

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE  
TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN:  
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

DISEÑO DE UNA ANTENA COMPACTA  
IMPLANTABLE EN BANDAS ISM Y MICS

AUTOR: RUBÉN DE SALAS CORREGIDOR  
TUTOR: ÓSCAR QUEVEDO TERUEL

LEGANÉS, SEPTIEMBRE DE 2010



*A todos aquellos que piensan que la recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado.*

*A mis padres, familiares y amigos.*



# Agradecimientos

---

Me gustaría agradecer a las siguientes personas su colaboración en este proyecto y el apoyo a lo largo de la carrera:

A mis padres Jesús y Celia, por su continuo apoyo y ayuda en los momentos más difíciles y por sus alegrías en los más felices.

A mi hermana Belén, por estar siempre a mi lado y ser mi confidente y el espejo donde mirarme.

A mis abuelos, en especial a mi abuelo Neo, porque nos dejó confiando en que su nieto sería ingeniero y por dejarme la fuerza para serlo.

A mis tíos y primos por estar siempre pendientes y preocupados de mi evolución.

A mis amigos de la universidad, Torres, Agus, Alfonso, Serrano, Miguel, Fer, Torreño, Javi, Carlitos, Talavera, Cris, Irene y todos los que me dejo en el tintero, por todas las horas compartidas en la biblioteca, por conseguir sacarme una risa en los momentos malos y por compartir conmigo los momentos buenos. Siempre nos encontraremos en el Central.

A mis amigos Gurriatos, por su paciencia en las épocas de vacaciones y ayudarme a desconectar en los momentos difíciles.

Y finalmente a Oscar Quevedo Teruel, mi tutor, por su paciencia, su inestimable ayuda, su comprensión y su sinceridad. Este proyecto no hubiera sido posible sin él.



# Contenido

Introducción .....	9
Capítulo 1. Estado del arte.....	13
1.1. Conceptos teóricos de antenas microstrip .....	13
1.1.1. Ventajas antenas microstrip .....	15
1.1.2. Desventajas de antenas microstrip .....	16
1.1.3. Aplicaciones de antenas microstrip .....	16
1.2. Visión actual de antenas implantables en el cuerpo humano .....	17
1.2.1. Motivación .....	17
1.2.2. Situación actual y ejemplos propuestos en literatura .....	18
1.3. Propiedades dieléctricas de tejidos biológicos .....	21
Capítulo 2. Antenas PIFA.....	27
2.1. Conceptos teóricos.....	27
2.2. Presentación del modelo básico .....	28
2.2.1. Estudio del funcionamiento del modelo básico .....	29
2.2.2. Campo eléctrico a la frecuencia de propagación y diagrama de radiación en 3D del modelo básico .....	34
2.3. Conclusiones.....	35
Capítulo 3. Diseño y desarrollo de una antena implantable.....	37
3.1. Análisis del modelo básico cargado con semianillo metálico .....	37
3.1.1. Estudio paramétrico de una antena PIFA cargada con semianillo metálico.....	39
3.1.2. Campo eléctrico a la frecuencia de propagación y diagrama de radiación en 3D....	43
3.1.3. Conclusiones .....	45
3.2. Diseño y desarrollo del modelo básico cargado con semianillo metálico para las especificaciones propuestas .....	47
3.2.1. Introducción de un condensador centrado.....	49
3.2.2. Introducción de dos condensadores reflejados .....	55
3.2.3. Introducción de dos condensadores reflejados en huecos del semicírculo. ....	59
3.3. Resumen del proceso y presentación del diseño final.....	63
Capítulo 4. Modelos del cuerpo humano, fabricación y medidas.....	67
4.1. Modelos de simulación del cuerpo humano.....	67
4.1.1. Modelo de una capa.....	68

4.1.2. Modelo de tres capas .....	70
4.2. Fabricación y resultados obtenidos .....	71
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras de trabajo. ....	75
5.1. Conclusiones.....	75
5.2. Futuros trabajos .....	77
Bibliografía .....	79
Anexo. ....	83

# Introducción

---

Durante las últimas décadas la necesidad por parte de los usuarios de dispositivos de telecomunicaciones compactos y capaces de integrar diversas funcionalidades ha motivado el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías por parte de la comunidad científica. Los resultados obtenidos por parte de los científicos han abierto nuevos nichos de aplicaciones como pueden ser en el campo de la biomedicina. Las antenas implantables para aplicaciones médicas han comenzado utilizarse en tratamientos médicos de hipertermia, para elevar la temperatura de tejidos cancerígenos, o para la monitorización de diversos parámetros fisiológicos, como pueden ser los niveles de glucosa. En los últimos años este tipo de antenas también han sido desarrolladas para dotar de más funcionalidades a diversos implantes médicos, como marcapasos o implantes cocleares.

De esta forma, la motivación principal de este proyecto fue la de desarrollar un dispositivo radiante muy compacto que fuera capaz de trabajar en las bandas de operación MICS (Medical Implant Communications Service, 402-405MHz) e ISM (Industrial, Scientific and Medical, 2.4-2.48GHz). Para este desarrollo se pensó en antenas en tecnología microstrip, más concretamente en antenas de parche, debido a que este tipo de antenas cobra cada día un mayor protagonismo en diversos sistemas de telecomunicaciones dada su versatilidad, su bajo coste y su alta eficiencia (al menos en su modo fundamental de operación). El proceso de diseño ha partido de la antena propuesta en [15], modificando las frecuencias de operación e introduciendo variaciones novedosas (como es la inclusión de capacidades concentradas) para conseguir las dos bandas propuestas con una adecuada adaptación.

El proyecto queda distribuido en 5 capítulos y un anexo con las especificaciones de los fabricantes de los sustratos y las capacidades de radiofrecuencia. En el Capítulo 1 se presentan los conceptos básicos de antenas de parche y el estado del arte en el modelado de las características dieléctricas de diversos tejidos biológicos a distintas frecuencias de funcionamiento. Posteriormente, en el Capítulo 2 se explican las características de las antenas PIFA (Planar Inverted F Antenna) mostrándose la influencia que tienen los diversos parámetros de la misma sobre el modo fundamental de radiación<sup>1</sup>. Seguidamente, en el Capítulo 3 se presenta el diseño de una antena de parche multifrecuencial mediante el uso de una estructura cargada (tal y como fue definida en cargada propuesta en [15]). Del mismo modo, se ha demostrado como al añadir un semianillo metálico sobre un antena PIFA circular se puede conseguir un modo réplica junto al modo fundamental. También aquí se ha estudiado la influencia de los parámetros de la antena sobre las frecuencias de excitación de ambos modos. A continuación, se realizaron diferentes modificaciones del diseño básico como la inclusión de nuevos elementos en la antena previa (condensadores en serie centrados o reflejados con respecto al centro de la antena), con la intención de conseguir los objetivos marcados en este proyecto (doble banda de operación a las frecuencias de MICS e ISM). Se ha demostrado que el uso de capacidades concentradas permite la disminución de la frecuencia de trabajo pudiéndose alcanzar la banda MICS con un tamaño aceptable. También se ha estudiado el efecto de modificar la forma del parche semicircular mediante unos huecos donde poder introducir los condensadores y de esa manera permitir una adaptación adecuada de las dos bandas. Una vez conseguida una antena adecuada, en el Capítulo 4 se ha procedido a validar los resultados obtenidos en la simulación con medidas de un prototipo fabricado en el laboratorio del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Carlos III de Madrid. Finalmente, en este capítulo, se ha realizado un estudio en simulación del comportamiento de la antena para dos modelos simulados del cuerpo humano existentes en la literatura (una y tres capas). Por último, en el Capítulo 5 se detallan las conclusiones obtenidas tras realizar todos los estudios del presente proyecto, y se han especificado las futuras líneas de trabajo abiertas por el mismo.

---

<sup>1</sup> Todas las simulaciones de este proyecto han sido realizadas con el software comercial CST Microwave Studio<sup>®</sup>.





# Capítulo 1.

## Estado del arte

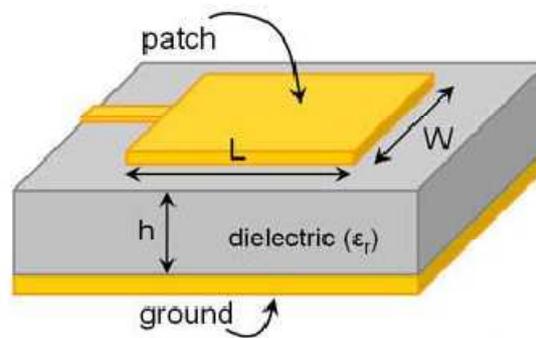
---

Este primer capítulo se compone de un resumen con los principios teóricos de algunos de los conceptos que se van a manejar en este documento. Se comenzará explicando la teoría de antenas microstrip debido a que la antena que se desarrollará se puede clasificar como tal. A continuación, se repasará la situación actual de antenas implantables así como una visión histórica del trabajo hasta ahora desarrollado en este ámbito. Por último, estudiaremos las propiedades dieléctricas de materiales biológicos que nos darán una idea de la motivación del desarrollo de este tipo de antenas y su posterior avance.

### *1.1. Conceptos teóricos de antenas microstrip*

Las primeras antenas microstrip, también conocidas como antenas de parche, comenzaron a desarrollarse a principios de los años 50 de manera más teórica que práctica [1]. No fue hasta los años 70 cuando se comenzó la construcción de las primeras antenas microstrip [2], y hasta mediados de los 90 cuando se empezó a usar en diferentes campos de manera más amplia. Desde entonces los trabajos de desarrollo e investigación han propiciado una amplia mejora en sus prestaciones y en la actualidad podemos encontrarlas en estaciones de telefonía, teléfonos móviles, sistemas de radar e incluso comunicaciones satélite, sin olvidar su utilidad y aplicación en biomedicina.

Todas las antenas microstrip están formadas básicamente por tres partes [3]: plano de masa, sustrato y parte radiante o parche, como puede verse en la figura 1.



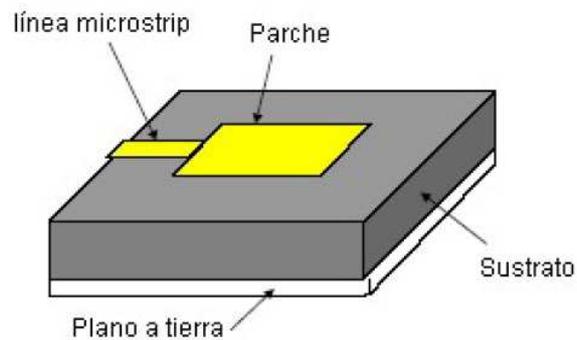
**Figura 1:** Configuración básica de una antena de parche en geometría rectangular.

El sustrato se encuentra entre el parche y el plano de masa y se trata de una lámina de material dieléctrico cuya constante dieléctrica suele variar entre 1 y 11. La elección del tipo de dieléctrico depende de varios factores pero por lo general hay que restablecer un compromiso dependiendo de las especificaciones de la antena. Aumentado el espesor de la lámina y disminuyendo la constante dieléctrica se obtienen resultados con una mejor eficiencia y mayor ancho banda. Sin embargo, al disminuir la constante dieléctrica la antena tendrá un tamaño más grande para una frecuencia de trabajo fijada que si utilizáramos una constante dieléctrica mayor. Si por el contrario el espesor es pequeño y la constante dieléctrica elevada se obtendrán mayores acoplos (entre antenas si estas componen un array), pero se sacrifica ancho de banda y la antena presenta mayores pérdidas óhmicas.

El parche es una metalización cuyo espesor debe ser despreciable en relación a la longitud de onda, soliendo ser establecido entre  $0.04 \lambda_0$  y  $0.05 \lambda_0$ . Existen diferentes geometrías de parche y la frecuencia de radiación fundamental de la antena (modos  $TM_{10}$  o  $TM_{01}$ ) dependerá de sus dimensiones. El plano de masa es simplemente una capa de metal que se encuentra en la parte inferior de la capa de sustrato y que consigue crear una condición de plano conductor perfecto. La alimentación de este tipo de antenas se puede realizar de diversas maneras, pero las más utilizadas son mediante línea de transmisión impresa, con cable coaxial, por ranura y por acoplo.

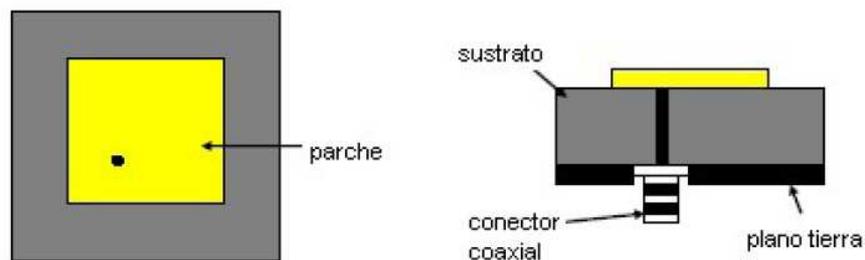
La línea de transmisión impresa es la más sencilla ya que ambos elementos están contruidos sobre el sustrato aunque su principal desventaja es que presenta una impedancia

de borde de parche muy alta y modifica el diagrama de radiación ya que la alimentación va directamente conectada al borde del parche [4]. El esquema puede observarse en la figura 2.



**Figura 2:** Antena microstrip alimentada por línea de transmisión.

La alimentación por cable coaxial conecta los parches directamente mediante el conductor central del cable coaxial atravesando el material dieléctrico, como puede verse en la figura 3. La posición del conector influirá directamente en la polarización y adaptación de la antena como se verá más adelante ya que este tipo de alimentación es el que ha sido usado en la realización de este proyecto. Además las antenas alimentadas por cable coaxial presentan una buena pureza de diagrama de radiación de cada modo.



**Figura 3:** Antena microstrip alimentada por cable coaxial.

### *1.1.1. Ventajas antenas microstrip*

Las antenas microstrip presentan multitud de ventajas, de las cuales las más destacadas son [5][6]:

- **Tamaño:** El tamaño físico de una antena microstrip resulta mucho más reducido si es comparado con otras antenas. Esta característica es una de las razones por las que se ha elegido una antena microstrip para el desarrollo del presente proyecto.
- **Eficiencia:** La radiación de las antenas microstrip en su modo fundamental presenta una eficiencia elevada, aunque esta eficiencia se verá influida por el procedimiento elegido para alimentar dicha antena.
- **Construcción:** La construcción de antenas microstrip es relativamente sencilla debido a que sus estructuras son planas.
- **Coste:** Gracias a técnicas estándar sobre circuitos impresos una antena microstrip puede ser construida con un coste bajo.

### *1.1.2. Desventajas de antenas microstrip*

Las antenas microstrip presentan una serie de desventajas a pesar de las ventajas anteriormente enumeradas, de las cuales las principales son [5][6][7]:

- **Reducido ancho de banda:** El ancho de banda de una antena microstrip es reducido, lo cual descarta su uso para ciertas aplicaciones.
- **Excitación de ondas de superficie:** Las antenas microstrip presentan una excitación de las ondas de superficie debido al sustrato dieléctrico. Este hecho puede provocar un efecto de difracción en el plano de masa que conllevaría a aparición de radiación indeseada, o el aumento de acoplo mutuo cuando las antenas pertenecen a un array.

### *1.1.3. Aplicaciones de antenas microstrip*

Debido a las múltiples ventajas y características de las antenas microstrip su uso está cada vez más extendido, siendo las aplicaciones más usadas las enumeradas a continuación [5][6][7]:

- **Servicios de biomedicina:** Gracias a su tamaño y a la facilidad de integración con otros componentes el uso de antenas microstrip en este tipo de servicios cada vez está más

valorado. El hecho de que estas aplicaciones no requieren de un ancho de banda amplio convierte a estas antenas en la elección perfecta frente a otros tipos.

- Estaciones base en comunicaciones móviles: En la actualidad es una de las aplicaciones más importantes de las antenas microstrip. Su uso ha ido creciendo desde los años 90 y actualmente hay multitud de antenas de parche diseñadas por distintos fabricantes.
- Comunicaciones vía satélite: Las antenas microstrip fueron capaces de satisfacer los requerimientos para este tipo de aplicaciones a partir de mediados de los años 90.
- Radar: Los sistemas radar también han ido incorporando antenas microstrip debido a su reducido tamaño y el bajo coste de producción de estas.
- Terminales móviles: La mayoría de los terminales móviles tienen como elemento radiante una antena microstrip.

## *1.2. Visión actual de antenas implantables en el cuerpo humano*

A lo largo de esta sección se planteará tanto los aspectos característicos relacionados con dispositivos implantables así como la situación actual de los mismos, haciendo hincapié en los diferentes autores y sus contribuciones.

### *1.2.1. Motivación*

El diseño de dispositivos capaces de interactuar con el cuerpo humano ha sido en las últimas décadas un desafío en el que no sólo ha estado pendiente la comunidad científica, sino prácticamente todos los sectores de la sociedad, debido a las expectativas que se han generado, y la posibilidad de mejorar y solucionar buena parte de los tratamientos médicos que en la actualidad tienen una difícil o complicada solución [8], basándose en el sensado de diferentes parámetros biológicos, como por ejemplo los niveles de glucosa (uno de los primeros que comenzó a investigarse).

En los últimos años, los dispositivos implantables están siendo aplicados en servicios de telemetría y aplicaciones como ojos artificiales, implantes cocleares, marcapasos cardíacos o grabadores de señales nerviosas, y los esfuerzos se están dirigiendo en conseguir la estandarización entre estos dispositivos médicos [8]. Como resultado de esta estandarización se ha conseguido que estos dispositivos se integren en sistemas de comunicaciones que permiten la monitorización y control a distancia de manera inalámbrica. Estos sistemas utilizan un enlace bidireccional entre el implante y un dispositivo de monitorización a través de la banda de comunicaciones MICS (Medical Implant Communications Service, 402-405MHz) y más actualmente de la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical, 2.4-2.48GHz) [9]. Dependiendo de las especificaciones y prestaciones que quieran obtenerse se pueden implementar una o ambas frecuencias, aunque como puede observarse, estas bandas son muy estrechas y muy distancias entre sí en el espectro.

Respecto a la antena que se desarrolla en este proyecto, se ha decidido que trabaje a las dos frecuencias anteriormente indicadas, y debe presentar una serie de características que en otro tipo de antenas para aplicaciones más comúnmente conocidos (como puede ser la telefonía móvil) no son tan esenciales, como su tamaño, su bajo consumo y la compatibilidad con los tejidos de los que van a rodearse.

### *1.2.2. Situación actual y ejemplos propuestos en literatura*

Como se ha comentado anteriormente, existen una serie de especificaciones que deben cumplirse durante el proceso de diseño de las antenas y que vendrán determinadas en cada uno de los casos. A continuación se presentan dos casos como ejemplo que pueden encontrarse en la literatura, cada uno de ellos propone una solución diferente al problema de construir una antena implantable.

En el primero de ellos [10] se propone una antena implantable para comunicación que sólo soporta la banda MICS, mediante la comparación de dos formas básicas, una espiral y una serpiente o serpentina, en ambos casos estando las geometrías conectadas a masa. Se puede ver en la figura 4 la estructura de ambas antenas y en la figura 5 los diagramas de adaptación para diferentes simulaciones.

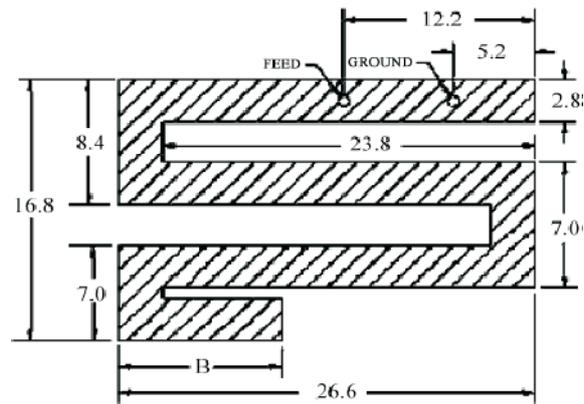
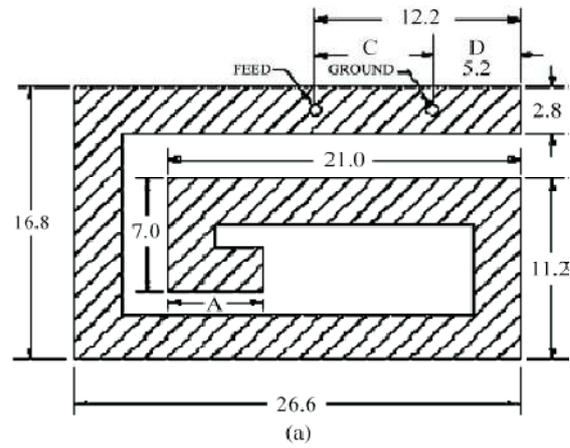


Figura 4: Esquema de antenas propuesto en [10].

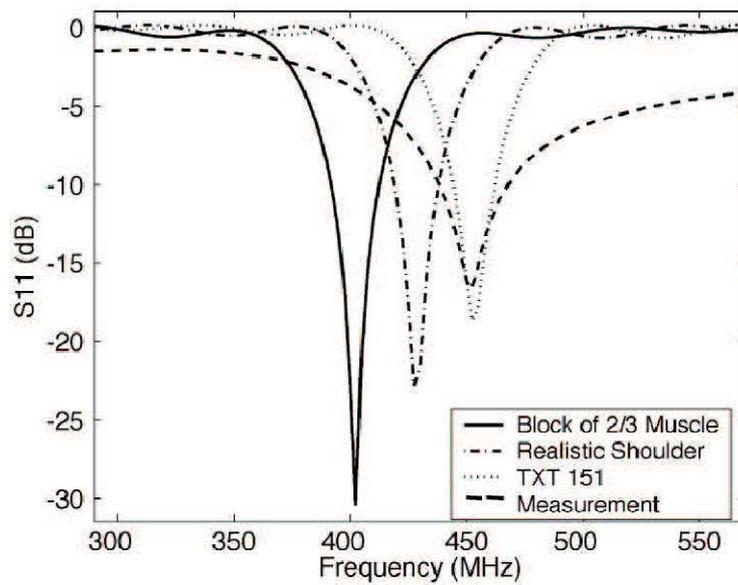
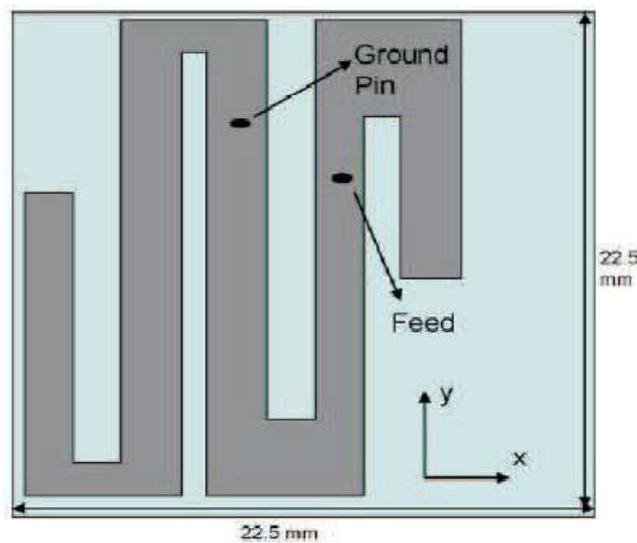


Figura 5: Diagrama de adaptación de la antena propuesta en [10].

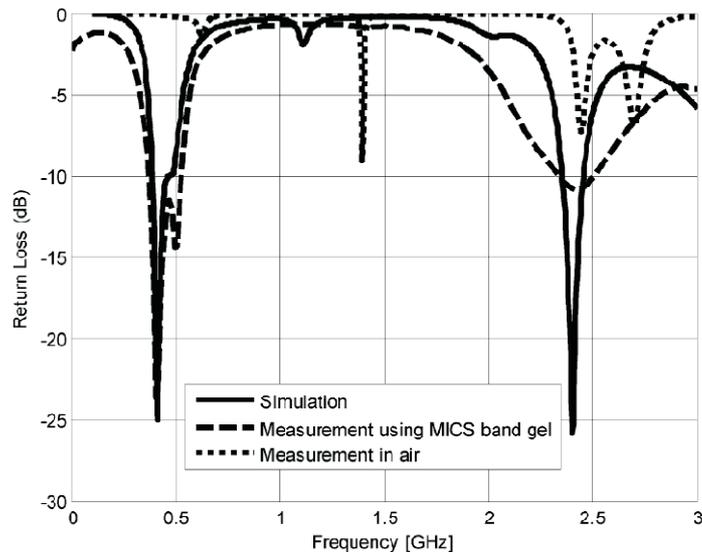
Lo normal en este tipo de simulaciones y desarrollos es usar un tipo de superestrato para poder realiza los implantes y que la metalización de la antena no esté en contacto con el cuerpo humano. Como puede observarse la antena obtiene una buena adaptación para la banda MICS y dependiendo del modelo humano empleado para la simulación se obtiene un desplazamiento a frecuencias superiores.

Otro ejemplo de este tipo de antenas puede ser el mostrado en [11], en el que se propone una antena que trabaja simultáneamente en las bandas MICS e ISM, y que como novedad aporta al estudio la utilización de geles que imitan las propiedades electromagnéticas de la piel humana por lo que las medidas serán más realistas si se comparan con las realizadas en espacio libre. Como puede observarse en la figura 6 la estructura de la antena es muy similar a las anteriormente propuestas (con una forma en serpentina, teniendo una conexión a masa).

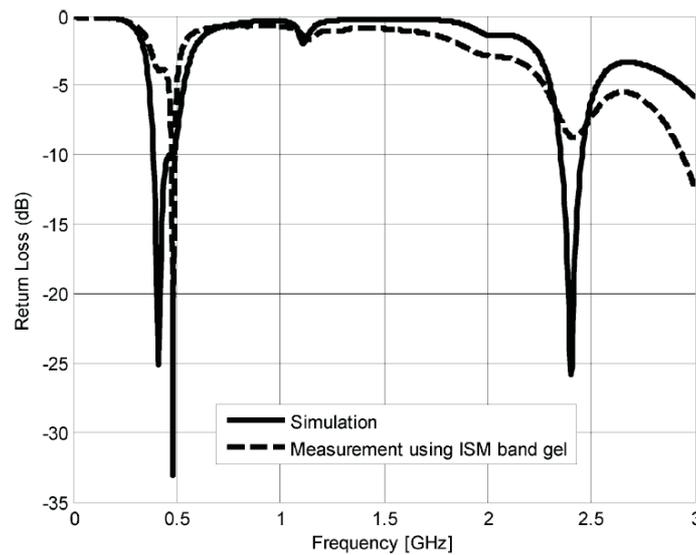


**Figura 6:** Esquema de antena propuesto en [11].

Los resultados obtenidos con los geles los podemos encontrar en las figuras 7 y 8.



**Figura 7:** Diagrama de adaptación de la antena propuesta en [11] banda MICS.



**Figura 8:** Diagrama de adaptación de la antena propuesta en [11] banda ISM.

### *1.3. Propiedades dieléctricas de tejidos biológicos*

Las propiedades dieléctricas de tejidos han sido caracterizadas experimentalmente en el rango de frecuencias de 10Hz hasta 20 GHz [19]. Las principales características de espectro dieléctrico de los tejidos han sido revisados desde finales de los 80 por diversos estudios, de entre ellos destaca Foster and Schwan [12]. El espectro dieléctrico de un tejido es normalmente dividido en tres regiones para bajas, medias y altas frecuencias. En su forma

simple, cada una de estas regiones representa la manifestación de un mecanismo de polarización caracterizado por una constante temporal  $\tau$  que da una primera expresión de la permitividad relativa  $\varepsilon$  en función de la frecuencia  $\omega$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.1)$$

Esta es la expresión conocida como Debye donde  $\varepsilon_\infty$  es la permitividad para  $\omega\tau \gg 1$  y  $\varepsilon_s$  la permitividad para  $\omega\tau \ll 1$ . La magnitud de la dispersión está descrita como  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$

Hurt en [13] modeló el espectro dieléctrico del músculo como la suma de cinco dispersiones Debye añadiendo el término de la conductividad  $\sigma$  y donde  $\varepsilon_0$  es la permitividad en el vacío:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{n=1}^5 \frac{\Delta\varepsilon_n}{1 + j\omega\tau_n} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

Como último paso se añadió a esta ecuación el parámetro  $\alpha$  que representa las múltiples contribuciones a cada región de dispersión debidas a la estructura y composición de los materiales biológicos. De esta manera el espectro de un tejido será descrito de una manera más aproximada en la siguiente ecuación, conocida como dispersión múltiple de Cole-Cole:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_n \frac{\Delta\varepsilon_n}{1 + (j\omega\tau_n)^{(1-\alpha_n)}} + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0} \quad (2.3)$$

Con esta ecuación y una elección de parámetros apropiados para cada tejido se puede predecir el comportamiento dieléctrico en el rango de frecuencias deseado.

En el caso de este proyecto, los parámetros utilizados para ver el comportamiento dieléctrico de ciertos tejidos del cuerpo humano, como piel, grasa o músculo, se obtuvo de [14] y la tabla 1, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 8, 9, 10 y 11 para piel, piel mojada, músculo y grasa en el rango de 300 MHz a 3 GHz. La curva color rojo corresponde a la aproximación correspondiente a la ecuación de Cole-Cole, mientras que la azul es la propuesta por Hurt. De esta manera puede verse la contribución de cada dispersión al modelo final.

Tissue type	$\epsilon_{\infty}$	$\Delta\epsilon_1$	$\tau_1$ (ps)	$\sigma_1$	$\Delta\epsilon_2$	$\tau_2$ (ns)	$\sigma_2$	$\Delta\epsilon_3$	$\tau_3$ ( $\mu$ s)	$\sigma_3$	$\Delta\epsilon_4$	$\tau_4$ (ms)	$\sigma_4$	$\sigma$
Blood	4.0	56.0	8.38	0.10	5200	132.63	0.10	0.0			0.0			0.7000
Bone (cancellous)	2.5	18.0	14.26	0.22	300	79.58	0.25	$2.0 \times 10^4$	159.15	0.20	$2.0 \times 10^7$	15.915	0.00	0.0700
Bone (cortical)	2.5	10.0	13.26	0.20	180	79.58	0.20	$5.0 \times 10^4$	159.15	0.20	$1.0 \times 10^6$	15.915	0.00	0.0200
Brain (gray matter)	4.0	45.0	7.96	0.10	400	15.92	0.15	$2.0 \times 10^5$	106.10	0.22	$4.5 \times 10^7$	5.305	0.00	0.0200
Brain (white matter)	4.0	32.0	7.96	0.10	100	7.96	0.10	$4.0 \times 10^4$	53.05	0.30	$3.5 \times 10^7$	7.958	0.02	0.0200
Fat (infiltrated)	2.5	9.0	7.96	0.20	35	15.92	0.10	$3.3 \times 10^4$	159.15	0.05	$1.0 \times 10^7$	15.915	0.01	0.0350
Fat (not infiltrated)	2.5	3.0	7.96	0.20	15	15.92	0.10	$5.5 \times 10^4$	159.15	0.05	$1.0 \times 10^7$	7.958	0.01	0.0100
Heart	4.0	50.0	7.96	0.10	1200	159.15	0.05	$4.5 \times 10^5$	72.34	0.22	$2.5 \times 10^7$	4.547	0.00	0.0500
Kidney	4.0	47.0	7.96	0.10	3500	108.04	0.22	$2.5 \times 10^5$	79.58	0.22	$3.0 \times 10^7$	4.547	0.00	0.0500
Lens cortex	4.0	42.0	7.96	0.10	1500	79.58	0.10	$2.0 \times 10^5$	159.15	0.10	$4.0 \times 10^7$	15.915	0.00	0.3000
Liver	4.0	39.0	8.84	0.10	6000	530.52	0.20	$5.0 \times 10^4$	22.74	0.20	$3.0 \times 10^7$	15.915	0.05	0.0200
Lung (inflated)	2.5	18.0	7.96	0.10	300	65.00	0.10	$2.5 \times 10^5$	159.15	0.20	$4.0 \times 10^7$	7.958	0.00	0.0300
Muscle	4.0	50.0	7.23	0.10	7000	353.60	0.10	$1.2 \times 10^6$	218.31	0.10	$2.5 \times 10^7$	2.274	0.00	0.2000
Skin (dry)	4.0	37.0	7.23	0.00	1100	33.48	0.20	0.0			0.0			0.0007
Skin (wet)	4.0	39.0	7.96	0.10	280	79.58	0.00	$3.0 \times 10^4$	1.59	0.16	$3.0 \times 10^4$	1.592	0.20	0.0004
Spleen	4.0	48.0	7.96	0.10	2500	63.66	0.15	$2.0 \times 10^5$	265.26	0.25	$5.0 \times 10^7$	6.366	0.00	0.0300
Tendon	4.0	42.0	12.24	0.10	60	6.37	0.10	$6.0 \times 10^4$	318.31	0.22	$2.0 \times 10^7$	1.526	0.00	0.2500

Tabla 1: Parámetros de la ecuación (2.3) usados para predecir las propiedades dieléctricas.

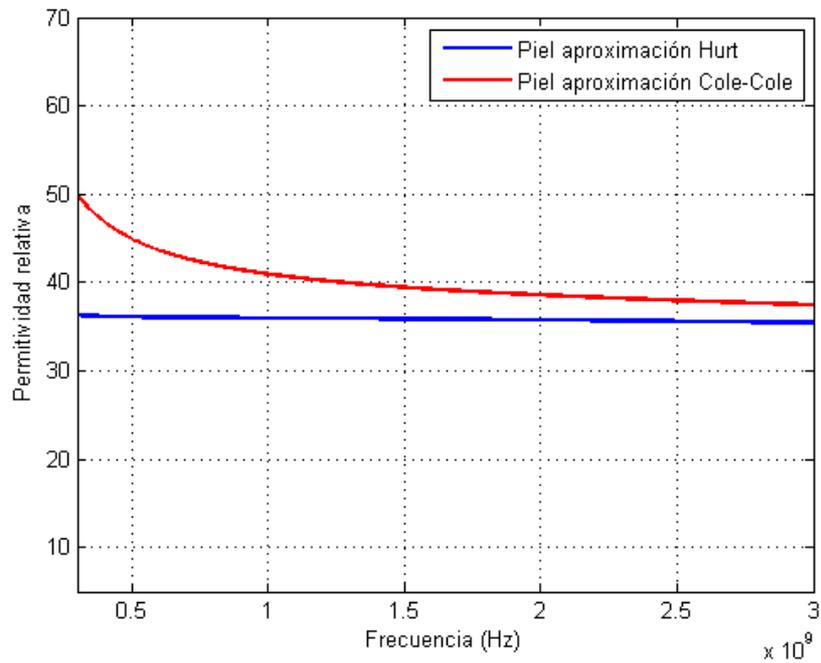
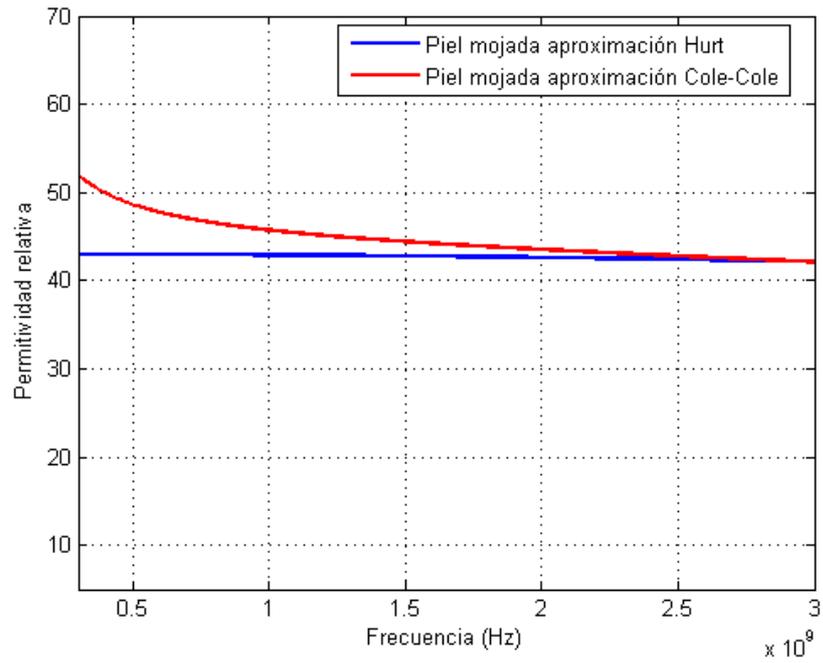
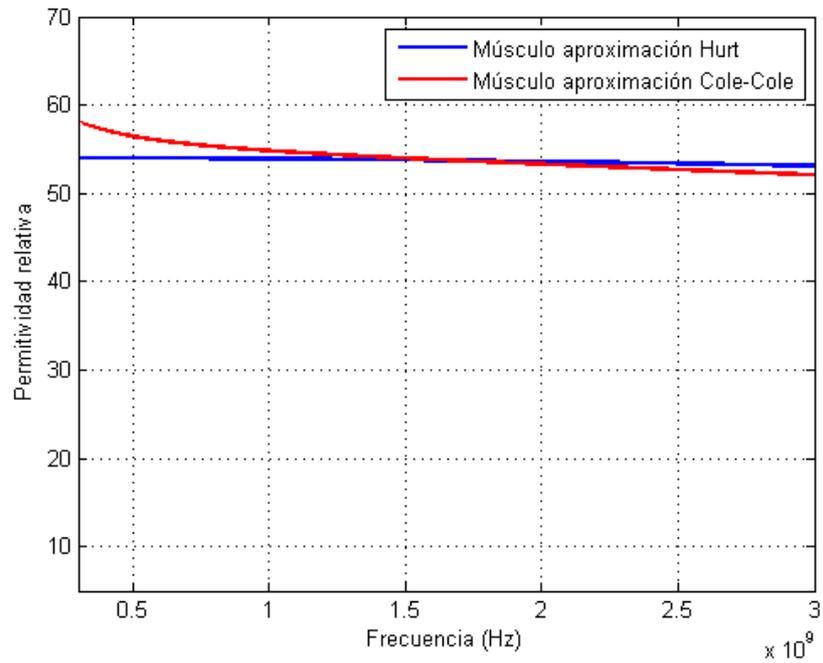


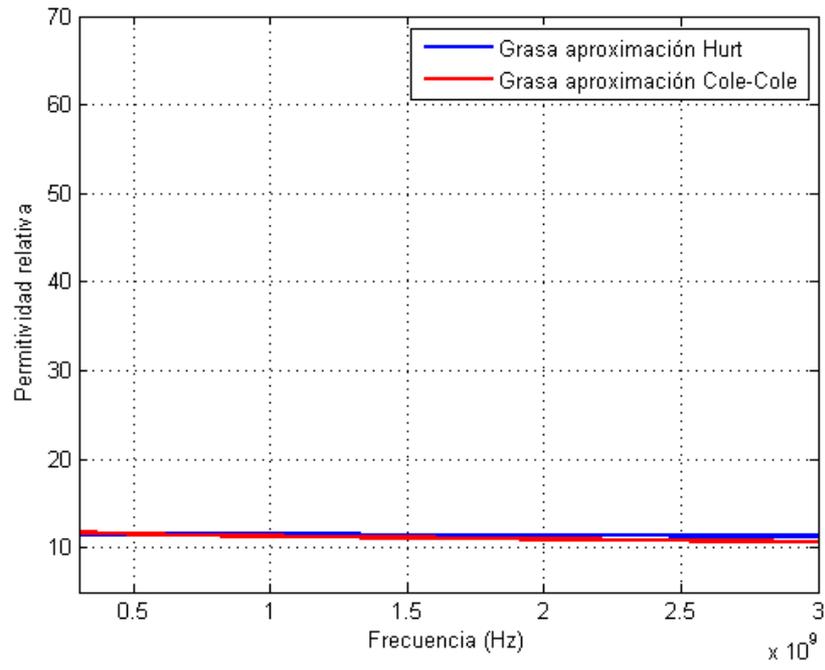
Figura 8: Valor de la permitividad de la piel según la frecuencia.



**Figura 9:** Valor de la permitividad de la piel mojada según la frecuencia.



**Figura 10:** Valor de la permitividad del músculo según la frecuencia.



**Figura 11:** Valor de la permitividad de la grasa según la frecuencia.



# Capítulo 2.

## Antenas PIFA

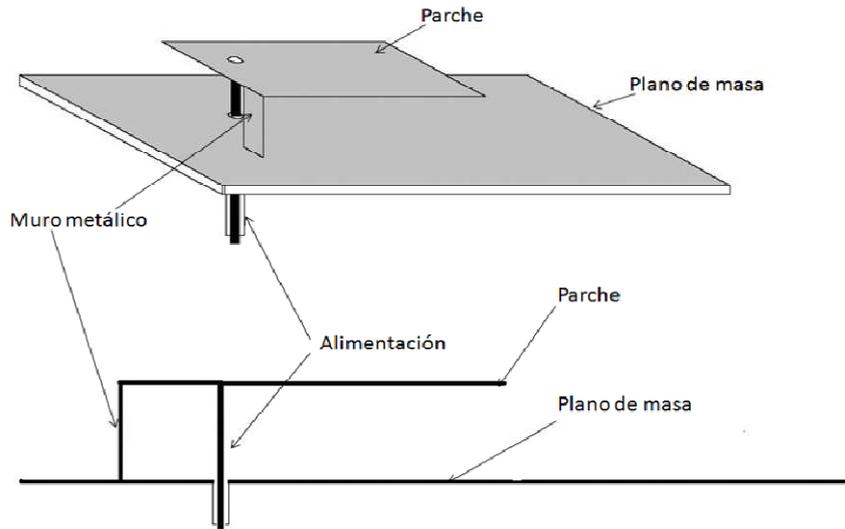
---

Durante este capítulo se expondrán la teoría básica de las antenas PIFA que servirán de modelo para el posterior desarrollo de la antena implantable. A continuación se estudiará el diseño básico de este tipo de antenas y los efectos que provocan la variación de sus parámetros tanto en la frecuencia de trabajo como en la adaptación de la antena, y se finalizará haciendo un resumen de las conclusiones obtenidas a lo largo del estudio.

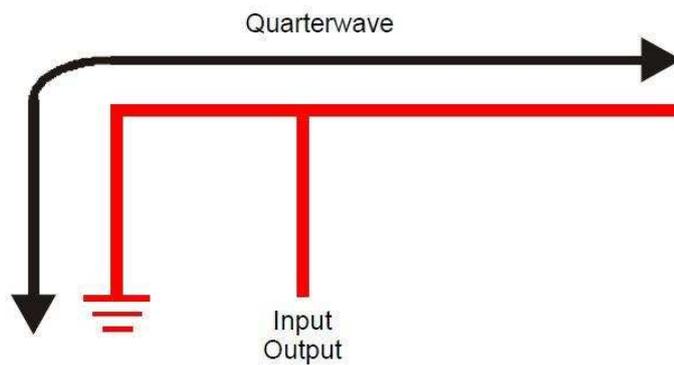
### *2.1. Conceptos teóricos*

Las antenas PIFA (Planar Inverted F Antenna) son antenas de parche cuya característica principal es tener uno de los lados formado de un material metálico, actuando de cortocircuito, y por lo tanto fijando el tamaño de la antena a  $\lambda/4$  en vez de a  $\lambda/2$  en una de sus dimensiones [5]. Este concepto ha permitido el desarrollo de muchas antenas PIFA que proporcionan diferentes bandas de trabajo con un tamaño compacto y reducido. Por esta causa la elección de un antena PIFA para el desarrollo de este proyecto parecía la más adecuada debido a la especificación de conseguir un tamaño muy reducido.

El esquema básico de una antena PIFA se muestra en la figuras 11 y 12.



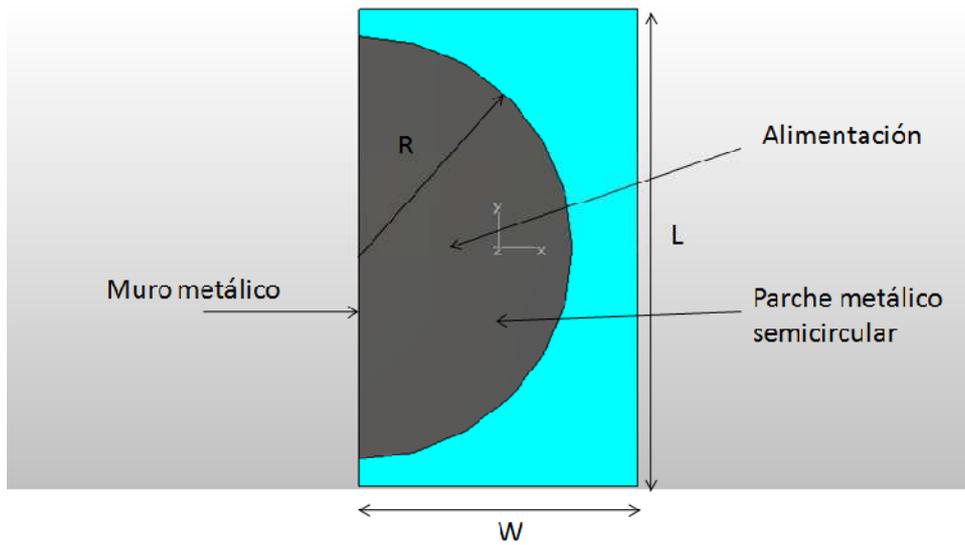
**Figura 11:** Partes fundamentales de una antena PIFA.



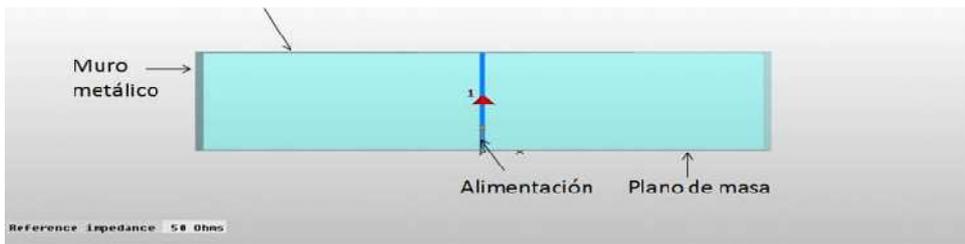
**Figura 12:** Esquema de una antena PIFA.

## 2.2. Presentación del modelo básico

El esquema básico del que se parte para el posterior desarrollo de la antena consiste en una antena PIFA como se muestra en las figuras 13 y 14. Se trata de una antena con un plano de masa sobre el que se ha colocado un material dieléctrico y sobre él un parche semicircular metálico. El muro metálico cortocircuita el parche con el plano de masa.



**Figura 13:** Visión frontal de la antena PIFA.



**Figura 14:** Visión lateral de la antena PIFA.

### *2.2.1. Estudio del funcionamiento del modelo básico*

En este apartado se mostrarán diferentes simulaciones obtenidas al modificar algunos parámetros de la antena con el fin de observar el funcionamiento de la misma y estudiar la variación que provocan estos cambios en la frecuencia de funcionamiento.

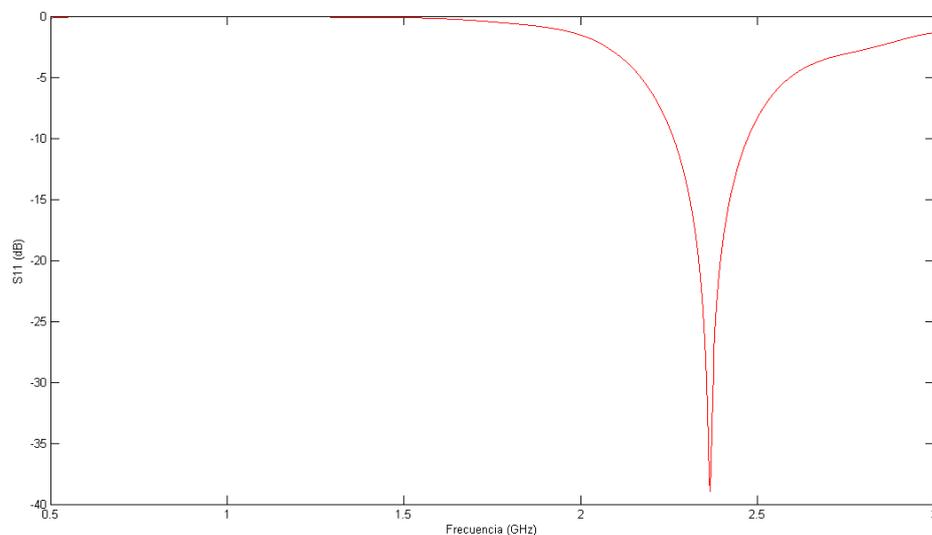
Para el estudio paramétrico de la antena se utiliza el parámetro  $S_{11}$  modificándose diferentes parámetros de la antena para ver cuál es su variación.

Se parte de una antena inicial cuyos parámetros principales son:

- Parámetro **R**: Valor del radio del parche semicircular. Tamaño inicial de 23 mm.
- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño inicial de 50 mm.

- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño inicial de 30 mm.
- Parámetro **xport**: Valor de la posición de la alimentación. Posición inicial a 17 mm del muro.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la permitividad dieléctrica del sustrato. Valor inicial de 2.2
- Parámetro **h1**: Espesor del material dieléctrico. Tamaño inicial de 10 mm.

Con estos valores iniciales se obtiene una antena con una frecuencia fundamental de trabajo de unos 2.36 GHz como puede observarse en la figura 15.



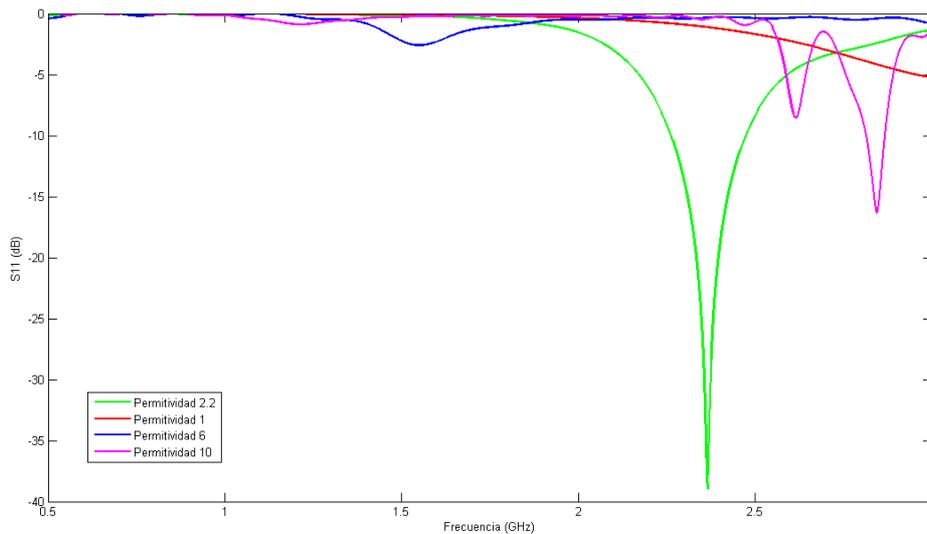
**Figura 15:** Parámetro S<sub>11</sub> para la antena inicial.

La forma de ver la influencia de cada uno de los parámetros será variando únicamente un parámetro, manteniendo el resto según el modelo inicial, estudiando la frecuencia de trabajo y la adaptación.

### **Influencia de la variación de la constante dieléctrica**

El primero de los valores que se van a modificar será la permitividad del dieléctrico. Para ello se ha empleado 4 tipos de materiales dieléctricos con distintas constantes dieléctricas: espuma, cuya constante dieléctrica es 1; polipropileno, con 2.2 de constante dieléctrica; Arlon 600 y Arlon 1000 con constante dieléctrica de 6 y 10 respectivamente.

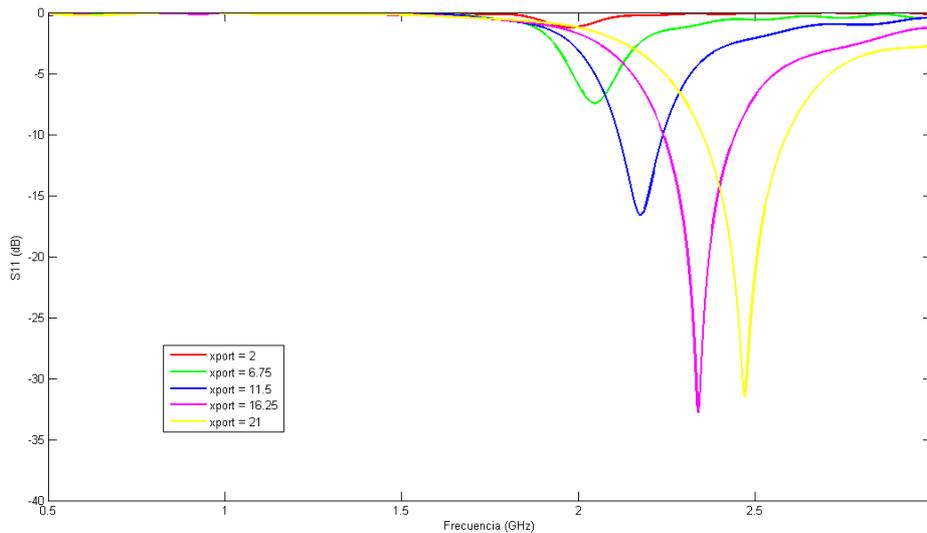
De los resultados obtenidos en la figura 16 se puede inferir que el aumento de la constante dieléctrica produce un desplazamiento hacia frecuencias menores del modo fundamental de trabajo dado que el modo fundamental de la antena funciona a  $\lambda/4$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el dieléctrico. De esta manera, al aumentar la constante dieléctrica la frecuencia de funcionamiento se ve reducida. Por esta razón la adaptación no varía de forma lineal.



**Figura 16:** Parámetro  $S_{11}$  modificando el material dieléctrico.

### **Influencia de la variación de la posición de la alimentación**

Otro de los parámetros que influye en los resultados es la posición del puerto o alimentación. En este caso se ha ido variando la posición del puerto a lo largo del radio central del parche semicircular. Se ha tomado una medida en la posición inicial y a partir de ahí se han realizado dos pruebas a cada lado de él, es decir, dos hacia el muro metálico y otras dos hacia el borde del parche. Como puede observarse en la figura 17 este parámetro va a ser muy importante a la hora de conseguir el diseño buscado ya que hace variar de manera muy considerable la adaptación pues varía el punto en el que el parche es observado y por tanto su impedancia (que varía desde 0 ohmios en el centro del parche a un abierto, teóricamente un impedancia infinita en el borde exterior). Además se observa que la frecuencia de trabajo se ha movido en un margen de hasta 0.5 GHz, según la alimentación se situara más cercana al muro o más alejada de él. El modo se desplaza hacia frecuencias mayores según la alimentación se aleja del muro.



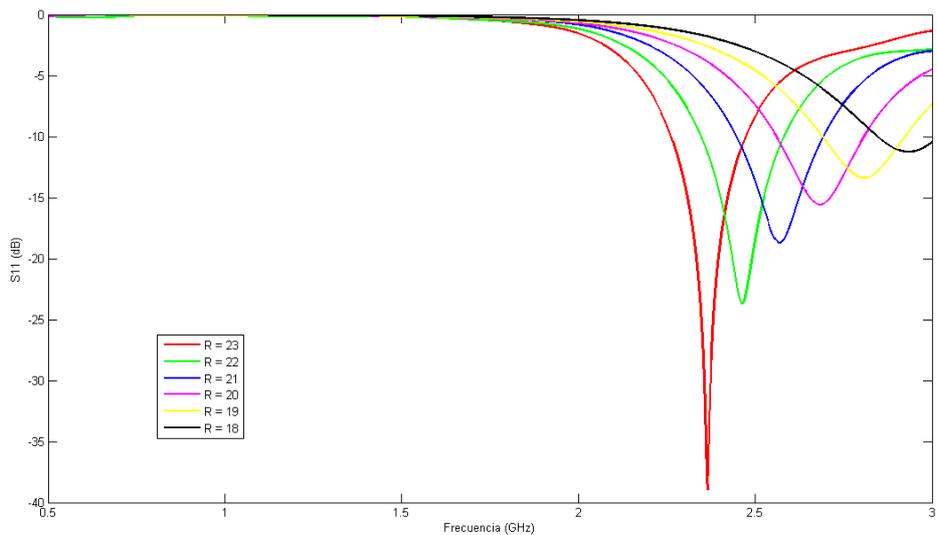
**Figura 17:** Parámetro S<sub>11</sub> modificando la posición de la alimentación en mm.

### Influencia de la variación del radio del parche semicircular

Por último estudiaremos la influencia del radio del parche semicircular, variándole desde los 18 mm hasta los 23 mm, realizando una simulación por cada milímetro que se aumenta.

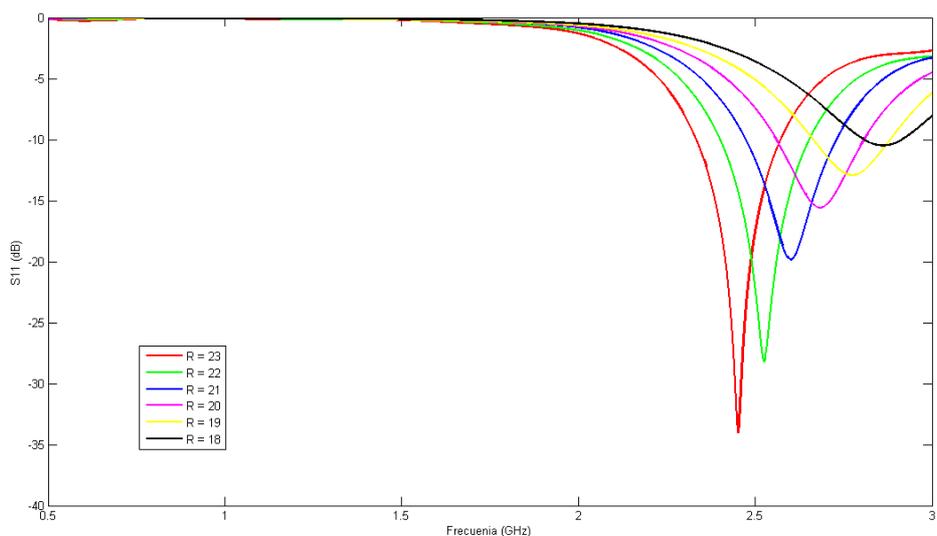
En este caso hay un parámetro que también se verá modificado, y es la posición del puerto en términos relativos respecto del muro y el extremo abierto del parche. Es decir, si se aumenta el radio y se deja fijada la posición del puerto con respecto al muro metálico se estará variando de alguna manera esa posición dentro del parche y por tanto la impedancia vista desde dicho punto será diferente y la adaptación también.

Como se observa en la siguiente simulación de la figura 18, el modo fundamental se desplaza en frecuencia según aumenta o disminuye el radio. En este caso, un aumento del radio provoca el desplazamiento hacia frecuencias inferiores, debido a un aumento del tamaño de la antena, o lo que es lo mismo un aumento de  $\lambda/4$ .



**Figura 18:** Parámetro  $S_{11}$  modificando radio (R) en mm del parche semicircular.

Si por el contrario, a la vez que se aumenta el radio del parche, se mantiene la distancia del puerto al borde del parche, se obtienen simulaciones diferentes (tanto en frecuencia como en adaptación), tal y como se muestra en la figura 19. En este caso se ha mantenido a 3 mm del borde del parche el puerto con las mismas variaciones del radio que se realizaron anteriormente.



**Figura 19:** Parámetro  $S_{11}$  modificando radio (R) en mm del parche semicircular y posición del puerto.

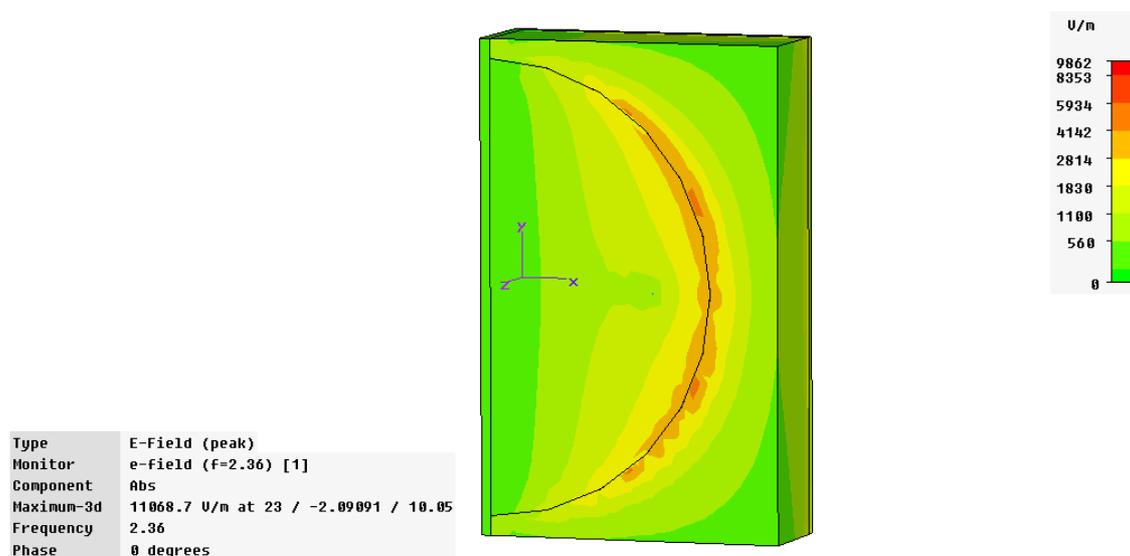
Como puede observarse en este caso el aumento del radio provoca un desplazamiento a frecuencias inferiores del modo fundamental, como en el caso anterior, pero esta vez la adaptación ha variado con respecto a la simulación anterior.

### 2.2.2. Campo eléctrico a la frecuencia de propagación y diagrama de radiación en 3D del modelo básico

A continuación se estudiará la distribución del campo eléctrico y el valor de su diagrama de radiación obtenidos para el modo fundamental de radiación en el modelo básico propuesto anteriormente con las dimensiones ya citadas:

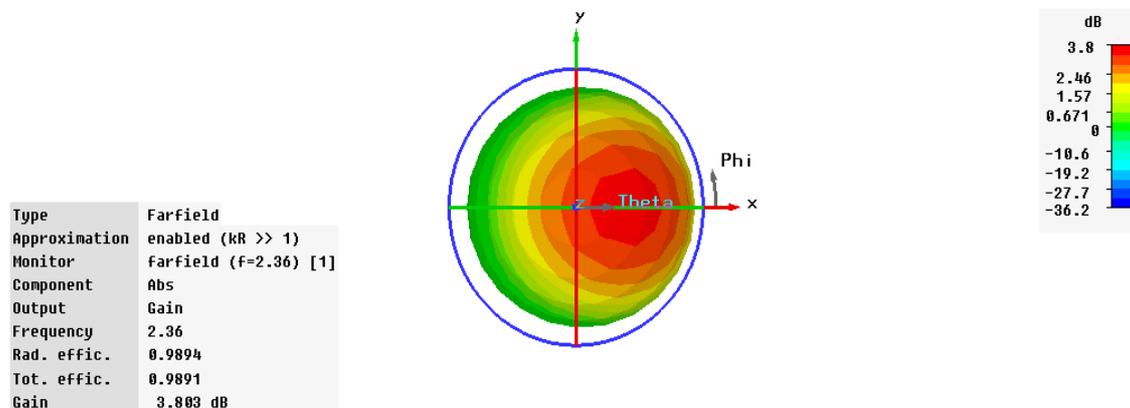
1.  $R = 23 \text{ mm}$
2.  $L = 50 \text{ mm}$
3.  $W = 30 \text{ mm}$
4.  $x_{\text{port}} = 17 \text{ mm}$
5. dieléctrico = 2.2
6.  $h_1 = 10 \text{ mm}$

Como puede observarse en la figura 20, según la distribución de campo eléctrico conseguida el modo fundamental o de trabajo se trata de un modo  $\text{TM}_{11}$  ya que sólo presenta un máximo en el plano E.



**Figura 20:** Campo eléctrico para el modo fundamental.

El diagrama de radiación en 3D de la figura 21 muestra un máximo en la dirección broadside aunque el efecto del muro metálico produce una ligera inclinación.



**Figura 21:** Diagrama de radiación representado en tres dimensiones.

### 2.3. Conclusiones

Durante este capítulo se ha presentado y analizado un modelo básico de antena PIFA del cual se han conseguido una serie de conclusiones expuestas a continuación:

- Los parámetros analizados provocan diferentes efectos en la frecuencia de trabajo de la antena. La variación de la constante dieléctrica del sustrato provoca un desplazamiento del modo fundamental hacia frecuencias más bajas según aumenta la constante dieléctrica. Por otro lado la posición del puerto influirá de manera muy importante tanto en la frecuencia de excitación como en la adaptación de la antena. Por último, la variación del radio del parche semicircular genera cambios en la frecuencia de trabajo de manera considerable debido a que el tamaño del parche es el que define esta frecuencia de funcionamiento.
- El modo fundamental de operación corresponde a un modo  $TM_{11}$  ya que la antena presenta un máximo en el plano E.
- El diagrama de radiación nos muestra un máximo de radiación en la dirección broadside, aunque presenta una pequeña inclinación debida al efecto del muro metálico.

Por lo tanto, a través de estos resultados podemos concluir que, variando los parámetros de la antena, podremos conseguir que la frecuencia de operación del modo fundamental se produzca justo en la banda de frecuencias especificada para nuestro diseño.

## Capítulo 3.

# Diseño y desarrollo de una antena implantable

---

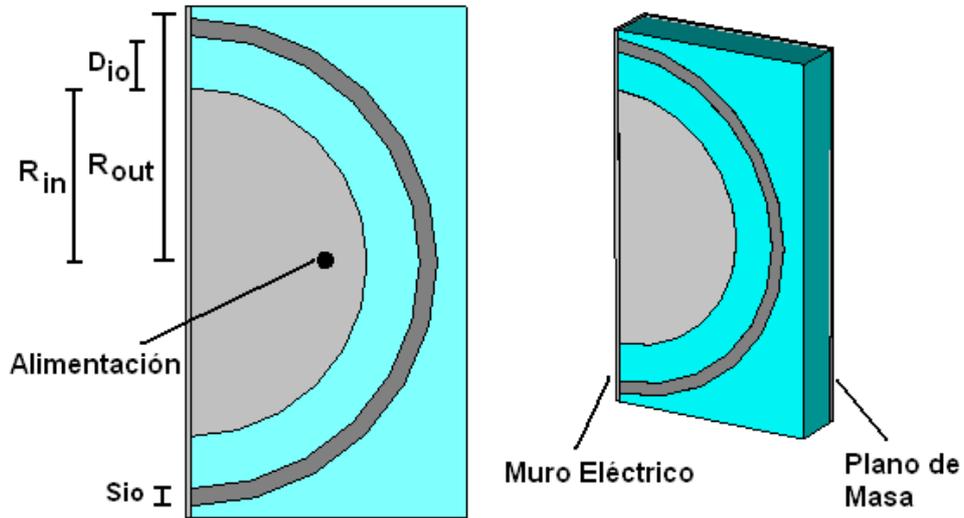
En este capítulo se expondrá el análisis de un modelo de antena PIFA cargado con un semianillo metálico para obtener dos bandas de operación en frecuencia. Posteriormente se presentará el desarrollo de dicho modelo para conseguir cumplir los requisitos de las bandas MICS e ISM prestando especial atención a la influencia de cada uno de los parámetros de la antena y en sus efectos sobre la adaptación y el valor de la frecuencia de trabajo.

### *3.1. Análisis del modelo básico cargado con semianillo metálico*

Partiendo de la antena básica PIFA estudiada en el capítulo anterior, se desarrollará un nuevo modelo que presenta múltiples bandas de operación.

Un esquema de la antena se ilustra en la figura 22. Como puede observarse se trata del modelo básico con un semicírculo metálico impreso de radio  $R_{in}$  que conecta con el plano de masa a través del muro metálico por lo que se considera antena PIFA. A partir de aquí se ha añadido un semianillo metálico impreso, exterior al semicírculo, que también está conectado

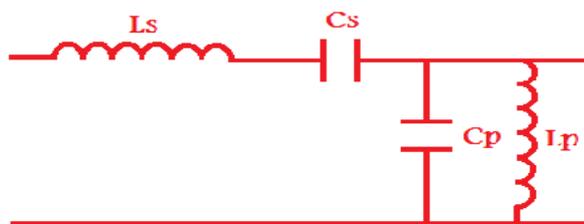
al plano de masa a través del muro metálico. El radio externo de este semianillo es  $R_{out}$ , su anchura es  $W_{io}$  y la separación al semicírculo se denomina  $D_{io}$ .



**Figura 22:** Esquema de la antena PIFA con semianillo metálico.

De esta manera gracias a la capacidad intrínseca entre el semicírculo y el semianillo y la inductancia intrínseca dada por el semianillo y sus conexiones al muro metálico se genera una resonancia que puede ser usada para nuevos modos de radiación [15]. Esto se puede ver en la figura 23 en la que se representa el esquema circuital de la antena sin tener en cuenta la alimentación.

La capacidad en paralelo y la inductancia serie corresponde al modelo circuital del modo ordinario de una antena de parche, mientras que la capacidad serie y la inductancia en paralelo modelan los nuevos modos.



**Figura 23:** Esquema circuital de la antena PIFA con semianillo metálico.

Añadiendo más semianillos externos se podrían conseguir más bandas de operación, sin embargo este proyecto sólo impone dos bandas de trabajo (MICS e ISM) por lo que no es necesario seguir introduciendo semicírculos. En caso de que las necesidades de nuestro diseño fueran introducir más frecuencias no habría ninguna restricción en el número de semianillos impresos, ya que es este número el que determina el número de resonancias introducidas (llamadas réplicas) [15].

A continuación se pasará a desarrollar el estudio paramétrico de este modelo tal y como se hizo con el modelo de antena básica en el capítulo anterior.

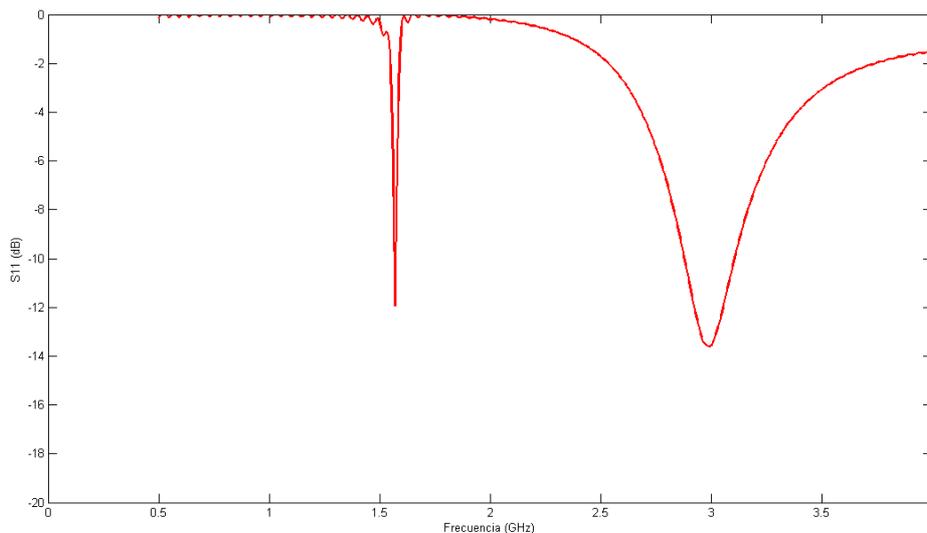
### *3.1.1. Estudio paramétrico de una antena PIFA cargada con semianillo metálico*

Este estudio que se va a realizar ayudará a entender el efecto que tienen las variaciones de diversos parámetros de la antena, como por ejemplo la anchura del semianillo o su separación al semicírculo, sobre las frecuencias de trabajo generadas.

El diseño inicial desde el que se parte para realizar el estudio tiene las siguientes dimensiones y características:

- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño inicial de 50 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño inicial de 30 mm.
- Parámetro **xport**: Valor de la posición de la alimentación. Posición inicial a 17 mm del muro.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del sustrato. Valor inicial de 2.2
- Parámetro **h1**: Espesor del material dieléctrico. Tamaño inicial de 10 mm.
- Parámetro **R<sub>in</sub>**: Tamaño inicial de 18 mm.
- Parámetro **R<sub>out</sub>**: Tamaño inicial de 24 mm.
- Parámetro **D<sub>io</sub>**: Tamaño inicial de 3.5 mm.
- Parámetro **S<sub>io</sub>**: Tamaño inicial de 2.5 mm.

En la figura 24 se ilustra el resultado de la simulación del parámetro  $S_{11}$  con estos valores de partida. Como se puede apreciar existen dos frecuencias de trabajo de la antena que corresponden al modo  $TM_{11}$  y a su réplica en zonas inferiores de frecuencia.

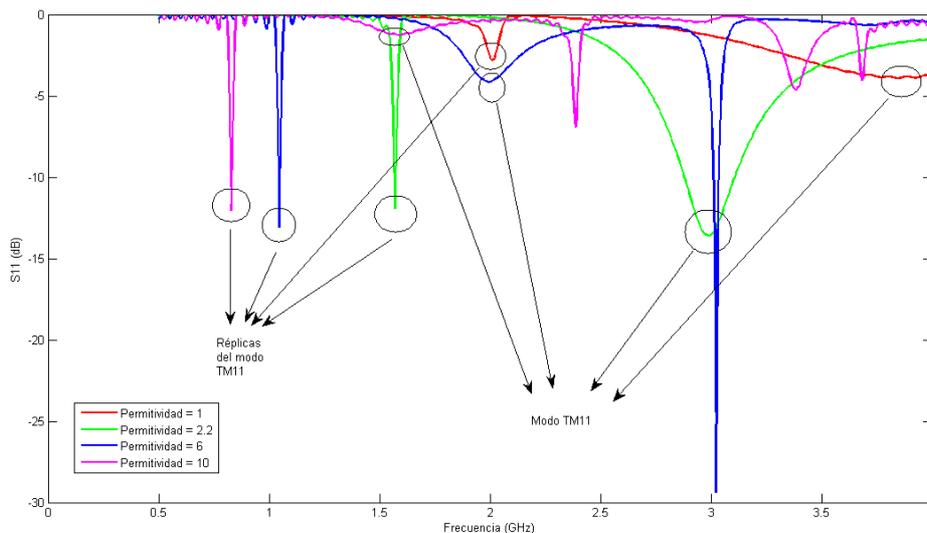


**Figura 24:** Parámetro  $S_{11}$  con semianillo metálico.

### **Influencia de la variación de la constante dieléctrica**

Para descubrir la influencia de este parámetro se han llevado a cabo 4 simulaciones del parámetro  $S_{11}$  con materiales dieléctricos distintos. Al igual que en el caso del modelo básico de PIFA (Capítulo 2) se han utilizado espuma, cuya constante dieléctrica es 1; polipropileno, con 2.2 de constante dieléctrica; Arlon 600 y Arlon 1000 con constante dieléctrica de 6 y 10 respectivamente.

En la figura 25 se muestra el resultado de estas simulaciones. Se puede observar que las dos frecuencias se ven alteradas por el cambio de constante dieléctrica. Con la espuma el modo fundamental se encuentra casi en los 4 GHz mientras que según se modifica el material aumentando su constante dieléctrica el modo fundamental se desplaza a frecuencias inferiores. Del mismo modo que el modo fundamental, la réplica también se desplaza hacia frecuencias inferiores. Por lo tanto podemos concluir que el aumento de la constante dieléctrica reduce tanto la frecuencia del modo principal como la de su réplica.



**Figura 25:** Parámetro  $S_{11}$  modificando el material dieléctrico.

### **Influencia de la variación de la posición de la alimentación**

En las siguientes simulaciones se estudiará la influencia del parámetro  $x_{port}$ , que representa la posición de la alimentación respecto al muro metálico.

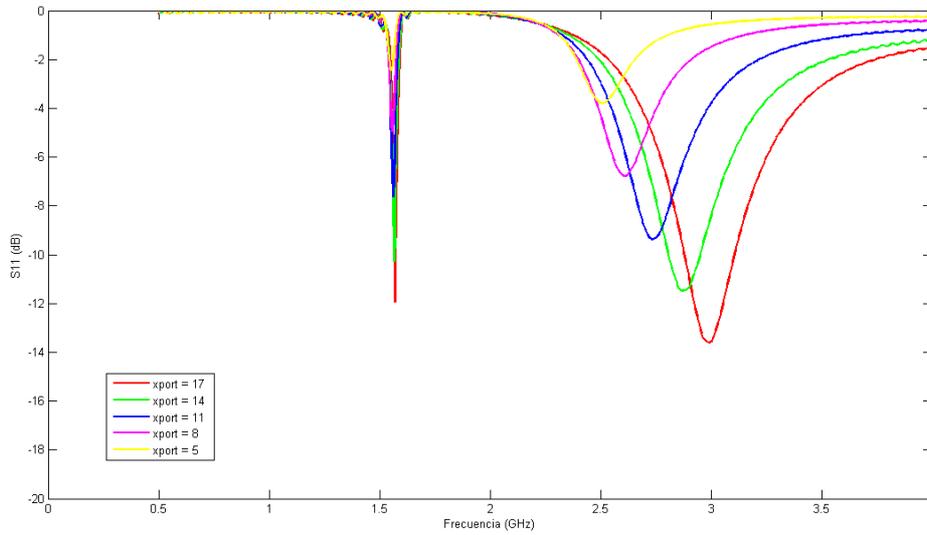
Para ello se ha colocado la alimentación a cinco distancias distintas, obteniendo los resultados mostrados en la figura 26. Como puede apreciarse las dos frecuencias se ven afectadas de distinta manera. Si bien la frecuencia del modo fundamental incrementa con el aumento la distancia del puerto del muro metálico, la frecuencia de la réplica apenas se ve alterada. En cuanto a la adaptación, el modo fundamental ve como disminuye su adaptación con el aumento de la posición del puerto y la réplica obtiene unas adaptaciones oscilantes.

### **Influencia de la variación del parámetro $S_{i0}$**

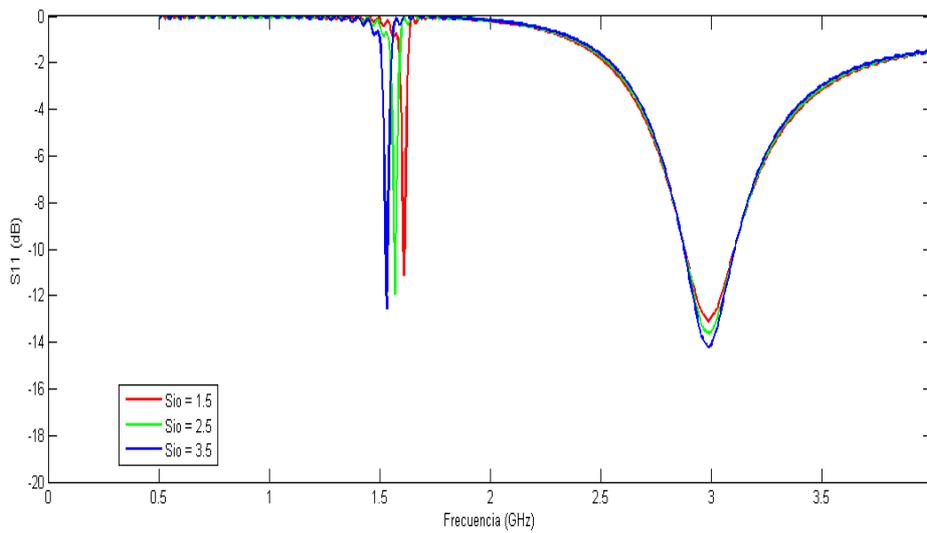
La variación de la anchura del semianillo metálico provocará cambios en la frecuencia de funcionamiento de las réplicas. Para comprobarlo se ha variado 3 veces la anchura y se han realizado las simulaciones para los valores de 1.5 mm, 2.5 mm y 3.5 mm.

Estos resultados pueden verse en la figura 27. Un aumento de la anchura del semianillo provoca una bajada de la frecuencia del modo réplica, mientras que el modo fundamental no se ve influido. Algo lógico sabiendo, como se ha explicado anteriormente, que

es el semicírculo el que define el modo fundamental y el semianillo el modo réplica. La adaptación de ambos modos no se ve alterada, por lo que se puede predecir que este parámetro ayudará a conseguir frecuencias muy bajas sin alterar la adaptación del modo, aunque provocará un aumento del tamaño de la antena.



**Figura 26:** Parámetro  $S_{11}$  modificando la posición del puerto ( $x_{port}$ ) en mm.



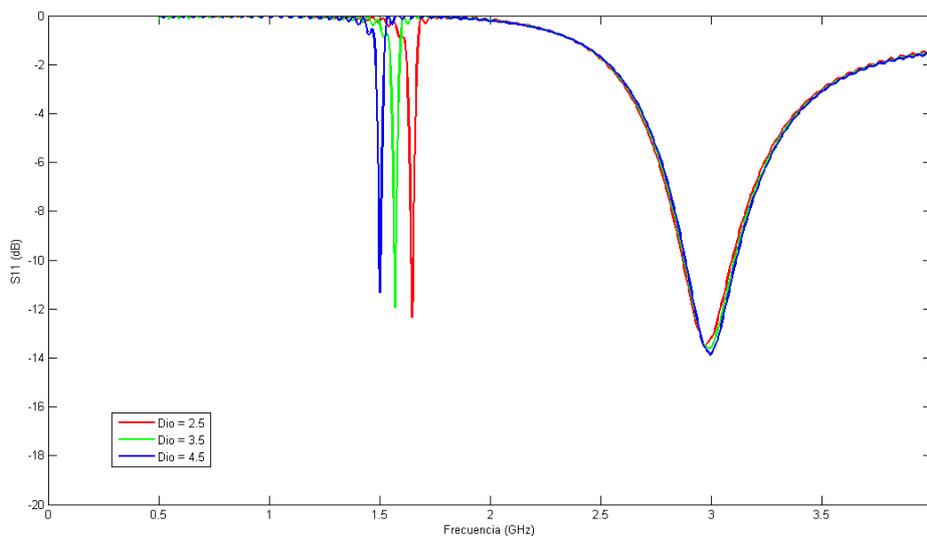
**Figura 27:** Parámetro  $S_{11}$  modificando anchura semianillo ( $S_{io}$ ) en mm.

### Influencia de la variación del parámetro $D_{io}$

A continuación se estudiará como influye la distancia del semicírculo interno al semianillo externo mediante tres simulaciones para valores de este parámetro de 2.5 mm, 3.5 mm y 4.5 mm.

Los resultados se encuentran representados en la figura 28. Como puede apreciarse, si el semianillo lo alejamos del semicírculo y por lo tanto aumentamos su tamaño, se consigue una disminución de la frecuencia de trabajo del modo réplica. En cambio el modo fundamental  $TM_{11}$  no se ve alterado, debido a que el semicírculo no ve modificadas sus dimensiones.

La adaptación del modo réplica empeora según aumenta el tamaño del semicírculo, algo que puede suponer problemas a la hora de tratar adaptar el modo réplica a frecuencias muy bajas de trabajo.



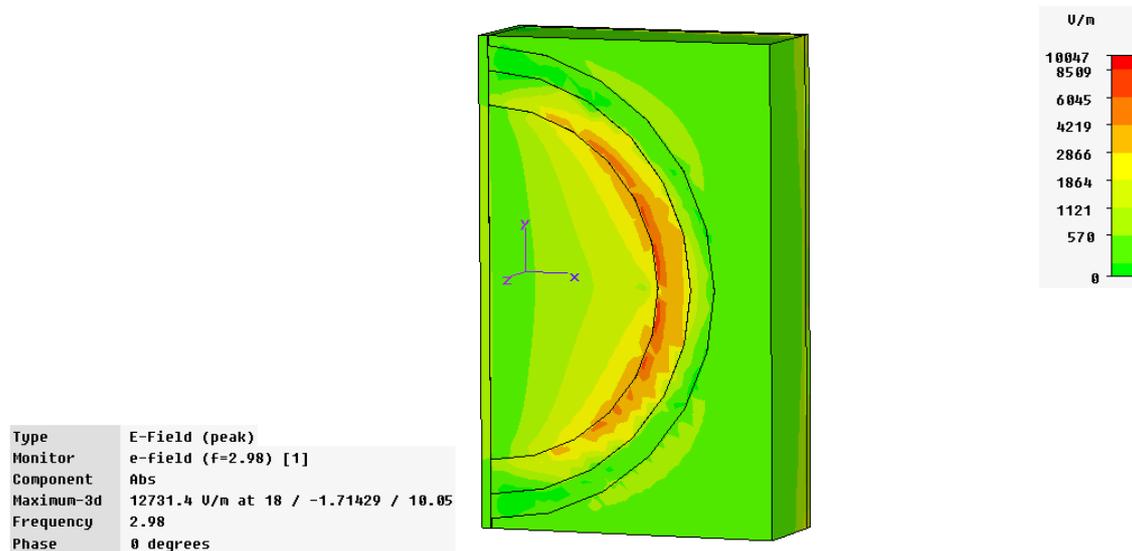
**Figura 28:** Parámetro  $S_{11}$  modificando separación entre parches ( $D_{io}$ ) en mm.

### *3.1.2. Campo eléctrico a la frecuencia de propagación y diagrama de radiación en 3D*

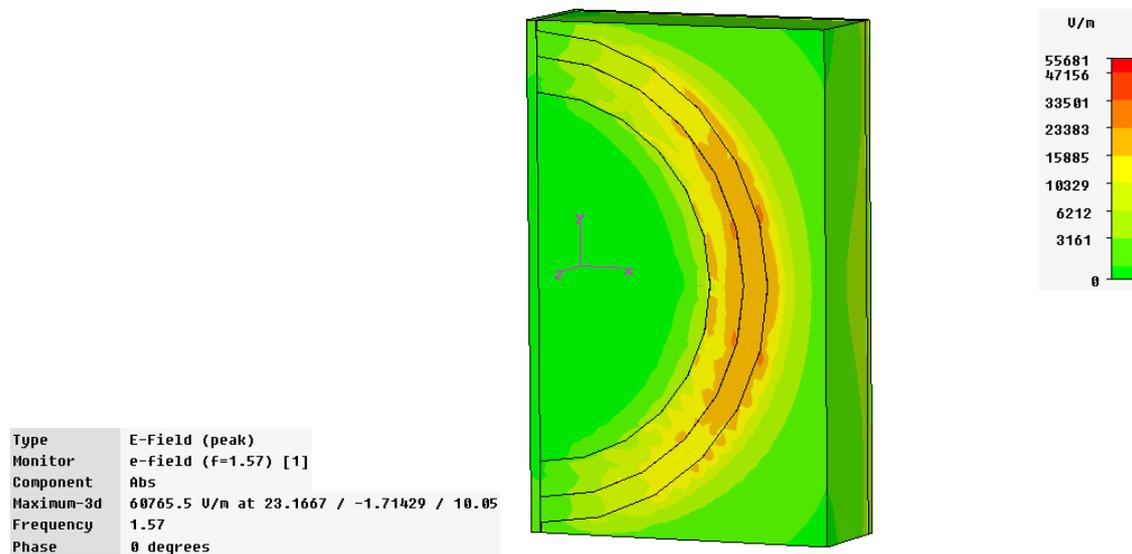
La distribución de campo eléctrico puede observarse en las figuras 29 y 30 tanto para el modo fundamental como para el modo réplica.

En el caso del modo fundamental la mayor distribución del campo eléctrico se produce en el borde del parche semicircular, como es lógico debido a que es el responsable de la

aparición de dicho modo. En cambio, para el modo réplica, se puede apreciar más distribución de campo eléctrico en el semianillo impreso, debido también a que es el responsable de este modo.



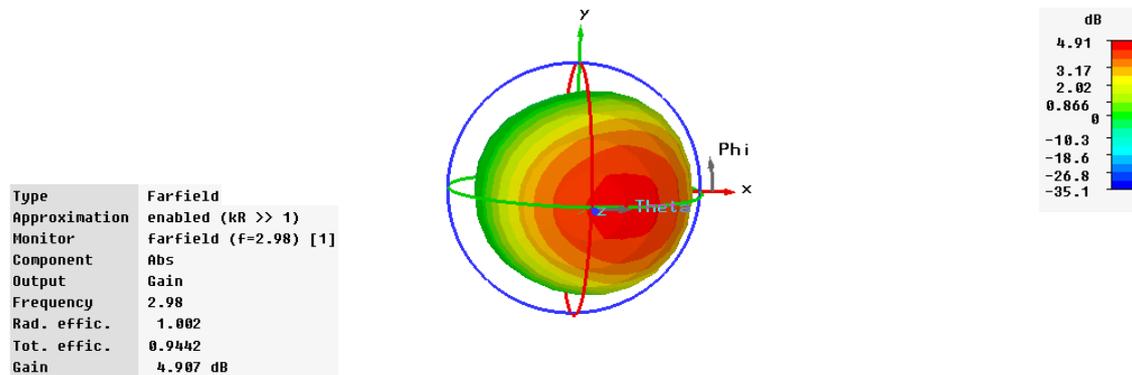
**Figura 29:** Campo eléctrico para el modo fundamental.



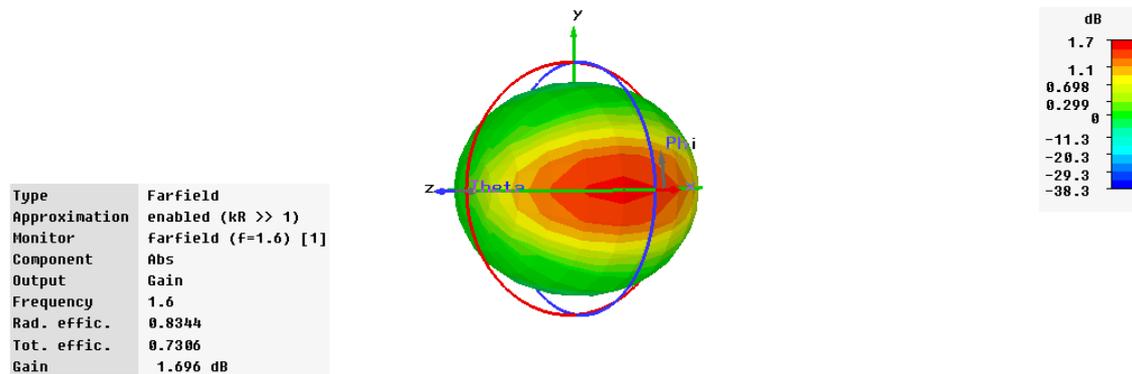
**Figura 30:** Campo eléctrico para la réplica del modo fundamental

Los diagramas de radiación en 3D se muestran en las figuras 31 y 32 para el modo fundamental y el modo réplica respectivamente. De nuevo, al igual que en el caso de modelo básico PIFA visto anteriormente, el modo fundamental se encuentra ligeramente inclinado

debido al muro metálico. Dado que la distribución de campo eléctrico en ambos modos es similar (en cuanto al número de máximos y su disposición) es lógico pensar que el diagrama de radiación también lo será.



**Figura 31:** Diagrama de radiación en tres dimensiones del modo fundamental.



**Figura 32:** Diagrama de radiación en tres dimensiones de la réplica del modo fundamental.

### 3.1.3. Conclusiones

El hecho de cargar una antena básica PIFA con una semianillo metálico se produce como consecuencia de la necesidad de desarrollar un antena que trabaje en dos frecuencias, que en nuestro caso deberán ser desplazadas a las bandas MICS e ISM.

El estudio paramétrico realizado en esta primera parte del capítulo ha proporcionado unas conclusiones que nos servirán para el desarrollo del modelo final de la antena buscada.

Las conclusiones extraídas son las siguientes:

- Queda demostrado que el uso de semianillos metálicos cargados sobre antenas PIFA básicas provocan excitación de nuevos modos, réplicas de los excitados por la antena PIFA básica.
- Existen una serie de parámetros cuya variación provocan cambios en las frecuencias de radiación tanto del modo fundamental como del modo réplica.
  - El aumento de la constante dieléctrica del sustrato produce que las frecuencias de trabajo tanto del modo fundamental como del modo réplica disminuyan.
  - La posición del puerto de alimentación genera grandes variaciones de adaptación de ambos modos. Además hay que destacar que la posición óptima no coincide para los dos modos. En cuanto a las frecuencias, si bien la variación de este parámetro no influye en la frecuencia del modo réplica, el modo fundamental sí ve cómo su frecuencia de trabajo aumenta en el caso de que la alimentación se aleje del muro metálico y viceversa.
  - El aumento de la separación entre semicírculo y semianillo tiene como consecuencia que la frecuencia de trabajo del modo réplica disminuya, sin afectar a la del modo fundamental. Por otro lado, la adaptación de la frecuencia de trabajo del modo réplica empeora.
  - El aumento de la anchura del semianillo metálico provoca nuevamente una bajada de la frecuencia de trabajo del modo réplica, sin modificar la del modo fundamental. Para este caso las adaptaciones no se ven modificadas en exceso.
- La modificación de estos parámetros permite obtener unos diseños multifrecuenciales muy versátiles a la hora de conseguir unas frecuencias de trabajo muy específicas, puesto que como hemos visto, ambas frecuencias de trabajo pueden ser independientes la una de la otra [16].

- Según los campos eléctricos obtenidos en la simulación para las frecuencias de trabajo de ambos modos, la distribución de campo eléctrico se encuentra principalmente en el semianillo metálico para el modo réplica, confirmando que este semianillo genera la excitación de este modo.
- Los diagramas de radiación presentan las características de los modos  $TM_{11}$ , con el máximo ligeramente inclinado por la acción del muro metálico, como ocurría con la antena básica PIFA sin semianillo metálico.

### *3.2. Diseño y desarrollo del modelo básico cargado con semianillo metálico para las especificaciones propuestas*

Una vez estudiado el comportamiento y la influencia de los parámetros de la antena básica PIFA cargada con semianillo metálico, se realizaron diversas pruebas y simulaciones con el objetivo de conseguir una antena que cumpliera con las especificaciones del proyecto (bandas de trabajo MICS e ISM y un diseño físicamente pequeño). El mayor problema que se encontró fue reducir la frecuencia de trabajo del modo réplica hasta la banda MICS (402-405 MHz) con una adaptación mínimamente aceptable.

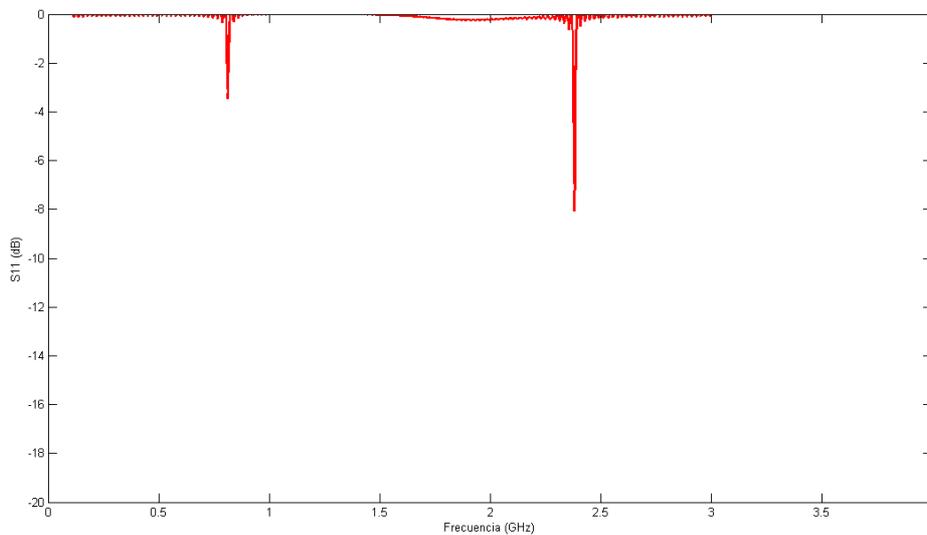
Según se ha comprobado en los estudios previos, existen tres formas de reducir la frecuencia del modo réplica. La primera de ellas es cambiar el material dieléctrico por otro de mayor constante dieléctrica. La segunda es aumentar el espacio que separa el semicírculo del semianillo, manteniendo fijo el tamaño del semicírculo, lo que supone aumentar el tamaño de la antena. Y por último también se consigue reducir la frecuencia si se aumenta la anchura del semianillo manteniendo fijo el radio interno, forma que también provoca el aumento del tamaño de la antena.

Después de realizar pruebas y simulaciones con el fin de minimizar el tamaño no se obtuvo el resultado esperado (no pudiéndose alcanzar la distancia adecuada entre bandas). Uno de los modelos que más podía aproximarse al modelo buscado se expone a continuación:

- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño de 49 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño de 24.5 mm.
- Parámetro **xport**: Valor de la posición de la alimentación. Posición a 13 mm del muro.

- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del material. Valor de 10 (Arlon 1000)
- Parámetro **h1**: Espesor de la altura del material dieléctrico. Tamaño de 2.54 mm.
- Parámetro **R<sub>in</sub>**: Tamaño de 15 mm.
- Parámetro **R<sub>out</sub>**: Tamaño de 24 mm.
- Parámetro **D<sub>io</sub>**: Tamaño de 5 mm.
- Parámetro **S<sub>io</sub>**: Tamaño de 4 mm.

El resultado de la simulación se encuentra en la figura 33.



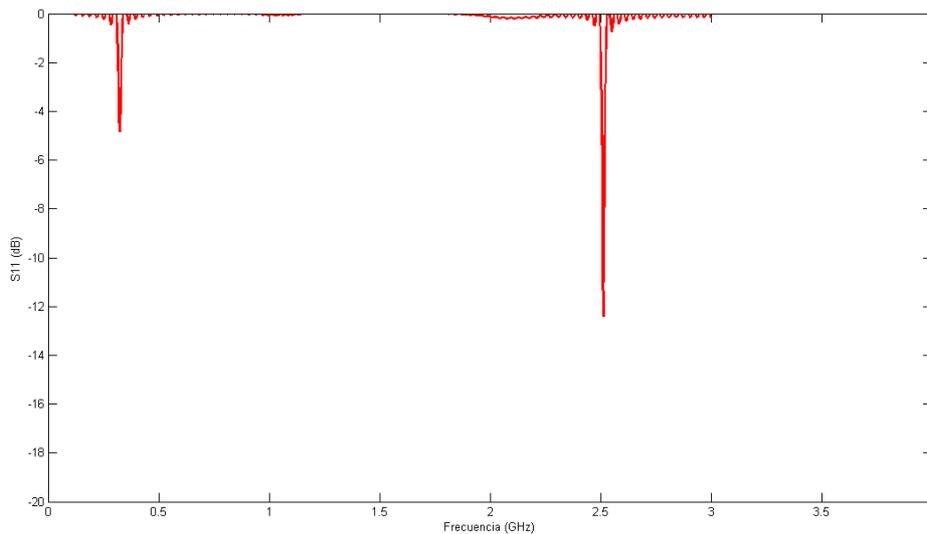
**Figura 33:** Parámetro  $S_{11}$  del modelo aproximado con semianillo metálico.

Como puede observarse la frecuencia inferior (0.81 GHz) queda lejos de los 0.4 GHz que se buscan para trabajar en la banda MICS. Además las adaptaciones de ambos modos se encuentran por encima de los -10 dB. Por otro lado, el tamaño de la antena, de casi 5 cm de longitud es excesivamente grande si se compara con otros diseños que se han analizado anteriormente en el Capítulo 1 [10] [11].

El hecho de no conseguir resultados que minimizaran el problema del dimensionado de la antena obligó a buscar nuevos modelos de diseño, aunque basados en antenas básicas PIFA cargadas con semianillo metálico, como es la introducción de elementos concentrados.

### 3.2.1. Introducción de un condensador centrado

En primer lugar se introdujo un condensador que unía el semicírculo y el semianillo, para comprobar cómo afectaba a las bandas de funcionamiento. Para ello se realizó una simulación con una capacidad cuyo valor era de 22 pF sobre el diseño que se ha estudiado en el apartado anterior. El resultado de dicha simulación se ilustra en la figura 34.



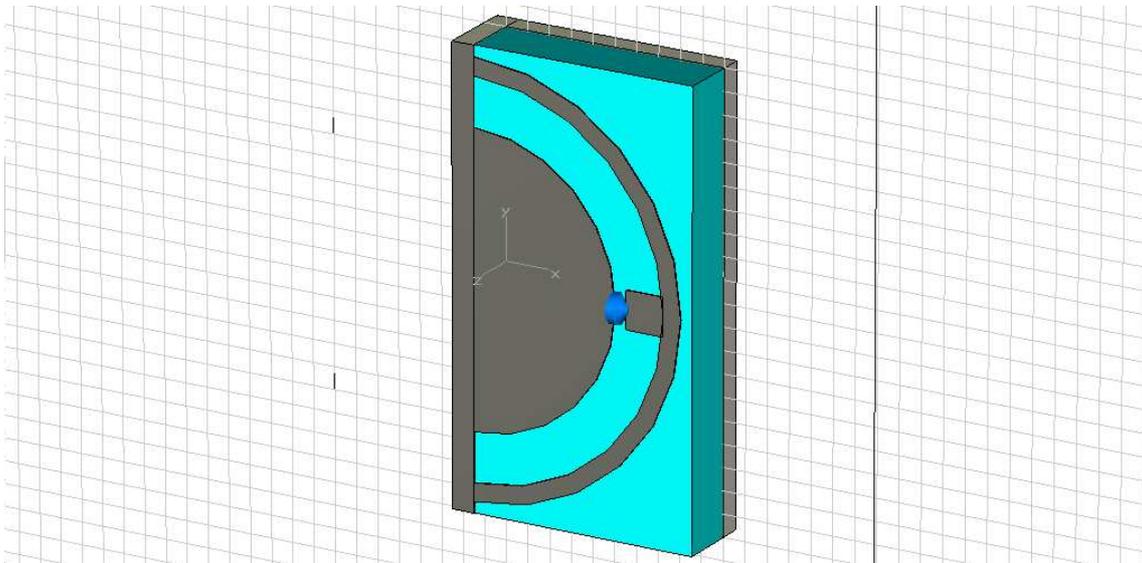
**Figura 34:** Parámetro  $S_{11}$  de la antena con condensador.

Si se compara esta simulación con la obtenida sin condensador (Figura 33), se aprecia que la frecuencia del modo réplica ha descendido considerablemente, mientras que la frecuencia del modo fundamental prácticamente se ha mantenido en similar posición. Esto confirma el modelo circuital propuesto anteriormente para el modelo básico de antena PIFA cargada con semianillo metálico.

#### **Influencia de la variación del valor del condensador**

En este apartado se estudiará la influencia de la variación del valor del condensador en las frecuencias de trabajo de los modos fundamental y réplica. Para ello se realizarán cuatro simulaciones del parámetro  $S_{11}$ , para los valores del condensador de 2.2 pF, 10 pF, 15 pF y 22 pF, y se usará el modelo de antena básica PIFA cargada con semianillo metálico que se puede ver en la figura 35 con las siguientes dimensiones:

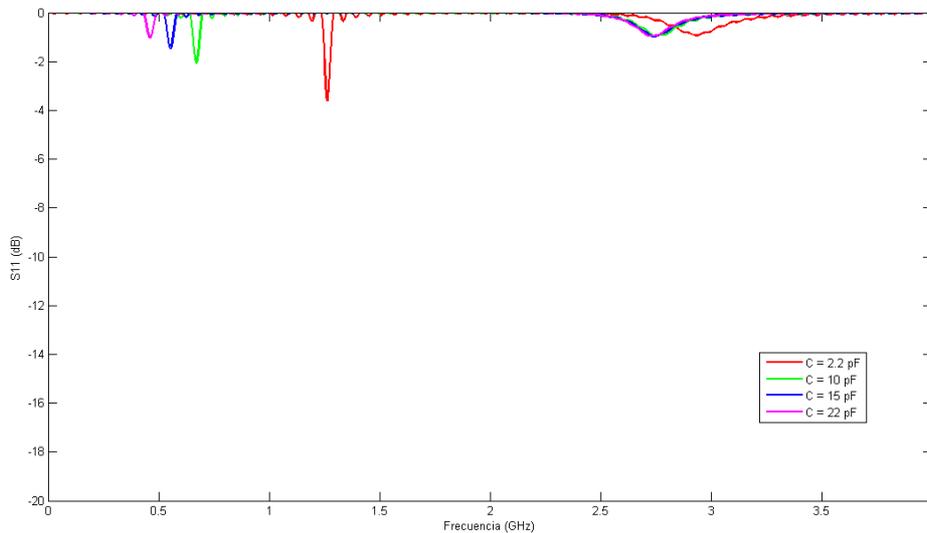
- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño de 20 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño de 10 mm.
- Parámetro **xport**: Valor de la posición de la alimentación. Posición a 3.5 mm del muro.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del material. Valor de 10 (Arlon 1000)
- Parámetro **h1**: Espesor del material dieléctrico. Tamaño de 2.54 mm.
- Parámetro **R<sub>in</sub>**: Tamaño de 6.5 mm.
- Parámetro **R<sub>out</sub>**: Tamaño de 9.5 mm.
- Parámetro **D<sub>io</sub>**: Tamaño de 2.2 mm.
- Parámetro **S<sub>io</sub>**: Tamaño de 0.8 mm.



**Figura 35:** Antena PIFA cargada con semianillo metálico y condensador.

Como se ve en la figura 35, existe un nuevo elemento necesario para conectar los dos parches con el condensador debido a que los condensadores que se emplean en el laboratorio de fabricación del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Carlos III de Madrid tienen un tamaño fijado por el fabricante y que podemos encontrar en el Anexo 1 con las hojas de características de los materiales utilizados en este proyecto. Se tratan de condensadores Phycomp 0402 NP0 50V cuya dimensiones son 1 mm de longitud por 0.5 mm de anchura.

El resultado de las simulaciones se ilustra en la figura 36. En ella se aprecia que aumentando el valor del condensador se reduce la frecuencia de trabajo del modo réplica. Se consiguen valores de hasta 500 MHz con unas dimensiones de la antena bastante más reducidas de lo que hasta ahora se había diseñado. Sin embargo, el problema sigue siendo la adaptación, ya que según se aumenta el condensador el modo se adapta peor.

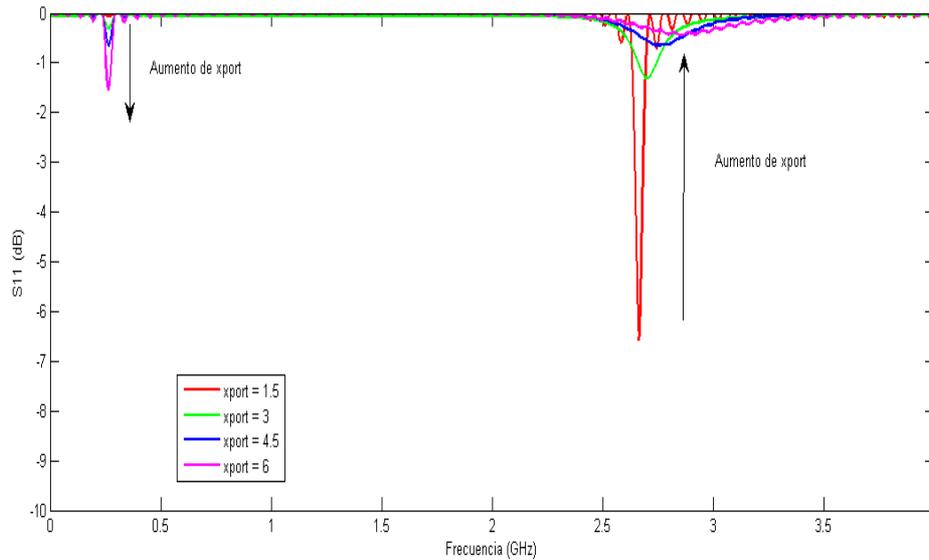


**Figura 36:** Parámetro  $S_{11}$  modificando el valor de la capacidad del condensador.

### **Influencia de la variación de la posición de la alimentación**

Como en casos anteriores, el estudio de la variación de la posición de la alimentación se antoja un parámetro clave para el buen funcionamiento de la antena. Para ello utilizaremos varias simulaciones para ver la influencia de este parámetro sobre el modelo de antena anterior ya que estaba diseñado con unas dimensiones aceptables para el proyecto y usando un condensador de 68 pF, que acercaría más la frecuencia del modo réplica hacia la banda MICS. Los resultados se pueden ver en la figura 37.

Si se observa más en detalle las frecuencias de trabajo se concluye que aumentando la distancia entre la alimentación y el muro metálico la adaptación mejora para la banda MICS pero empeora para la banda ISM.



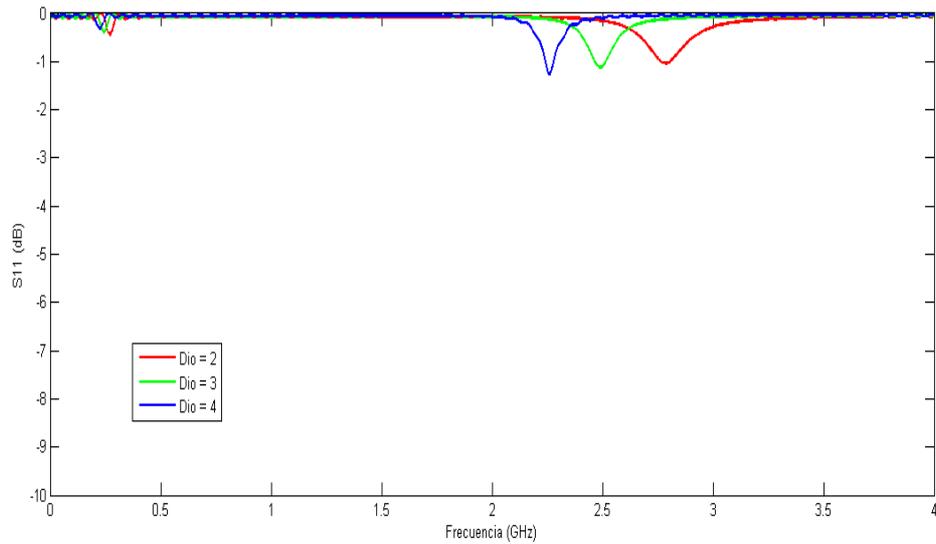
**Figura 37:** Parámetro  $S_{11}$  modificando la posición del puerto ( $x_{port}$ ) en mm.

Por tanto, podemos concluir que la adaptación entre ambas bandas está balanceada, es decir, la mejor adaptación para una banda es la peor para la otra banda y viceversa.

### Influencia de la variación del parámetro $D_{i0}$

En este caso se va a estudiar de nuevo la influencia que tiene la separación entre el semicírculo y el semianillo en las frecuencias de trabajo y sus adaptaciones. Para ello, habrá que tener en cuenta también que el elemento que une un condensador y un semianillo introducirá un pequeño efecto a los que ya añade la separación.

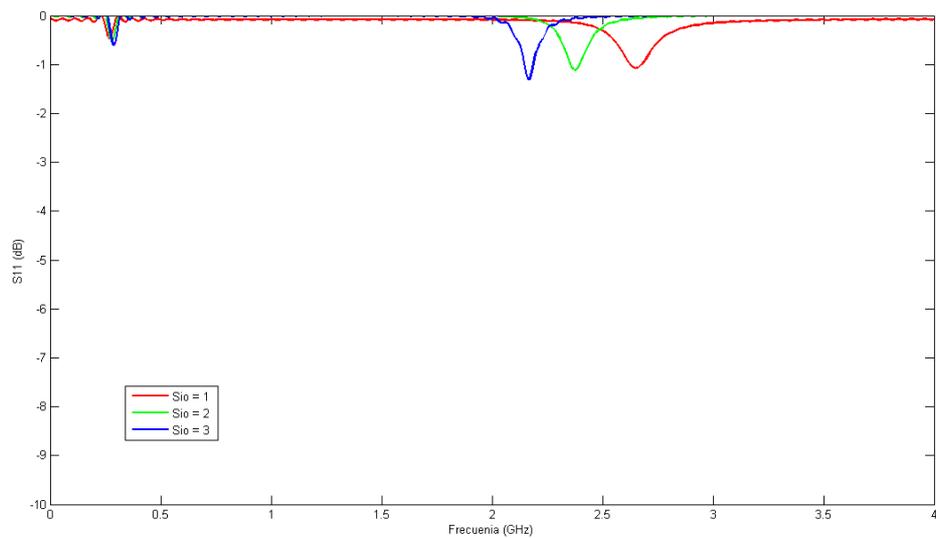
Se realizarán tres simulaciones sobre las dimensiones del modelo que estamos utilizando para estudiar estos parámetros. Las dimensiones de  $D_{i0}$  que utilizaremos para el estudio son 2 mm, 3 mm y 4 mm, y los resultados los podemos encontrar en la figura 38. A partir de ella se puede concluir que el aumento de la distancia entre parches provoca la reducción de las frecuencias de ambos modos estudiados. Además la adaptación, como ocurre con la variación de la alimentación, es inversa para los dos modos. La mejora de una implica el empeoramiento de la otra.



**Figura 38:** Parámetro  $S_{11}$  modificando distancia entre parches ( $D_{io}$ ) en mm.

### Influencia de la variación del parámetro $S_{io}$

El último parámetro para el que se verá la influencia de sus variaciones sobre las frecuencias será la anchura del semianillo metálico. Para ello, se realizarán tres simulaciones con valores de 1 mm, 2 mm y 3 mm. De nuevo el modelo utilizado es el mismo que para los estudios previos. La figura 39 muestra los resultados de las tres simulaciones.



**Figura 39:** Parámetro  $S_{11}$  modificando anchura semianillo metálico ( $S_{io}$ ) en mm.

Como puede apreciarse, la frecuencia del modo fundamental se reduce con el aumento de la anchura del semianillo, y la frecuencia del modo réplica apenas se ve alterada. Las adaptaciones tampoco sufren una gran variación.

### **Conclusiones del estudio paramétrico**

De este estudio paramétrico se pueden resumir las conclusiones siguientes:

- La introducción entre el semicírculo y el semianillo de una capacidad suficientemente grande provoca una bajada en la frecuencia del modo réplica capaz de llegar a frecuencias del orden de los 300 MHz manteniendo la frecuencia del modo fundamental en aproximadamente los 2-3 GHz.
- Existen una serie de parámetros cuya variación provocan cambios en las frecuencias de radiación tanto del modo fundamental como del modo réplica.
  - El aumento del valor del condensador provoca una bajada de la frecuencia del modo réplica.
  - La variación de la posición de la alimentación respecto al muro metálico genera un balanceo en las adaptaciones de las frecuencias del modo fundamental y réplica.
  - Un aumento en el parámetro de la distancia entre semicírculo y semianillo reduce la frecuencia de los dos modos. De nuevo las adaptaciones se ven modificadas de forma inversa para ambos modos.
  - Un aumento en el parámetro de la anchura del semianillo reduce la frecuencia del modo fundamental, y en menor medida la del modo réplica.
- Como puede apreciarse la variación en la frecuencia del modo fundamental ya no sólo depende de la variación en el radio del semicírculo, como era hasta ahora, sino que las modificaciones en el anillo también provocan movimientos de esta frecuencia.

Por lo tanto después de diversas simulaciones no se consiguió una antena que cumpliera con las tres especificaciones que debe cumplirse, frecuencias de trabajo en las bandas MICS e ISM, reducido tamaño y buena adaptación de ambos modos. Este modelo de condensador centrado consiguió reducir la frecuencia de la banda MICS con un tamaño reducido, algo que no se conseguía anteriormente, pero las adaptaciones de ambas frecuencias no llegan a un mínimo de calidad aceptado.

### *3.2.2. Introducción de dos condensadores reflejados*

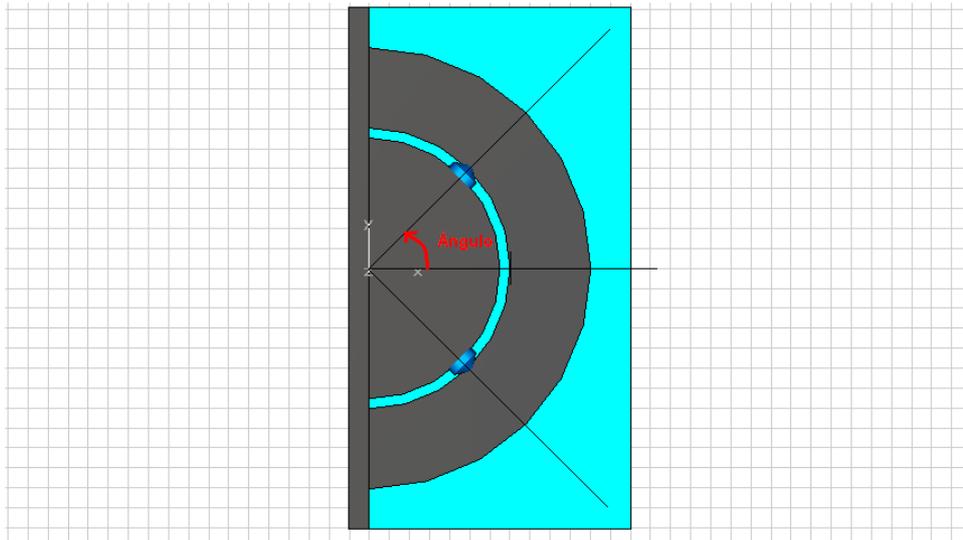
Como se ha demostrado en el apartado anterior, el hecho de introducir un condensador centrado en la antena básica PIFA cargada con semianillo metálico solucionaba algunos problemas, como conseguir reducir la frecuencia de trabajo hasta la banda MICS, pero no resolvía otro como conseguir buenas adaptación para ambas frecuencias de trabajo.

Por lo tanto el siguiente avance en el desarrollo debía ir encaminado a buscar mejores adaptaciones para lo que se decidió utilizar dos condensadores no centrados, sino reflejados con respecto al centro de la antena.

Para estudiar y analizar esta variante del modelo anterior se usó un modelo con las siguientes dimensiones y características:

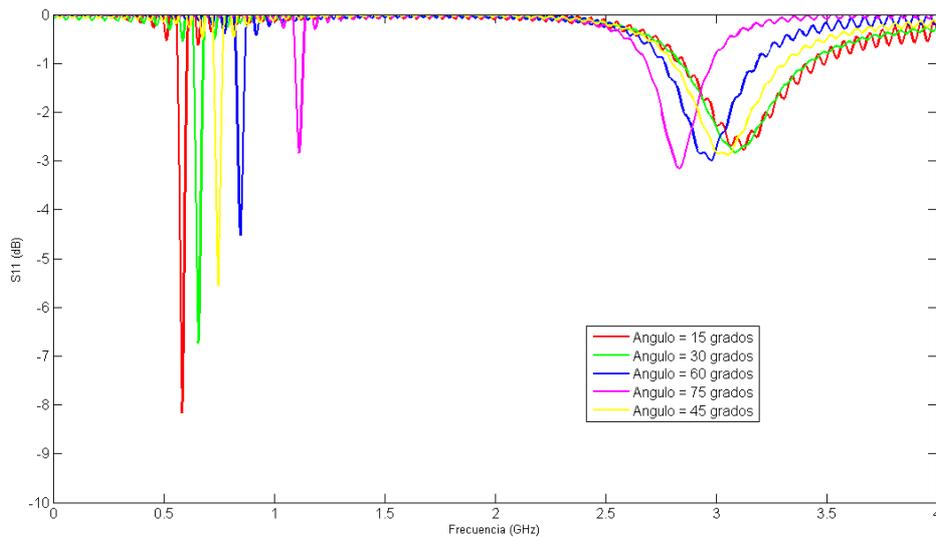
- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño de 26 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño de 13 mm.
- Parámetro **xport**: Valor de la posición de la alimentación. Posición a 6 mm del muro.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del sustrato. Valor de 6 (Arlon 600)
- Parámetro **h1**: Espesor del sustato dieléctrico. Tamaño de 4.8 mm.
- Parámetro **R<sub>in</sub>**: Tamaño de 6.5 mm.
- Parámetro **R<sub>out</sub>**: Tamaño de 11 mm.
- Parámetro **D<sub>io</sub>**: Tamaño de 0.5 mm.
- Parámetro **S<sub>io</sub>**: Tamaño de 4 mm.
- Condensador **C**: Valor del condensador 22 pF

El parámetro que se modificó fue el ángulo donde se colocaban ambos condensadores desde el centro de la antena. En la figura 40 se explica mejor el diseño.



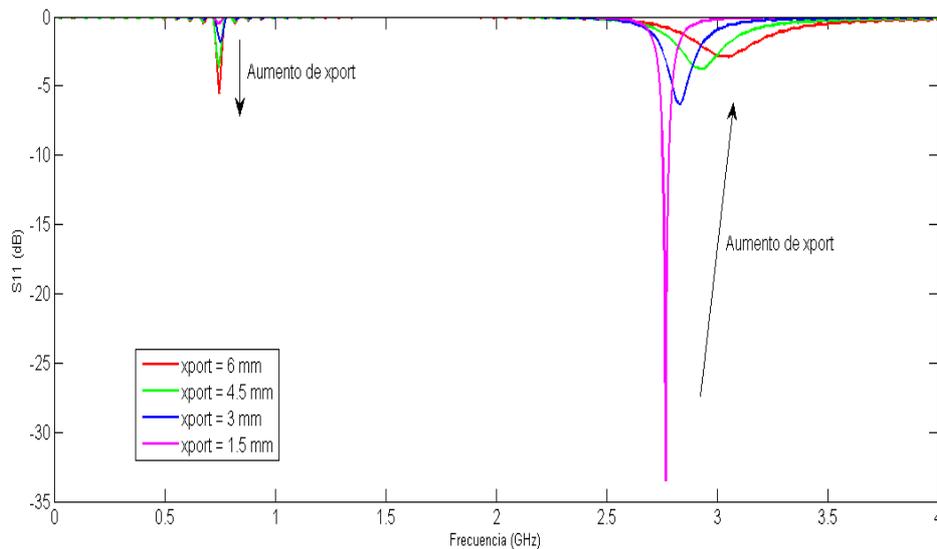
**Figura 40:** Diseño de la antena con condensadores reflejados.

Las simulaciones se hicieron para valores del ángulo de 15, 30, 45, 60 y 75 grados desde el centro y el resultado que se obtuvo está representado en la figura 41. La frecuencia de la banda réplica se ve aumentada a medida que se aumenta el ángulo de colocación de los condensadores y la adaptación empeora. En cambio, la frecuencia del modo fundamental apenas se ve influida.



**Figura 41:** Parámetro  $S_{11}$  modificando el ángulo de posición de los condensadores.

Del mismo modo, se estudió también la variación de la posición de la alimentación, parámetro que hasta ahora en todas las simulaciones había tenido una influencia importante en las adaptaciones de ambos modos. Para ello se realizaron 4 simulaciones con distintos valores de la posición de la alimentación. El ángulo usado es de 45 grados, sin alterar el resto de dimensiones. Los resultados obtenidos están representados en la figura 42.



**Figura 42:** Parámetro  $S_{11}$  variando posición del puerto ( $x_{port}$ ) en mm.

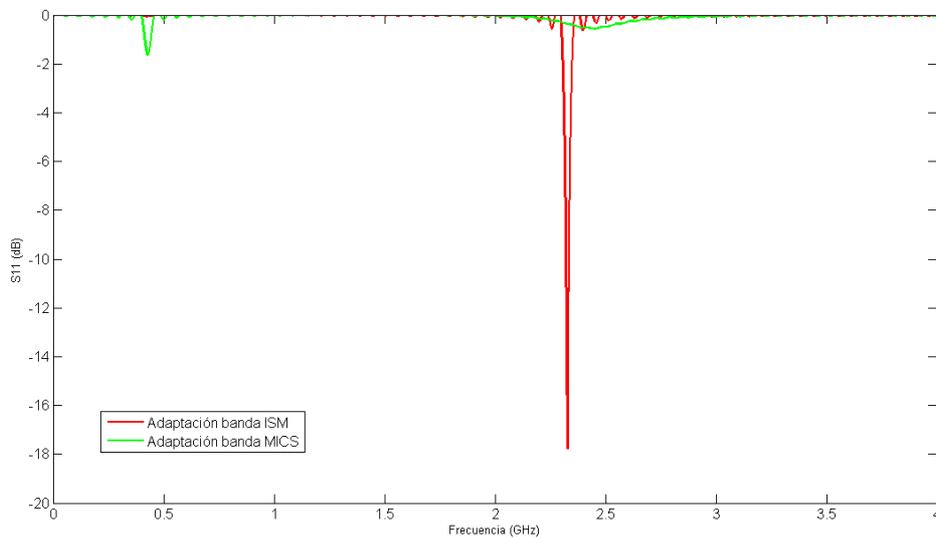
Los resultados reflejan, al igual que en los modelos estudiados previamente, que el valor del puerto modifica en ambas bandas su adaptación de una manera inversa. Es decir, la posición del puerto más pegada al muro metálico mejora considerablemente la adaptación de la banda ISM, mientras que la posición del puerto más pegada al borde mejora la adaptación de la banda MICS.

Tras diversas simulaciones, se obtuvo que la mejor antena de este tipo de modelo con los condensadores reflejados en un ángulo de 45 grados para las especificaciones pedidas era la que tenía las siguientes dimensiones:

- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño de 23 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño de 11.5 mm.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del sustrato. Valor de 10 (Arlon 1000)
- Parámetro **h1**: Espesor del sustrato dieléctrico. Tamaño de 2.54 mm.

- Parámetro  $R_{in}$ : Tamaño de 6.5 mm.
- Parámetro  $R_{out}$ : Tamaño de 11 mm.
- Parámetro  $D_{io}$ : Tamaño de 0.5 mm.
- Parámetro  $S_{io}$ : Tamaño de 4 mm.
- Condensador  $C$ : Valor del condensador 68 pF
- Ángulo **angulo**: Valor del ángulo de la colocación de los condensadores. 45 grados.

Los resultados de esta antena se pueden encontrar en la figura 43, para los dos valores óptimos de adaptación para la banda ISM y MICS (ya que estos valores óptimos están invertidos según la posición del puerto).



**Figura 43:** Parámetro  $S_{11}$  para las mejores adaptaciones de las bandas ISM y MICS.

Como puede observarse en la figura 43 las frecuencias de trabajo son de 433MHz y 2.33 GHz aproximadamente, es decir muy cercanas a las bandas MICS e ISM. El tamaño de la antena es aceptable, ya que no supera los 23x11.5 mm. Pero nuevamente el problema se encuentra en las adaptaciones. La adaptación de la banda del modo fundamental sí consigue un valor adecuado de hasta -18 dB, pero la adaptación del modo réplica no supera los -2 dB en la mejor de las simulaciones.

Por tanto, tras este estudio de antena básica PIFA cargada con condensadores podemos concluir que mejora las prestaciones del modelo anterior (un único condensador centrado).

### *3.2.3. Introducción de dos condensadores reflejados en huecos del semicírculo.*

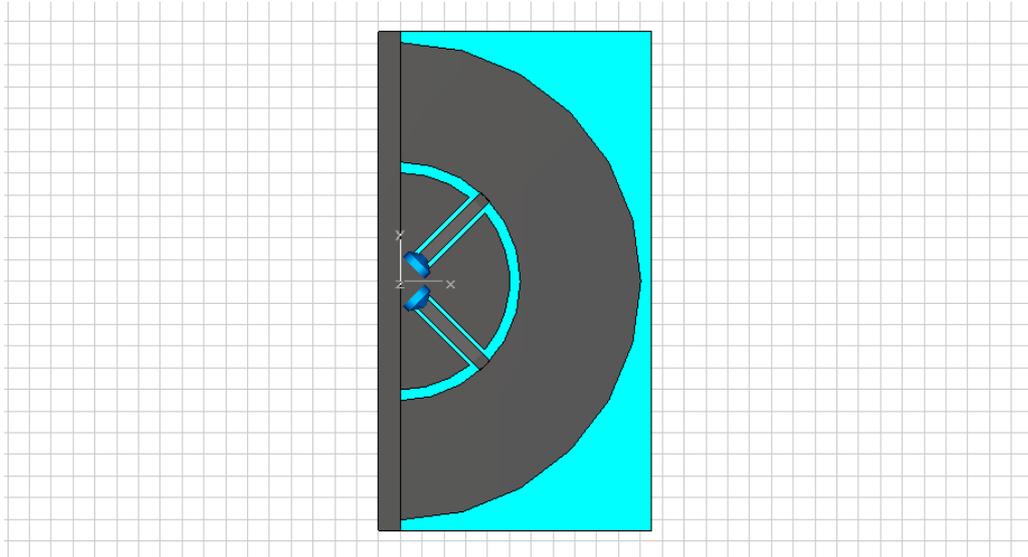
Hasta este punto se ha conseguido diseñar una antena que cubre todas las especificaciones previas del proyecto salvo una de ellas, que es la adaptación de la frecuencia de trabajo en la banda MICS. El resto de requisitos, a saber, frecuencias de trabajo en las bandas MICS e ISM, tamaño reducido del diseño y adaptación de la frecuencia de la banda ISM se han logrado con los modelos de antenas propuestos anteriormente. Por lo tanto, se necesita una nueva característica en el diseño que proporcione el cumplimiento de la especificación que falta sin altera en la medida de lo posible lo conseguido anteriormente.

Por ello, después de revisar los modelos anteriores, surgió la idea de jugar con el balanceo de las adaptaciones de ambos modos. Si bien la adaptación del modo fundamental en la banda ISM se conseguía con mayor facilidad que la adaptación del modo réplica, se pensó en tratar de fijar la colocación del puerto lo más cercano posible al borde del parche semicircular para que la adaptación de la banda MICS siempre fuera la óptima. Fijando este parámetro, era necesario que la adaptación de la banda ISM no descendiera demasiado, y esto se conseguía si el puerto se colocaba lo más cercano al muro metálico. Como consecuencia, la idea que surgió fue la de acercar lo máximo posible los condensadores al muro metálico gracias a unos huecos en el parche semicircular. De esta manera la adaptación de la banda ISM podría no verse alterada en exceso.

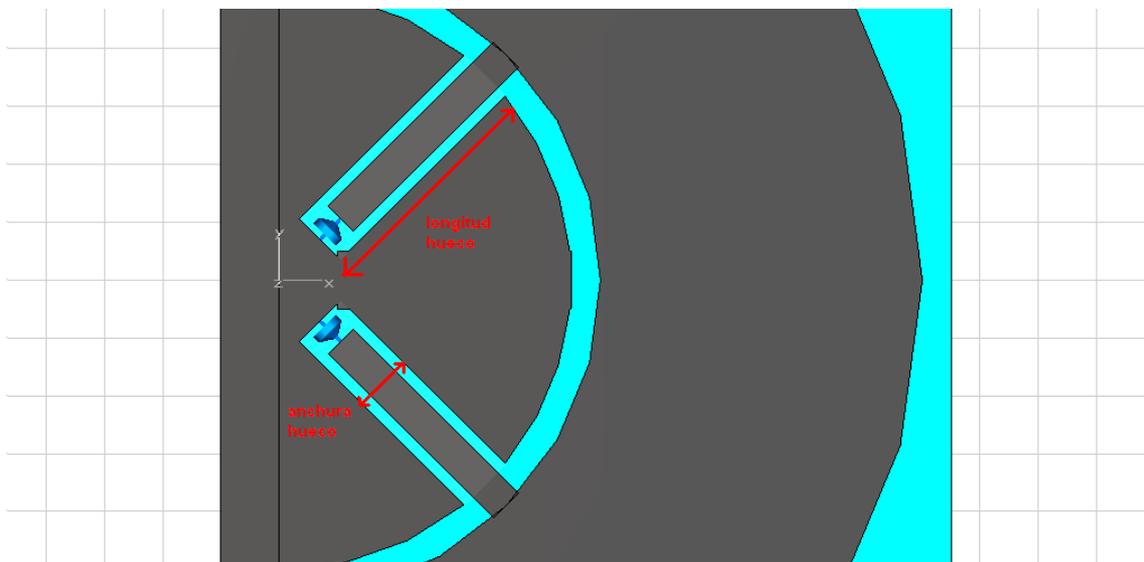
Para estudiar el efecto de la colocación de los condensadores se usó la configuración mostrada en las figuras 44 y 45 para la antena, básicamente el mismo que el utilizado en el punto anterior con una ligera variación en el radio del parche semicircular y en la anchura del semianillo simplemente para ajustar más las frecuencias de trabajo a las bandas MICS e ISM, en el que se introdujo un nuevo parámetro que es la longitud del hueco. Las dimensiones de este modelo se encuentran continuación.

- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño de 23 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño de 11.5 mm.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del sustrato. Valor de 10 (Arlon 1000)
- Parámetro **h1**: Espesor del sustrato dieléctrico. Tamaño de 2.54 mm.
- Parámetro **R<sub>in</sub>**: Tamaño de 5 mm.
- Parámetro **R<sub>out</sub>**: Tamaño de 11 mm.
- Parámetro **D<sub>io</sub>**: Tamaño de 0.5 mm.

- Parámetro  $S_{i0}$ : Tamaño de 5.5 mm.
- Condensador C: Valor del condensador 68 pF
- Ángulo **angulo**: Valor del ángulo de la colocación de los condensadores. 45 grados.



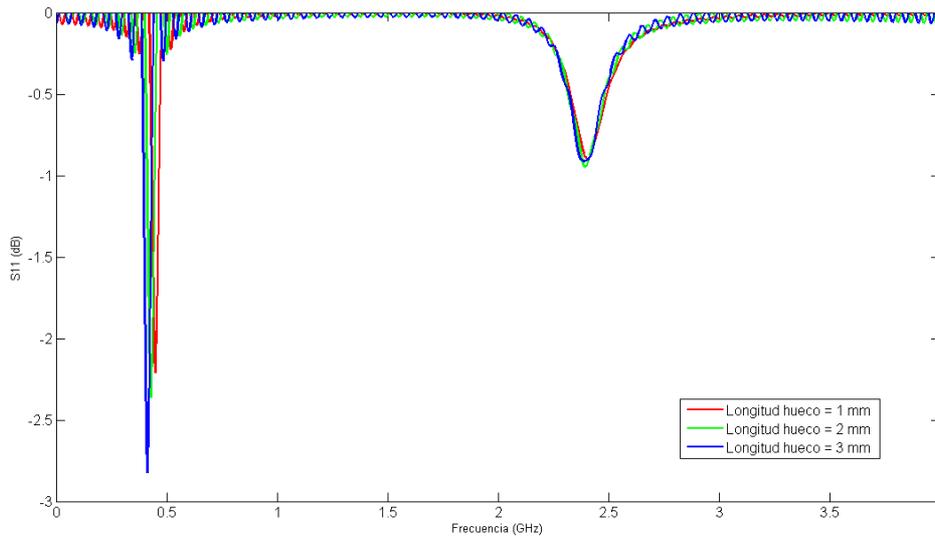
**Figura 44:** Esquema de antena PIFA con huecos para los condensadores.



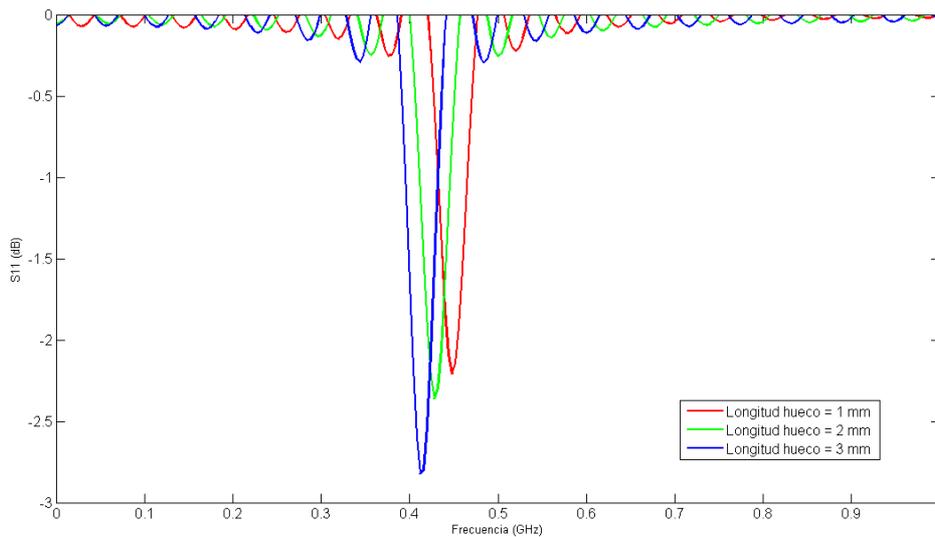
**Figura 45:** Detalle de los huecos de la antena PIFA.

Para estudiar el efecto de la longitud del hueco se realizaron 3 simulaciones variando esta longitud. En cuanto a la anchura del hueco se utilizó 1 mm para poder introducir los condensadores según las especificaciones de los condensadores que se pueden encontrar en el Anexo 1.

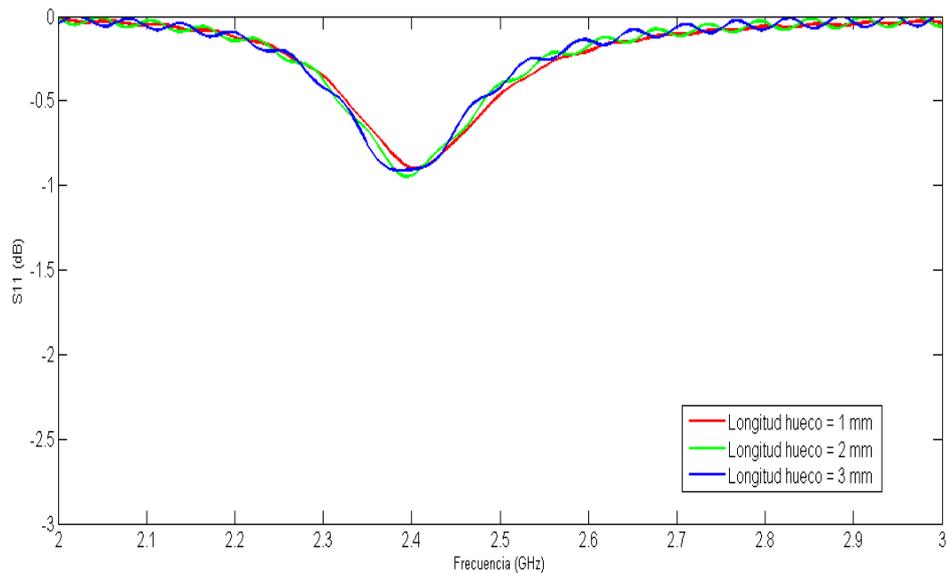
Los resultados se encuentran en la gráfica 46, y más en detalle para la banda MICS en la figura 47 y para la banda ISM en la figura 48.



**Figura 46:** Parámetro  $S_{11}$  modificando la longitud del hueco en mm.



**Figura 47:** Parámetro  $S_{11}$  modificando la longitud del hueco (detalle banda MICS).



**Figura 48:** Parámetro  $S_{11}$  modificando la longitud del hueco (detalle banda ISM).

Como puede apreciarse, cuanto mayor es el valor del hueco, es decir, cuanto más se aproximan los condensadores al muro metálico, la adaptación de la frecuencia de la banda MICS mejora además de reducir esta frecuencia. En cambio ni la adaptación ni la frecuencia de trabajo del modo fundamental se ven alteradas. De esta manera, incluyendo un hueco por el que aproximar los condensadores al muro de carga, se puede conseguir el último requisito que faltaba por cumplir, y por lo tanto se puede adaptar la frecuencia del modo réplica hasta los valores requeridos.

Como mejora a este modelo, también se estudió cómo afectaba la variación del ángulo, pero para ángulos grandes y pequeños las dimensiones de los parches y huecos no permitían un estudio correcto. Para los ángulos grandes, cercanos a 90 grados, la medida de los huecos y los condensadores tocaban el muro metálico, y para ángulos cercanos a 15 grados, los huecos y los condensadores se tocaban entre ellos. Por lo que la idea de mejora fue colocar el hueco directamente paralelo al muro metálico, de esta manera los condensadores podían acercarse al muro sin tocarle y aproximarse al centro del parche lo máximo posible sin que los huecos lo impidieran.

### *3.3. Resumen del proceso y presentación del diseño final*

Después de los estudios de los distintos modelos presentados, procedemos a realizar un resumen de los pasos llevados a cabo para conseguir las especificaciones de la antena que se quería diseñar.

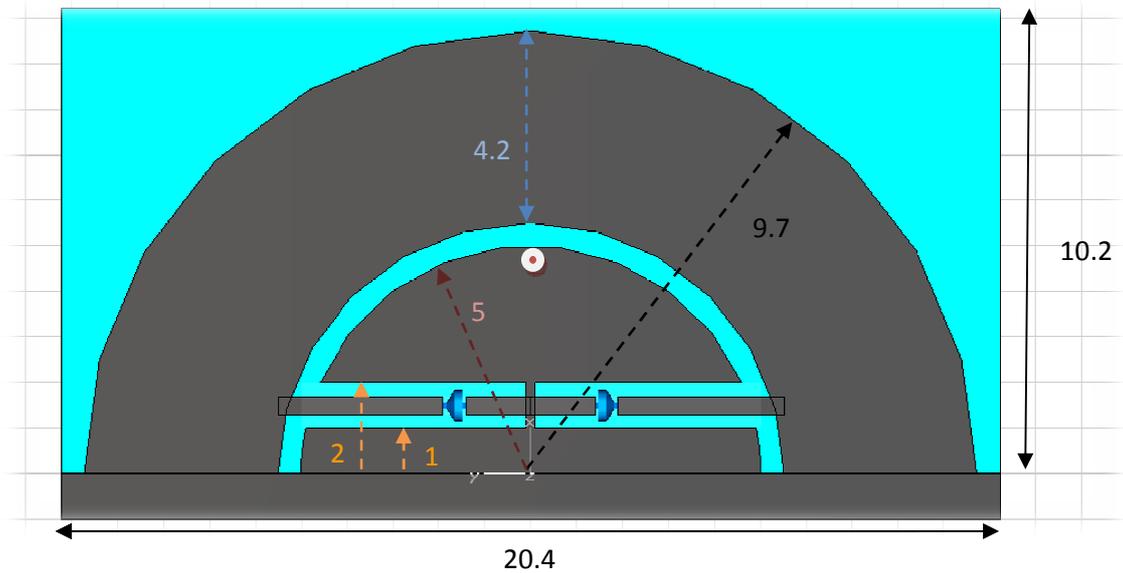
1. El proceso se inició con un antena básica PIFA con una parche semicircular que nos fijaba la frecuencia de trabajo en la banda ISM con una buena adaptación.
2. Era necesario que la antena tuviera otra frecuencia de trabajo para la banda MICS, por lo que se cargó la antena PIFA con un semianillo metálico que excitaba un modo réplica del modo fundamental. De esta manera se conseguía introducir una nueva frecuencia de trabajo pero no se conseguía bajarla hasta la banda MICS.
3. Se introdujo un condensador centrado entre los parches con el objetivo de conseguir cubrir la banda MICS con la frecuencia de trabajo del modo réplica. Las adaptaciones de ambas frecuencias no eran aceptables y el tamaño era excesivamente grande.
4. Se necesitaba mejorar las adaptaciones de ambas frecuencias, por lo tanto se buscó un diseño con condensadores reflejados. Se consiguió adaptar la frecuencia para la banda ISM, pero la frecuencia para la banda MICS seguía sin conseguir adaptaciones mínimas aceptables (aproximadamente -10dB).
5. El único requisito que faltaba para conseguir la antena que se nos había propuesto era la adaptación de la frecuencia de la banda MICS. El hecho de introducir huecos en el parche semicircular para acercar los condensadores al muro metálico propició la adaptación buscada manteniendo el resto de especificaciones.

Como resultado y después de muchas simulaciones buscando mejorar el tamaño y las adaptaciones, las dimensiones de la antena para el diseño final fueron las siguientes:

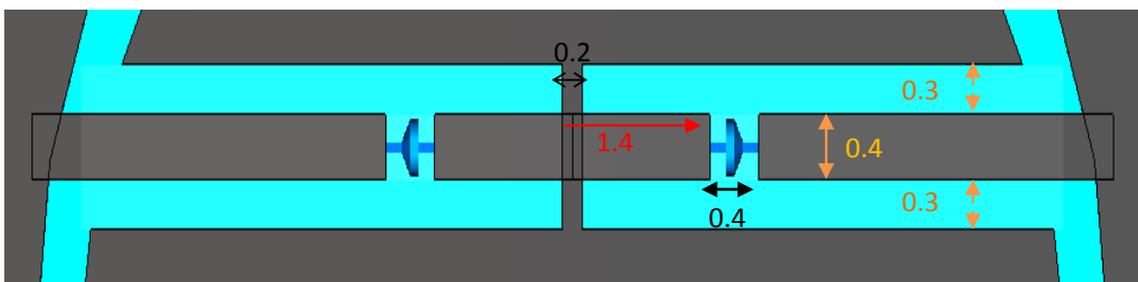
- Parámetro **L**: Valor de la longitud de la antena. Tamaño de 20,4 mm.
- Parámetro **W**: Valor de la anchura de la antena. Tamaño de 11.2 mm.
- Parámetro **dieléctrico**: Valor de la constante dieléctrica del sustrato. Valor de 10 (Arlon 1000)

- Parámetro **h<sub>1</sub>**: Espesor del sustrato dieléctrico. Tamaño de 2.54 mm.
- Parámetro **R<sub>in</sub>**: Tamaño de 5 mm.
- Parámetro **R<sub>out</sub>**: Tamaño de 9.7 mm.
- Parámetro **D<sub>io</sub>**: Tamaño de 0.5 mm.
- Parámetro **S<sub>io</sub>**: Tamaño de 4.2 mm.
- Condensador **C**: Valor del condensador 33 pF.

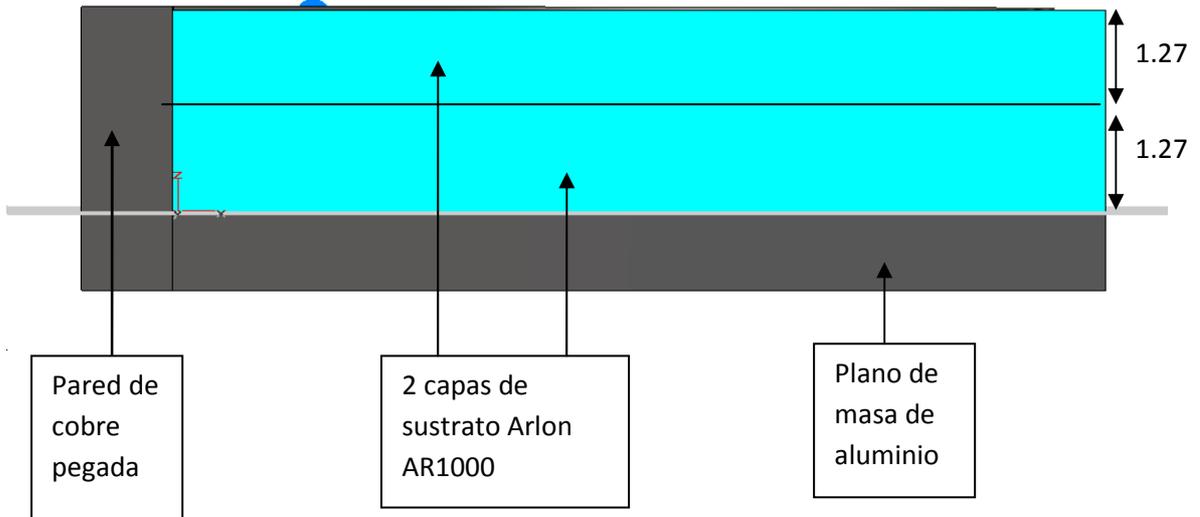
En la figura 49 se ilustra el diseño final acotado en mm. Las dimensiones de los huecos están descritas en la figura 50. Estas dimensiones vienen especificadas por el tipo de condensador utilizado. En concreto, los condensadores corresponden al modelo Phycomp 0402 NPO 50V cuya hoja de características se encuentra en el Anexo 1. El perfil de la antena se ve en la figura 51.



**Figura 49:** Diseño final de la antena acotado en mm.

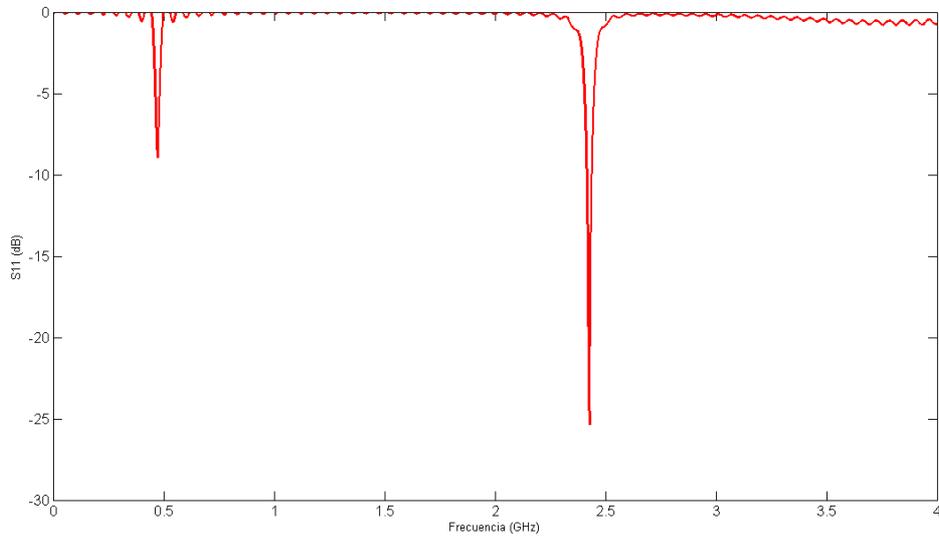


**Figura 50:** Detalle de los huecos del diseño final acotado en mm.



**Figura 51:** Perfil del diseño final de la antena acotado en mm.

Finalmente, el resultado de la simulación de esta antena se ilustra en la figura 52, en la que se representa una banda correctamente adaptada para la banda ISM y MICS.



**Figura 52:** Parámetro  $S_{11}$  para el modelo final.



## Capítulo 4.

# Modelos de Cuerpo Humano, fabricación y medidas

---

En este capítulo estudiaremos las maneras que existen de simular la influencia del cuerpo humano y como afectan al funcionamiento de la antena que fue previamente diseñada, para posteriormente presentar los resultados obtenidos de un prototipo construido en el laboratorio de fabricación del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Carlos III de Madrid.

### *4.1. Modelos de simulación del cuerpo humano*

Para simular la antena desarrollada dentro del cuerpo humano, nos basaremos en las propiedades electromagnéticas de los diferentes tejidos del cuerpo humano, que ya se estudiaron en el Capítulo 1 de este proyecto.

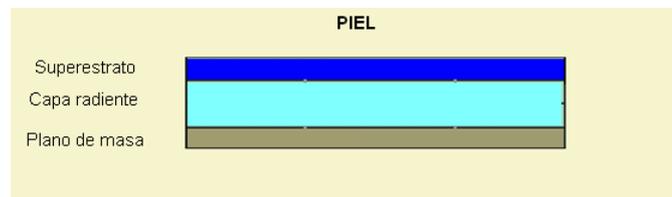
Los dos modelos que se han estudiado y se expondrán a continuación son el modelo de una capa y el modelo de tres capas.

#### 4.1.1. Modelo de una capa

Este modelo es a priori el más sencillo de los dos, ya que consiste en colocar la antena dentro de un bloque compuesto por un material, básicamente piel humana, a las frecuencias que se desean simular. Lo que se hace es cambiar el espacio libre por un material con permitividad relativa mayor y equivalente a la de la piel.

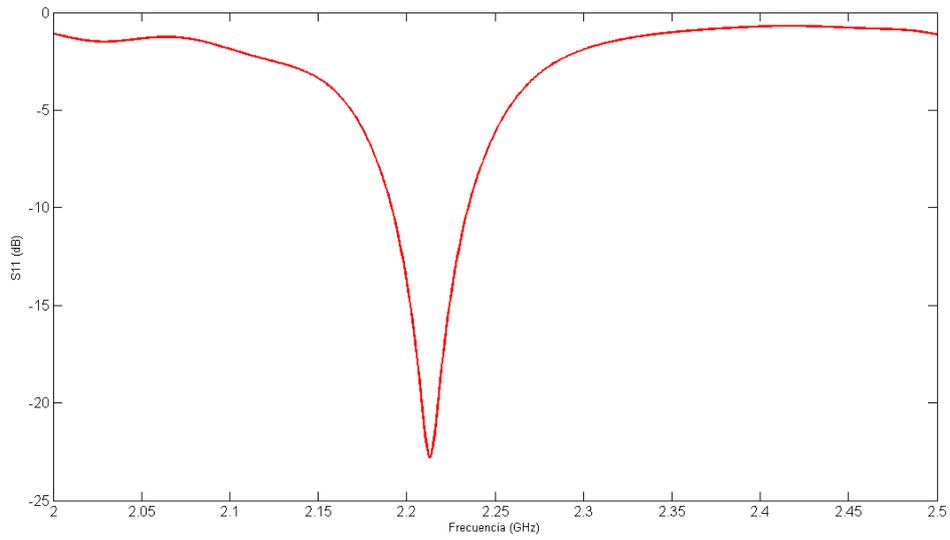
En principio podría pensarse que este modelo es poco preciso, sin embargo debemos aclarar que en la mayoría de los casos de antenas implantables éstas se colocarán en el cuerpo humano de manera subcutánea, es decir, que el material que rodearía a la antena sería una mezcla de músculo, grasa y piel. Según los valores de permitividad calculados en el primer capítulo con la ecuación Cole-Cole es la piel la que tiene unos valores intermedios. Por lo tanto, la piel puede llegar a ser un tejido con una precisión razonable, y por ello ha sido utilizada como una primera aproximación en numerosos trabajos de la literatura [9][10][20].

Una ventaja de este modelo es que su construcción es sencilla y económica, e incluso se han desarrollado geles que simulan la permitividad y conductividad de la piel. Estos geles son de fácil construcción ya que utilizan agua, azúcar, sal y compuestos químicos de fácil acceso [11][17]. En la figura 53 podemos observar el esquema de este modelo.

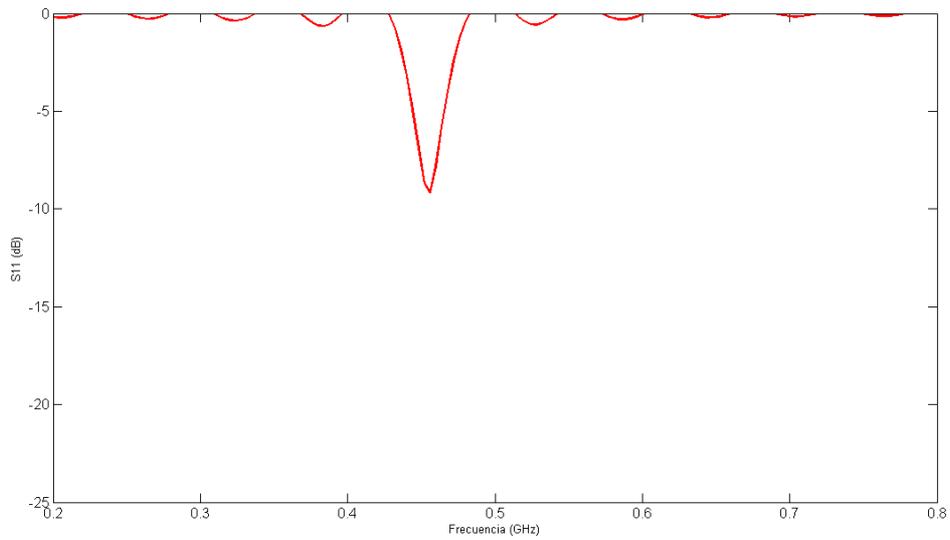


**Figura 53:** Esquema de modelo de una capa del cuerpo humano.

Los resultados de la simulación de la antena final usando este modelo de una capa se encuentran en las figuras 54 y 55 para cada una de las bandas. Estas simulaciones se hacen por separado una de la otra debido a que la permitividad dieléctrica de la piel varía de una frecuencia a otras según se ha estudiado en el Capítulo 1. En nuestro caso hemos usado el modelo Cole-Cole lo que nos proporciona una permitividad de 38 para la banda ISM y de 46 para la banda MICS aproximadamente.



**Figura 54:** Parámetro  $S_{11}$  para la banda ISM usando el modelo de una capa.

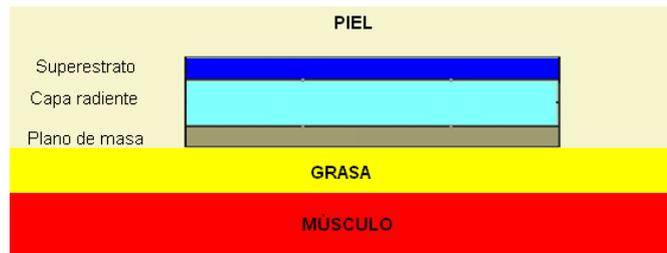


**Figura 55:** Parámetro  $S_{11}$  para la banda MICS usando el modelo de una capa.

Como se puede apreciar tanto el modo fundamental como su réplica pierden poca adaptación y la frecuencia de funcionamiento disminuye.

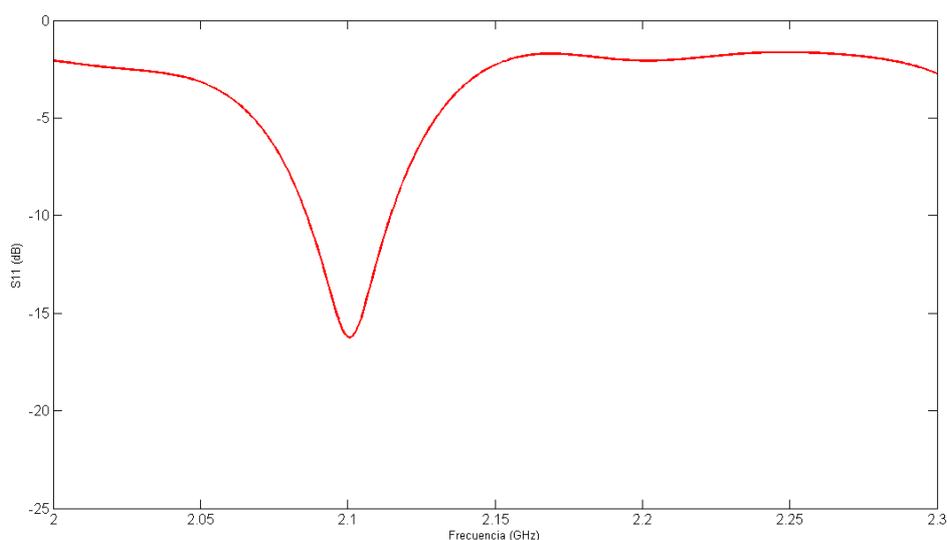
#### 4.1.2. Modelo de tres capas

El modelo de tres capas es muy parecido al anterior y consiste en introducir la antena dentro de un bloque en el que están presentes capas de piel, músculo y grasa. Evidentemente este modelo se parece al de una capa pero es más preciso y riguroso. Como se puede ver en el esquema de la figura 56 la antena se introduce de manera subcutánea, con el músculo como tejido más interno del cuerpo humano y la grasa entre ambas capas.

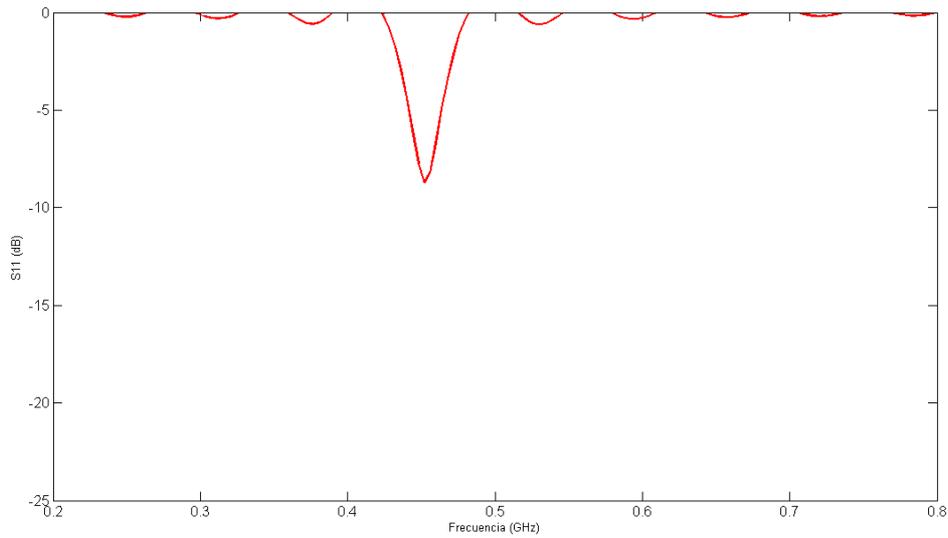


**Figura 56:** Esquema del modelo de tres capas del cuerpo humano.

Al igual que para el modelo de una capa, se han realizado dos simulaciones para cada frecuencia de funcionamiento con la antena final. En el caso de la simulación para la banda ISM se ha utilizado una permitividad para la grasa de 12 y para el músculo de 54, según el modelo de Cole-Cole. En la simulación para la banda MICS la permitividad de la grasa es 13 y la del músculo es 58. Los resultados de ambas simulaciones se pueden observar en las figuras 57 y 58.



**Figura 57:** Parámetro  $S_{11}$  para la banda ISM usando el modelo de tres capas.

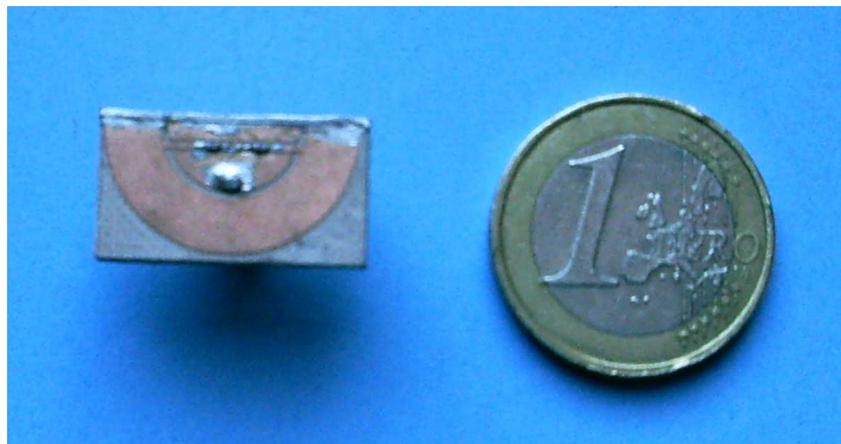


**Figura 58:** Parámetro  $S_{11}$  para la banda MICS usando el modelo de tres capas.

Como puede comprobarse los resultados con ambos modelos de simulación del cuerpo humano son muy parecidos, lo que ya habíamos supuesto cuando presentábamos el modelo de una capa al principio del capítulo.

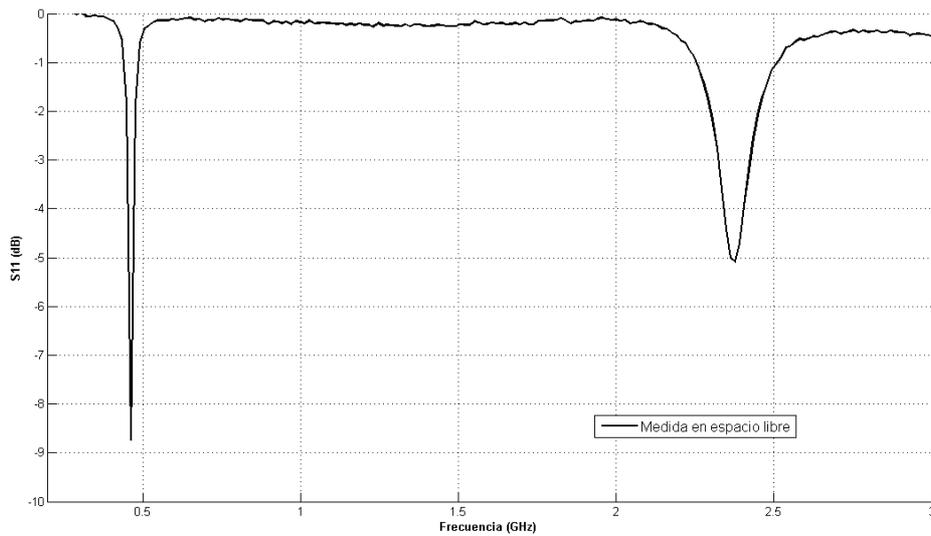
## 4.2. Fabricación y resultados obtenidos

En el Capítulo 3 de este proyecto se presentaba el diseño y la simulación de una antena que se aproximaba a los requisitos de las bandas ISM y MICS. Después de este proceso de simulación se ha procedido a la construcción de un prototipo que es mostrado en la figura 59.

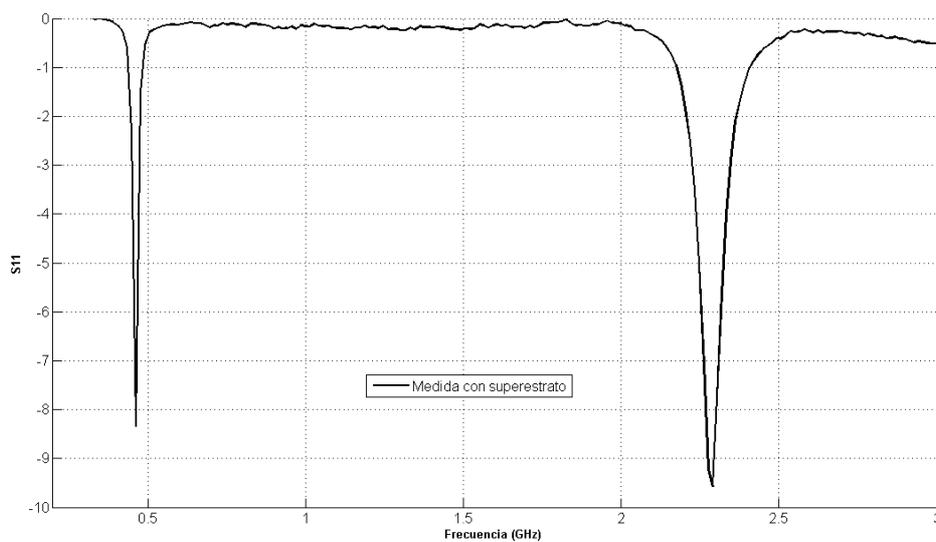


**Figura 59:** Prototipo de la antena desarrollada.

Se han realizado dos pruebas con este prototipo, una en espacio libre y otra con superestrato que recubre la parte radiante de la antenna, que se emplearía para aislar el contacto directo por parte de la antenna con el cuerpo humano o cualquier otro componente del dispositivo biomédico. Los resultados obtenidos de ambas pruebas se muestran en las figuras 60 y 61. En ellas se muestra que las bandas de trabajo se aproximan adecuadamente a las bandas ISM y MICS aunque el nivel de adaptación no se encuentra por debajo de los -10 dB.

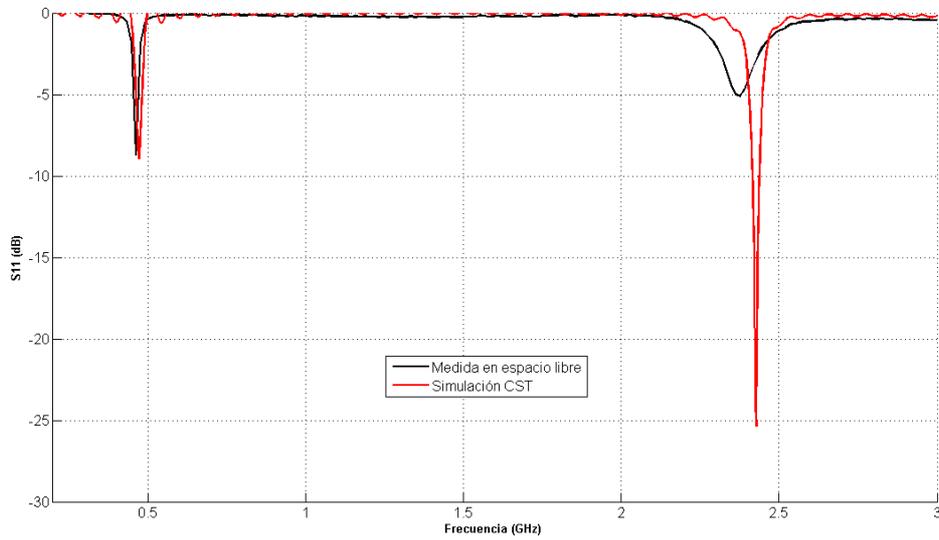


**Figura 60:** Parámetro  $S_{11}$  para el prototipo medido en espacio libre.

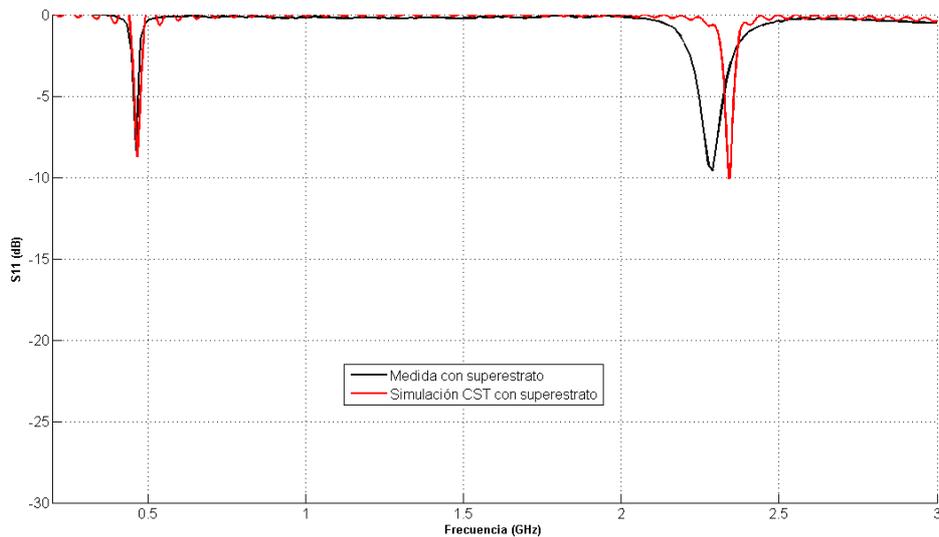


**Figura 61:** Parámetro  $S_{11}$  para el prototipo medido con superestrato.

Si se compara estos resultados con el resultado de la simulación en CST se obtienen las siguientes figuras 62 y 63, con lo que podremos concluir que el simulador ha predicho adecuadamente las bandas de operación, aunque en la banda superior el factor de calidad es ligeramente diferente para la simulación en espacio libre.



**Figura 62:** Comparación resultados medidos y simulados en espacio libre.



**Figura 63:** Comparación resultados medidos y simulados con superestrato.

Por lo tanto y a la vista de estos resultados, se puede concluir que el prototipo muestra un adecuado funcionamiento y se aproxima a las características necesarias para obtener una antena en las bandas ISM y MICS.

## Capítulo 5.

# Conclusiones y líneas futuras de trabajo

---

En este último capítulo se resumirán las conclusiones finales obtenidas del proyecto, además de una pequeña muestra de los trabajos que pueden continuar desarrollándose en este campo y con este modelo de antena viendo los resultados obtenidos en los capítulos previos.

### *5.1. Conclusiones*

A lo largo de este proyecto se han estudiado antenas PIFA básicas y cargadas, así como las modificaciones propuestas hasta conseguir una antena que se amolda a las especificaciones de antenas implantables en las bandas ISM y MICS, presentando ciertas mejoras respecto a otros prototipos expuestos en la literatura [9][10][11][15].

En el Capítulo 1 se veía las propiedades básicas de una antena microstrip, con el fin de justificar su uso para el desarrollo de la antena buscada. También se estudiaban las características dieléctricas de diversos tejidos biológicos y los modelos usados para la obtención de estas características. De esta manera se puede simular a ciertas frecuencias la permitividad de los tejidos donde se implantara la antena y obtener resultados más precisos y

fiables sobre el funcionamiento de la misma. El método más completo para este fin es el modelo Cole-Cole que añadía las múltiples contribuciones debidas a la estructura y composición de los materiales biológicos.

En el segundo de los capítulos, se presentó una antena básica PIFA de parche semicircular y sus conceptos teóricos. Para ver el funcionamiento de la misma se desarrolló un estudio de la influencia de diversos parámetros sobre las frecuencias de trabajo de la antena. De esta manera se demostró que el material dieléctrico, la posición de la alimentación y el radio del parche modificaban estas frecuencias de trabajo. Se estudió además el campo eléctrico y los diagramas de radiación obtenidos, comprobando que el modo propagado era el  $TM_{11}$  y que existía un máximo en el diagrama de radiación en la dirección broadside, ligeramente inclinado por el efecto del muro metálico.

Dentro del Capítulo 3 se realizó la parte de desarrollo de la antena deseada. Para ello se partió de una antena PIFA estudiada en el capítulo previo cargándola con un semianillo metálico para conseguir excitar una nueva frecuencia de trabajo. Esta frecuencia de trabajo es una réplica del modo fundamental. De nuevo se estudió la influencia de los nuevos parámetros añadidos sobre las frecuencias de trabajo, demostrando que la separación entre parches o la anchura del semianillo también modificaban las frecuencias de trabajo y sus adaptaciones. A partir de este punto, la finalidad del estudio fue conseguir alcanzar las especificaciones propuestas para la antena que no se habían conseguido hasta ahora, que eran la bajar la frecuencia de trabajo del modo réplica hasta la banda MICS y reducir el tamaño físico consiguiendo una adecuada adaptación para ambas frecuencias. Para ello se realizaron tres modificaciones que permitieron obtener los objetivos buscados.

La primera de las variaciones consistía en añadir un condensador centrado entre los parches. De esta manera se alcanzaba la banda MICS. Posteriormente el condensador centrado era sustituido por dos condensadores reflejados de igual valor, consiguiendo una buena adaptación para la banda ISM. La tercera y última variación fue introducir los condensadores en huecos del parche semicircular para que éstos se aproximaran al muro metálico obteniendo las dos bandas adecuadamente adaptadas.

El resultado fue una antena cuyo tamaño (anchura x longitud) era un 85% más reducido que el propuesto por [9], un 55% que el propuesto por [10] y casi un 60% más reducido que el propuesto por [11]. Este último caso es aún más significativo que los otros dos ya que también proponía un diseño de antena de doble banda.

Finalmente en el Capítulo 4 se comprobó el correcto funcionamiento de la antena en medidas con un prototipo. Las medidas mostraron una reducción del nivel de adaptación de la frecuencia de trabajo en la banda ISM y MICS con respecto a la simulación, aunque las bandas de operación fueron debidamente estimadas.

## *5.2. Futuros trabajos*

Las líneas de trabajo que pueden desarrollarse continuando o tomando como punto de partida este proyecto son las siguientes.

- Mejora de la adaptación de ambas frecuencias de trabajo mediante un nuevo proceso de simulación y medida a través de las diferencias y conclusiones obtenidas para el primer prototipo.
- Realizar medidas de eficiencia de radiación de las antenas, sobre todo en banda MICS para corroborar el funcionamiento y la eficiencia de la antena en dicha banda.
- Diseño y comparación de la misma geometría de antena haciendo uso de bobinas en paralelo en vez de condensadores en serie.
- Estudio del funcionamiento de la antena usando sustratos de tipo cerámico con mayor permitividad que el ARLON1000, lo que podría reducir aún más el tamaño de la misma.
- Medida y rediseño de la antena en geles que emulen las propiedades de la piel humana, para una adecuación mayor de las propiedades de la antena al dispositivo final.
- Comparación de los resultados con otros modelos de cuerpo humano más sofisticados como el modelo Voxel Man [18].



# Bibliografía

---

- [1] G.A. Deschamps. *Microstrip microwave antennas*. Third USAF symposium on antennas, 1953.
- [2] R. E. Munson. *Conformed microstrip antennas microstrip phased arrays*. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol.22, pag: 74-78, 1974.
- [3] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley Interscience, 2005.
- [4] M. Ferrando y A. Valero, *Apuntes de antenas*. Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- [5] R. B. Waterhouse. *Microstrip patch antennas. A designer's guide*. Kluwer Academic Publishers Boston, 2003.
- [6] C.Martin-Pascual, E. Rajo-Iglesias and V. González-Posadas, *Patches: The most versatile radiator?*, presentado en IASTED Int. Conf. Advanced in Communications, 2001.
- [7] R. Garg, P. Barthia, I. Bahl and A. Ittipoboon. *Microstrip antenna design handbook*. Artech house publishers, 2001.
- [8] Continua Health Alliance, *Connecting technology and people for healthier living. Overview Presentation. 2007*
- [9] J. Kim, Y. Rahmat-Samii. *Implanted Antennas Inside a Human Body: Simulations, Designs and Characterizations*. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Agosto 2004.

- [10] P. Soontornpipit, C. Furse, and Y. C. Chung, *Design of implantable microstrip antenna for communication with medical implants*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 52, pag: 1944-1951, Agosto 2004.
- [11] T. Karacolak, A. Hood, and E. Topsakal, *Design of a dual-band implantable antenna and development of skin mimicking gels for continuous glucose monitoring*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 56, pag: 1001-1008, Abril 2008.
- [12] Foster K R and Schwan H P, *Dielectric properties of tissues and biological materials: A critical review*. Crit. Rev. Biomed. Eng. Vol. 17, pag: 25-104. 1989
- [13] W.D. Hurt *Multiterm Debye dispersion relations for permittivity of muscle*. IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol.32. 1985
- [14] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, *The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues*. Phys. Med. Biol., vol. 41, pag: 2271-2293, 1996.
- [15] O. Quevedo-Teruel, E. Pucci and E. Rajo-Iglesias. *Compact Loaded PIFA for Multifrequency Applications*. IEEE Transactions on antennas and propagation. Vol 58. Marzo 2010.
- [16] A. Fernández-Herrera. *Estudio y eliminación del acoplo mutuo entre antenas de parche basadas en modos CRLH*. Proyecto Fin de Carrera Universidad Carlos III de Madrid. Mayo 2009
- [17] T. Yilmaz, T. Karacolak, and E. Topsakal, *Characterization and testing of a skin mimicking material for implantable antennas operation at ISM band (2.4GHz- 2,48GHz)*, IEEE Antennas and Wireless propagation letters, vol. 7, pag: 418-420, 2008.
- [18] F. B. Sachse, C. D. Werner, K. Meyer-Waarden, and O. Dossel, *Development of a human body model for numerical calculation of electrical*. Institute of Biomedical Engineering, University of Karlsruhe, 1999.
- [19] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, *The dielectric properties of biological tissues: II. Measurement in the frequency range 10 Hz to 20 GHz*. Phys. Med. Biol., vol 41 pag: 2251-2269, 1996.
- [20] C.J. Sánchez-Fernández, O. Quevedo-Teruel, J. Requena-Carrión, L. Inclán-Sánchez, E. Rajo-Iglesias, *Dual-band microstrip patch antenna based on short-circuited ring and spiral resonators for implantable medical devices*. Microwaves, Antennas & Propagación, IET. Vol: 4 pag: 1048-1055. Agosto 2010.





# Anexo I

## Hoja de características de los materiales usados

---

En este anexo se pueden encontrar las hojas de características de los materiales y componentes usados para la construcción de la antena:

- Material dieléctrico Arlon AR1000
- Condensadores Phycomp 0402 NPO 50V

## Surface-mount ceramic multilayer capacitors

## Class 1, NP0 50/100/200/500 V Noble Metal Electrode

### FEATURES

- Six standard sizes
- High capacitance per unit volume
- Supplied in tape on reel or in bulk case (case sizes 0402, 0603 and 0805 only)
- For high frequency applications
- NiSn terminations.

### APPLICATIONS

- Consumer electronics
- Telecommunications
- Automotive
- Data processing.

### DESCRIPTION

The capacitor consists of a rectangular block of ceramic dielectric in which a number of interleaved precious metal electrodes are contained. This structure gives rise to a high capacitance per unit volume.

The inner electrodes are connected to the two terminations, either by silver palladium (AgPd) alloy, or silver dipped with a barrier layer of plated nickel and finally covered with a layer of plated tin (NiSn). A cross section of the structure is shown in Fig.1.

### QUICK REFERENCE DATA

DESCRIPTION	VALUE
Rated voltage $U_R$ (DC)	50 V, 100 V, 200 V and 500 V (IEC)
Capacitance range (E12 series); note 1: 50 V; note 2 100 V 200 V 500 V	0.47 pF to 22 nF 10 pF to 22 nF 10 pF to 5.6 nF 10 pF to 3.3 nF
Tolerance on capacitance: $C \geq 10$ pF $C < 10$ pF	$\pm 5\%$ ; $\pm 2\%$ $\pm 0.5$ pF; $\pm 0.25$ pF
Test voltage (DC) for 1 minute: 50 V and 100 V 200 V 500 V	$2.5 \times U_R$ $3 \times U_R$ $2 \times U_R$
Sectional specifications	IEC 60384-10, second edition 1989-04; also based on CECC 32 100
Detailed specification	based on CECC 32 101-801
Climatic category (IEC 60068)	55/125/56

### Notes

1. Other values below 10 pF and non E12 series are available on request.
2. Also applicable for applications up to 63 V.

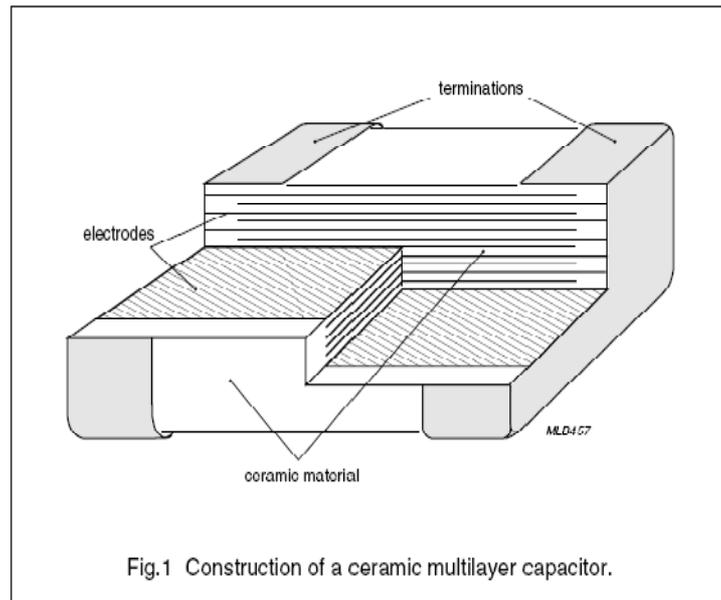
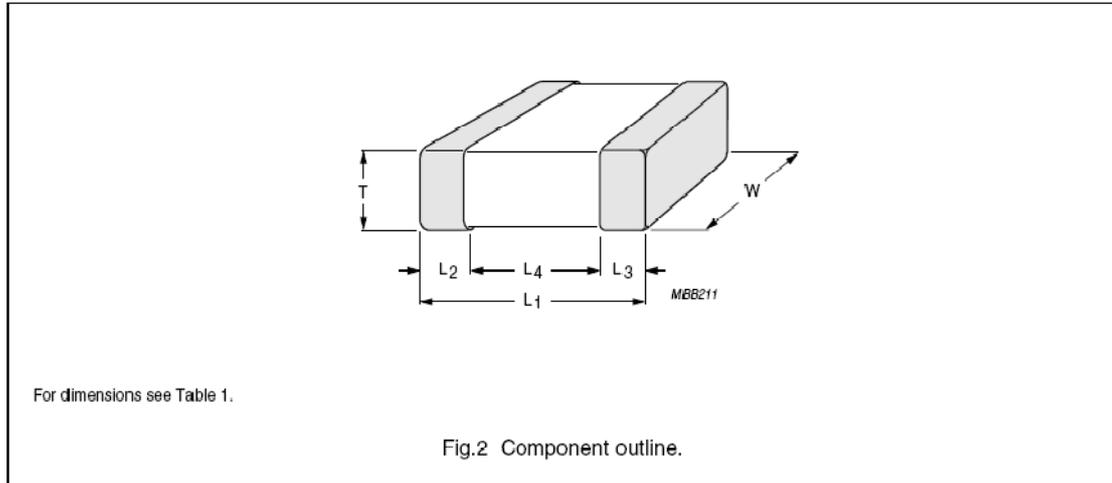


Fig.1 Construction of a ceramic multilayer capacitor.

Surface-mount ceramic  
multilayer capacitors

Class 1, NP0 50/100/200/500 V  
Noble Metal Electrode

MECHANICAL DATA



Physical dimensions

Table 1 Capacitor dimensions

CASE SIZE	L <sub>1</sub>	W	T		L <sub>2</sub> and L <sub>3</sub>		L <sub>4</sub> MIN.
			MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
<b>Dimensions in millimetres</b>							
0402	1.0 ±0.05	0.5 ±0.05	0.45	0.55	0.20	0.30	0.40
0603	1.6 ±0.10	0.8 ±0.07	0.73	0.87	0.25	0.65	0.40
0805	2.0 ±0.10	1.25 ±0.10	0.50	1.35	0.25	0.75	0.55
1206	3.2 ±0.15	1.6 ±0.15	0.50	1.75	0.25	0.75	1.40
1210	3.2 ±0.20	2.5 ±0.20	0.50	1.80	0.25	0.75	1.40
1812	4.5 ±0.20	3.2 ±0.20	0.50	1.80	0.25	0.75	2.20
<b>Dimensions in inches</b>							
0402	0.040 ±0.002	0.020 ±0.002	0.018	0.022	0.008	0.012	0.016
0603	0.063 ±0.004	0.032 ±0.003	0.029	0.035	0.010	0.026	0.016
0805	0.079 ±0.004	0.049 ±0.004	0.020	0.053	0.010	0.030	0.022
1206	0.126 ±0.006	0.063 ±0.006	0.020	0.069	0.010	0.030	0.056
1210	0.126 ±0.008	0.098 ±0.008	0.020	0.072	0.010	0.030	0.056
1812	0.177 ±0.008	0.126 ±0.008	0.020	0.072	0.010	0.030	0.088

# **AR1000™ and AR600™**

## **Microwave Materials**

### **PTFE/Woven Fiberglass/Ceramic Filled High $E_r$ Laminates**

Arlon's AR1000 and AR600 are woven fiberglass, reinforced ceramic filled PTFE based composite materials for use as printed circuit board substrates.

The higher dielectric constants of AR1000 and AR600 permit various degrees of circuit miniaturization, especially for power amplifiers, filters, couplers and other components that use low impedance lines.

AR1000 and AR600 are "soft substrates" and are relatively insensitive to vibrational stress. This allows miniaturized circuitry without requiring the complicated processing or fragile handling associated with brittle pure ceramic materials.

AR1000 and AR600 are compatible with the processing used for standard PTFE based printed circuit board substrates. In addition, the low Z-axis thermal expansion provided by the ceramic loading will improve plated through hole reliability compared to typical PTFE based laminates.

#### **Features**

- Ceramic Filled High  $E_r$
- High Thermal Conductivity
- Large Panel Size vs. Ceramic

#### **Benefits**

- Circuit Miniaturization
- Heat Dissipation and Management
- Cost Effective Volume Manufacture of Components

#### **Availability:**

AR1000 and AR600 laminates are available in a range of thicknesses from 0.005" to 0.125" and are supplied with 1/2, 1 or 2 ounce electrodeposited copper on both sides. Other copper weights and rolled copper foil are available. AR1000 and AR600 are available bonded to heavy metal ground planes. Aluminum, brass or copper plates also provide an integral heat sink and mechanical support to the substrate. Other combinations of thickness and cladding may be available. Contact Arlon with any requests for non-standard materials.

When ordering AR1000 or AR600 products, please specify thickness, cladding, panel size, and any other special considerations. Available master sheet sizes include 36" x 48" and 36" x 72".



**MATERIALS FOR ELECTRONICS**

## Typical Properties: AR1000™ and AR600™ PTFE/Woven Fiberglass/Ceramic Filled Laminates

Properties	Test Method	Condition	Typical Values AR1000	Typical Values AR600
Dielectric Constant @10GHz	IPC TM-650 2.5.5.6	C23/50	10.0*	6.0*
Dissipation Factor @10GHz	IPC TM-650 2.5.5.6	C23/50	0.003	0.0035
Thermal Coefficient of E <sub>r</sub> (ppm/°C)	IPC TM-650 2.5.5.5 Adapted	-10°C to +140°C	-233	-325
Peel Strength (lbs per inch)	IPC TM-650 2.4.8	After Thermal Stress	5	6
Volume Resistivity (MΩ-cm)	IPC TM-650 2.5.17.1	C96/35/90	1.4 x 10 <sup>9</sup>	1.5 x 10 <sup>12</sup>
Surface Resistivity (MΩ)	IPC TM-650 2.5.17.1	C96/35/90	1.8 x 10 <sup>9</sup>	3.8 x 10 <sup>9</sup>
Arc Resistance (seconds)	ASTM D-495	D48/50	> 180	> 180
Tensile Modulus (kpsi) (x,y)	ASTM D-638	A, 23°C	830, 680	700, 500
Tensile Strength (kpsi) (x,y)	ASTM D-882	A, 23°C	5.1, 4.3	8.3, 7.0
Compressive Modulus (kpsi)	ASTM D-695	A, 23°C	450	225
Flexural Modulus (kpsi)	ASTM D-790	A, 23°C	615	375
Dielectric Breakdown (kv)	ASTM D-149	D48/50	> 45	> 45
Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D-792 Method A	A, 23°C	2.84	2.45
Water Absorption (%)	MIL-S-13949H 3.7.7 IPC TM 650 2.6.2.2	E1/105 + D24/23	0.08	0.08
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/°C) X Axis Y Axis Z Axis	IPC TM-650 2.4.24 TMA	0°C to 100°C	14 16 37	12 14 62
Thermal Conductivity (W/mk)	ASTM E-1225	100°C	0.645	0.431
Outgassing Total Mass Loss (%) Collected Volatile Condensable Material (%) Water Vapor Regain (%) Visible Condensate (±)	NASA SP-R-0022A Maximum 1.00% Maximum 0.10%	125°C, ≤ 10 <sup>-6</sup> torr	0.02 0.00 0.00 NO	- - - -
Flammability	UL 94 Vertical Burn IPC TM-650 2.3.10	C48/23/50, E24/125	Meets requirements of UL94V-0	Meets requirements of UL94V-0

Data based on 0.062" dielectric thickness, exclusive of metal cladding except where indicated by test method. Results listed above are typical properties; they are not to be used as specification limits. The above information creates no expressed or implied warranties. The properties of AR600 and AR1000 laminates may vary depending on the application.

\* Dielectric constants of AR1000 and AR600 vary with thickness. Check with Arlon for the E<sub>r</sub> of the particular thickness you are using.

The information and data contained herein are believed reliable, but all recommendations or suggestions are made without guarantee. You should thoroughly and independently test materials for any planned applications and determine satisfactory performance before commercialization. Furthermore, no suggestion for use, or material supplied shall be construed as a recommendation or inducement to violate any law or infringe any patent.

## **ARLON** MATERIALS FOR ELECTRONICS

9433 Hyssop Drive, Rancho Cucamonga, CA 91730 • Telephone: (909) 987-9533 • Fax: (909) 987-8541  
 1100 Governor Lea Road, Bear, DE 19701 • Telephone: (302) 834-2100, (800) 635-9333 • Fax: (302) 834-2574  
 37 Rue Collange, 92300 LeVallois, Perret, France • Telephone: (33) 1-427-02642 • Fax: (33) 1-427-02798  
 44 Wilby Avenue, Little Lever, Bolton, Lancashire, B1.31.0E, UK • Telephone: (44) 120-457-6068 • Fax: (44) 120-457-9615  
 No. 8 Hong Gu Road, Shanghai, China 200363 • Telephone/Fax: (86) 216-2090-202  
 Website: www.arlon-med.com

<b>Arlon is an ISO 9001:2000 Registered Company</b>
---

1003-R5 Copyright © 2000 Arlon Materials for Electronics Printed in U.S.A.

