruz**, “Propiedades de la matriz de dispersión generalizada de discontinuidades y uniones en medios de transmisión,” *I Encuentro Nacional Sobre Electromagnetismo Computacional, Cantabria, July 2000*.