



GRUPO DE ELECTROMAGNETISMO  
APLICADO A LAS  
TELECOMUNICACIONES



E.T.S.I. TELECOMUNICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
CARTAGENA

## XXVI CONVOCATORIA DE PREMIOS “INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN 2005”

### RESUMEN TESIS DOCTORAL

#### Datos de la Tesis:

---

**Título:** *Análisis de Modos de Fuga en Estructuras Planares Apantalladas Lateralmente y Diseño de Nuevas Antenas “Leaky-Wave” en Tecnología Híbrida Impresa-Apantallada*

**Autor:** José Luis Gómez Tornero  
**Director:** Alejandro Álvarez Melcón

**Lugar de Realización:** Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena

**Fecha de Lectura:** 30 de mayo de 2005  
**Calificación:** Sobresaliente “*Cum Laude*” por Unanimidad con Mención *Doctorado Europeo*.

#### Datos del Autor:

---

**Nombre:** José Luis Gómez Tornero

---

# ÍNDICE

0- BIOGRAFÍA DEL AUTOR DE LA TESIS DOCTORAL.....	2
1- DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO	
1.1- MÉTODO DE ANÁLISIS DE ONDAS DE FUGA EN TECNOLOGÍA HÍBRIDA....	3
1.2- DISEÑO DE ANTENAS “LEAKY-WAVE” UNIFORMES.....	4
1.3- ANÁLISIS Y DISEÑO DE ANTENAS “LEAKY-WAVE” PERIÓDICAS.....	6
1.4- DESARROLLO DE SOFTWARE CAD.....	8
2- ORIGINALIDAD DEL TEMA.....	9
3- RESULTADOS OBTENIDOS.....	12
4- APLICABILIDAD PRÁCTICA.....	15
ANEXOS	
A.1- PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES.....	17
A.2- PONENCIAS EN CONGRESOS INTERNACIONALES.....	18
A.3- COLABORACIONES.....	19
A.4- OTROS MÉRITOS DEL AUTOR.....	19

## 0- BIOGRAFÍA DEL AUTOR

---



José Luis Gómez Tornero nació en Murcia en 1977. Obtuvo el título de Ingeniero de Telecomunicación en julio del 2001 por la Universidad Politécnica de Valencia. En 1999 trabajó como alumno interno en el Departamento de Radiocomunicaciones de la UPV, donde desarrolló técnicas analíticas y numéricas para el análisis y diseño automatizado de filtros de microondas en tecnología de guía de onda para aplicaciones espaciales. En el año 2000 se incorporó a la empresa Alcatel Espacio, S.A., donde trabajó como Ingeniero de Radiofrecuencia en el Departamento de Radiofrecuencia Activa. Allí estuvo involucrado en el desarrollo de circuitos activos (osciladores, amplificadores, mezcladores, moduladores, demoduladores...) para el sistema transpondedor de Telemidas, Telecomandos y Seguimiento (TTC) de diversas misiones de la ESA, NASA y otras agencias espaciales. Tras desarrollar su proyecto fin de carrera en Alcatel Espacio sobre osciladores controlados por tensión, en el año 2001 se unió a la plantilla de la E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), donde actualmente es Profesor Ayudante de Segundo Periodo. Allí, en el Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones desarrolló su tesis doctoral sobre antenas “*leaky-wave*” en tecnología híbrida (circuito impreso con guía de onda), obteniendo el grado de Doctor Ingeniero en mayo del 2005. En junio 2004 recibió el segundo premio Rosina Ribalta, que concede la fundación EPSON-Ibérica a los mejores proyectos de tesis nacionales en el ámbito de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Desde octubre del 2005, José Luis Gómez Tornero ocupa el cargo de Subdirector de Alumnos y Ordenación Académica de la E.T.S.I.T. de la UPCT.

## 1- DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

A continuación se resume el trabajo realizado en esta tesis doctoral. Se ha dividido en cinco partes atendiendo a los objetivos logrados en cada parte.

### 1.1- MÉTODO DE ANÁLISIS DE ONDAS DE FUGA EN TECNOLOGÍA HÍBRIDA

Los **modos de fuga** (“*leaky-wave modes*”) son conocidos desde los años 60, como parte del espectro modal de una guía de onda o una línea de transmisión abierta. Estos modos se caracterizan por una constante de propagación longitudinal compleja ( $k_y = \beta_y - j\alpha_y$ ), en la que la parte imaginaria aparece como consecuencia de las pérdidas por radiación, tal y como muestra la Fig.1.

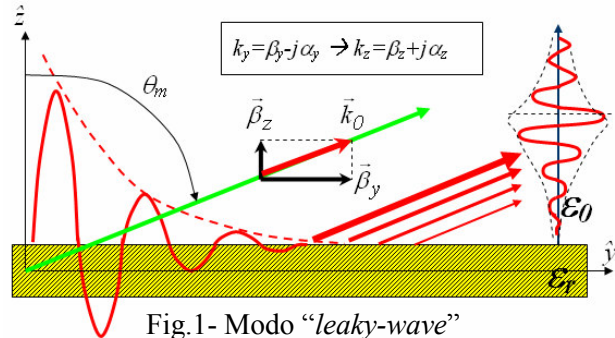


Fig.1- Modo “*leaky-wave*”

Conociendo dicha constante de propagación compleja de un modo de fuga, se puede caracterizar la **radiación** producida por dicho modo. Si bien dichos modos no son deseados en circuitos electrónicos, ya que producen pérdidas por radiación y acoplos indeseados (“*crosstalk*”), es interesante controlar su radiación para concebir un tipo de antenas de onda progresiva llamadas **antenas “*leaky-wave*” (LWAs)**. El diseño de estas antenas se basa en el **control de la constante de propagación compleja** del modo de fuga que es responsable de la radiación de dicha antena. Se hace necesario, por lo tanto, encontrar los modos de fuga que aparecen en una determinada estructura, y analizar los mecanismos que permiten controlar el modo de fuga deseado.

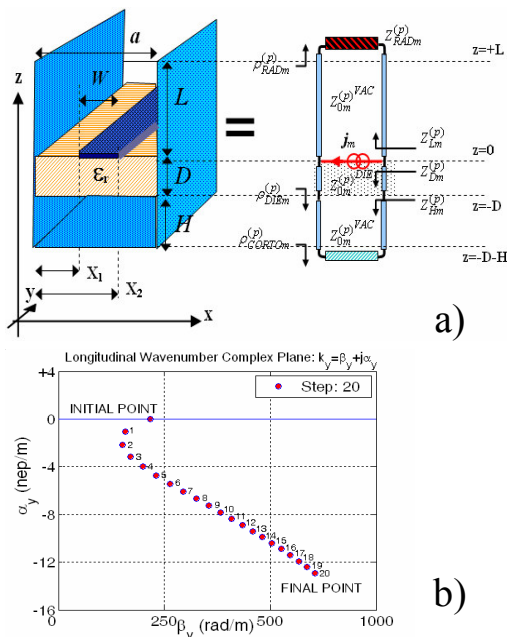


Fig.2- Circuito equivalente y búsqueda de modos de fuga en el plano complejo.

En esta tesis se han estudiado los modos de fuga en líneas de transmisión compuestas por un sustrato dieléctrico apantallado por una guía rectangular al que se le añade un circuito impreso (de tipo “*strip*” o “*slot*”). El sustrato puede estar suspendido a una altura “*H*” del suelo de la guía (ver Fig.2-a), y la pared superior está abierta a una altura “*L*”, permitiendo la existencia de modos de fuga. Este tipo de estructura combina, no obstante, la tecnología guía de onda con la tecnología impresa, por lo que hemos llamado **tecnología híbrida impresa-apantallada**. La propuesta de esta tecnología es **totalmente novedosa**, y como se verá en los apartados 1.2 y 1.3, permite concebir un nuevo tipo de LWAs con interesantes propiedades.

Para analizar los modos de fuga en esta tecnología se ha desarrollado un **circuito equivalente totalmente original**, mostrado en la Fig.2-a. El circuito se ha obtenido usando una expansión espectral de los modos de la guía de placas paralelas separadas una distancia “*a*”. De esta manera se ha obtenido una **novedosa función de Green analítica**, y las ecuaciones de Maxwell se han resuelto usando el **Método de los Momentos** para expresar las corrientes eléctricas sobre la tira impresa de tipo “*strip*” (o en su caso las corrientes magnéticas del “*slot*”). La **búsqueda de los modos complejos** no es una tarea sencilla, y ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación de matemáticos y físicos. En esta tesis se ha desarrollado un **método numérico iterativo completamente original** para encontrar las soluciones de los modos de fuga en el plano complejo  $k_y = \beta_y - j\alpha_y$ , tal y como se muestra en la Fig.2-b.

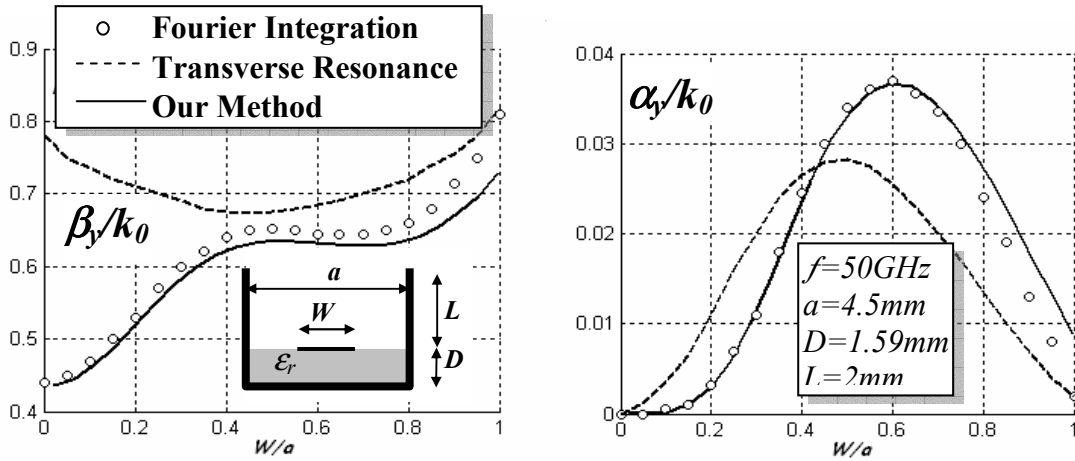


Fig.3- Validación análisis modo de fuga.

Al ser un método específicamente desarrollado para estudiar los modos de fuga en esta particular tecnología híbrida, se ha conseguido **optimizar de manera sorprendente el tiempo de cálculo**, debido a su **alta carga analítica** (si lo comparamos con otros métodos más genéricos y de alta carga numérica, como FDTD, FEM...). Los resultados del análisis modal se han validado comparando la constante de propagación compleja ( $\beta_y, \alpha_y$ ) de diferentes modos de fuga estudiados en la literatura, como se muestra en la Fig.3.

El método de análisis **desarrollado de manera totalmente original en esta tesis doctoral** ha sido muy bien aceptado en la comunidad científica, dando lugar a **5 publicaciones en revistas internacionales** de alto índice de impacto (ver Refs.[1-5] en el anexo A.1, publicaciones en revistas internacionales).

### 1.2- DISEÑO DE ANTENAS “LEAKY-WAVE” UNIFORMES EN TECNOLOGÍA HÍBRIDA

Una vez desarrollado un método de análisis rápido y riguroso, se ha usado para diseñar **nuevas antenas LWAs** en la tecnología híbrida propuesta. El esquema de estas antenas se muestra en la Fig.4. La guía de onda dieléctrica propaga un **modo TE<sub>10</sub> inicialmente no radiativo**. Sin embargo, el **circuito impreso planar**, de tipo “slot” (Fig.4-a) ó “strip” (Fig.4-b y 4-c), **inducirá y controlará la radiación** de dicho modo, que se transformará en un modo de fuga bajo unas condiciones determinadas.

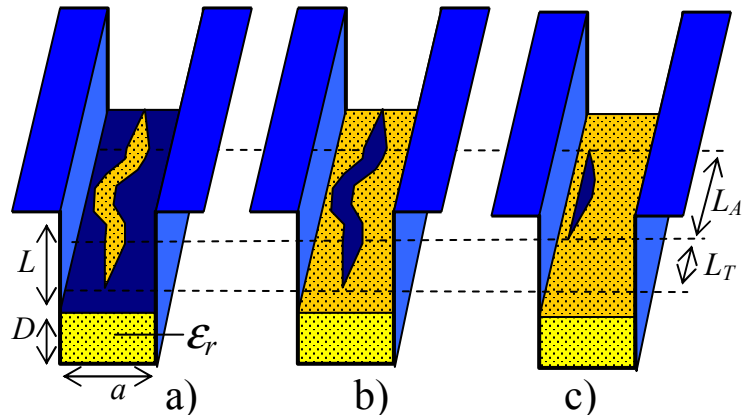


Fig.4- Antenas LWAs uniformes en tecnología híbrida.

La **ventaja principal** de estas antenas respecto a anteriores LWAs estriba en que **es el circuito planar el encargado de controlar la iluminación de la antena**. Como se observa en la Fig.4, las dimensiones del “slot” o “strip” impreso deben ser variadas a lo largo de la antena para controlar la constante de propagación del modo de fuga, y de esta manera se controla la radiación de la antena. Es lo que se llama un **diseño “taper”** del circuito impreso, para conseguir un determinado diagrama de radiación. Las antenas LWAs propuestas hasta ahora se basaban en la **tecnología puramente de guía de onda**. Así, el diagrama de radiación se controlaba haciendo un “taper” de las dimensiones de la guía de onda, con las consiguientes **dificultades de fabricación** y el **elevado coste** que conlleva **mecanizar una guía de onda**. En esta tesis **se ha demostrado por primera vez que el circuito impreso puede controlar, por sí solo, el diagrama de radiación** de estas antenas. La tecnología propuesta **combina la guía de onda con el circuito impreso**, siendo la labor de la guía de onda propagar el modo TE<sub>10</sub> y la labor del circuito impreso inducir y controlar su radiación. El circuito impreso se puede fabricar

usando **fotolitografía**, que es una técnica de fabricación mucho **más barata y sencilla** que el mecanizado de una guía de onda. Además, se pueden añadir diferentes circuitos planares sobre la misma guía de onda para conseguir diferentes diagramas de radiación, confiriendo **mayor flexibilidad** a los diseños de antenas LWA en esta tecnología.

El mecanismo de control de la radiación mediante circuito impreso se muestra en la Fig.5. Se basa en el **principio de radiación por la asimetría introducida por el circuito impreso** (ver Fig.5). A mayor nivel de asimetría, mayores pérdidas por radiación (aumenta el valor de  $\alpha_y$ , nep/m), y viceversa. Variando la tasa de radiación a lo largo de la longitud de la antenna se puede sintetizar una determinada función de iluminación, que determinará el **ancho de haz** y la distribución de **lóbulos secundarios** del diagrama de radiación. De esta manera, se puede **controlar la tasa de radiación del modo  $TE_{10}$  variando el nivel de asimetría del circuito impreso**. Por otro lado, la constante de fase del modo de fuga  $TE_{10}$ ,  $\beta_y$ , determinará el **ángulo de apuntamiento** (dirección del haz principal) de la antenna (ver Fig.1).

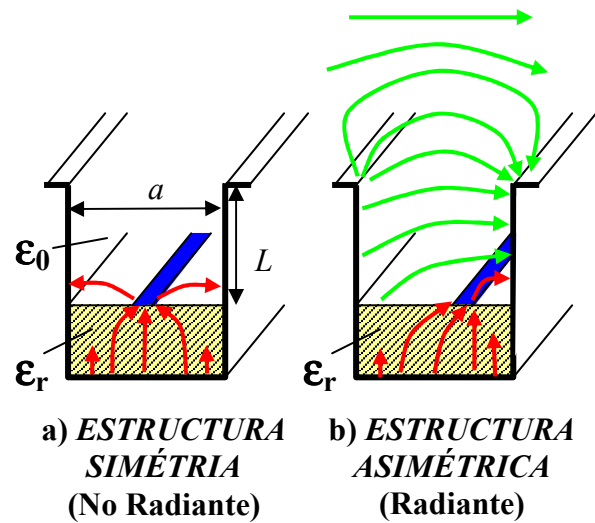


Fig.5- Principio de radiación por asimetría.

Por lo tanto, el proceso de diseño de nuestra antena LWA consiste en **variar las dimensiones del circuito impreso** (anchura  $W$  y posición “ $d$ ”, ver Fig.6-a) a lo largo de la antenna, de forma que se **module la tasa de radiación** para conseguir una determinada iluminación (que proporcione, por ejemplo, **bajo nivel de lóbulos secundarios, NLS**). A su vez se debe **mantener constante el ángulo de apuntamiento**, de forma que todas las secciones de la antenna apunten al mismo ángulo y se consiga la máxima directividad. Para ello se debe conocer cómo variar  $\alpha_y$  sin modificar  $\beta_y$ . Esta es la parte más complicada en el diseño de antenas LWA, y depende de cada tecnología en concreto. Con la tecnología que se ha propuesto en esta tesis, se ha demostrado que **el circuito impreso permite realizar esta función de control de la tasa de radiación sin variar el ángulo de apuntamiento**. Estudiando la variación de la constante de propagación compleja del modo de fuga ( $\beta_y, \alpha_y$ ) al variar las dimensiones del circuito impreso ( $W, d$ ), se puede diseñar un circuito con “taper”. Si se mantiene uniforme el circuito impreso, tal y como muestra la Fig.6-b, se consigue un apuntamiento constante pero **un NLS muy elevado para aplicaciones prácticas** (mayor de -13dB, ver Fig.6-d), debido a que una antena sin “taper” proporciona una iluminación de tipo exponencial. Mediante un diseño taper, como el mostrado en la Fig.6-c, se puede sintetizar una función de iluminación con menor NLS. En la Fig.6-d se

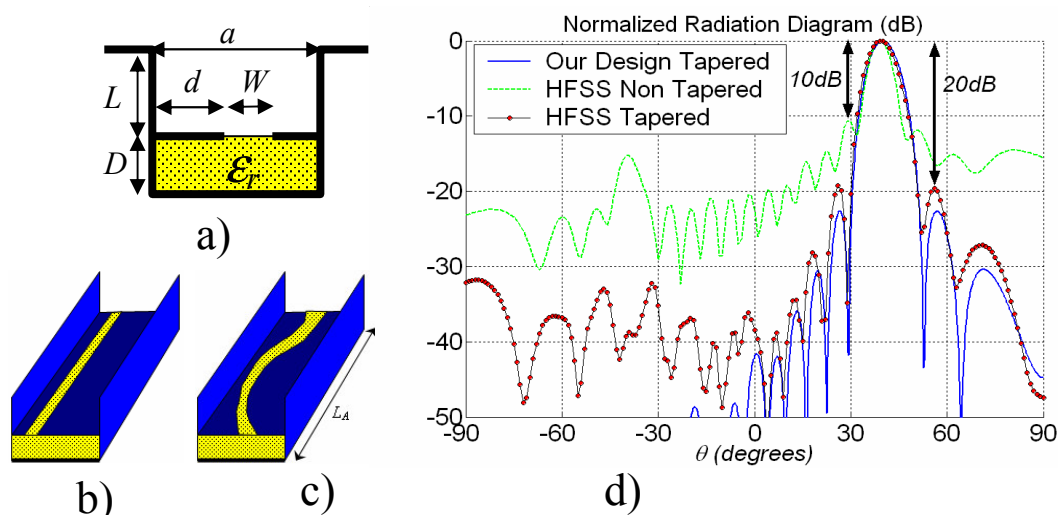


Fig.6- Mejora del nivel de lóbulos secundarios al diseñar una antena LWA con “taper”

muestra la comparación entre el diagrama de radiación para una antena con “taper” de tipo **coseno**, observando una **mejora del NLS de 10dB respecto del diseño uniforme**. Los resultados obtenidos con el método de análisis modal son **totalmente novedosos** y fueron **validados** por comparación con simulación de la estructura tridimensional usando un programa comercial basado en elementos finitos (HFSS), y posteriormente con **medidas experimentales**. Se observó **excelente sintonía entre los resultados del modo de fuga y los obtenidos con HFSS, así como con las medidas**.

Se realizaron **diferentes diseños completamente originales**, sintetizando **diferentes iluminaciones** (triangular, coseno al cuadrado...), mostrando siempre excelentes resultados entre las especificaciones y el diseño final. Como se comentó anteriormente, sólo era necesario **cambiar el circuito impreso** para conseguir una nueva función de iluminación, ofreciendo una **gran flexibilidad de diseño y fabricación**. Por otro lado, se sintetizaron **diferentes longitudes efectivas** para demostrar la facilidad con que se puede variar **el ancho de haz**. En la Fig.7 se muestran los diagramas de radiación para una antena de longitud  $10\lambda_0$  y para otra de longitud  $30\lambda_0$  (para aplicaciones que requieran una alta directividad). Así mismo, se estudió el fenómeno de variación del ángulo de apuntamiento al barrer la frecuencia, y se diseñaron antenas capaces de trabajar en banda de microondas (5GHz) y en banda milimétrica (50GHz). Para **mover la banda de frecuencia** es suficiente con **escalar las dimensiones de la guía dieléctrica** que soporta el modo  $TE_{10}$ .

Por último, también se propuso **un diseño completamente original de antena suspendida** (Fig.8-a), que proporcionaba la interesante propiedad de **mantener constante la tasa de radiación para un determinado ancho de banda**.

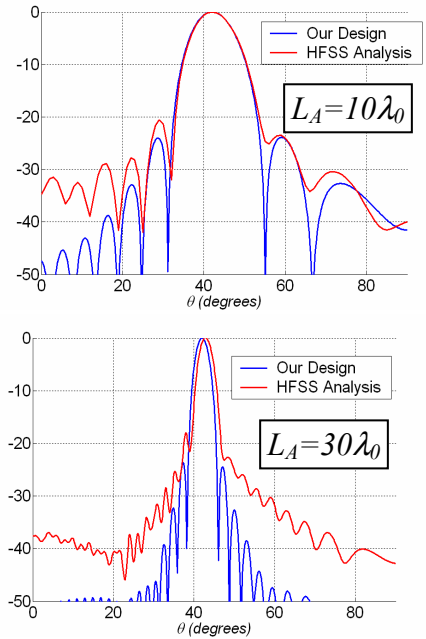


Fig.7-Aumento de directividad

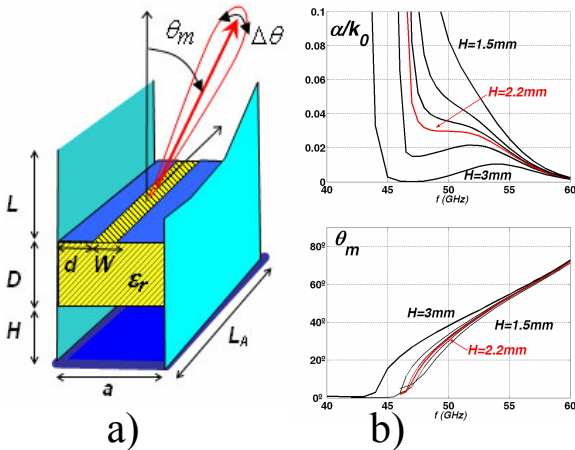


Fig.8- Efecto de configuración suspendida

La variación de la tasa de radiación con la frecuencia es un fenómeno conocido en todas las antenas LWA. Este fenómeno hace que la eficiencia de radiación (y por tanto la longitud efectiva y el ancho de haz) no se mantenga fija para diferentes ángulos de apuntamiento, empobreciendo las prestaciones de la antena para aplicaciones de “beam-scanning”. Como se observa en la Fig.8-b, escogiendo un valor adecuado de la altura de suspensión “H” (en este diseño  $H_{OPTIMO}=2.2mm$ ), se mejora considerablemente la respuesta en frecuencia de la tasa de radiación ( $\alpha$ ). Este resultado es **totalmente novedoso** y de un **alto interés práctico**. El trabajo de esta parte de la tesis dio lugar a **3 artículos en revistas internacionales** de elevado índice de impacto (Refs.[6-8]).

### 1.3- ANÁLISIS Y DISEÑO DE ANTENAS “LEAKY-WAVE” PERIÓDICAS

La teoría de análisis y diseño de antenas LWAs en tecnología híbrida fue extendida para el caso de antenas compuestas por **circuitos impresos periódicos**, tal y como se muestra en la Fig.9-a y 9-b. La **novedad** introducida respecto de las antenas LWAs periódicas anteriormente estudiadas en la literatura (Fig.9-c) estribó en la **capacidad de controlar la tasa de radiación** usando el ya comentado **mecanismo de radiación por asimetría**. Como muestra la Fig.9-a, el circuito periódico centrado no provoca radiación del modo  $TE_{10}$ .

Cuanto más se descentra, mayor es la tasa de radiación (Fig.9-b), pudiendo así  **sintetizar iluminaciones “taper”**, con  **bajos NLS** en el diagrama de radiación. Las antenas LWAs anteriores excitaban el modo  $TE_{01}$  (polarización horizontal, ver Fig.9-c), de manera que no podían usar el control por asimetría, siendo muy complicado el diseño de antenas con iluminación “taper” y apuntamiento constante

Para poder estudiar y diseñar estas antenas, se expandió el método de análisis usando la  **teoría de modos de Floquet** para tener en cuenta las discontinuidades periódicas en el eje longitudinal. Así se desarrolló una  **red equivalente completamente original** para modelar, de una manera  **rigurosa** y con expresiones  **analíticas**, el comportamiento de los campos ante las perturbaciones planares periódicas.

En la Fig.10-a se muestra la variación de las componentes del campo eléctrico en el eje “x” (entre las placas paralelas) para un modo de fugas, observando cómo  **se satisfacen las condiciones de contorno impuestas por la metalización planar**. En la Fig.10-b se muestra el comportamiento de los campos a lo largo del eje longitudinal (eje “y”), observando cómo se respetan las condiciones de periodicidad y cómo los campos decrecen como consecuencia de las pérdidas por radiación de la antena. El método de análisis desarrollado en esta tesis permite obtener los modos de fuga de estas estructuras periódicas combinando  **rapidez de cálculo y precisión**. Así se demostró por comparación con otros métodos numéricos, que o bien eran más costosos computacionalmente o bien se basaban en ciertas aproximaciones.

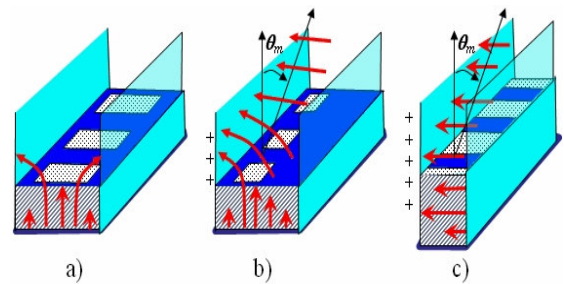


Fig.9- Antenas LWAs periódicas en tecnología híbrida

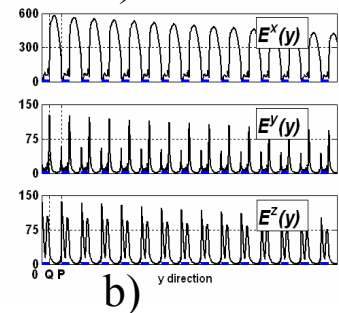
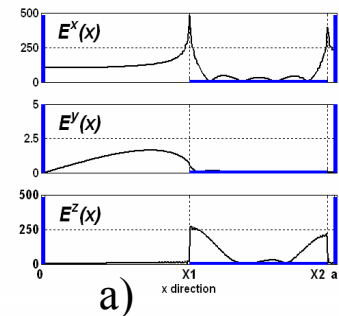


Fig.10- Variación de campo eléctrico en circuito periódico

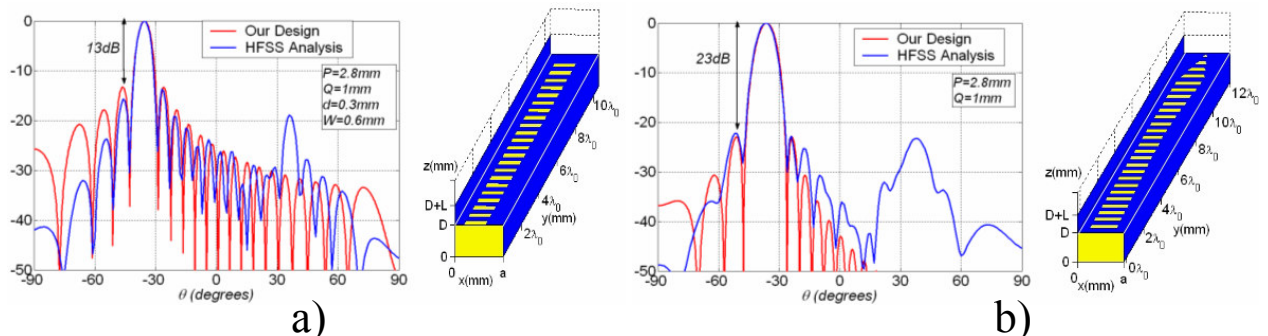


Fig.11- Antenas LWA periódicas en tecnología híbrida a) Sin “taper” b) Con “taper”

En la Fig.11 se muestran los esquemas de dos antenas periódicas en tecnología híbrida  **propuestas por primera vez en esta tesis**, junto con sus respectivos diagramas de radiación. Una de las propiedades de las antenas periódicas es la de excitar  **ondas de fuga regresivas (“backward leaky-waves”)**, que presentan la propiedad de antiparalelismo entre su velocidad de fase y su velocidad de grupo.

Dicho de otro modo, la antena puede radiar la energía en sentido opuesto al de la propagación de la onda en el interior de la guía, tal y como muestra el esquema de la Fig.12. Como también se muestra en la Fig.12, esta propiedad permite poder barrer el haz radiado desde el  **cuadrante trasero (“backward radiation”)** al  **cuadrante delantero (“forward radiation”)**, mejorando el rango de barrido de las antenas LWA no periódicas.

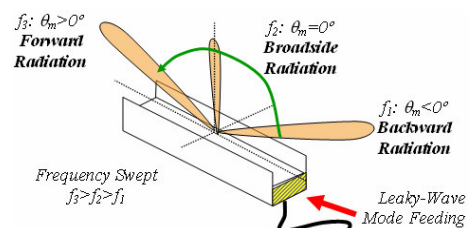


Fig.12- Barrido “backward-to-forward”

Además de poder barrer en los dos cuadrantes, las antenas periódicas propuestas en esta tesis exhiben **por primera vez la capacidad de conformar el haz para reducir el NLS, de una manera sencilla e independiente al barrido del haz**. Tal y como se muestra en la Fig.11-b, el diseño “*taper*” mejora el NLS respecto del diseño sin “*taper*” (Fig.11-a). La **comparación con las simulaciones de HFSS es muy buena**, como se aprecia en los resultados de la Fig.11, **validando** de este modo los **novedosos diseños** efectuados.

Otro **resultado totalmente original y de mucha utilidad práctica** fue demostrar que la inserción de circuitos periódicos con “*taper*” permite controlar no sólo la **iluminación** de la antena LWA (como ocurría con las antenas no periódicas), sino también el **ángulo de apuntamiento**. Así, la tecnología híbrida propuesta en esta tesis ofrece una **altísima flexibilidad de diseño** y una gran **facilidad de fabricación**. Como se muestra en la Fig.13, el circuito impreso es capaz de controlar, por sí solo y para una **frecuencia fija**, el ángulo de apuntamiento, la eficiencia de radiación y el nivel de lóbulos secundarios, como muestran los diagramas de radiación de la Fig.13. La guía de onda dieléctrica se encarga solamente de determinar la banda de frecuencias de trabajo. De esta manera, podemos intercambiar **diferentes circuitos impresos para distintas necesidades**, usando la misma estructura de soporte (**la misma guía dieléctrica**).

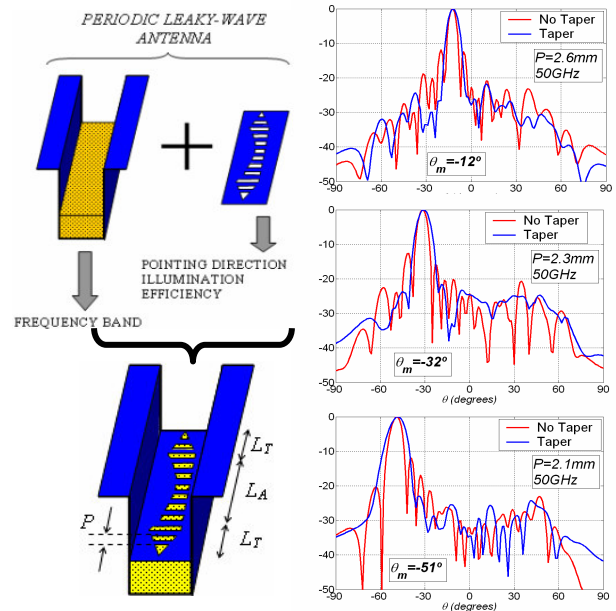


Fig.13- Control del apuntamiento y la iluminación mediante inserción del circuito

Como se comentó, la fabricación del circuito impreso no supone un coste excesivo, si lo comparamos con el coste de mecanizado de una guía de onda. Las **originales ideas** y los **novedosos diseños** presentados en esta parte de la tesis dieron lugar a **3 publicaciones en revistas internacionales de alto prestigio** (Refs.[9-11]).

#### 1.4- DESARROLLO DE SOFTWARE CAD

El diseño de las antenas estudiadas en esta tesis doctoral conlleva dos tareas importantes y bien diferenciadas. La primera es el **análisis de los modos de fuga** presentes en las estructuras propuestas, así como la obtención de sus constantes de propagación compleja.

Con tal fin se desarrolló un software capaz de encontrar los modos de fuga y obtener los **resultados de dispersión** (variación de  $k_y = \beta_y - j\alpha_y$  al modificar la frecuencia o las dimensiones de la antena), que fue llamado **P.A.M.E.L.A.** (*Programa de Análisis Modal de Estructuras Lateralmente Apantalladas*). La segunda tarea es el diseño de las antenas. **PAMELA** se utilizó como parte de un paquete de programas para realizar el **diseño asistido por ordenador** (CAD, “*Computer Aided Design*”) de las antenas propuestas en esta tesis. En el punto 10 del apartado 3 (resultados obtenidos), se detalla un poco más la utilidad de este software de diseño.

Hay que destacar que el **software desarrollado es totalmente original**, y que ha sido **fundamental para obtener los resultados** de esta tesis doctoral. Por un lado **PAMELA** ha agilizado enormemente la complicada **tarea de análisis de los modos de fuga** en las diferentes estructuras tratadas a lo largo de la tesis. Por otro lado, las **curvas de dispersión** obtenidas y el paquete CAD desarrollado han sido de vital importancia para poder diseñar con éxito las antenas propuestas. Estas características han hecho que estos programas de análisis y diseño hayan sido publicados en **2 revistas internacionales de prestigio** (Refs.[12-13]).



## 2- ORIGINALIDAD DEL TEMA

En los siguientes puntos se destaca la originalidad de las contribuciones derivadas de esta tesis doctoral.

1. El método que se ha desarrollado está basado en un **circuito equivalente totalmente original**. Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y particularizando para el tipo de estructuras seleccionadas en esta tesis, se han podido obtener **unas líneas de transmisión acopladas equivalentes totalmente novedosas** que permiten modelar, de una manera **rigurosa y totalmente analítica**, el comportamiento de los campos electromagnéticos en las antenas propuestas. Otros métodos modales desarrollados con anterioridad para analizar estructuras parecidas, basaban en ciertas **aproximaciones** los circuitos equivalentes obtenidos. Estas aproximaciones hacían que se perdiera exactitud en los resultados, o que el método de análisis estuviera limitado a **ciertas restricciones**. Por otro lado, el estudio de las antenas propuestas en esta tesis, usando métodos de análisis tridimensional genéricos (como el método de diferencias finitas o el de elementos finitos, tanto en el dominio temporal como en la frecuencia), resulta demasiado **costoso computacionalmente** para aplicarlos al diseño asistido automatizado por ordenador.
2. También es **totalmente original el algoritmo iterativo ideado para facilitar la búsqueda en el plano complejo de los ceros correspondientes a las soluciones de los modos de fuga**. Debemos recordar que el diseño de las antenas se basa en el estudio de la constante de propagación compleja de los modos “leaky”. Si no somos capaces de encontrar dichos modos, no podríamos estudiar las antenas propuestas, y menos aún diseñarlas. La labor de búsqueda de los ceros complejos es una **tarea numérica** (a diferencia del resto de la formulación del método, que es totalmente analítico), y se trata de la parte **más crítica y costosa computacionalmente** en cualquier estudio de los modos de fuga. El novedoso algoritmo desarrollado ha dotado de una enorme **robustez** a esta difícil tarea numérica, y además **puede ser aplicado a la búsqueda de modos leaky en cualquier tipo de estructura radiante**.
3. El método de análisis se ha aplicado para estudiar antenas de onda de fuga basadas en una **tecnología totalmente novedosa**, y que hemos llamado **tecnología híbrida guía de onda - circuito impreso**. Esta nueva tecnología ha demostrado ser muy eficaz a la hora de controlar las propiedades de radiación de las antenas propuestas en esta tesis.

Para comprender la originalidad de los resultados obtenidos, conviene hacer un pequeño repaso a las tecnologías que se habían propuesto con anterioridad a la hora de concebir antenas “leaky-wave” uniformes.

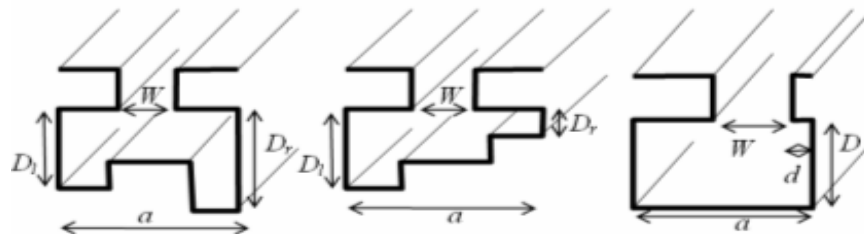


Fig.14- Antenas LWAs en guía no periódicas propuestas en trabajos anteriores.

Por un lado se habían propuesto antenas LWAs basadas en guías no periódicas como las que se muestran en la Fig.14. Como se ilustra en la Fig.15, todas estas guías son capaces de propagar un modo  $TE_{10}$  que es no radiativo si la estructura es simétrica (Fig.15-a), y que se transforma en un modo de fuga si la guía se deforma para introducir una cierta asimetría (Fig.15-b).

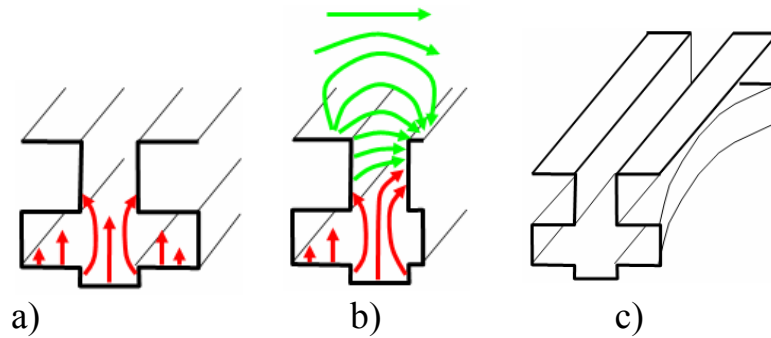


Fig.15- Mecanismo de control de radiación y “taper” en las antenas LWAs en guía no periódicas propuestas en trabajos anteriores.

Usando este mecanismo de radiación por asimetría de la guía de onda, se podía controlar la tasa de radiación, y de esta forma la iluminación de la antenna. En la Fig.15-c se muestra como quedaría un diseño “taper” usando esta **tecnología basada puramente en guía de onda**. Se puede observar que se ha hecho necesario **modificar la sección de la guía a lo largo de la longitud de la antenna**. En la práctica, esto supone **mecanizar la robusta estructura metálica** de la guía de onda, con el coste de fabricación tan elevado que supone, sobre todo a altas frecuencias donde las tolerancias son críticas. Además, este tipo de “taper” introduce **poca flexibilidad en el diseño**, ya que si una guía de onda ya fabricada no funciona como se esperaba es muy complicado afinar su respuesta (es muy complicado reajustar las dimensiones para corregir los fallos), y hay que desechar la antenna fabricada.

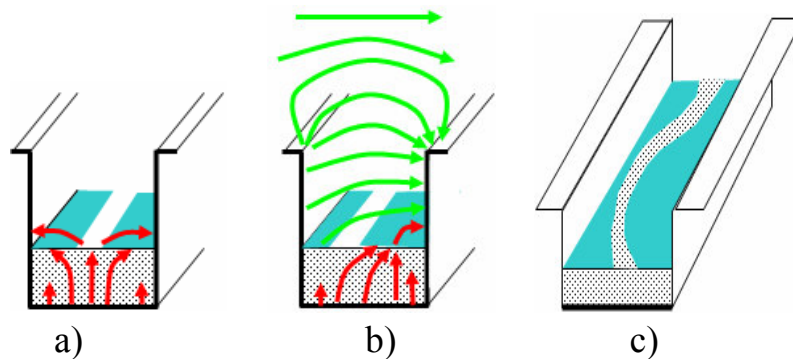


Fig.16- Mecanismo de control de radiación y “taper” en las antenas LWAs en guía no periódicas propuestas en esta tesis doctoral.

La original tecnología híbrida propuesta en esta tesis supone una **mejora muy interesante** a la hora de diseñar y fabricar antenas LWAs no periódicas. Como se esquematiza en la Fig.16, es el circuito impreso el que se encarga de controlar la radiación del modo  $TE_{10}$  que viaja por la guía de onda. Combinando la tecnología guiada con la impresa, se consigue **abaratar costes de fabricación**, ya que **no es necesario mecanizar la guía de onda**. Como se muestra en la Fig.16-c, basta con diseñar un circuito impreso con “taper” que sea capaz de sintetizar el diagrama de radiación deseado. Además, la **flexibilidad en los diseños** es mucho mayor, ya que podemos corregir los fallos de fabricación o diseño, simplemente modificando el circuito impreso que se añade a la parte superior de la guía de onda. Debemos recordar que los procesos de fabricación y retoque de circuitos impresos (fotolitografía, vaciado de cobre con broca...) son mucho **más sencillos, rápidos y baratos** que los procesos de mecanizado de guías de onda.

- De la misma manera, en la literatura se habían propuesto antenas LWAs no periódicas basadas en la **guía NRD (Non Radiative Dielectric guide) para aplicaciones en bandas milimétricas y óptica**. La Fig.17-a muestra este tipo de antenas y el mecanismo de taper. Como se observa en la Fig.17-a, se recurría a la **modificación de las dimensiones de la guía dieléctrica para hacerla radiar**. De nuevo esto supone **mecanizar la guía de onda** que propaga el modo fundamental para inducir y controlar la radiación. La tecnología

híbrida fue aplicada en la guía NRD, insertándole un sencillo “strip” o tira metálica en su pared superior (Fig.17-b). Este tipo de antena es **totalmente novedosa**, y reúne las ventajas de la guía NRD **para aplicaciones en bandas milimétricas** (bajas pérdidas, sencilla fabricación), con la ventaja de no tener que mecanizar la guía NRD.

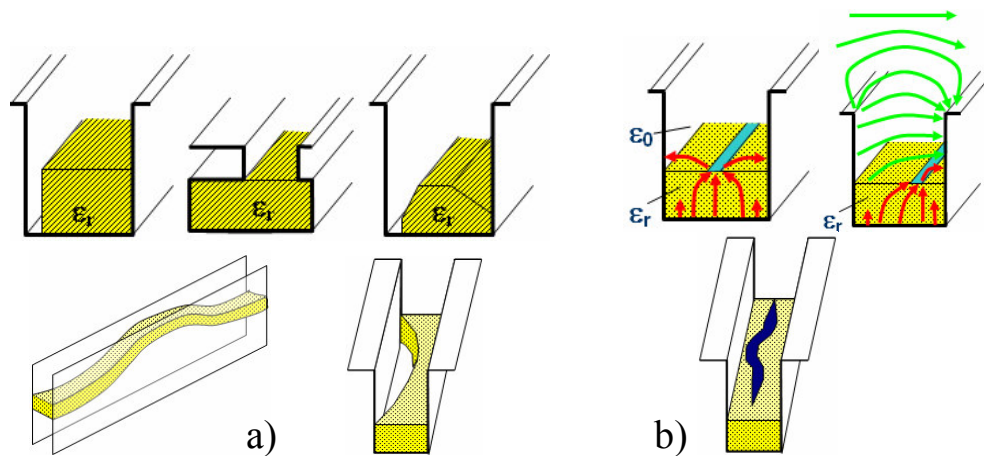


Fig.17- Mecanismo de control de radiación y “taper” en antenas LWAs en guía NRD.

5. Se ha extendido el método de análisis para permitir el estudio de **circuitos impresos periódicos**. Para ello se ha combinado la expansión de modos de placas paralelas con la expansión de armónicos espaciales de Floquet. De nuevo, **es la primera vez que se desarrolla un método de análisis específico para este tipo de estructuras periódicas radiantes**. El análisis modal es **totalmente riguroso**, sin ningún tipo de restricción, y **formulado de una manera totalmente analítica**.
6. Como consecuencia se ha propuesto un **nuevo tipo de antena “leaky-wave” periódica, basadas en la tecnología híbrida**. Este tipo de antena (mostrada en la Fig.18-a) reúne dos mejoras importantes respecto de anteriores diseños (Fig.18-b). Primero, por primera vez se puede **controlar de manera independiente el ángulo de apuntamiento y el tipo de iluminación**. Segundo, no hace falta modificar la estructura de la guía de onda para conseguir las especificaciones deseadas. El **circuito impreso fijará la respuesta de la antena** (apuntamiento y distribución de lóbulos secundarios).
7. Además hay que destacar que se ha desarrollado una **metodología de diseño asistido por ordenador totalmente original**, basada en la obtención y el procesado de las curvas de dispersión de los modos de fuga. Esta metodología se ha implementado en un **software original de tipo CAD**, que permite obtener de manera automatizada las dimensiones del circuito impreso que sintetizan una determinada respuesta eléctrica.

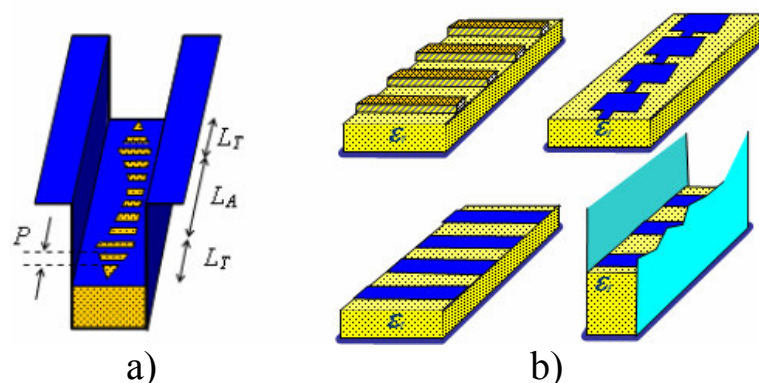


Fig.18- Antenas LWAs periódicas.

### 3- RESULTADOS OBTENIDOS

En los siguientes puntos se resumen las conclusiones y resultados derivados del trabajo realizado durante esta tesis doctoral:

1. Como primer resultado de la tesis, hay que mencionar que se ha desarrollado un **método de análisis bidimensional**, que permite hallar las **constantes de propagación complejas** de los **modos de fuga** existentes en **estructuras abiertas** en **tecnología híbrida** (guía de onda con circuito impreso). Los resultados del método se han **validado** comparando curvas de modos de fuga obtenidas en la literatura usando otros métodos (ver Fig.3).
2. Hay que destacar que el método desarrollado combina una **alta carga analítica (bajo tiempo de cálculo)** manteniendo la naturaleza de **onda completa** (resultados rigurosos, teniendo en cuenta los efectos de orden superior). Es por ello que **los resultados obtenidos han superado las restricciones de otros métodos publicados**, basados en ciertas aproximaciones, y han igualado los resultados obtenidos con **métodos “full-wave”** mucho más complejos y costosos computacionalmente (ver Fig.3).
3. Además, la parte numérica de búsqueda de ceros en el plano complejo se ha resuelto ideando un **robusto y original algoritmo de búsqueda iterativo** (ver Fig.2-b). Esta técnica de búsqueda ha mostrado ser capaz de seguir las soluciones complejas y encontrar una gran variedad de modos de fuga, en condiciones incluso de acoplo modal.
4. Usando el método desarrollado, se han propuesto **novedosas antenas “leaky-wave”** capaces de **controlar su diagrama de radiación tan sólo modificando la geometría del circuito impreso sobre la guía de onda**. Para ello, primeramente se han obtenido las **curvas de dispersión** de la constante del modo de fuga  $TE_{10}$  para demostrar que variando la anchura ( $W$ ) y la posición ( $d$ ) del circuito impreso se puede controlar el ángulo de apuntamiento ( $\theta_m$ ) y la tasa de radiación ( $\alpha/k_0$ ) de dicho modo de fuga (ver Fig. 19).

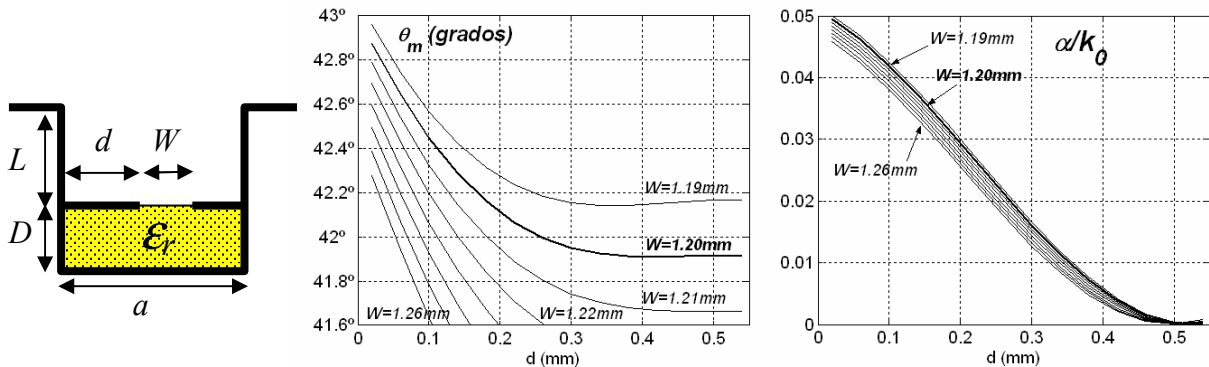


Fig.19- Curvas de dispersión de modo de fuga al variar las dimensiones del circuito impreso

5. Procesando la información de estas curvas de dispersión se han diseñado **circuitos impresos “taper”**, en los que sus dimensiones son variadas a lo largo de la antena (ver Fig.6-c), de forma que se sintetiza una determinada iluminación para conseguir **reducir el nivel de lóbulos secundarios sin afectar al apuntamiento**. Los resultados predichos con el método de **análisis modal** se han comparado con los diagramas de radiación obtenidos por una **herramienta comercial de análisis electromagnético tridimensional** (software HFSS, basado en el método de elementos finitos, FEM). La comparación entre ambas técnicas, de naturaleza totalmente diferente, ha sido muy buena, mostrando la habilidad de mejorar el diagrama de radiación al usar un circuito con “taper” (ver Fig.6-d).

6. También hay que destacar el novedoso resultado obtenido al **suspender el circuito impreso** (ver Fig.8). Se ha demostrado que la configuración suspendida es capaz de mejorar las prestaciones de las antenas “leaky-wave”, ya que permite **mantener constante la tasa de radiación en un amplio ancho de banda**. Este es un **resultado totalmente novedoso**.
7. Se ha expandido el método de análisis para poder estudiar **circuitos periódicos**. De nuevo, los resultados del método modal se han validado comparando las constantes complejas de modos de fuga estudiados anteriormente en la literatura. La Fig.20 presenta resultados obtenidos para una antena “leaky-wave” periódica, mostrando una excelente comparación tanto para el ángulo de apuntamiento ( $\theta_m$ ) como para la tasa de radiación ( $\alpha_y/k_0$ ). Además, **el método desarrollado supera ciertas limitaciones de otros métodos**. En la Fig.20 se puede ver que nuestros resultados se extienden más allá de la frecuencia de 50GHz, pues permite **tener en cuenta efectos de orden superior**, como la radiación de varios armónicos espaciales a la vez, las bandas prohibidas de orden superior, o el acople entre modos.

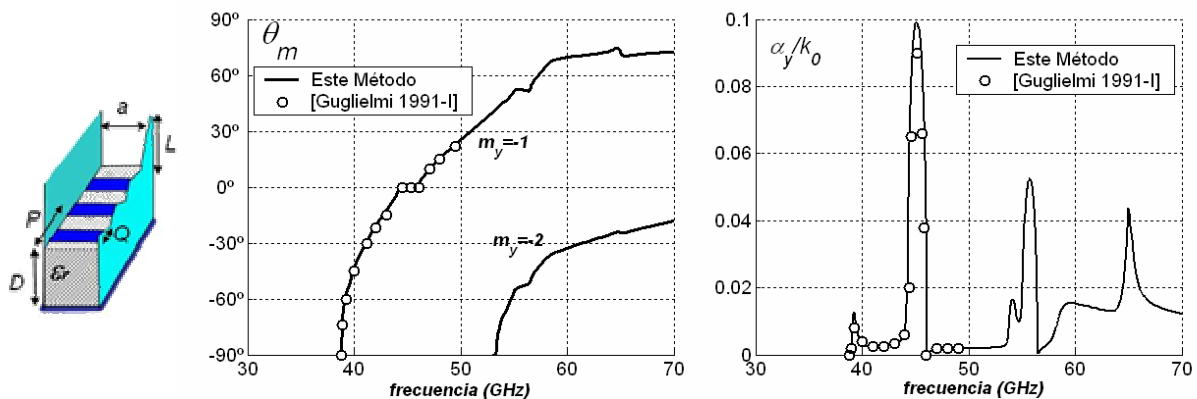


Fig.20- Comparación de resultados modales para estructura periódica.

8. De nuevo, los resultados del modo de fuga analizado se han comparado con los diagramas de radiación obtenidos con métodos tridimensionales genéricos (método de elementos finitos, FEM). La Fig.21 muestra la **buena comparativa obtenida**, pudiendo **predecir con exactitud la radiación de armónicos de orden superior** (en esta figura se muestran dos haces radiados a  $+67^\circ$  y  $-37^\circ$ , producidos por los armónicos de orden  $n=-1$  y de orden  $n=-2$ ).

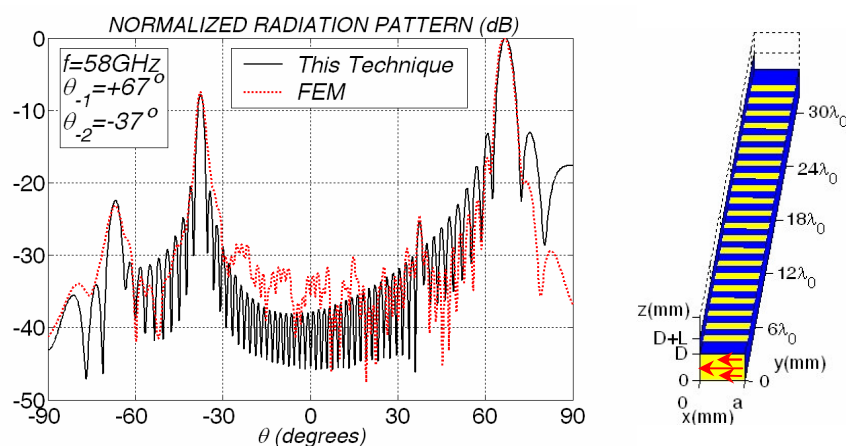


Fig.21- Comparación de diagramas de radiación para estructura periódica.

9. El estudio de estas estructuras periódicas ha permitido **diseñar nuevas antenas “leaky-wave” en tecnología híbrida basadas en circuitos impresos periódicos**. Los resultados obtenidos muestran que estas nuevas antenas permiten **disminuir el nivel de lóbulos secundarios** (ver Fig.11), así como **controlar de manera independiente el ángulo de apuntamiento** (ver Fig.13), **modificando la geometría del circuito impreso periódico**.

10. Llegados a este punto, es importante resaltar que el diseño de estas antenas han sido posible gracias a que el **método de análisis desarrollado es muy rápido** (tiene un coste computacional bajo). De esta manera, se ha podido integrar el software de análisis (PAMELA) dentro de un paquete de **diseño asistido por ordenador (CAD)**. Este software CAD permite obtener **las curvas de dispersión del modo de fuga** en muy poco tiempo (15 minutos en un Pentium 4, 384MB RAM a 2GHz). Una vez obtenidas las curvas de dispersión (Fig.22-a), el proceso de diseño basado en el **método de análisis modal es inmediato**, obteniendo las dimensiones del circuito impreso a lo largo de la guía de onda para sintetizar una determinada respuesta (Fig.22-b). Además, una vez obtenidas las curvas de dispersión para una determinada guía de onda, se pueden **diseñar tantos circuitos impresos como se desee sin mayor coste computacional** (repetimos que el procesamiento de las curvas de dispersión es prácticamente en tiempo real).

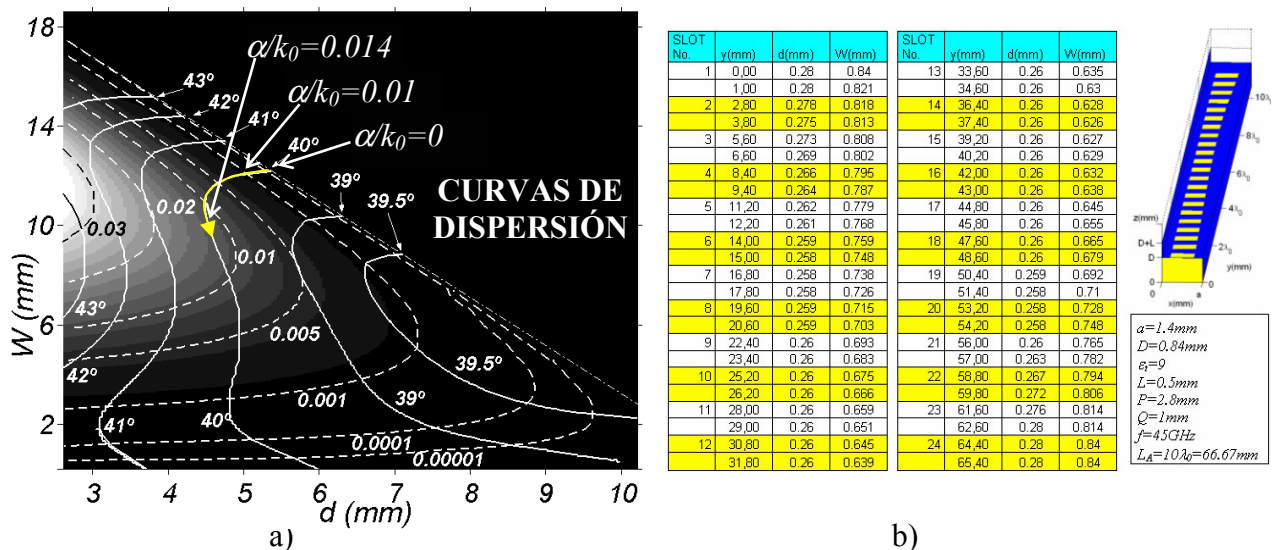


Fig.22- Diseño de dimensiones del circuito impreso (posición  $d$  y anchura  $W$ ) a lo largo de la longitud de la antena (eje  $y$ ) usando las curvas de dispersión del modo de fuga.

Sin embargo, un **diseño por optimización usando software de análisis tridimensional comercial basado en un método más numérico (como FEM)**, habría resultado **tremendamente costoso**. Téngase en cuenta que el análisis de una antena LWA de largas dimensiones ( $10\lambda_0$ ) puede llevar del orden de 30 minutos por punto en frecuencia. La optimización de las dimensiones de la antena conlleva decenas de simulaciones (variando las diferentes variables de la misma), lo cual se traduce en un tiempo de diseño mucho mayor sin poder asegurar la convergencia del proceso de **optimización numérica**. Sirva de ejemplo la antena periódica mostrada en la Fig.22-b, compuesta por 24 slots. El diseño por optimización numérica conllevaría la obtención de la anchura y la posición de cada uno de los 24 slots. Esto se traduce en 96 variables a optimizar (4 variables por cada slot: anchura  $W$  inicial y  $W$  final de cada slot, posición  $d$  inicial y  $d$  final de cada slot), lo cual se hace **inabordable con un método numérico genérico**. El método de análisis desarrollado en esta tesis permite un **diseño rápido y exitoso**, debido a que se ha creado **específicamente para este tipo de estructuras**. Esto ha permitido que, partiendo de las mismas **ecuaciones de Maxwell**, se haya podido formular un **sencillo circuito equivalente**, dotando a esta técnica de análisis de una **elevada carga analítica**.

11. Como último resultado se destaca que **los diseños ideados en esta tesis doctoral también se han validado con medidas de los primeros prototipos fabricados, obteniendo excelentes resultados**. En el siguiente apartado (Aplicabilidad Industrial) se detallan los resultados experimentales conseguidos. El trabajo experimental ha dado lugar a un artículo, que actualmente está en proceso de revisión (Ref.[14]).

## 4- APLICABILIDAD PRÁCTICA

Como se ha comentado en varias ocasiones a lo largo de este resumen, las antenas propuestas y diseñadas en esta tesis doctoral presentan una **enorme flexibilidad** a la hora de **controlar sus propiedades de radiación**; ángulo de apuntamiento, ancho de haz y nivel de lóbulos secundarios. A su vez, la tecnología híbrida permite controlar dichas propiedades a través del **circuito impreso sin necesidad de mecanizar la propia guía de onda**. Esto introduce muchas ventajas. Se pueden fabricar diferentes máscaras o “layout” para **distintas aplicaciones** y a un **bajo coste**, usando la misma guía de onda. Es sencillo **ajustar la respuesta de la antena**, pues sólo hay que modificar las dimensiones del circuito impreso (no es necesario reajustar las dimensiones de la guía de onda). Estas características hacen que las antenas propuestas sean interesantes a la hora de aplicarlas en la práctica.

Además, como se ha comentado, se ha desarrollado una **metodología de diseño asistido por ordenador**, que permite llevar a buen puerto el **diseño del circuito impreso capaz de sintetizar diferentes respuestas eléctricas** (ancho de haz, tipo de iluminación y ángulo de apuntamiento de la antena). El procedimiento de diseño es rápido y efectivo.

La **utilidad** de este software para el **desarrollo industrial** de antenas LWA basadas en la tecnología propuesta se ha demostrado con la implementación **práctica de los primeros prototipos de estas antenas**. El autor de esta tesis ha realizado **dos estancias en la Universidad de Loughborough, Inglaterra** (una estancia doctoral de 3 meses y una estancia posdoctoral de 3 meses), con el principal objetivo de usar sus **laboratorios de fabricación y medidas**.

Se han fabricado unos prototipos y se ha comprobado con medidas el correcto funcionamiento de las antenas diseñadas en la tesis. Para ello se ha usado una **guía de onda rellena de teflón** ( $\epsilon_r=2$ ), con unas dimensiones dadas para trabajar en la banda de **6GHz**. La guía está abierta en su parte superior, y se le pueden acoplar diferentes **placas paralelas** en los laterales y distintos circuitos impresos en su cara superior, tal y como muestra la Fig.23. Usando procesos de fabricación **fotolitográficos**, se diseñaron varias **máscaras** para fabricar **circuitos impresos** capaces de sintetizar **distintas respuestas eléctricas**.

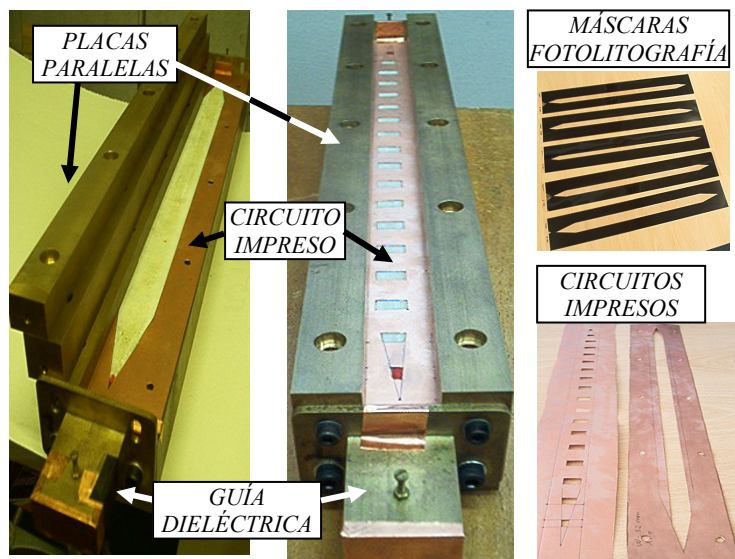


Fig.23- Fabricación de prototipos en Inglaterra

La Fig.24 muestra algunos resultados prácticos. Se trata de **los primeros resultados experimentales** obtenidos en antenas LWAs que demuestren la habilidad de variar el ángulo de apuntamiento con el circuito impreso (Fig.24-a), y la capacidad de mejorar el NLS al pasar de un diseño sin “taper” (Fig.24-b) a un diseño con “taper” (Fig.24-c). Además, se observa **muy buena comparación entre las medidas experimentales y las simulaciones** obtenidas con el **método de análisis de modo de fugas**. De esta manera queda validada la teoría de control del diagrama de radiación mediante el circuito impreso, así como la metodología de diseño presentada en esta tesis doctoral.

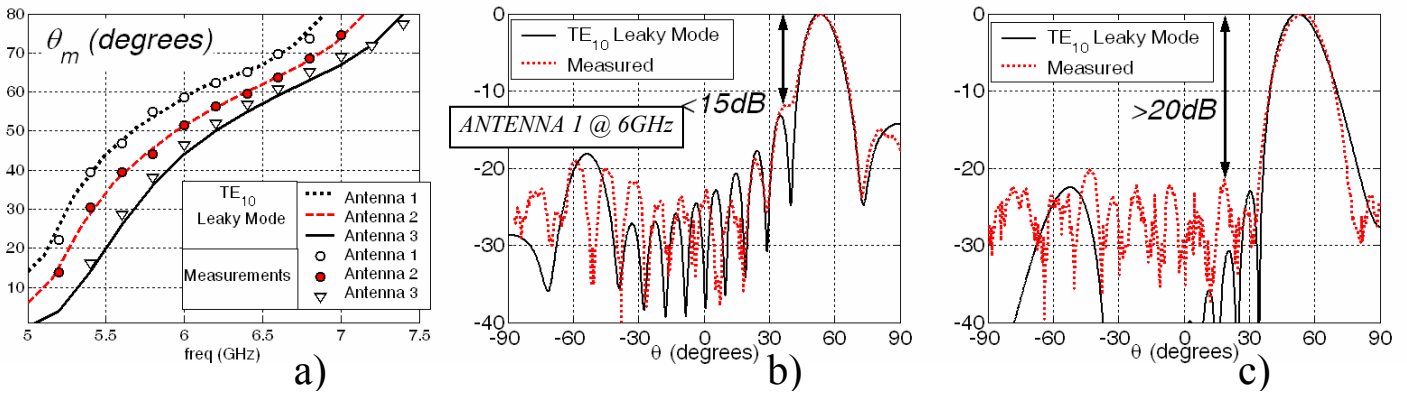


Fig.24- Comparación entre resultados experimentales y simulaciones de modo de fuga.

Actualmente se está **transfiriendo esta tecnología a la industria**, a la que se ha mostrado los resultados obtenidos (RYMSA, CASA, Centre for Mobile Communications Research –CMCR-). Este tipo de antenas se pueden aplicar en muchos escenarios (RADAR, comunicaciones por satélite, antenas inteligentes, sistemas de prevención de colisiones...), debido a la simplicidad con que se diseñan **antenas de alta directividad**, y la **facilidad** con que se puede controlar el diagrama de radiación mediante el correcto diseño del **circuito impreso**. Además, la **sencillez** de su estructura hace que estas antenas sean buenas candidatas para las **futuras aplicaciones en bandas milimétricas**, donde las tolerancias y los costes de fabricación son muy restrictivos, como se explica en las Refs.[7, 8, 9, 10].

Combinando varias antenas “leaky-wave” podemos sintetizar un “**array**” de antenas, capaz de barrar no sólo en el ángulo de elevación ( $\theta$ ) sino también en azimut ( $\phi$ ), tal y como muestra la Fig.25. La principal ventaja práctica de usar antenas LWA (Fig.25-a) en vez de radiadores simples (Fig.25-b), estriba en que el número de antenas a excitar es mucho menor, simplificando enormemente el circuito de alimentación.

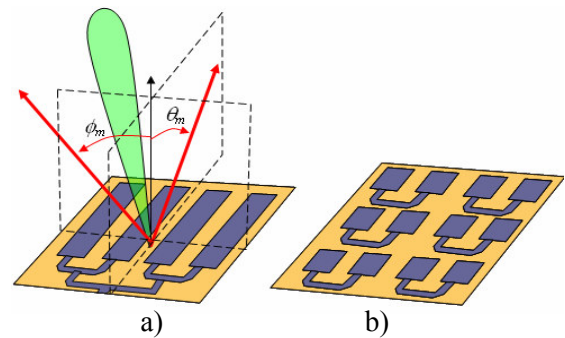


Fig.25- “Array” de antenas a) Leaky b) Parches

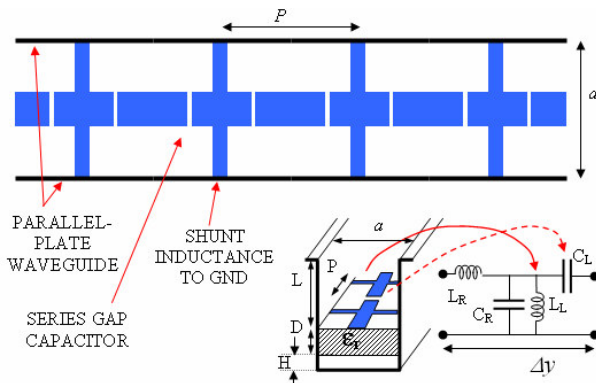


Fig.26- Línea de transmisión “left-handed” en tecnología híbrida

Por último, se resalta que la tecnología híbrida se quiere utilizar para concebir antenas LWA con propiedad de **metamaterial**. Para ello se está extendiendo el método de análisis a **líneas de transmisión periódicas más complicadas**, como la mostrada en la Fig.26 (que hace uso de “gaps” capacitivos en serie y líneas inductivas en paralelo, Ref.[11]). Así mismo, se están estudiando diferentes **circuitos basados en las antenas LWAs** estudiadas en esta tesis, como **acopladores direccionales** (Ref.[15]) y **filtros paso banda** con superficies selectoras en frecuencia.

Una vez comprobadas experimentalmente las propiedades de las antenas propuestas en esta tesis, se pueden aplicar en diversos escenarios donde es **importante poder controlar las propiedades eléctricas del haz radiado** (ancho de haz, forma del haz, dirección de propagación). Como se ha comentado, estas aplicaciones no se limitan sólo a **comunicaciones inalámbricas**, sino también a **circuitos de microondas y óptica** basados en la propagación de un modo de fuga (como los acopladores direccionales y los filtros paso banda mencionados).



## ANEXOS

## A.1- PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES

El trabajo desarrollado en esta tesis doctoral ha dado lugar a **13 publicaciones en revistas de alto impacto científico** (más 2 artículos en proceso de revisión). Nótese que el autor de esta tesis es **autor principal de todos los artículos** que a continuación se nombran. Se separan los artículos atendiendo a la parte de la tesis en la que fue desarrollado el trabajo que dio lugar a los mismos.

**Parte I: Método de Análisis de Ondas de Fuga en Tecnología Híbrida**

1. **J.L.Gómez** and A.A.Melcón, "Leaky and Surface Waves In Multilayered Laterally-Shielded Microstrip Transmission Lines", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 37, Nº 2, pp. 88-93, April 2003
2. **J.L.Gómez** and A.A. Melcón, "Non-Orthogonality Relations between Complex-Hybrid-Modes: an Application for the Leaky-Wave Analysis of Laterally-Shielded Top-Open Planar Transmission Lines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 52, No.3, pp. 760-767, March 2004.
3. **J.L.Gómez** and A.A.Melcón, "Radiation Analysis in the Space Domain of Laterally-Shielded Planar Transmission Lines. Part I: Theory", *Radio Science*, Vol.39, RS3005 pp.1-11, June 2004.
4. **J.L.Gómez** and A.A.Melcón, "Radiation Analysis in the Space Domain of Laterally-Shielded Planar Transmission Lines. Part II: Applications", *Radio Science*, Vol.39, RS3006 pp.1-10, June 2004.
5. **J.L.Gómez**, A.A.Melcón and F.Quesada, "A Full-Wave Space-Domain Method for the Analysis of Leaky-Wave modes in Multilayered Planar Open Parallel-Plate Waveguides", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol.15, No.1, pp.128-139, January 2005.

**Parte II: Diseño de Antenas "Leaky-Wave" Uniformes en Tecnología Híbrida**

6. **J.L.Gómez**, F.Quesada and A.A.Melcón, "Application of the High-Gain Substrate-Superstrate Configuration to Dielectric Leaky-Wave Antennas", *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, Vol.15, No.4, pp. 250-252, April 2005.
7. **J.L.Gómez**, A.de la Torre, D.Cañete, M.Gugliemi and A.A.Melcón, "Design of Tapered Leaky-Wave Antennas in Hybrid Waveguide-Planar Technology for Millimeter Waveband Applications", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.53, No.8, pp.2563-2577, August 2005.
8. **J.L.Gómez**, J.Pascual and A.A.Melcón, "A Novel Leaky-Wave Antenna Combining an Image NRD Guide and a Strip Circuit", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.*, Vol.4, pp.289-292, August 2005.

**Parte III: Análisis y Diseño de Antenas "Leaky-Wave" Periódicas**

9. **J.L.Gómez**, D.Cañete and A.A.Melcón, "Printed-Circuit Leaky-Wave Antenna with Pointing and Illumination Flexibility", *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, Vol.15, No.8, pp.536-538, August 2005.
10. **J.L.Gómez**, F.Quesada and A.A.Melcón, "Analysis and Design of Periodic Leaky-Wave Antennas for the Millimeter Waveband in Hybrid Waveguide-Planar Technology", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.53, No.9, pp. 2834-2842, September 2005.
11. **J.L.Gómez**, J.Pascual and A.A.Melcón, "Efficient Full-Wave Analysis Method of Leaky-Wave Modes in Periodically Loaded Dielectric Waveguides with Application to Backward-to-Forward Frequency-Scannable Antennas and Metamaterials", *Int. Journal of Numerical Modelling*, to be published March 2006.

**Parte IV: Desarrollo de Software CAD**

12. **J.L.Gómez**, J.Pascual and A.A.Melcón, "A Novel Full-Wave CAD for the Design of Tapered Leaky-Wave Antennas in Hybrid Waveguide Printed-Circuit Technology", *Int. Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, to be published, Vol.16, No.4, July 2006.
13. **J.L.Gómez**, D.Cañete, and A.A.Melcón, "P.A.M.E.L.A: A Useful Tool for the Study of Leaky-Wave Modes in Strip Loaded Open Dielectric Waveguides ", *IEEE Antennas and Propagat. Magazine*, to be published.
14. **J.L.Gómez** G.Goussetis, A.Feresidis, Y.Vardaxoglou, and A.A.Melcón, "Control of Leaky-Mode Propagation and Radiation Properties in Hybrid Waveguide-Planar Technology: Experimental Results", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, submitted.
15. **J.L.Gómez**, S.Martínez and A.A.Melcón, "Analysis and Design of Leaky-Wave Directional Couplers in Hybrid Dielectric-Waveguide Printed-Circuit Technology", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, submitted.

**A.2- PONENCIAS EN CONGRESOS INTERNACIONALES**

El trabajo desarrollado en esta tesis doctoral ha dado lugar a **10 ponencias en congresos internacionales**.

1. **J.L.Gómez** and A.A.Melcón, "Integral Equation Analysis of Multilayered Shielded Transmission Lines", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Digest*, p. 616, Cambridge, Massachusetts, July 1-5, 2002.
2. **J.L.Gómez** and A.A.Melcón, "Non-Orthogonality Relations Between Complex Hybrid Modes: An Application for the Leaky-Wave Analysis of a Laterally-Shielded Top-Open Suspended Microstrip Line", *2003 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 681-684, Philadelphia, Pennsylvania, June 8-13, 2003.
3. **J.L.Gómez** and A.A.Melcón, "Radiation Analysis in the Space Domain of Laterally-Shielded Planar Transmission Lines", *2003 IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, Vol. 1, pp. 753-756. Columbus, Ohio, June 22-27, 2003.
4. **J.L.Gómez**, A.A.Melcón and F.D. Quesada, "A Fast and Accurate Method for Analysis and Design of Laterally-Shielded Multilayered Planar Leaky-Wave Antennas", *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Digest*, pp.603-606, Pisa, Italy, 28-31 March 2004.
5. **J.L.Gómez**, A.de la Torre and A.A.Melcón, "Analysis and Design of Printed-Circuit Laterally-Shielded Leaky-Wave Antennas with High-Gain Substrate-Superstrate Configuration", *2004 IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, Vol 1, pp. 3221-3224, Monterey, California, June 20-26, 2004.
6. **J.L.Gómez**, A.A.Melcón and F.Quesada, "A Fast and Accurate Method for Analysis and Design of Periodic Leaky-Wave Antennas", *27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antennas Digest*, pp. 555-562, Santiago de Compostela, Spain, 9-11 March 2004.
7. **J.L.Gómez**, M.Padilla and A.A.Melcón, "Design of Backfire to Endfire Periodic Leaky-Wave Antennas for Millimeter-Wave Band Applications", *27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antennas Digest*, pp. 47-54, Santiago de Compostela, Spain, 9-11 March 2004.
8. **J.L.Gómez**, M.Padilla, G.Goussetis, A.Feresidis and J.Vardaxoglou, "A New Tapering Procedure for the Dielectric-Inset Periodic Leaky-Wave Antenna", *2005 IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, Washington D.C., Washington, July 3-8, 2005.
9. **J.L.Gómez**, G.Goussetis, A.Feresidis, Y.Vardaxoglou, and A.A.Melcón, "Experimental Results of Tapered Leaky-Wave Antennas in Hybrid Dielectric-Waveguide Printed-Circuit

Technology”, *Loughborough Antennas and Propagation Conference*, Loughborough, U.K., April 11-12, 2006.

10. **J.L.Gómez**, S.Martínez, D.Cañete, J.Pascual, and A.A.Melcón, "A New Leaky-Wave Directional Coupler in Hybrid Dielectric-Waveguide Printed-Circuit Technology", *2006 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, San Francisco, California, June 11-16, 2006.

### A.3- COLABORACIONES

Parte del trabajo de esta tesis ha sido realizado en colaboración con la **Agencia Espacial Europea** (ESA/ESTEC, **Dr. Marco Guglielmi**) y con la **Universidad de Loughborough**, Inglaterra (**Prof. Yiannis Vardaxoglou**). Así mismo, durante el desarrollo de la tesis se ha participado en varios **proyectos nacionales** (proyectos CICYT TIC2000-0591-C03-03, ESP2001-4546-PE y TEC2004-04313-C02-02/TCM), y **proyectos regionales** (proyectos Séneca 2002 PB/4/FS/02, y proyectos PMPDI-UPCT-2004, PMPDI-UPCT-2005).

### A.4- OTROS MÉRITOS DEL AUTOR

El proyecto de esta tesis doctoral fue galardonado en junio del 2004 por la fundación EPSON-Ibérica con el **segundo premio al mejor proyecto de tesis nacional** en el ámbito de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (VI Edición de los **Premios Rosina Ribalta**, curso 2003-2004). A este certamen se presentaron 32 candidatos de diferentes universidades de España y Portugal.

Además, el autor de esta tesis quiere hacer notar que el trabajo de la misma ha sido desarrollado en paralelo con sus **deberes docentes** como **profesor ayudante** en la E.T.S.I. Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Cartagena. Al ser una Escuela de reciente implantación (comenzó en el año 1999), la labor del profesorado es elevada al tener que preparar el material de nuevas asignaturas. El autor de esta tesis imparte clases de teoría desde septiembre del año 2001 en las asignaturas de **Sistemas y Circuitos, Campos Electromagnéticos y Transmisión por Soporte Físico**, de 1<sup>er</sup>, 2<sup>o</sup> y 4<sup>o</sup> curso de Ingeniería Superior de Telecomunicación. Durante los cuatro cursos que ha impartido docencia (a la vez que realizaba su tesis doctoral), el autor de esta tesis ha obtenido en las encuestas a los alumnos la calificación de Sobresaliente como profesor, recibiendo la **mención a la excelencia docente** por parte del rector de la UPCT. Así mismo, el autor de esta tesis ocupa desde octubre de 2005 el cargo de **Subdirector de Alumnos y Ordenación Académica** de la ETSIT de la UPCT.

El autor ha realizado, durante los meses de verano en los que no hay clases, **6 meses de estancia de investigación en la Universidad de Loughborough, Inglaterra**, en uno de los grupos más fuertes a nivel mundial en el tema de antenas, EBGs, FSS y metamateriales (*Wireless Communications Research group, WiCR*, Prof. J.Vardaxoglou). Así mismo, el grupo de investigación al que pertenece el autor de esta tesis (GEAT, Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones), es un grupo pequeño y joven (fue creado en el año 2002, y consta de 6 investigadores). En este ambiente de comienzos, el trabajo es copioso y a veces se hace complicado compatibilizar todas las tareas. Es por ello que el autor considera un mérito desarrollar, en estas condiciones un tanto especiales, una tesis doctoral con **proyección internacional**, como lo demuestra el elevado número de publicaciones en revistas y congresos internacionales.

El autor quiere expresar su gratitud al apoyo prestado por las diferentes instituciones que han subvencionado el trabajo realizado en esta tesis: el **Ministerio de Educación y Ciencia** a través de los proyectos CICYT (TIC2000-0591-C03-03, ESP2001-4546-PE y TEC2004-04313-C02-02/TCM), la **Fundación Séneca** (proyectos 2002 PB/4/FS/02), la **Universidad Politécnica de Cartagena** (programas de movilidad de profesorado PMPDI-UPCT-2004 y PMPDI-UPCT-2005) y la **fundación EPSON-Ibérica**.