

# ÍNDICE

---

<b>0. AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
1.1. PROCESOS DE CALENTAMIENTO Y MEDIDA POR MICROONDAS .....	4
1.2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS.....	7
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	10
<b>2. DESARROLLO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
2.1. EL ANÁLISIS CIRCUITAL GENERALIZADO .....	12
2.1.1. El método de la matriz de dispersión generalizada .....	12
2.1.2. Método de la matriz de admitancia generalizada.....	16
2.1.3. Consideraciones respecto a las matrices $S$ e $Y$ .....	19
2.1.3.1. Diferentes definiciones de la matriz $Y$ .....	20
2.1.3.2. Relaciones entre la matriz $S$ y la matriz $Y$ .....	25
2.2. ANÁLISIS MODAL DE DISCONTINUIDADES.....	27
2.2.1. Introducción .....	27
2.2.2. Adaptación modal en la unión .....	27
2.2.3. Extensión a la formulación de la guía N-furcada. ....	30
2.2.4. El problema de la convergencia relativa .....	31
2.2.5. Ejemplo: un salto en guía de onda. ....	32
2.3. LA CONVERGENCIA Y EL NÚMERO DE MODOS.....	37
2.3.1. Cálculo de áreas por recuento de cuadrados .....	37
2.3.2. Ejemplos.....	40
2.4. EL MÉTODO DE LOS MODOS ACOPLADOS.....	44
2.4.1. Introducción .....	44
2.4.2. Cálculo de la matriz de acoplo.....	46
2.4.2.1. Formulación directa.....	53
2.4.2.2. Formulación indirecta.....	60
2.4.2.3. Formulación restringida.....	71
2.4.3. Formulaciones para el caso isótropo .....	79
2.4.3.1. Formulación directa.....	79
2.4.3.2. Formulación indirecta.....	83
2.4.3.3. Formulación restringida.....	88
2.4.4. Validaciones .....	91
2.4.4.1. Materiales isótropos .....	93
2.4.4.2. Materiales anisótropos .....	112
2.4.4.3. Materiales quirales.....	129
2.4.4.4. Materiales bianisótropos .....	142
2.5. HIBRIDACIÓN CON ELEMENTOS FINITOS .....	151
2.5.1. Introducción .....	151
2.5.2. Resolución de un problema de valor propio .....	152
2.5.3. Aplicación a la caracterización de guías de onda .....	160
2.5.4. La Toolbox PDE de MATLAB®.....	161
2.5.4.1. Introducción.....	161

2.5.4.2. Dibujo de la geometría.....	162
2.5.4.3. Condiciones de contorno.....	163
2.5.4.4. Definición de los coeficientes.....	164
2.5.4.5. Mallado de la geometría.....	165
2.5.4.6. Otros parámetros del problema.....	167
2.5.4.7. Descripción de las variables y funciones de interés.....	168
2.5.5. Desarrollo de una herramienta para el análisis de transiciones.....	172
2.5.6. Resultados.....	178
<b>3. APLICACIONES.....</b>	<b>183</b>
3.1. LA MULTIALIMENTACIÓN.....	183
3.1.1. Introducción.....	183
3.1.2. Análisis y optimización de cavidades multialimentadas.....	184
3.1.3. Resultados.....	187
3.1.3.1. Cavidad estática.....	189
3.1.3.2. Túnel de microondas.....	196
3.1.4. Conclusiones.....	200
3.2. DISPOSITIVOS DE MULTIGUÍAS.....	201
3.3. MEDIDA INVERSA DE PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS.....	204
3.3.1. Recuperación de parámetros.....	204
3.3.2. Resultados.....	205
3.4. FILTROS DE ENTRADA/SALIDA.....	211
3.4.1. Introducción.....	211
3.4.2. Análisis.....	213
<b>4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>216</b>
<b>5. PUBLICACIONES.....</b>	<b>218</b>
5.1. REVISTAS INTERNACIONALES.....	218
5.2. CONGRESOS NACIONALES E INTERNACIONALES.....	218
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>220</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>232</b>
7.1. INTEGRALES DE ACOPLO DEL MÉTODO DE MODOS ACOPLADOS.....	232
7.1.1. Formulación directa.....	234
7.1.2. Formulación indirecta.....	265
7.1.3. Formulación restringida.....	300
7.2. INTEGRALES DE ACOPLO DEL MÉTODO DE ADAPTACIÓN MODAL.....	304
7.3. SOFTWARE DESARROLLADO.....	311
7.3.1. Método de adaptación modal.....	311
7.3.2. Método de los modos acoplados.....	313
7.3.3. Hibridación con elementos finitos.....	314



# 0. AGRADECIMIENTOS

---

Este trabajo es el resultado de una serie de investigaciones realizadas en el Grupo de Calentamiento por Microondas de la Universidad Politécnica de Valencia, liderado por José Manuel Catalá, mi director. A él debo la especialización que he adquirido en el campo de las microondas y el sustento económico que me ha permitido cursar en exclusividad mis estudios de doctorado. Espero que su lucha constante contra mi tendencia natural al desorden se haya visto reflejada en este documento. Aquí consta mi agradecimiento por todo su apoyo. También quiero expresar mi agradecimiento a Felipe Peñaranda, por su implicación en el desarrollo matemático de algunos métodos y en la obtención de resultados.

Mis compañeras, las recientes madres, que han llegado conmigo hasta el final, han hecho que el trabajo fuera mucho más llevadero, aparte de darme su apoyo, cuando no ayuda directa, en incontables momentos: Bea, que conoce más que nadie mi vida en la universidad en estos diez años, y Rocío, mi amiga colombiana, que cuando todos nos estabilicemos, me animará a visitar el otro lado del charco.

Esta tesis debe mucho a Miguel Ángel Solano, de la Universidad de Cantabria. Cuando la cosa no estaba nada clara, di con él, y no dudó en ayudarme en mi trabajo e implicarse, incluso en los detalles. De aquellas interesantes comunicaciones, surgió la idea de dar un nuevo rumbo a la investigación, cuyos frutos se consiguieron finalmente.

Mis padres tienen mucha culpa de que haya llegado a completar mi formación hasta el máximo nivel, puesto que siempre han querido que así sea, para lo que me han mantenido y eximido de otras tareas más allá de lo que yo mismo habría hecho. Por eso, ahora que llega el momento de irse, les doy las gracias por todo. También hago extensivos los agradecimientos al resto de la familia, especialmente a mi prima Marta, que sin duda me superará en lo deportivo, científico y musical.

En este periodo de doctorado, he hecho casi más cosas que en todo el resto de mi vida. Esto lo debo en gran parte a los amigos que tengo la suerte de tener y que tan importante han sido para mí. Empiezo por David Blay, mi amigo más famoso, estrella de las ondas, con quien lo mío viene de largo y va para largo.

Mi agradecimiento va también a David Sornosa y Germán. Con el primero he tenido y tendré unas conversaciones científicas de lo más interesante, aparte

de no dejar de quejarnos sobre el sistema educativo de este país. Con el segundo, reconozco que alguna vez me he sentido acomplejado ante toda su inteligencia y cultura, cuando no contábamos más de 13 o 14 años. Luego le fue algo peor, pero seguro que el año que viene se saca las oposiciones.

Si tengo algún plan que incluya irnos a correr o de excursión a alguna parte, llamaré a Joan Marc y a Javi, con los que ya he compartido incontables vivencias, y las que faltan por llegar. Solamente ellos me entienden que me pueda gustar caminar 8 horas bajo el sol con 15 kilos a la espalda, o dormir en una tienda de campaña con temperaturas bajo cero en el exterior. Ahora, nos ha dado por hacernos funcionarios. Este año, yo. El año que viene, vosotros.

Carlos (El Mico) es de esos que siempre están ahí, desde los tiempos de aquella cinta grabada de Van Halen, o de nuestras historias con la grabadora compartida de cd's. Vinieron un montón de nocheviejas y un montón de pateos, y juntos nos hemos visto evolucionar el uno al otro. Es quizá el único que reconoce como cualidades mías cosas que yo sólo considero como defectos.

Que no falte por mencionar a mis queridas amigas y compañeras de colegio desde que éramos casi unos bebés, especialmente a Cristina, Merche, Inma y Raquel Rubio. Ya quedaremos para celebrarlo.

Una de las razones que me llevó a estudiar teleco en su día fue saber que iba a conocer a un grupo “bueno”. Esa expectativa se superó con creces, y a los primeros días de empezar la carrera, ya nos habíamos hecho los amos de la clase, simplemente porque éramos los mejores. Ahí nacieron unas amistades que durarán siempre, y mi agradecimiento va a todos ellos. Empiezo por Dani, por ser alguien especial. Por tantos momentos compartidos, buenos y malos, en todos los ámbitos y en todas las situaciones, que empezaron en aquella historia de la tubería en el instituto. Y porque me ayudó a hacerme una persona mejor. A Hueso, por ser la persona que mejor me comprende, el único que hasta ahora se ha atrevido a emigrar para buscar un futuro mejor. Sabes que tengo una visita pendiente a Munich. A Jaigarro, el profesor, con el que me unen tantas cosas, como esos conciertos con parada en su casa, aquellas temporadas en su equipete, o aquellos 91.5 créditos que nos dio por sacarnos en cuarto (y lo hicimos), para dejarnos quinto limpio para el proyecto. A Sergio (Pascal), la mascota, el perenquén, y recientemente, el doctor. En general, a los que, al poco de entrar en la escuela, inventamos ese engendro deportivo-social llamado “Los Triviales”, que tanto éxito tuvo. A los lllirianos, Pablo y Miguel, con los que tanto me he reído. A Ramón, mi compañero de pupitre de los primeros tiempos, hasta que decidió hacerse telemático e iniciar una carrera meteórica en la

empresa. A Pedro, el conquense, la inocencia y buena educación hecha persona, que está consiguiendo hacer carrera en Madrid, pero que sabe que está destinado a perder si se viene a correr conmigo. A Jose, el felizmente casado. También a Mariola, por todo lo que nos queremos. A Antonio Lozano, mi compañero de los primeros años de doctorado, una de las mejores personas que he conocido. Y también a Cristina, con quien conecté desde el primer momento que apareció por el laboratorio, y que tanto me ha estado animando para finalizar este trabajo. Yo la animo a que empiece a correr en serio de una vez.

Allá por finales de 2001, cuando la carrera estaba llegando a su fin, me dio por cultivar otra serie de disciplinas. Por ejemplo, ponerme a estudiar percusión. En éstas, que aparecí por el conservatorio José Iturbi y caí en las manos de Salvador Pelejero, y de buenas a primeras, con todo el afán por mi parte, y todo el entusiasmo por el suyo, me vi convertido en percusionista. Cuando ya acertaba a dar golpes con cierto sentido, me introdujo en el grupo de percusión, actual Percujove, donde encontré mucho más de lo que me esperaba, en lo musical y sobre todo en lo humano, con una cantidad de amigos tan grande, que para no gastar papel en exceso, consigno en pliego aparte los agradecimientos a ellos. Fruto de la asombrosa capacidad de organización y autogestión del grupo, surgieron aquellas giras europeas, y ya vamos a por la cuarta.

En sintonía con mis veleidades musicales, entran mis compañeros y amigos de L'Espera, los suecanos y marenyeros Roig, Víctor y Milio. Quién me iba a decir que, cuando buscaba integrarme como batería en un grupo de Heavy, iba a encontrar a unos amigos tan sanos, tan inteligentes y con los que tantos puntos de vista comparto, en lo musical, en lo político y en lo social. Sé que va a ser completamente imposible formar otro grupo tan bueno en todos los sentidos.

Cuando dispuse de más tiempo, me dio por correr más y mejor. Por culpa de la insistencia de Miguel Ferrer, gran ingeniero, corredor y amigo, me vi metido en el Club de Atletismo de la UPV, donde la gente entiende aquello de “correr por correr”, para huir de las cosas malas y perseguir las buenas. Mi agradecimiento por su amistad y compañerismo a todos ellos, especialmente, al citado Miguel, a Javi Galindo, nuestro presi, todo un ejemplo de líder, y a Carlos, con su enorme sonrisa a cuestras todos los días. Mención especial para Covadonga, por toda nuestra confianza y lo que compartimos.

Muchas gracias a todos.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. PROCESOS DE CALENTAMIENTO Y MEDIDA POR MICROONDAS

La utilización de energía microondas para la generación de calor fue descubierta accidentalmente en 1945 en el Departamento de Microondas y Tubos de Potencia de Raytheon (EE.UU.), durante un proceso de testeo de magnetrones. Inicialmente, fue visto como un medio eficiente y rápido de convertir energía eléctrica en calor. A partir de aquí, se han descubierto muchos otros aspectos de esta forma de energía que son extremadamente importantes. Un aspecto clave es la relativa uniformidad en la distribución de calor en el interior del material de interés. Este fenómeno básico, como se ha descubierto, posibilita al usuario controlar aspectos como la calidad, aspectos físicos del material y la repetitividad del proceso. Esta habilidad de control, junto con los obvios beneficios técnicos y económicos como son la conservación de la energía, reducción del tiempo de ciclo, selectividad en el calentamiento, velocidad, reducción del espacio de operación, control y entorno electrónico y mejora del entorno de trabajo, hacen muy atractivo el uso de este tipo de energía. El advenimiento del bajo coste comercial de los artículos de consumo tales como hornos domésticos de microondas, ha llevado consigo un resurgimiento del interés en usar las propiedades de estas frecuencias para otras importantes tareas de índole industrial. El calentamiento por microondas es una de las áreas que más progreso ha experimentado durante la última década, culminando en numerosas instalaciones de manufacturas y procesos industriales [1]-[5]. A medida que la comunidad científica en general ha llegado a tener mayor conocimiento del potencial del uso de la energía de microondas para usos industriales, muchos investigadores, especialmente científicos de materiales, están interesados en determinar si esta nueva tecnología puede ser beneficiosa para ellos. Históricamente, la banda de las microondas y radiofrecuencia del espectro electromagnético ha sido usada principalmente para la transmisión y recepción de información en comunicaciones y radar. Por tanto, las teorías electromagnéticas en que se basa el calentamiento por microondas han sido estudiadas durante muchos años y son conocidas pese a que continuamente se vienen desarrollando métodos o técnicas para su resolución. No obstante, para entender el mecanismo de calentamiento de los materiales, es fundamental

contemplar la interacción entre la energía microondas y las propiedades características de la materia durante el proceso [1], [5]-[6].

El calentamiento por microondas de materiales dieléctricos se debe a la disipación de parte de la energía del campo electromagnético aplicado en energía térmica. El mecanismo molecular envuelto es complejo. Se puede describir como un fenómeno de fricción en el cual la rotación de los dipolos es impedida por restricciones intermoleculares, resultando una histéresis entre campo aplicado y polarización que da como resultado un calentamiento del material bajo tratamiento [1], [2]-[5]. Visto desde un nivel macroscópico, la potencia disipada como calentamiento en un volumen es proporcional a la potencia electromagnética que penetra en ese volumen, es decir, al cuadrado del campo eléctrico local aplicado, a la frecuencia de la onda electromagnética y a las propiedades dieléctricas de los materiales. Internamente, la deposición de energía está limitada por la profundidad de penetración del campo dentro del material. Esta profundidad depende de nuevo de la frecuencia de la onda y también de las propiedades dieléctricas de los materiales. La radiación electromagnética comúnmente utilizada (infrarrojos, luz visible, etc.) presenta unas longitudes de onda relativamente pequeñas y por consiguiente muy poca penetración en la materia con pérdidas. A frecuencias de microondas este valor de penetración es del orden de centímetros, es decir, del mismo orden de magnitud que las dimensiones de los materiales a calentar, de ahí el uso de estas frecuencias. La generación de calor es prácticamente instantánea, por lo que otros fenómenos térmicos como conducción, convección, y radiación juegan un papel secundario en el equilibrio de la temperatura [1], [5]-[7]. De este modo, el conocimiento preciso de las propiedades eléctricas de los materiales es fundamental para conocer su comportamiento bajo la influencia de un campo electromagnético. Las características electromagnéticas más importantes de un material son la permitividad ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad ( $\mu$ ). Como resultado de estas propiedades, la longitud de onda de la onda electromagnética es menor en el interior del material a procesar. Además, el módulo del campo eléctrico se atenúa, lo que resulta en una transferencia de energía electromagnética en una energía térmica en el interior del material dando lugar al calentamiento del mismo.

No sólo es importante el conocimiento de las propiedades dieléctricas en aplicaciones de calentamiento por microondas. Recientemente, el aumento incesante del uso de los terminales móviles en telefonía, ha llevado consigo un aumento de la preocupación por la exposición de los usuarios a la radiación electromagnética. Así pues, la determinación de las propiedades dieléctricas de



varios tejidos y materiales orgánicos es muy importante para la estimación de la tasa de absorción específica local y promediada de la energía electromagnética (SAR) en el cuerpo humano. Del mismo modo, el comportamiento eléctrico de un circuito impreso o de un módulo multichip puede verse afectado significativamente por las propiedades dieléctricas del material del sustrato. Todo esto, junto con el incremento de las aplicaciones industriales de las microondas, ya sea en el campo de la medicina (hipertermia, angioplastia, liposucción, etc.), agricultura (desinfectación, desinsectación, secado de alimentos, etc.) e industria (vulcanizado de caucho, pasteurización, atemperado, etc.), ha hecho resurgir el interés por desarrollar sistemas precisos de medida para caracterización dieléctrica de estos materiales.

## 1.2. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

La sintonización o las correcciones mecánicas en un dispositivo de microondas, una vez éste ha sido fabricado, son muy difíciles, y en ocasiones, imposibles de realizar. Por tanto, el modelado preciso de este tipo de estructuras es una tarea importante.

El modelado electromagnético encuentra las relaciones entre las fuentes de energía y los campos que éstas producen en la estructura bajo análisis, tal y como describen las Ecuaciones de Maxwell [9]. Sin embargo, cuando los ordenadores no podían ayudar al diseño electromagnético, para los ingenieros, habituados a manejarse con circuitos eléctricos y electrónicos, resultaban inmanejables las expresiones resultantes de las Ecuaciones de Maxwell a la hora de poder diseñar dispositivos electromagnéticos. La gran demanda tecnológica durante la Segunda Guerra Mundial en el campo de las telecomunicaciones hizo redoblar los esfuerzos en este sentido. Se optó por realizar una abstracción circuital de un problema electromagnético y crear circuitos equivalentes eléctricos, cuyo comportamiento fuera aproximado al del dispositivo real. La contribución principal se debe a N. Marcuvitz, del MIT, que trabajó en el desarrollo de circuitos en guía con aplicaciones al radar. Al finalizar la guerra, estos trabajos fueron recopilados y publicados [8].

La solución a problemas de valor de frontera simples se puede encontrar mediante técnicas analíticas que conducen a soluciones cerradas. Este tipo de soluciones están usualmente limitadas a cierto tipo de geometrías canónicas. Sin embargo, éste no es el caso de las modernas estructuras que se utilizan en la actualidad, para las que se necesita la aplicación de técnicas numéricas. Esta clase de técnicas han de ser tan eficientes como sea posible, tanto en términos de velocidad de proceso como de requisitos de memoria.

En la bibliografía, se describen multitud de métodos para resolver problemas electromagnéticos. La idoneidad de un método u otro depende de las características del problema (geometría, tamaño eléctrico, etc.).

En la técnica del operador integral, la respuesta electromagnética es dada por la suma de todas las contribuciones elementales (funciones de Green) correspondientes a unas determinadas excitaciones elementales. Por otro lado, las técnicas de operador diferencial se basan en la aplicación directa de las Ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial. El método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) [10] y el método de los elementos finitos [11] son los ejemplos más conocidos. FDTD realiza una discretización de