

**Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica
de Telecomunicació La Salle**

Treball Final de Màster

Màster Universitari en Enginyeria de Telecomunicació

**Diseño de antenas parche microstrip y
monopolo con agua como elemento radiante**

Alumne

Jordi Eduard Miró Coin

Professors Ponents

Dr. Jaume Anguera Pros

Dr. Joan L. Pijoan

Dra. Aurora Andújar Linares

ACTA DE L'EXAMEN DEL TREBALL FI DE MASTER

Reunit el Tribunal qualificador en el dia de la data, l'alumne

Jordi Eduard Miró Coin

va exposar el seu Treball de Fi de Màster, el qual va tractar sobre el tema següent:

Diseño de antenas parche microstrip y monopolo con agua como elemento radiante

Acabada l'exposició i contestades per part de l'alumne les objeccions formulades pels Srs. membres del tribunal, aquest valorà l'esmentat Treball amb la qualificació de

Barcelona,

VOCAL DEL TRIBUNAL

VOCAL DEL TRIBUNAL

PRESIDENT DEL TRIBUNAL

Resumen

En las últimas décadas han surgido estudios para mimetizar y reducir los tamaños de las antenas. En el presente proyecto final de máster se pretende seguir con una línea de proyecto anterior para trabajar con antenas microstrip, cuyo parche radiante y plano de masa está constituido íntegramente de agua, así como antenas monopolo con plana de masa constituido íntegramente con el mismo material. A diferencia de las antenas de telefonía móvil, que enfundan las antenas mimetizándolas como si fueran chimeneas o incluso arropándolas como si fueran árboles, el Proyecto Final de Máster (PFM) propone el diseño y fabricación de antenas microstrip transparentes fabricadas a partir de agua trabajando en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical – 2.4 a 2.5 GHz, 5GHz, 0.9 GHz -).

Las antenas *microstrip* de agua implementadas en el proyecto están diseñadas para ser utilizadas para tecnologías IoT (Internet of Things) en entornos donde sea difícil llevar una línea de alimentación eléctrica, tales como desiertos o zonas boscosas. A la antena propuesta se le ha añadido una placa solar en su interior que servirá para darle alimentación. Al incorporar la placa solar dentro de la antena se consigue reducir el tamaño del conjunto de esta y de la placa solar, teniendo un tamaño mínimo de 47mm x 47mm que es la dimensión del parche radiante de la antena.

En el proyecto se ha realizado un estudio del arte de las antenas de agua que existen hasta el día de hoy. Seguidamente, y aplicando conceptos de teoría de antena se ha hecho un diseño inicial de la antena microstrip de agua. Una vez hecho el diseño inicial, se ha simulado con el software de análisis de antenas IE3D de Zeland. Posteriormente se han fabricado los diseños realizados y se ha medido su rendimiento con un analizador de redes y una cámara anecoica. Gracias a los diseños fabricados, se han utilizado los planos de masa de agua para realizar un estudio sobre el funcionamiento de antenas monopolo.

Finalmente se ha concluido el proyecto demostrando que es posible construir una antena *microstrip* de agua que trabaje en la banda ISM.

Agradecimientos

Este Proyecto Final de Máster no se podría haber realizado sin el apoyo y paciencia de amigos y familia que han estado ahí durante los 9 meses que ha durado la elaboración del proyecto. Quiero dar un agradecimiento especial a mis padres M^a Carmen y Jordi por haber estado siempre ahí cuando volvía tarde y a Namir Saffour que todas las tardes en el laboratorio estaba ahí para ayudarme cuando lo necesitaba.

Quiero dar las gracias a Fractus Antennas por la ayuda tanto logística, con los aparatos de medición y material utilizado, como humana por parte del Dr. Jaume Anguera y la Dra. Aurora Andújar.

Quiero dar las gracias a la Universitat de La Salle y al Dr. Joan Pijoan por el apoyo durante las reuniones durante el transcurso del proyecto.

Por último y no menos importante, quiero dar las gracias a Belén Fernández del Espai Maker Punt Multimedia Casa del Mig por haber sido de gran ayuda con la maquinaria utilizada y darme su punto de vista en los puntos críticos del diseño.

Índice

1	Introducción	9
1.1	Ámbito tecnológico	10
1.2	Objetivos	10
1.3	Metodología	11
1.4	Organización del proyecto	12
1.5	Parámetros básicos teoría de antenas <i>microstrip</i>	13
1.5.1	Características básicas de una antena	13
2	Diseño y simulación de antenas <i>microstrip</i> de agua con alimentador por acople capacitivo	17
2.1	Introducción	18
2.2	Antena <i>microstrip</i>	18
2.2.1	Parámetros de una antena <i>microstrip</i>	18
2.2.2	Cálculo del área del parche radiante	22
2.3	Caracterización del Agua	23
2.3.1	Conductividad	23
2.4	Simulación de una antena <i>microstrip</i> @2.45 GHz	25
2.4.1	Introducción	25
2.4.2	Antena <i>microstrip</i> de cobre con alimentador por acople capacitivo	26
2.4.3	Antena <i>microstrip</i> con parche radiante de agua y alimentador por acople capacitivo	30
2.4.4	Antena <i>microstrip</i> con plano de masa de agua y alimentador por acople capacitivo	33
2.4.5	Antena <i>microstrip</i> completamente de agua y alimentador por acople capacitivo	36
2.5	Simulación de una antena <i>microstrip</i> @5 GHz	41
2.5.1	Introducción	41
2.5.2	Antena <i>microstrip</i> de cobre con alimentador por acople capacitivo	42
2.5.3	Antena <i>microstrip</i> con parche radiante de agua y alimentador por acople capacitivo	46
2.5.4	Antena <i>microstrip</i> con plano de masa de agua y alimentador por acople capacitivo	50
2.5.5	Antena <i>microstrip</i> completamente de agua y alimentador por acople capacitivo	53
2.6	Simulación de una antena <i>microstrip</i> @0.9 GHz	57

2.6.1	Introducción	57
2.6.2	Antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo	57
2.6.3	Antena microstrip con parche radiante de agua y alimentador por acople capacitivo	61
2.6.4	Antena microstrip con plano de masa de agua y alimentador por acople capacitivo	65
2.6.5	Antena microstrip completamente de agua y alimentador por acople capacitivo	69
2.7	Conclusiones	73
3	Implementación de antenas microstrip de agua a la frecuencia de 5 GHz y 2.45GHz.	75
3.1	Introducción	76
3.2	Procedimiento de fabricación	76
3.2.1	Cortadora láser	76
3.2.2	Impresora 3D.....	77
3.2.3	Ensamblaje y montaje.....	78
3.3	Antena microstrip fabricada con materiales transparentes @5GHz	79
3.3.1	Geometría y dimensiones	79
3.3.2	Parámetros S	80
3.3.3	Eficiencia de radiación y antena.....	82
3.3.4	Diagrama de radiación y directividad	83
3.4	Antena microstrip fabricada con materiales transparentes @2.4-2.5 GHz	85
3.4.1	Geometría y dimensiones	85
3.4.2	Parámetros S	86
3.4.3	Eficiencia de radiación y antena.....	90
3.4.4	Diagrama de radiación y directividad	91
3.4.5	Otros experimentos	93
3.5	Conclusiones	96
4	Antenas monopolo con plano de masa de agua en la banda ISM.....	99
4.1	Introducción	100
4.2	Geometrías y dimensiones	100
4.3	Parámetros S	102
4.3.1	Antenas monopolo en la banda de 0.9 GHz.	102
4.3.2	Antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz.	103
4.3.3	Antenas monopolo en la banda de 5 GHz.....	103

4.4	Eficiencia de radiación y de antena.....	104
4.4.1	Antenas monopolo en la banda de 0.9 GHz.	104
4.4.2	Antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz.	105
4.4.3	Antenas monopolo en la banda de 5 GHz.....	106
4.5	Diagramas de radiación y directividad	107
4.5.1	Antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz.	108
4.5.2	Antenas monopolo a 5GHz.....	109
4.5.1	Antenas monopolo en la banda de 0.9 GHz.	111
4.6	Conclusiones.....	113
5	Conclusiones y líneas futuras del proyecto.....	115
5.1	Conclusiones.....	116
5.2	Líneas futuras	118
6	Bibliografía.....	119

Acrónimos

BW: Ancho de banda.

ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

IEEE: Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

IoT: Internet of Things.

ISM: Industrial, Scientific and Medical.

PFM: Proyecto Final de Máster.

RF: Radio Frecuencia.

Capítulo 1

Introducción



1.1 Ámbito tecnológico

Las antenas microstrip se conciben por primera vez en el año 1953 y se patentaron en 1955, cuando se empezaron a implementar las líneas microstrip en las placas de circuitos impresos [1]. No fue hasta los años 70 que empezaron a implantarse y a trabajar con ellas activamente, implantándose en sistemas de aviación, aeroespacial y sistemas armamentísticos [2]. Esto fue posible por la mejora de los modelos para diseñarlas y por la mejora de los procesos industriales que facilitó su construcción.

Entre las principales ventajas de esta tecnología está el tamaño adaptable a cualquier forma y el bajo peso que poseen este tipo de dispositivos. Su fabricación e implementación es sencilla y no supone un gasto económico elevado a gran escala.[2]

Las antenas impresas (microstrip antennas) consisten en un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico colocado encima de un plano metálico. El parche es habitualmente de forma rectangular o circular y de dimensiones del orden de media longitud de onda. Es posible, asimismo, construir agrupaciones de parches combinando líneas y radiadores impresos. Sus principales limitaciones son su reducido ancho de banda, por tratarse de una estructura resonante, y su baja eficiencia, puesto que de la energía acumulada en la cavidad formada entre el parche y el plano de masa sólo una pequeña porción es radiada al espacio [3].

Haciendo referencia a otro de los grandes puntos clave de este proyecto, en Junio de 2016 *Mitsubishi Electric Corporation* anunció que había desarrollado un innovador sistema de antena, llamado SeaAerial, que lanza una columna de agua de mar al aire para crear una columna conductora para la transmisión y recepción de ondas de radio-frecuencia [4].

Habiendo comentado una breve introducción al ámbito tecnológico de la tecnología microstrip y al uso del agua como elemento radiante, se plantea a continuación los objetivos de este proyecto.

1.2 Objetivos

En la actualidad, existe una tendencia, cada vez más implantada, de evitar el impacto visual que provocan las instalaciones de telecomunicaciones favoreciendo su integración y la de todos sus elementos constructivos con el entorno urbano. Esta tendencia se produce debido al auge cada vez más evidente de las telecomunicaciones y la necesidad de instalar cada vez más estaciones base y antenas para suplir la demanda existente. En el proyecto se le dará continuidad a la mimetización de las antenas, sin añadir elementos estructurales a las antenas para ocultarlas, sino que la misma antena estará mimetizada ya que será transparente. Por ello se propone el diseño y fabricación de una antena microstrip de agua siguiendo la línea de proyecto iniciada por Sergi Diaz y su proyecto de final de máster (El agua como elemento radiante: Aplicación al diseño de una antena microstrip) [5].

La antena propuesta en el proyecto se podría implementar para diseños IoT en zonas donde no hubiera posibilidad de llevar red eléctrica, por ejemplo en desiertos o zonas boscosas. Se instalaría una placa solar dentro de la antena, de esta forma se reduciría el tamaño del conjunto antena+placa solar. La placa solar serviría para dar alimentación a la antena, la cual al ser transparente estaría mimetizada.

El objetivo principal del proyecto es diseñar e implementar una antena *microstrip* transparente, que trabaje en la banda de 2.4 a 2.5GHz, 0.9 GHz (solo diseño) y 5GHz (banda ISM), utilizando un parche radiante de agua y un plano de masa de agua. Para llegar al objetivo principal se han propuesto también los siguientes objetivos específicos:

- A partir de la teoría de antenas *microstrip* y de la búsqueda de información de las tendencias de las antenas de aguas, se recopilará toda la información encontrada y se utilizará para conformar una base teórica para poder realizar los diseños finales.
- Una vez consolidada la teoría se diseñarán las antenas *microstrip* de agua mediante unas condiciones básicas de diseño y se extraerán los resultados radioeléctricos mediante el *software* IE3D, los cuales servirán para realizar una comparación entre la antena *microstrip* de agua simulada y la real.
- Finalmente se implementarán diferentes antenas de agua y se comprobarán sus características radioeléctricas utilizando equipos de medidas (anализador de redes y cámara anecoica).

1.3 Metodología

Para cumplir con los objetivos del proyecto se ha usado la metodología de prueba-error a partir de una sólida base teórica que se ha utilizado para reducir las pruebas de diseño y de implementación.

Definiendo unas condiciones de diseño iniciales se han realizado los cálculos para dimensionar la antena utilizando el método de línea de transmisión. Una vez definido el diseño inicial se ha utilizado el *software* de diseño de antenas IE3D de Zeland v.14.0 (actualmente la compañía es Mentor Graphics) y se han realizado pruebas modificando la estructura de la antena para poder conocer el comportamiento de la antena tras realizar las modificaciones. Las simulaciones se han realizado siempre con un alimentador por acople capacitivo con 1 mm de separación con el parche. Para poder llegar al objetivo de diseñar una antena *microstrip* completamente de agua, se han realizado las simulaciones empezando con antenas *microstrip* de cobre y añadiendo los componentes de agua paso a paso. Primeramente, adaptar la antena *microstrip* con un parche de agua y una vez alcanzados resultados satisfactorios se añadía el plano de masa de agua. Para estudiar el comportamiento del plano de masa, antes de proceder a diseñar una antena completamente de agua, se realizaban simulaciones con una antena *microstrip* cuyo parche era cobre y el plano de masa de agua.

Una vez realizadas todas las simulaciones y alcanzado el diseño final para cada uno de los prototipos funcionando a las frecuencias de 0.9 GHz, 2.4 - 2.5 GHz y 5 GHz se realiza un estudio para tratar de implementar las antenas de agua.

El mayor problema es la encapsulación del agua y conseguir que no tenga pérdidas. Teniendo presente el estudio que se hizo para tratar de encapsular el agua realizado por Sergi Díaz [5] se opta por encapsular el agua con metacrilato transparente y realizando los cortes con una cortadora láser en el caso del parche. Por otro lado, en el caso del plano de masa de agua, uno de los caminos aún por andar en esta línea de proyecto, se realizará un estudio para tratar de pasar un conector por el agua encapsulada en metacrilato, para ello se usarán impresoras 3D, resinas y cortadora láser.

Con los prototipos construidos y con el conocimiento previo de las simulaciones se han modificado las estructuras de las antenas hasta obtener la mejor adaptación de impedancias de las antenas utilizando un analizador de redes y utilizando el método de prueba-error.

Habiendo elaborado los diseños finales ya implementados se pasa a la fase de medición de las características radioeléctricas de las antenas. Para ello, se ha utilizado un analizador de redes para obtener los resultados de la impedancia de entrada y el ancho de banda (BW), y se ha utilizado una cámara anecoica para obtener los resultados de eficiencia de radiación y antena, directividad y diagramas de radiación.

Para finalizar el proyecto se han programado hojas Excel para recopilar los resultados de las simulaciones y de los resultados obtenidos de las mediciones de las antenas implementadas, facilitando la comparación de los resultados que servirán para extraer las conclusiones del proyecto.

1.4 Organización del proyecto

La presente memoria del proyecto se ha dividido en diferentes capítulos que a continuación se detallan:

- Capítulo 1. Se introduce una introducción al ámbito tecnológico de las antenas microstrip y aplicaciones de los materiales utilizados en este proyecto en otras ramas. Se presentan los objetivos del presente proyecto y la metodología seguida. Para concluir el capítulo se da una introducción a las características de una antena microstrip para entender los resultados que se expondrán en capítulos posteriores.
- Capítulo 2. Se presentan los diseños y simulaciones por pasos desde una antena microstrip con parche radiante y plano de masa de cobre al prototipo final con parche radiante y plano de masa de agua. Para ello se estudiarán las propiedades radioeléctricas del agua y la caracterización de todos los elementos que conforman una antena microstrip. Todo ello para las frecuencias de 0.9 GHz, 2.4 – 2.5 GHz y 5 GHz. Se simula la antena con IE3D y se estudian los resultados obtenidos al cambiar las dimensiones físicas y

espaciales de la antena así como la posición y dimensiones del alimentador por acople capacitivo.

- Capítulo 3. Se detalla el proceso de implementación de los prototipos de antenas de agua *microstrip* a la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz y 5 GHz con alimentador por acople capacitivo. Comparando los resultados obtenidos con los simulados con el *software* IE3D.
- Capítulo 4. Se aprovechan las diferentes geometrías de plano de masa realizadas para la implementación de los prototipos del capítulo 3 para estudiar el comportamiento de antenas monopolo a las frecuencias trabajadas en este proyecto con un plano de masa de agua.
- Capítulo 6. Se exponen las conclusiones del proyecto y se definen líneas futuras para ampliar el proyecto.

1.5 Parámetros básicos teoría de antenas *microstrip*

1.5.1 Características básicas de una antena

El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983). Si bien sus formas son muy variadas, todas las antenas tienen en común el ser una región de transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre, a la que puede además asignar un carácter direccional.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia (f) y longitud de onda (λ):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de propagación de la luz en el medio (299 792 458 m/s si es en el vacío) y f la frecuencia de la antena [6].

A continuación, se introducirán conceptos básicos de antenas utilizados durante el desarrollo de este proyecto y que servirán al lector para entender los resultados expuestos.

Una antena es un dispositivo de un puerto, por lo que presenta una impedancia de entrada que no es más que la relación entre la tensión y la corriente presente en ese puerto. La impedancia de entrada es un parámetro de gran trascendencia, ya que condiciona las tensiones de los generadores que se deben aplicar para obtener determinados valores de corriente en la antena y, en consecuencia, una determinada potencia radiada. Si la parte reactiva es grande, hay que aplicar tensiones elevadas para obtener corrientes apreciables; si la resistencia de radiación es baja, se requieren elevadas corrientes para tener una potencia radiada importante [3], [6].

La impedancia de entrada tiene una parte real ($R(\omega)$) y una parte imaginaria ($X(\omega)$) (ver fórmula (2)).

$$Z_{in} = R(\omega) + jX(\omega) \quad (2)$$

La parte real de la impedancia de entrada de una antena se puede desglosar en resistencia de radiación (R_r) que representa la potencia que la antena radia hacia el espacio libre, y la resistencia de pérdidas (R_Ω) que representan las pérdidas que se producen en la antena.

La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se puede definir un rendimiento o eficiencia de radiación η_r , mediante una relación entre potencia radiada y entregada (ver fórmula (3)). También se puede entender como la relación entre la resistencia de entrada de la antena considerada ideal y la que presenta realmente.

$$\eta_r = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (3)$$

También se introduce el concepto de eficiencia total o de antena, que es el resultado de multiplicar la eficiencia de radiación por el coeficiente de desadaptación de impedancias (ver fórmula (4)).

$$\eta_t = \eta_r \cdot (1 - |\rho|^2) \quad (4)$$

Donde ρ es el coeficiente de reflexión, que representa la potencia reflejada en el puerto de la antena hacia el sistema transmisor o receptor que está conectado al puerto de la antena (ver fórmula (5)). Por lo tanto se puede interpretar que uno de los objetivos del diseño de antenas es minimizar el coeficiente de reflexión a fin de conseguir, idealmente, adaptación de impedancias ($Z_{in} = Z_o$).

$$\rho = S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (5)$$

Donde Z_o es la impedancia de referencia del sistema.

Otro de los aspectos importantes a tener en cuenta es el concepto de ancho de banda (BW). El BW es siempre relativo y nunca se hablará en términos absolutos, por lo que lo caracterizamos sobre la expresión:

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_o} \times 100 \quad (6)$$

Donde se entiende por f_2 y f_1 como las frecuencias donde el valor de adaptación S_{11} tiene un valor determinado y f_o es la frecuencia central de la banda de interés.

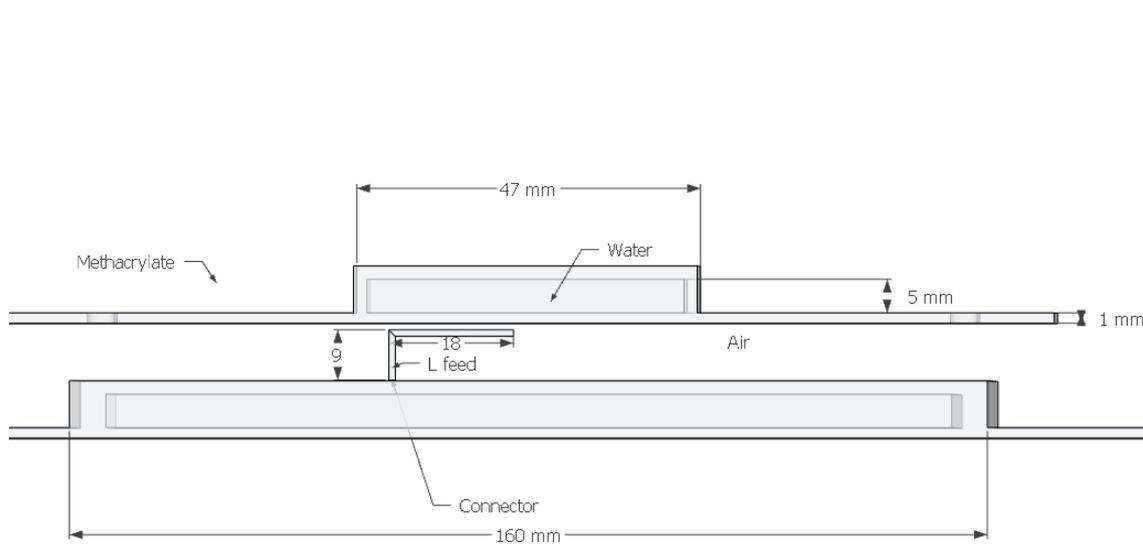
La directividad (D) se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia y la dirección que radiaría una antena isotrópica. En general se suele hablar de la dirección de máxima radiación. La expresión de la directividad puede escribirse en la forma:

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_e} \quad (7)$$

Para una antena que tuviera un diagrama de radiación uniforme en un cierto ángulo sólido y cero fuera de él, Ω_e en este caso sería igual al ángulo sólido en el que la antena está radiando. Una antena isótropa tiene directividad uno; si radiara uniformemente en un hemisferio, su directividad valdría 2, y si lo hiciera en un octante sería 8 [3].

Capítulo 2

Diseño y simulación de antenas microstrip de agua con alimentador por acople capacitivo.



2.1 Introducción

Una vez visto en el capítulo anterior, la información básica para entender los propósitos y resultados que se expondrán a lo largo de este informe, se dispone a explicar la teoría sobre antenas microstrip y caracterización del agua como dieléctrico, que formarán la base necesaria para llevar a cabo el objetivo de este proyecto.

Una vez vista la teoría necesaria para entender el capítulo, se expondrán los diseños y simulaciones de 3 antenas microstrip a las frecuencias de 0.9 GHz, 2.4 – 2.5 GHz y 5 GHz. Se representarán los resultados de los diseños simulados obtenidos desde una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo a una antena hecha completamente de agua, alimentada del mismo modo.

2.2 Antena microstrip

A continuación se procederá a explicar los conceptos relacionados con la tecnología microstrip. Se expondrán los conceptos relacionados con:

- Estructura de una antena microstrip.
- Métodos de alimentación.
- Modo de funcionamiento de la antena.
- Parche radiante.
- Plano de masa.

Para los diseños cuyas antenas consten de agua, en alguno o en el total de sus componentes, se procederá a explicar la caracterización del agua como dieléctrico y elemento radiante.

2.2.1 Parámetros de una antena *microstrip*

2.2.1.1 Estructura

Las antenas microstrip consisten en un parche metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico colocado encima de un plano metálico (Figura 1). El parche es habitualmente de forma rectangular o circular (aunque pueden moldearse con diferentes formas en función de la necesidad del diseño) y de dimensiones del orden de media longitud de onda. Es posible, asimismo, construir agrupaciones de parches combinando líneas y radiadores impresos. Sus principales limitaciones son su reducido ancho de banda, por tratarse de una estructura resonante, y su baja eficiencia, puesto que de la energía acumulada en la cavidad formada entre el parche y el plano de masa sólo una pequeña porción es radiada al espacio [3].

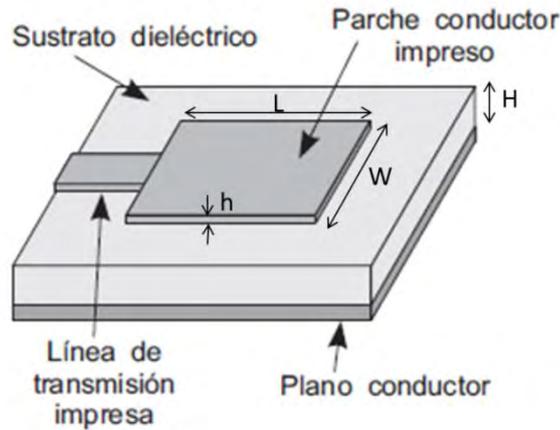


Figura 1 Partes de una antena microstrip

El parche radiante de una antena microstrip suele estar fabricado con metales muy conductivos como níquel, oro o cobre. Los grosores de un parche (h) radiante suelen ser muy inferiores a la longitud de onda de trabajo ($h \ll \lambda_0$) [7].

El material del sustrato tiene una constante dieléctrica cuyos valores suelen oscilar entre 1 y 12 ($1 \leq \epsilon_r \leq 12$) y tiene un grosor inferior a la longitud de onda de trabajo, normalmente está en un rango $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.005\lambda_0$. Para antenas trabajando a la frecuencia de microondas es recomendable que el grosor del sustrato sea muy pequeño para minimizar efectos de acoplamiento entre parche radiante y plano de masa. Si no se siguen estas condiciones de diseño puede repercutir en pérdidas de potencia en la antena y en eficiencias y anchos de banda pobres.

En el caso del plano de masa, el material con el que se suele trabajar es el cobre e interesa que sea mucho más grande que el parche, para tender eléctricamente al infinito.

2.2.1.2 Métodos de alimentación

Hay diferentes métodos de alimentar una antena microstrip. El método utilizado en este proyecto es por acople capacitivo, el cual se explicará junto al resto de métodos utilizables para entender porque elegimos este método y que características y usos tiene frente a otros.

El método de alimentación de una antena microstrip se implementa conectando un coaxial que una el parche radiante al generador que transmite la señal.

- Alimentación por contacto de sonda coaxial: agujereando el plano de masa se pasa un cable coaxial, evitando contactos con el plano de masa para evitar cortocircuito y se conecta al parche radiante metálico por contacto. Se pone énfasis en que el parche sea metálico porque en el caso de usar un parche radiante compuesto por agua, como es el caso de este proyecto, no se podrá utilizar este método.

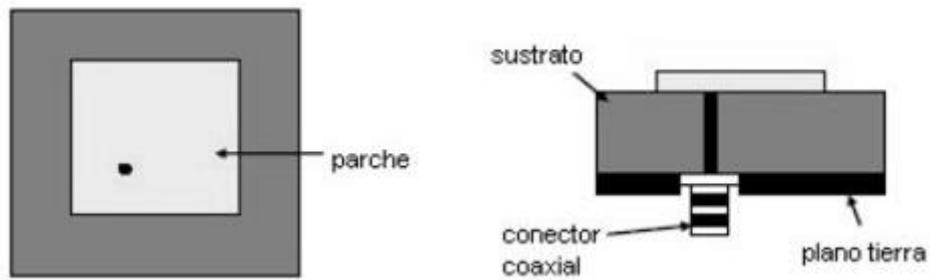


Figura 2 Dibujo de método de conexión por contacto de una antena microstrip [8].

- Conexión por contacto de línea microstrip: situado en el parche radiante metálico se une mediante línea microstrip conectada a la fuente de alimentación (Figura 1).
- Conexión mediante acople de línea microstrip: Se añade una línea microstrip que excite el parche mediante acoplamiento (Figura 3) y se coloca entre el parche radiante y el plano de masa, en la zona del sustrato.

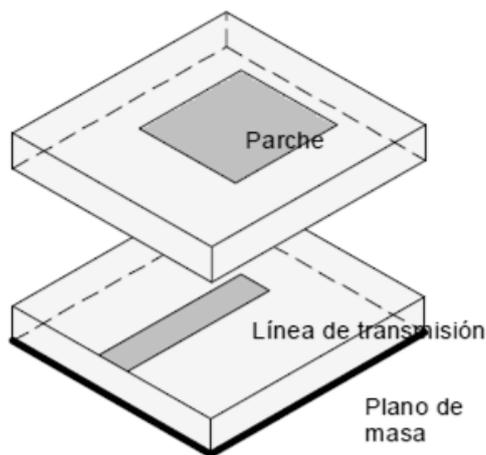


Figura 3 Método de alimentación por acople de una línea microstrip. [8].

- Conexión mediante acople de un hilo conductor en forma de "L": Agujereando el plano de masa, se coloca un hilo conductor en forma de "L" entre el parche radiante y el plano de masa, a una distancia del parche determinada (Figura 4). Por el agujero del plano se pasa el coaxial que conecta al hilo conductor [14].

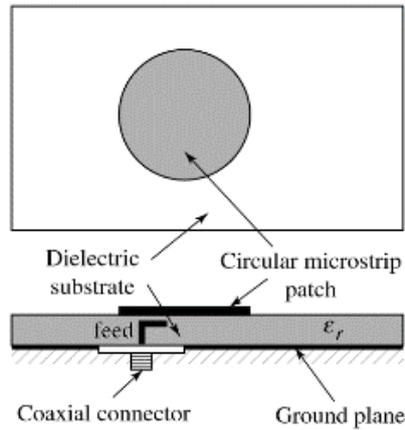


Figura 4 Conexión mediante acople de un hilo conductor en forma de “L”

- Alimentación por acople a través de plano de masa ranurado: Se introduce un plano de masa con una ranura entre el parche y el alimentador formado por una línea de transmisión (Figura 5).

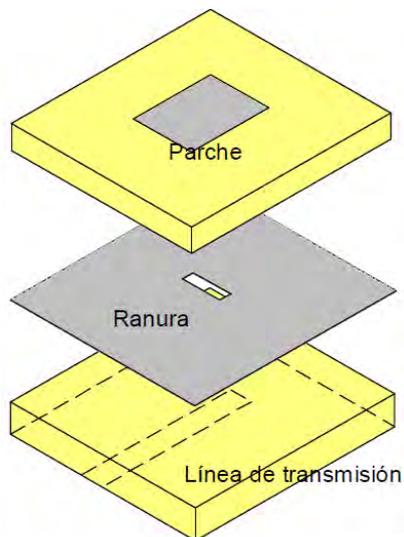


Figura 5 Alimentación por acople a través de plano de masa ranurado

2.2.1.3 Modo de funcionamiento de la antena

Una antena radia una vez se excita el alimentador con la señal a transmitir por el generador. Este hecho produce un campo eléctrico entre plano de masa y parche radiante en sentido perpendicular a este. Al ser el parche de dimensiones finitas se

producen desviaciones en el borde del mismo. Estas desviaciones se producen por el llamado efecto Fringe y produce la irradiación de la antena microstrip.

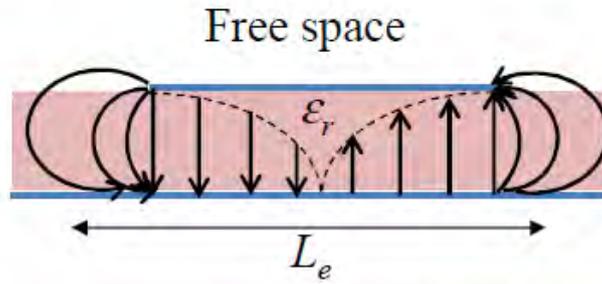


Figura 6 Distribución del campo eléctrico en una antena microstrip.

2.2.2 Cálculo del área del parche radiante

Existen diferentes métodos para el cálculo de las dimensiones de un parche radiante, desde los más complejos que requieren capacidad de cómputo elevado (método de cavidad resonante) hasta los más sencillos. Para este proyecto se utiliza el método de línea de transmisión al ser más intuitivo y sencillo de implementar. Con este método se realizará una primera aproximación de las dimensiones de los diferentes componentes de una antena microstrip, así como el parche radiante y el plano de masa y el alimentador por acople capacitivo.

A continuación se exponen los cálculos necesarios para obtener las dimensiones de una antena microstrip.

2.2.2.1 Método de línea de transmisión para diseño de antenas microstrip

En este proyecto se diseñará una antena cuadrada por lo que las dimensiones de ancho y largo serán las mismas, tanto para el parche radiante metálico como en el caso del plano de masa.

El ancho efectivo (W) se calcula mediante la expresión [7]:

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)}} \quad (8)$$

En el que la constante dieléctrica del sustrato (ϵ_r) es igual a 1 y f_0 es la frecuencia de resonancia de la antena microstrip.

La permitividad dieléctrica efectiva ϵ_{reff} se obtiene mediante la fórmula [7]:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{W}} \quad (9)$$

Se obtiene la expresión de la extensión del ancho del parche debido al campo eléctrico (ΔL) mediante la expresión:

$$\Delta L = 0.412 \cdot \frac{\left(\frac{W}{h} + 0.264\right) \cdot (\epsilon_{\text{reff}} - 0.3)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (10)$$

Se obtiene la longitud real de la antena de parche rectangular considerando la longitud efectiva de ésta y el valor de ΔL a partir de la expresión:

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_r \cdot \epsilon_{\text{reff}}} - 2 \cdot \Delta L \quad (11)$$

Definidas ya las ecuaciones del método de línea de transmisión para el diseño de antenas microstrip, se ha de tener en cuenta que de estas ecuaciones se igualan las referentes al ancho y al largo del parche radiante, simplificando así el método. Es un método efectivo para realizar una primera aproximación para empezar con los diseños a implementar con el software de simulación IE3D.

2.2.2.2 Posición del alimentador

En lo referente al cálculo de la posición del alimentador sobre el plano de masa existen métodos de cálculo complejos, que adaptarían la posición del alimentador a la frecuencia de interés en función de las dimensiones y estructura de la antena microstrip. Para este proyecto se estudiará la posición del alimentador moviéndose únicamente en un eje de simetría con el parche radiante, por lo que un método de cálculo complejo no sería necesario.

2.3 Caracterización del Agua

En este proyecto el objetivo final es implementar una antena microstrip, cuyo material principal utilizado sea el agua. A diferencia de otros materiales como el cobre, supone un inconveniente puesto que sustituimos un material de conductividad alta, adecuada para la construcción de elementos radiantes, por un material aislante cuyo comportamiento es el de un dieléctrico.

2.3.1 Conductividad

El agua tiene una composición de átomos, 2 de hidrógeno y 1 de oxígeno, unidos por un enlace covalente muy fuerte. Al aplicar un diferencial de tensión sobre el agua, es muy difícil romper estos enlaces por lo que no se conduce electricidad por este medio.

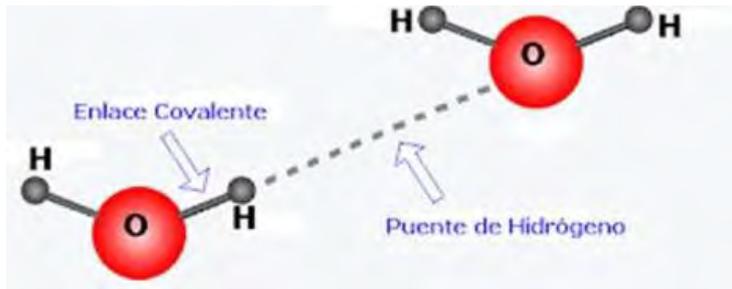


Figura 7 Enlace covalente del agua.

Teniendo en cuenta este detalle acerca de la característica aislante del agua, para el diseño, simulación e implementación de antenas microstrip de agua, se utilizará agua destilada y no mineral o de mar, pese a poseer mayor conductividad, las impurezas de estas suponen inconvenientes en términos de eficiencia. [5]

En términos de conductividad, tal y como hemos comentado anteriormente, el agua pura está más cerca de ser un aislante que de ser un conductor. Al ser un dieléctrico se puede caracterizar como un condensador y calcular su permitividad debido a su composición química y una tangente de pérdidas ($\tan \delta$) debida al grado de aislamiento o resistividad del agua. El valor de estos parámetros, los cuáles se necesitarán para implementar simulaciones en IE3D, varía en función de la frecuencia (Figura 8), así que para cada diseño implementado funcionando a una frecuencia determinada, se configurarán los parámetros correspondientes a la frecuencia de trabajo de la antena.

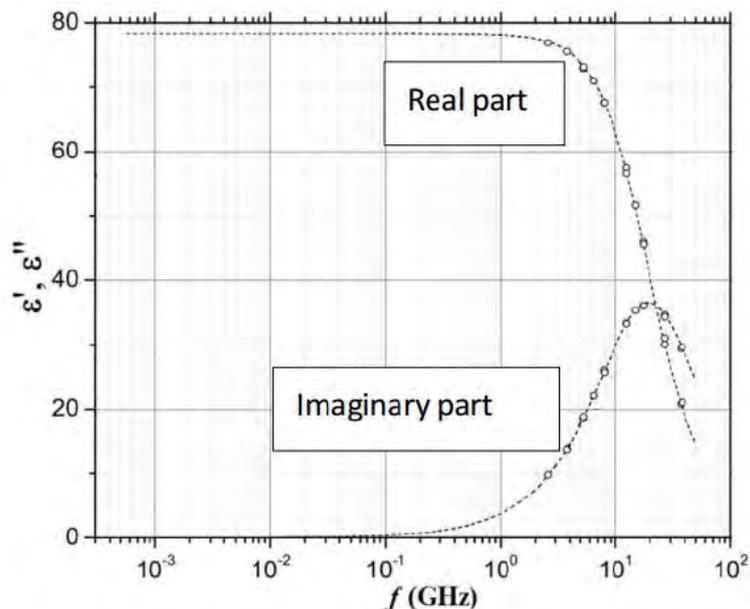


Figura 8 Cálculo de la tangente de pérdidas y la constante dieléctrica (permitividad) del agua en función de la frecuencia.

La permitividad eléctrica relativa del agua se compone de parte real e imaginaria:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - j \cdot \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \right) = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (12)$$

Donde:

ϵ , permitividad absoluta.

ϵ_0 , permitividad en el vacío.

ϵ' , permitividad absoluta parte real.

ϵ'' , permitividad absoluta parte imaginaria.

La tangente de pérdidas depende directamente de la permitividad absoluta:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (13)$$

Una vez definidos los parámetros eléctricos, los cuáles servirán para configurar el comportamiento del agua a la frecuencia de trabajo, se procederá a realizar el diseño a fin de adaptar la antena microstrip.

Dielectric Constant, Epsr	73.5
Loss Tangent for Epsr, TanD(E)	0.244898

Figura 9 Configuración del agua destilada para un diseño de antena microstrip a la frecuencia centrada de 2.45 GHz.

2.4 Simulación de una antena microstrip @2.45 GHz

2.4.1 Introducción

En este capítulo se expondrán los resultados de las simulaciones realizadas para la implementación de una antena microstrip completamente de agua a la frecuencia centrada de 2.45 GHz. El proceso será el comentado anteriormente, diseño y adaptación de una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo, e ir añadiendo paso a paso componentes de agua para readaptar el diseño, cumpliendo así con los criterios mínimos de adaptación ($ROE < 3$, $BW_{\min} = 4\%$). También se analizan para cada caso resultados de eficiencia, diagrama de radiación y directividad.

2.4.2 Antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo

2.4.2.1 Geometría de antena

Para el diseño de una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo se han realizado diversas simulaciones hasta adaptar la antena a los criterios buscados. Para ello se han utilizado los conceptos expuestos en apartados anteriores del capítulo. Cabe decir que para el caso de la posición del alimentador se basa en prueba y error hasta fijar esta posición.

Las dimensiones del parche radiante varían ligeramente de la aproximación inicial realizada según el método de líneas de transmisión, en calidad de corrección adaptativa. El largo del hilo conductor estará fijado con un techo superior, en el caso de la antena resonando a 2.45GHz, tendrá que ser menor a la longitud de una antena monopolo $\lambda/4$ (30mm).

Las dimensiones del plano de masa se modifican para obtener unos resultados de eficiencia y de diagrama de radiación óptima, no suponen un impacto significativo para otras características como la adaptación.

A continuación, se exponen las geometrías del primer diseño de una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo (ver Tabla 1). Para entender dicha tabla hay un conjunto de variables que se han de explicar:

- W: Ancho del parche o plano de masa.
- L: Largo del parche o plano de masa.
- H: Altura del parche o plano de masa.
- l: Longitud del acople capacitivo.
- h: Altura del sustrato.
- center - x: distancia del centro al acople capacitivo respecto al plano de masa.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center - x)
Cobre Cobre	47x47x1	98x98x1	24	10	10

Tabla 1 Geometrías de la antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.4.2.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados de $ROE < 3$ se cumple un BW superior al 4%, este BW correspondería al ancho correspondiente a la banda

de interés entre 2.4 GHz y 2.5 GHz. Para el diseño propuesto (Figura 10) se consigue un BW>20% (ROE>3) con un máximo de adaptación centrado en la banda de interés (-8.9 dB).

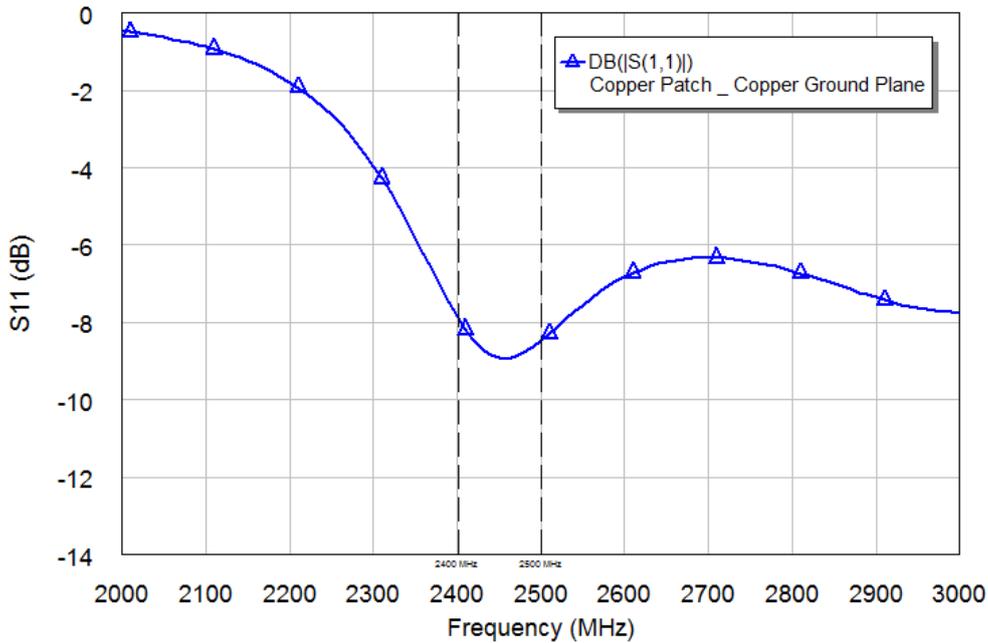


Figura 10 Parámetros S₁₁ (dB) para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.4.2.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip de cobre, se puede ver como la eficiencia de radiación está cerca del máximo, eso es lo que se espera de un diseño bien optimizado para una antena con materiales altamente conductivos. En términos de eficiencia de antena se tiene un máximo en 2.5 GHz a un 83% y a 2.4 GHz 67.5%

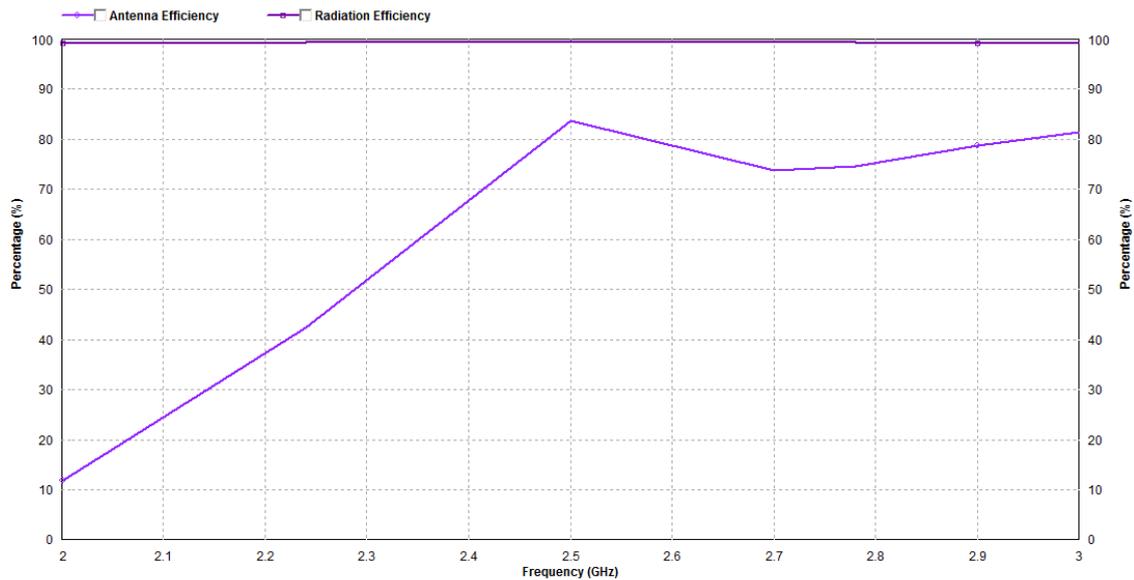


Figura 11 Eficiencia de radiación y antena para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.4.2.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo tiende al ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. El diagrama de radiación de este diseño (Figura 12) tiene un ancho de haz de 80° en el plano E (phi 90) y de 56° en el plano H (phi 0). La Directividad media de la antena microstrip de cobre es de 8.3 dB en la banda de interés (BW=4%) (Figura 13).

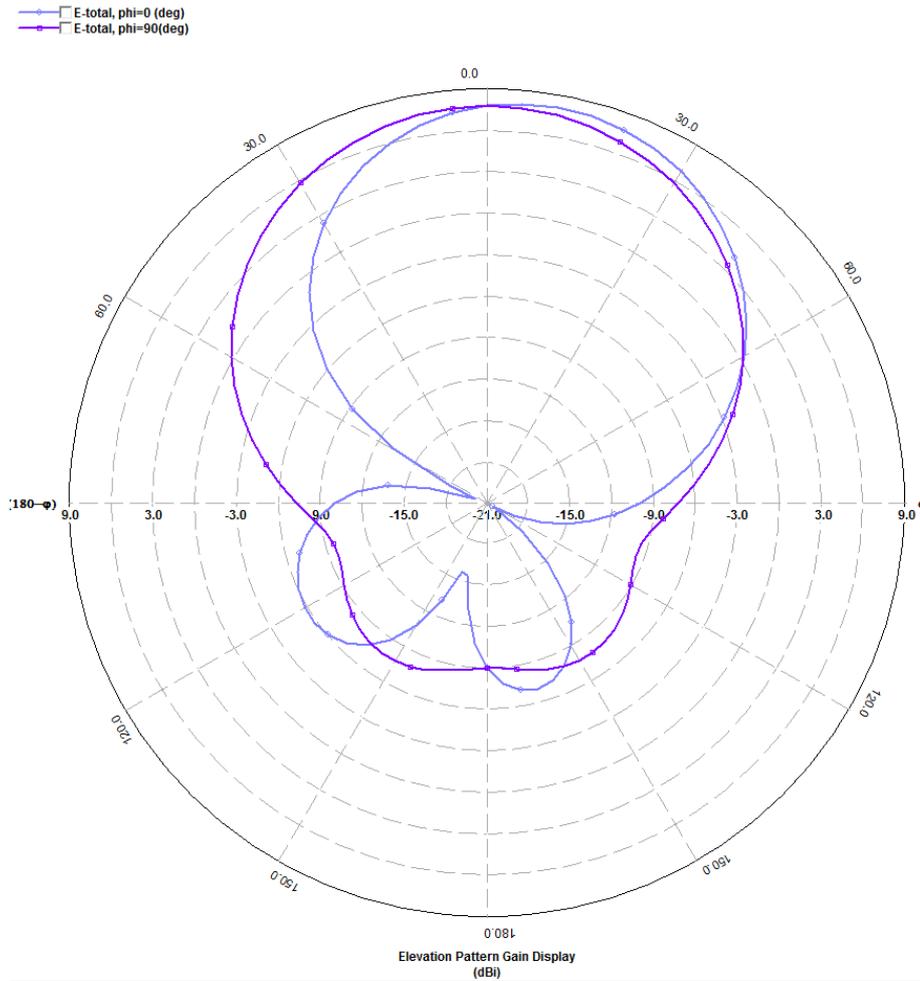


Figura 12 Diagrama de radiación para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo. Phi = 0 (línea lila) y Phi = 90 (línea morado oscuro).

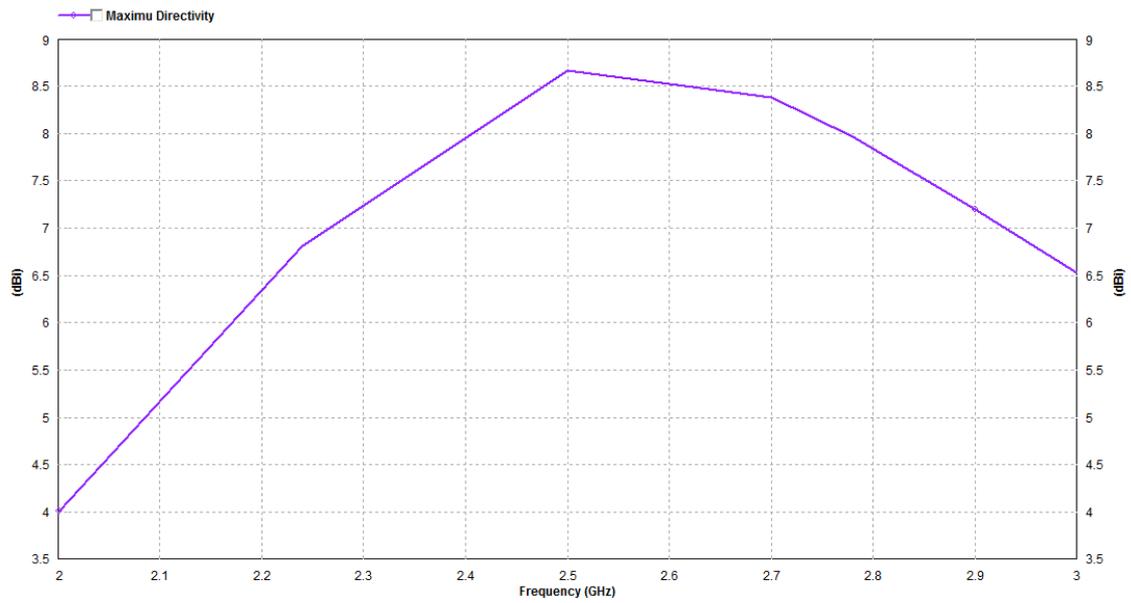


Figura 13 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.4.3 Antena microstrip con parche radiante de agua y alimentador por acople capacitivo

2.4.3.1 Geometría de antena

A continuación, se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip con parche radiante de agua. En este diseño se conserva el plano de masa de cobre alimentada por acople capacitivo (ver Tabla 2). Para conseguir adaptar el diseño se ha aumentado el parche radiante 2mm por lado y alargado las dimensiones del alimentador en forma de "L". Se ha mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Cobre	49x49x5	98x98x1	26	10	10

Tabla 2 Geometrías de la antena microstrip con parche radiante de agua y con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.4.3.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado (Figura 14). Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo. Con un máximo de adaptación entre 2.4 GHz y 2.5 GHz, se obtiene un amplio BW (18%) para una ROE inferior a 2.

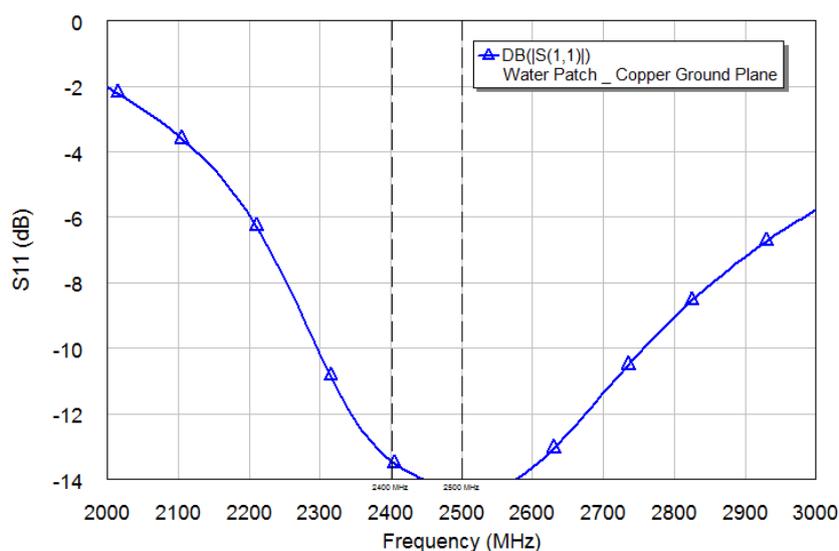


Figura 14 Parámetros S_{11} (dB) para una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.4.3.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip con un parche radiante de agua, se puede ver como la eficiencia ha disminuido respecto al caso de la antena de cobre, siendo lógico puesto que se ha sustituido un material conductor por un dieléctrico. Pese a eso, se obtienen buenos resultados de eficiencia (Figura 15) habiendo optimizado al máximo las dimensiones del diseño, puesto que se obtiene en términos de eficiencia de antena, un 73.5% a la frecuencia de 2.5 GHz y un 67% en 2.4 GHz. La media de eficiencia de antena es del 70% y la de radiación es un 73.2%.

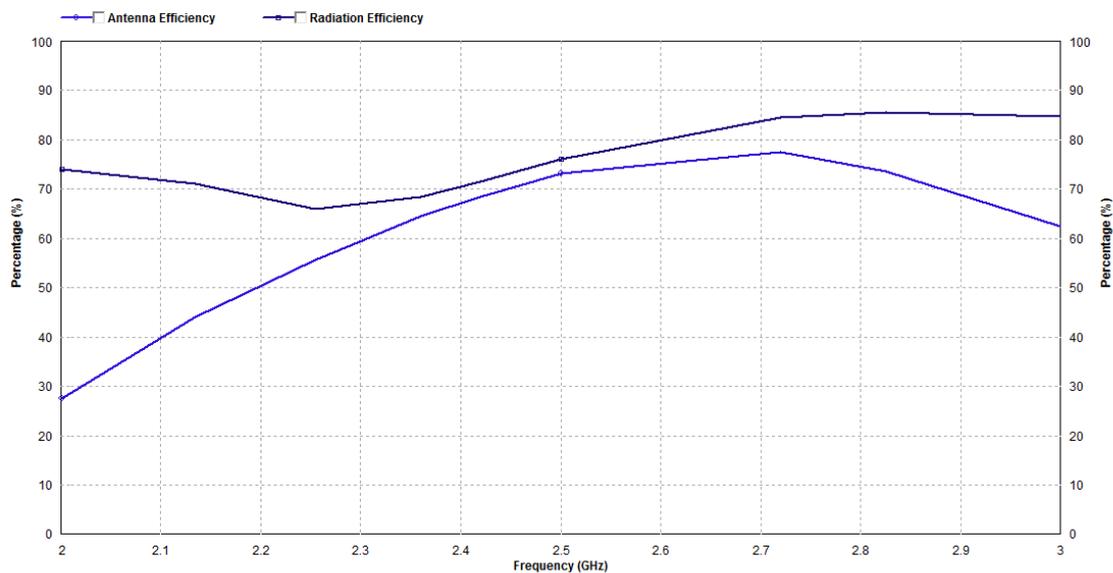


Figura 15 Eficiencia de antena y de radiación para una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.4.3.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo tiende al ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. Cabe añadir que respecto al diseño anterior, se ha inclinado ligeramente el máximo de radiación. El diagrama de radiación de este diseño (Figura 16) tiene anchos de haz más grandes comparando con la antena microstrip completamente de cobre, para el plano E (phi 90) se tiene un ancho de haz de 89.5° y de 51° en el plano H (phi 0). La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip con el parche radiante de agua es de 7.25 dB (Figura 17).

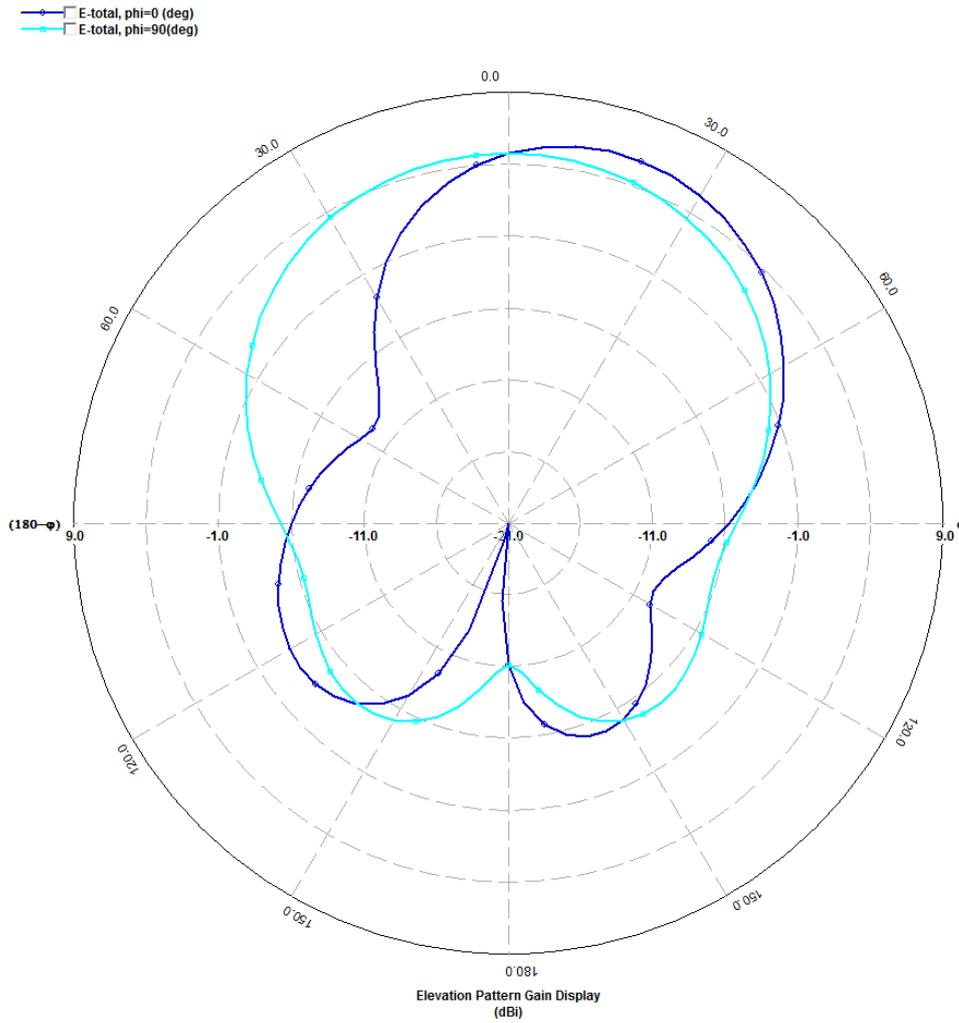


Figura 16 Diagrama de radiación para una antena microstrip con parche radiante de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea continua) y PHI = 90 (línea discontinua).

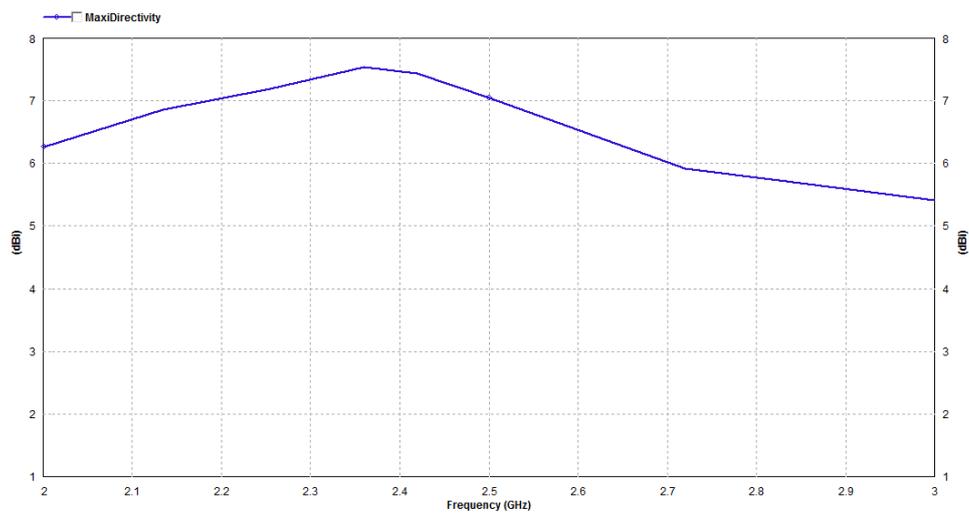


Figura 17 Directividad máxima (dB) en una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.4.4 Antena microstrip con plano de masa de agua y alimentador por acople capacitivo

2.4.4.1 Geometría de antena

A continuación se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip con plano de masa de agua. En este diseño se conserva el parche radiante de cobre (ver Tabla 3). Para conseguir adaptar el diseño, el resultado final después de varias simulaciones ha sido disminuir el parche radiante 2mm por lado. Se ha mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Cobre Agua	47x47x1	96x96x5	26	10	10

Tabla 3 Geometrías de la antena microstrip con plano de masa de agua y con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.4.4.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado (Figura 18). Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo. Con un máximo de adaptación entre 2.4 GHz y 2.5 GHz, se obtiene un amplio BW (>20%) para una ROE inferior a 2.

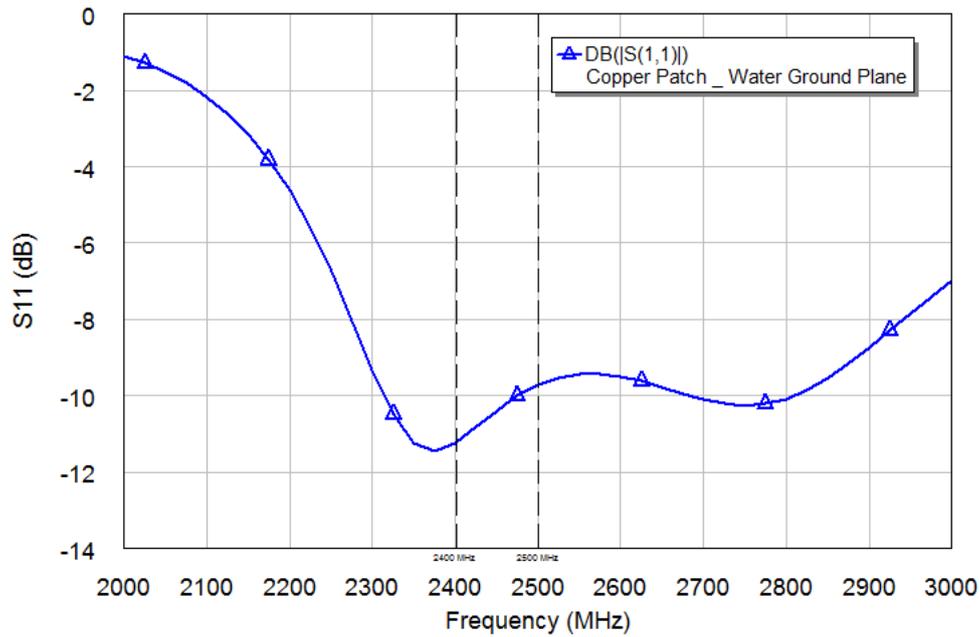


Figura 18 Parámetros S_{11} (dB) para una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.4.4.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado (Figura 19).

Para una antena microstrip con un plano de masa de agua, se obtienen buenos resultados de eficiencia habiendo optimizado al máximo las dimensiones del diseño, puesto que se obtiene un 82% de eficiencia de antena constante en toda la banda de interés. En términos de eficiencia de radiación se ha producido una disminución del 10% respecto a la antena microstrip de cobre con una media de 88.9%.

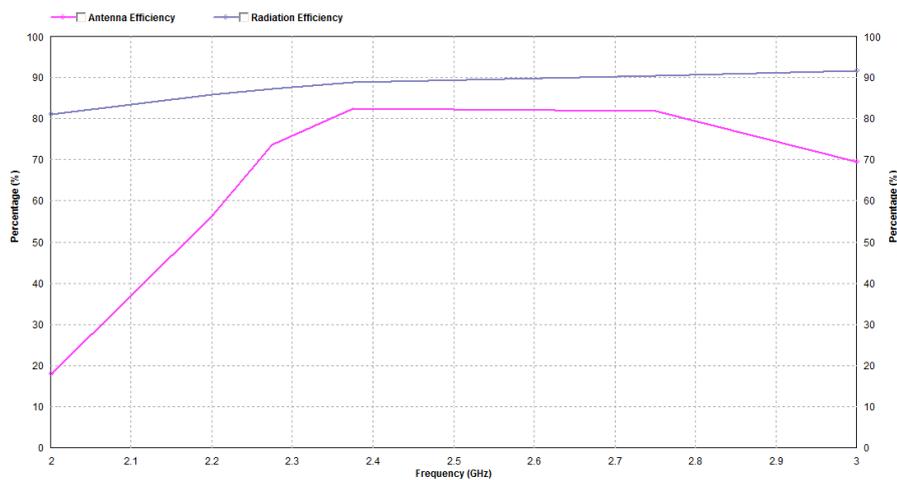


Figura 19 Eficiencia de antena y de radiación para una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.4.4.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo tiende al ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. El diagrama de radiación de este diseño tiene anchos de haz más pequeños comparando con la antena microstrip completamente de cobre, para el plano E (phi 90) se tiene un ancho de haz de 76° y de 45° en el plano H (phi 0). Se puede observar que en este diseño (Figura 20) la radiación hacia atrás es algo mayor que en casos anteriores, puesto que afecta al aislamiento el hecho de haber sustituido un plano de masa de cobre por uno de agua. La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip con el parche radiante de agua, es de 7.6 dB (Figura 21).



Figura 20 Diagrama de radiación para una antena microstrip con plano de masa de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea rosa) y PHI = 90 (línea lila).

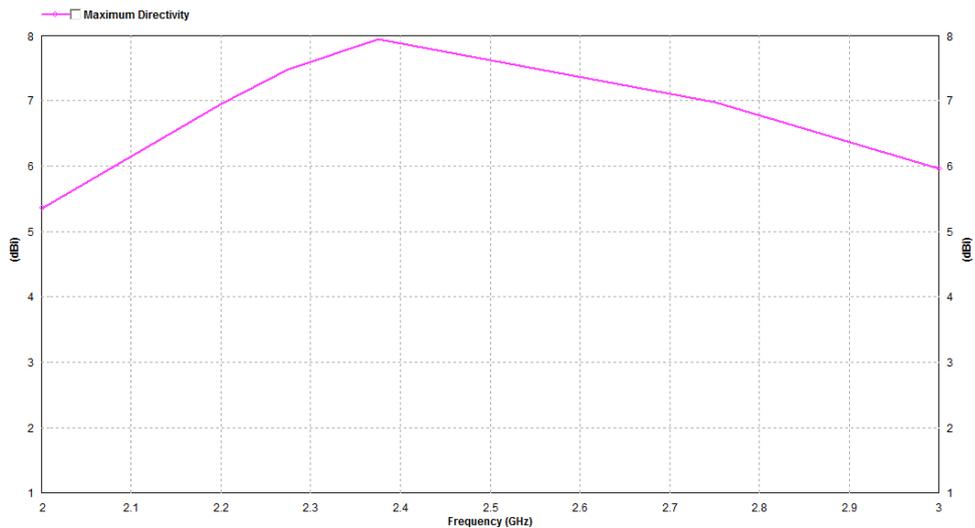


Figura 21 Directividad máxima (dB) en una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.4.5 Antena microstrip completamente de agua y alimentador por acople capacitivo

2.4.5.1 Geometría de antena

A continuación se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip hecha completamente de agua. En este diseño se llevan a cabo las geometrías que se implementarán en el capítulo siguiente. Para conseguir adaptar el diseño, el resultado final después de varias simulaciones ha sido aumentar las dimensiones del acople capacitivo y desplazar el punto de alimentación 3 mm hacia el centro. Se han mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Agua	47x47x5	96x96x5	28	10	7

Tabla 4 Geometrías de una antena microstrip hecha completamente de agua. Cotas en mm.

2.4.5.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios

de ROE en este capítulo. Con un máximo de adaptación entre 2.4 GHz y 2.5 GHz, se obtiene un amplio BW (14%) para una ROE inferior a 2.

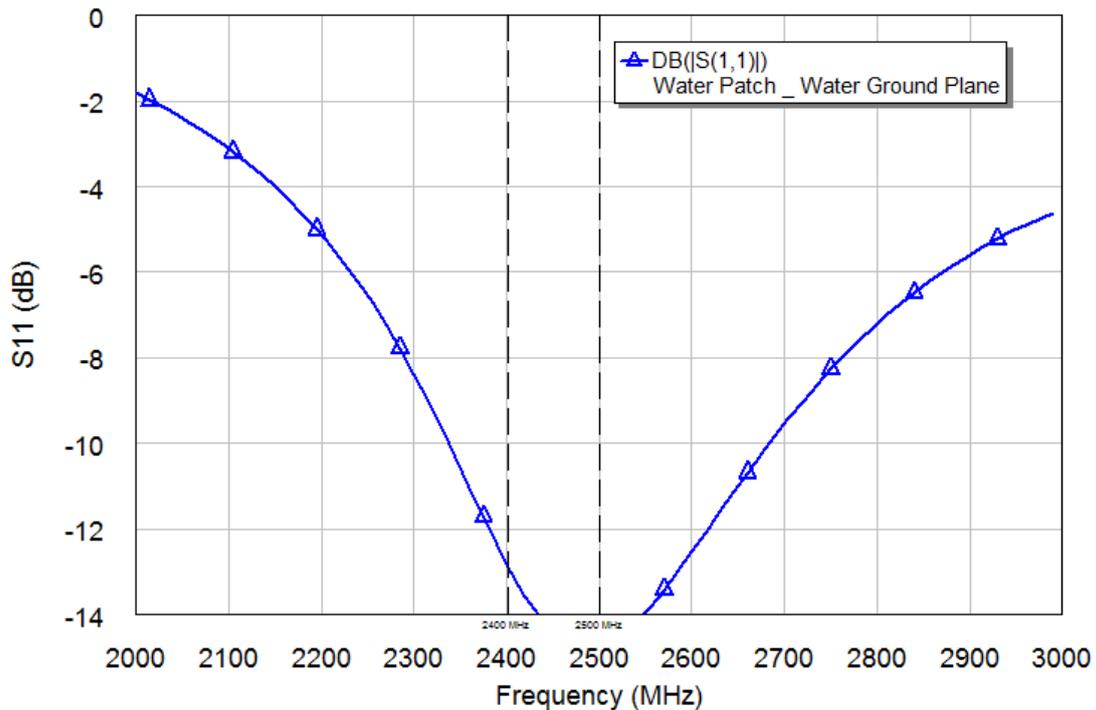


Figura 22 Parámetros S_{11} (dB) para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.4.5.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado (Figura 23).

Para una antena microstrip hecha completamente de agua se obtiene una disminución considerable en eficiencia debido al material que se está utilizando, pues genera muchas pérdidas en comparación al uso de materiales conductivos.

En términos de eficiencia de antena se obtiene un 62.5% a la frecuencia de 2.4 GHz y un 67.3% a 2.5 GHz, trabajando con una media de eficiencia de antena de 64.75% y 68% de eficiencia de radiación.

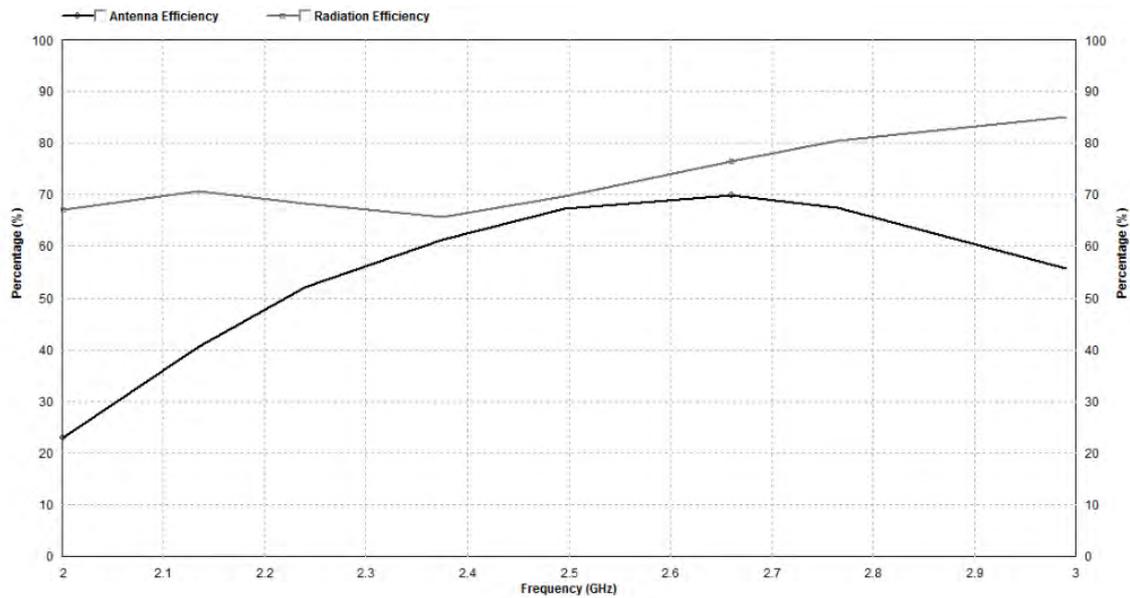


Figura 23 Eficiencia de antena y radiación para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.4.5.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo está 30° inclinado respecto al ángulo 0 (Figura 24). El diagrama de radiación de este diseño tiene anchos de haz más anchos comparando con diseños anteriores con parte o completamente de cobre, hecho el cuál disminuye la directividad total de la antena (Figura 24). Para el plano E (phi 90) se tiene un ancho de haz de 135° y de 60° en el plano H (phi 0). La Directividad media en la banda de interés es de 6.5 dB.

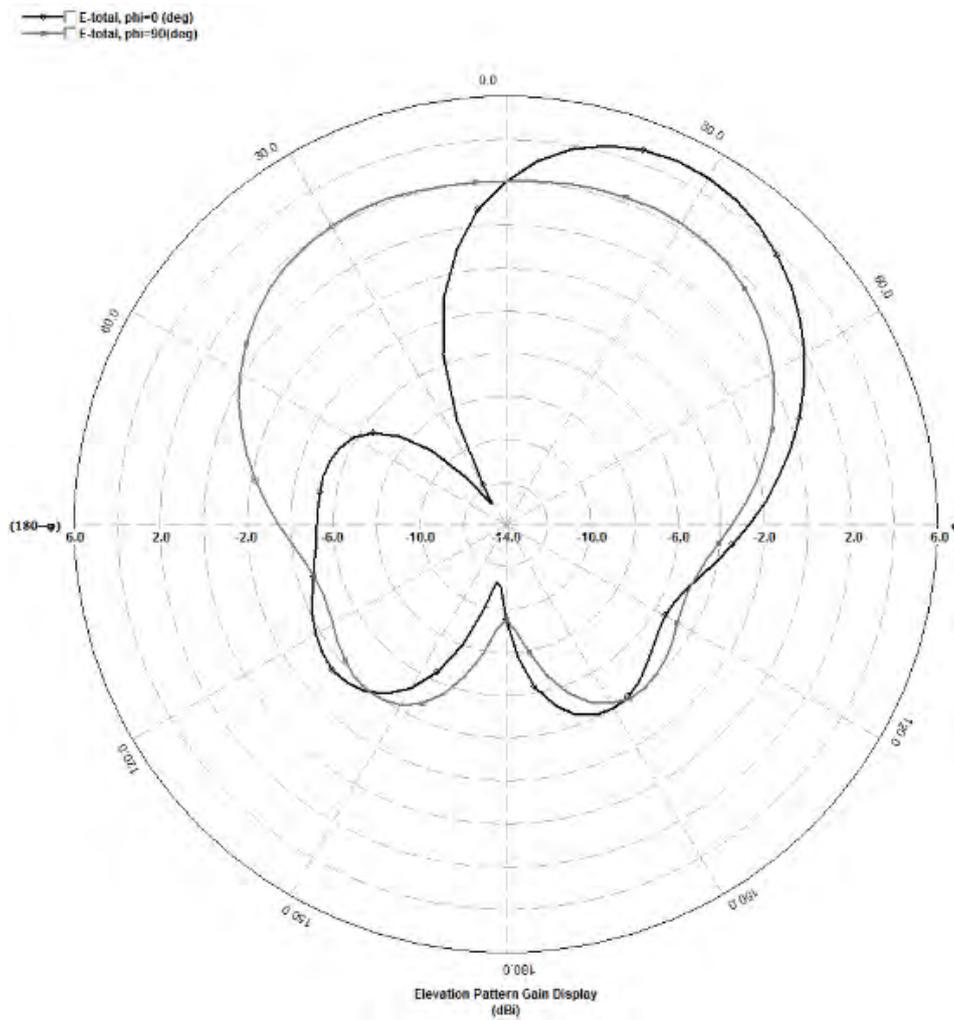


Figura 24 Diagrama de radiación para una antena microstrip hecha completamente de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea negra) y PHI = 90 (línea gris).

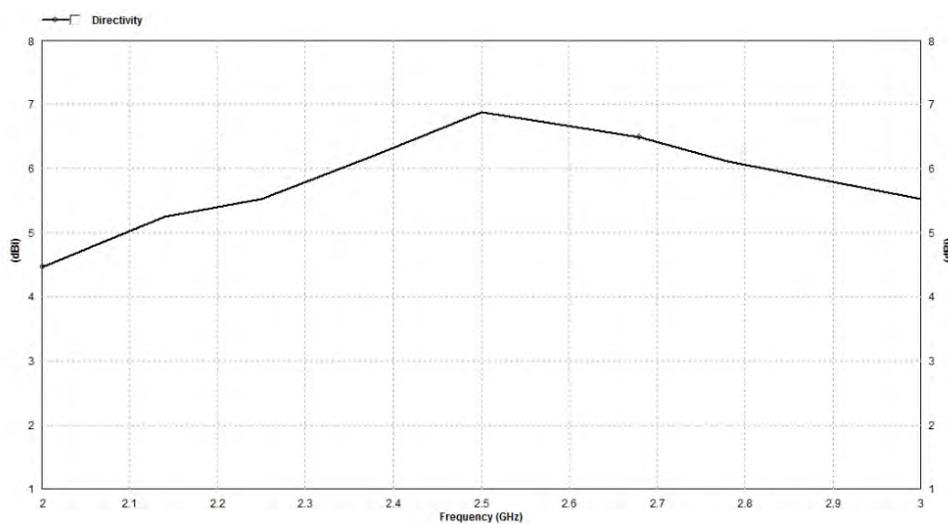


Figura 25 Directividad máxima (dB) en una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.4.5.5 Versión final

Una vez adaptado y validado el diseño para una antena microstrip hecha completamente de agua, trabajando en la banda de 2.4 – 2.5 GHz, se realiza un estudio del plano de masa a fin de mejorar en la mayor medida posible el rendimiento de la antena. Después de varias simulaciones se han ampliado las dimensiones del plano de masa hasta 160 mm por lado, manteniendo el grosor del mismo (). Esta modificación no supone mejoras significativas en eficiencia o adaptación, pero si en el diagrama de radiación de la antena (Figura 26) centrando el máximo paralelo al eje Z.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Versión final	47x47x5	160x160x5	28	10	7

Tabla 5 Geometría final de la antena microstrip hecha completamente de agua. Cotas en mm.

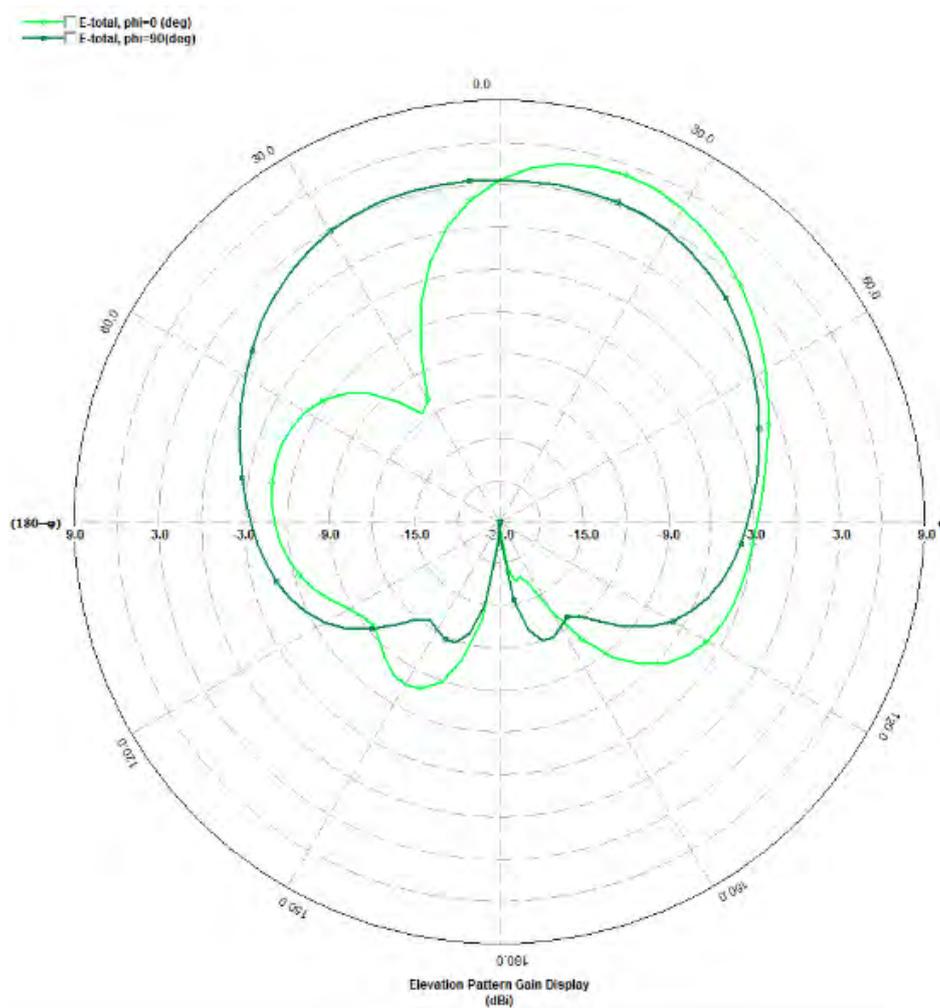


Figura 26 Diagrama de radiación para la versión final de una antena microstrip hecha completamente de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea verde claro) y PHI = 90 (línea verde oscuro).

2.5 Simulación de una antena microstrip @5 GHz

2.5.1 Introducción

En este capítulo se expondrán los resultados de las simulaciones realizadas para la implementación de una antena microstrip completamente de agua a la frecuencia centrada de 5 GHz. El proceso será el comentado anteriormente, diseño y adaptación de una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo, e ir añadiendo paso a paso componentes de agua para readaptar el diseño, cumpliendo así con los criterios mínimos de adaptación ($ROE < 3$, $BW_{\min} = 4\%$). También se analizan para cada caso resultados de eficiencia, diagrama de radiación y directividad.

2.5.2 Antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo

2.5.2.1 Geometría de antena

Las dimensiones del parche radiante varían ligeramente de la aproximación inicial realizada según el método de líneas de transmisión, en calidad de corrección adaptativa. El largo del hilo conductor estará fijado con un techo superior, en el caso de la antena resonando a 5GHz, tendrá que ser menor a la longitud de una antena monopolo $\lambda/4$ (15mm).

Las dimensiones del plano de masa se modifican para obtener unos resultados de eficiencia y de diagrama de radiación óptima, no suponen un impacto significativo para otras características como la adaptación.

A continuación se exponen las geometrías del primer diseño de una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo (ver Tabla 6).

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Cobre Cobre	27x27x1	100x100x1	14	5	9

Tabla 6 Geometrías de la antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.5.2.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados de $ROE < 3$ se cumple un BW superior al 4%, este BW correspondería al ancho correspondiente a la banda de interés entre 2.4 GHz y 2.5 GHz. Para el diseño propuesto (Figura 27) se consigue un $BW > 20\%$ ($ROE > 3$).

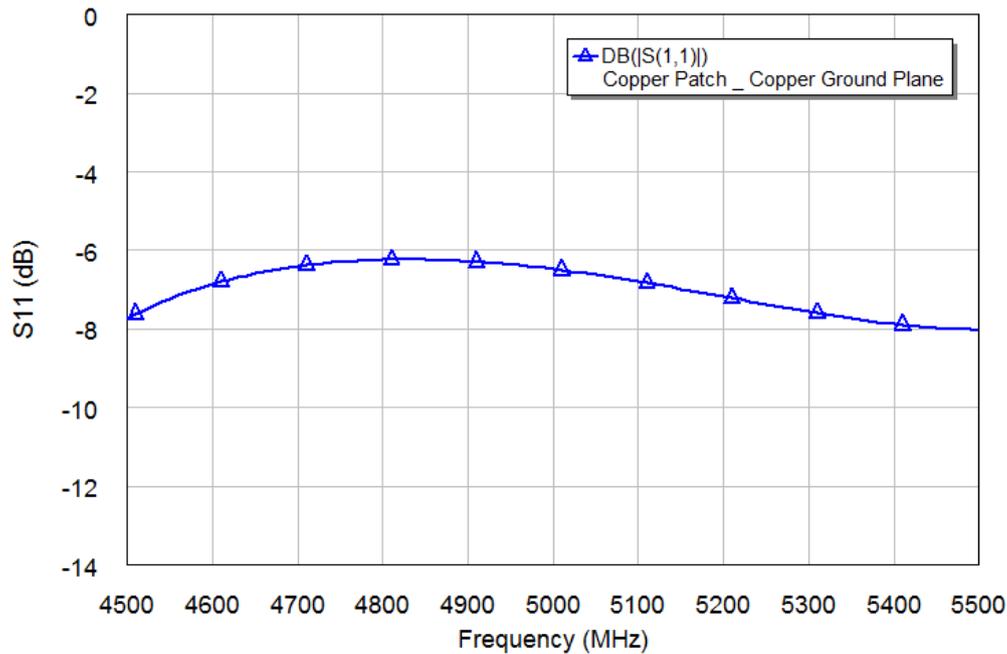


Figura 27 Parámetros S_{11} (dB) para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.5.2.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip de cobre, se puede ver como la eficiencia de radiación está cerca del máximo, eso es lo que se espera de un diseño bien optimizado para una antena con materiales altamente conductivos. En términos de eficiencia de antena se obtienen valores muy constantes debido al alto ancho de banda adaptado que se ha podido observar en el apartado anterior. A la frecuencia de 5 GHz se tiene una eficiencia de antena del 77.5% con un máximo de eficiencia de radiación del 99.4%.

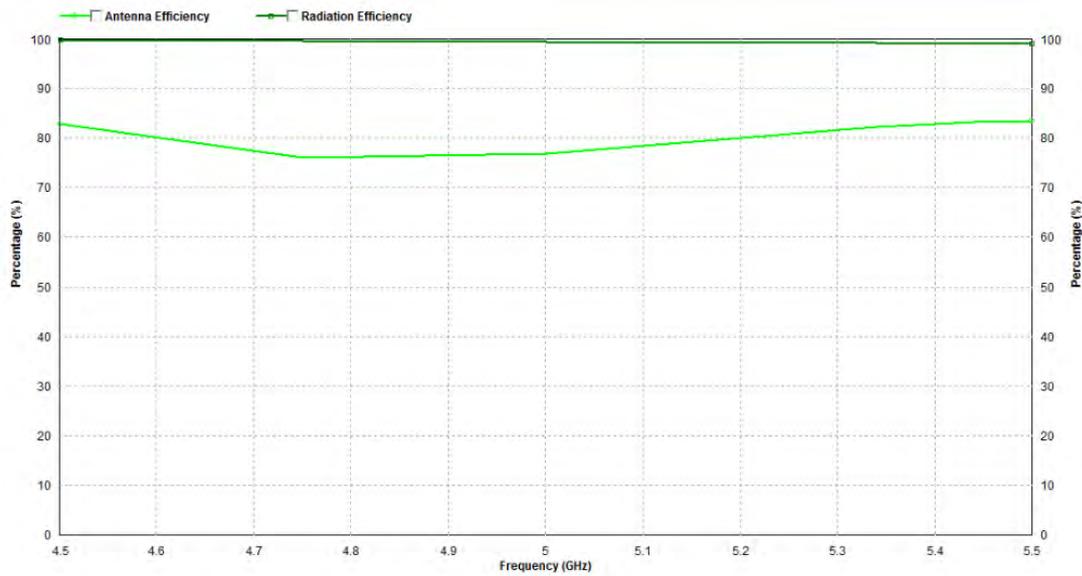


Figura 28 Eficiencia de radiación y de antena de una antena microstrip con alimentador por acople capacitivo.

2.5.2.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo tiende al ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. El diagrama de radiación de este diseño tiene un ancho de haz de 89.4° en el plano E (phi 90) y de 53.4° en el plano H (phi 0). La Directividad de la antena microstrip de cobre es de 9.4 dB en la frecuencia de interés (5 GHz).

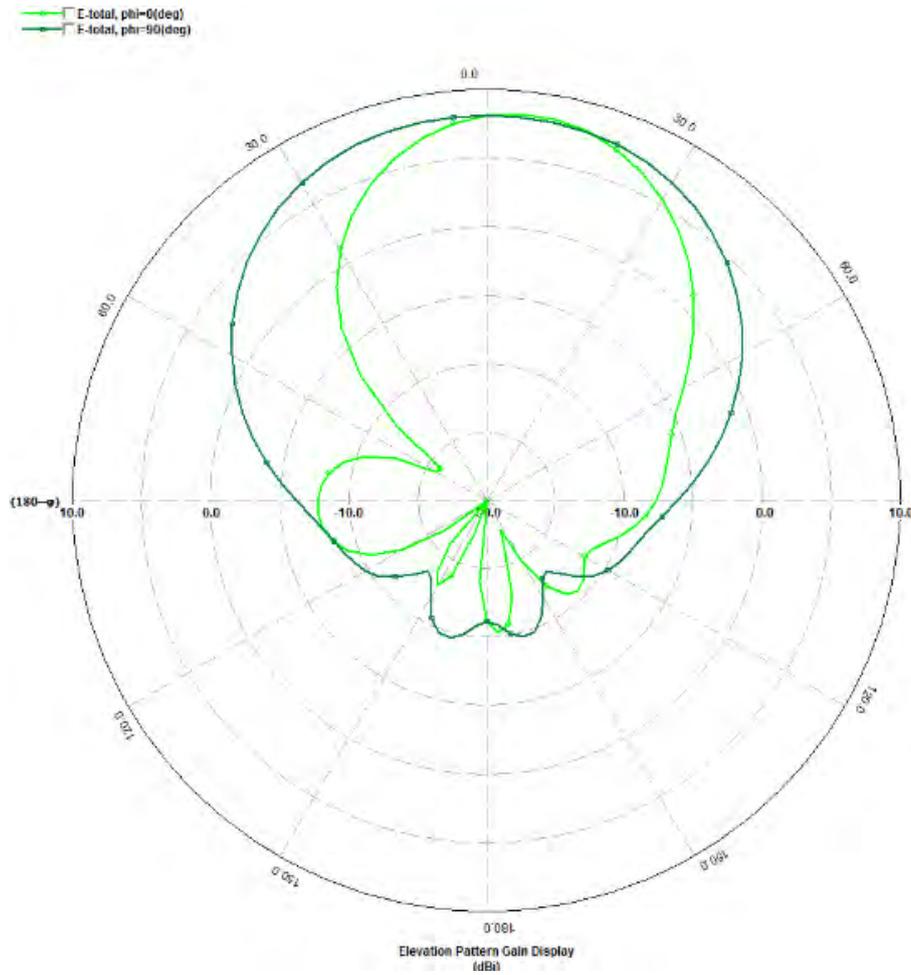


Figura 29 Diagrama de radiación para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea verde claro) y PHI = 90 (línea verde oscuro).

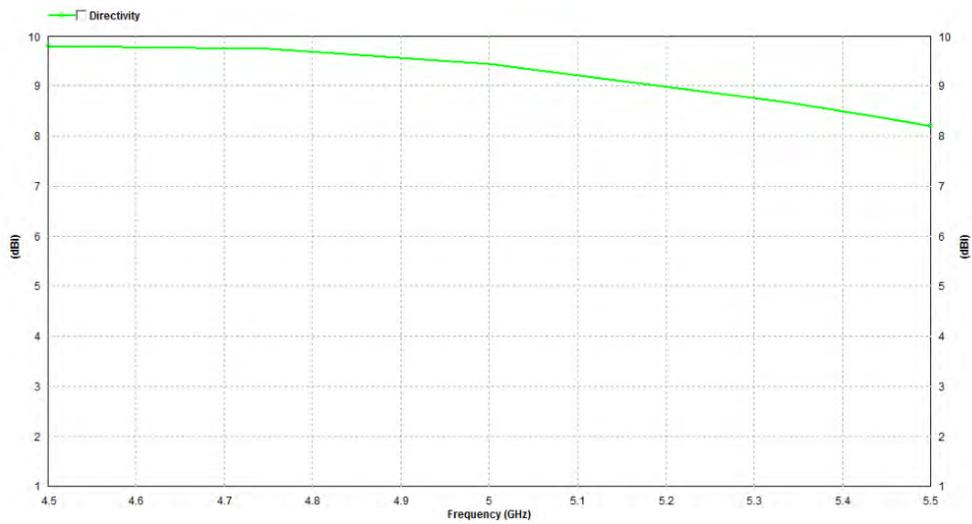


Figura 30 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.5.3 Antena microstrip con parche radiante de agua y alimentador por acople capacitivo

2.5.3.1 Geometría de antena

A continuación se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip con parche radiante de agua. En este diseño se conserva el plano de masa de cobre alimentada por acople capacitivo (Tabla 7). Para conseguir adaptar el diseño se ha aumentado el parche radiante 1mm por lado y desplazado el alimentador en forma de "L" 6 mm del centro. Se ha mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Cobre	28x28x5	100x100x1	14	5	13

Tabla 7 Geometrías de la antena microstrip con parche radiante de agua y con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.5.3.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo. Para este diseño, la frecuencia de 5GHz está adaptada a -9.8 dB y se obtiene un amplio BW (>20%) para una ROE inferior a 3.

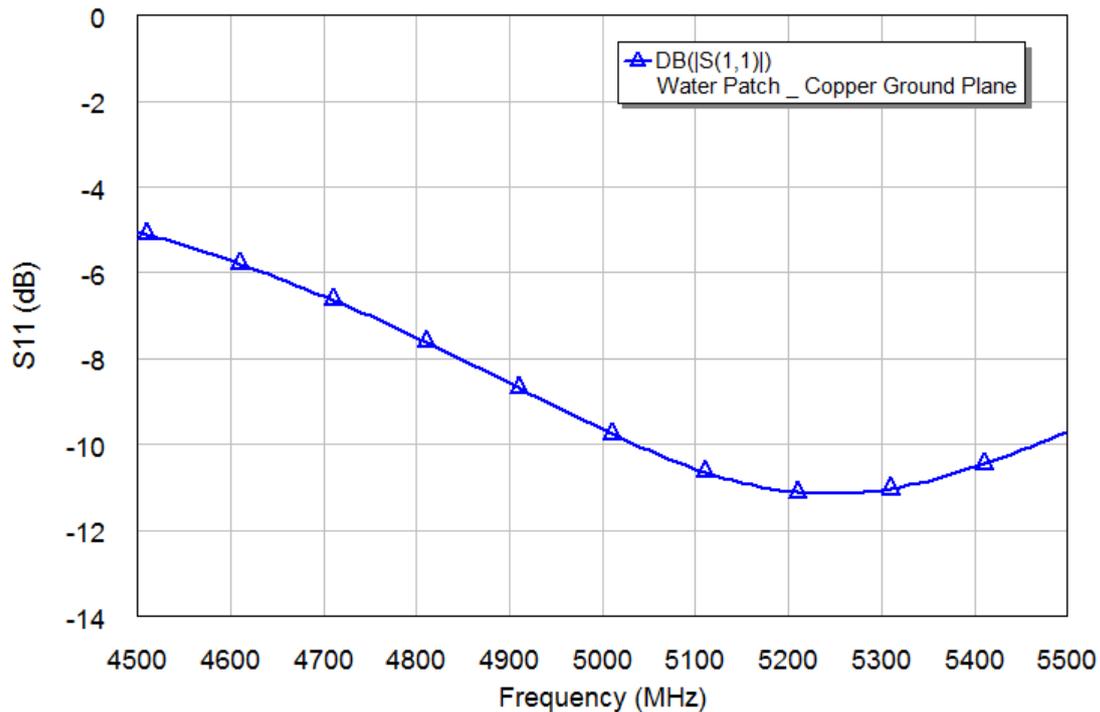


Figura 31 Parámetros S11 (dB) para una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.5.3.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip con un parche radiante de agua, se puede ver como la eficiencia ha disminuido respecto al caso de la antena de cobre, siendo lógico puesto que se ha sustituido un material conductor por un dieléctrico. Pese a eso, se obtienen buenos resultados de eficiencia habiendo optimizado al máximo las dimensiones del diseño, puesto que se obtiene en términos de eficiencia de antena, un 80% a la frecuencia de 5 GHz. La eficiencia media de antena con un BW del 4% (entre 4.9 – 5.1 GHz) es del 79%. La eficiencia de radiación se mantiene constante al 90% en la banda de interés.

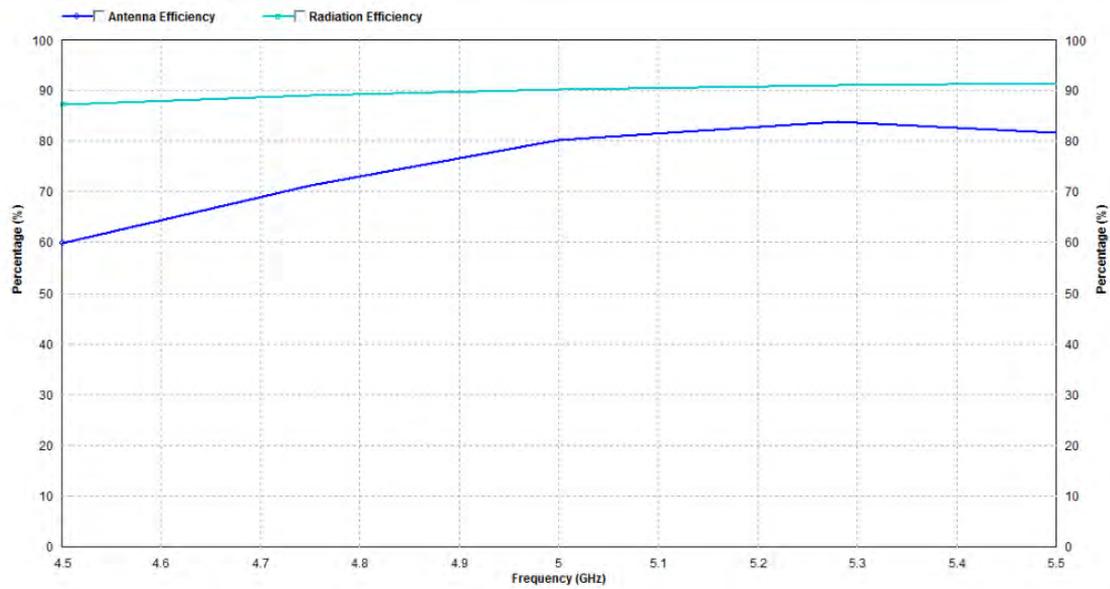


Figura 32 Eficiencia de antena y de radiación para una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.5.3.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes ϕ 0 (plano H) y ϕ 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo está situado en el ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. El diagrama de radiación de este diseño tiene anchos de haz más estrechos en el corte $\phi = 0^\circ$ comparando con la antena microstrip completamente de cobre. Para el plano E (ϕ 90) se tiene un ancho de haz de 115° y de 45° en el plano H (ϕ 0). La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip con el parche radiante de agua es de 7 dB.

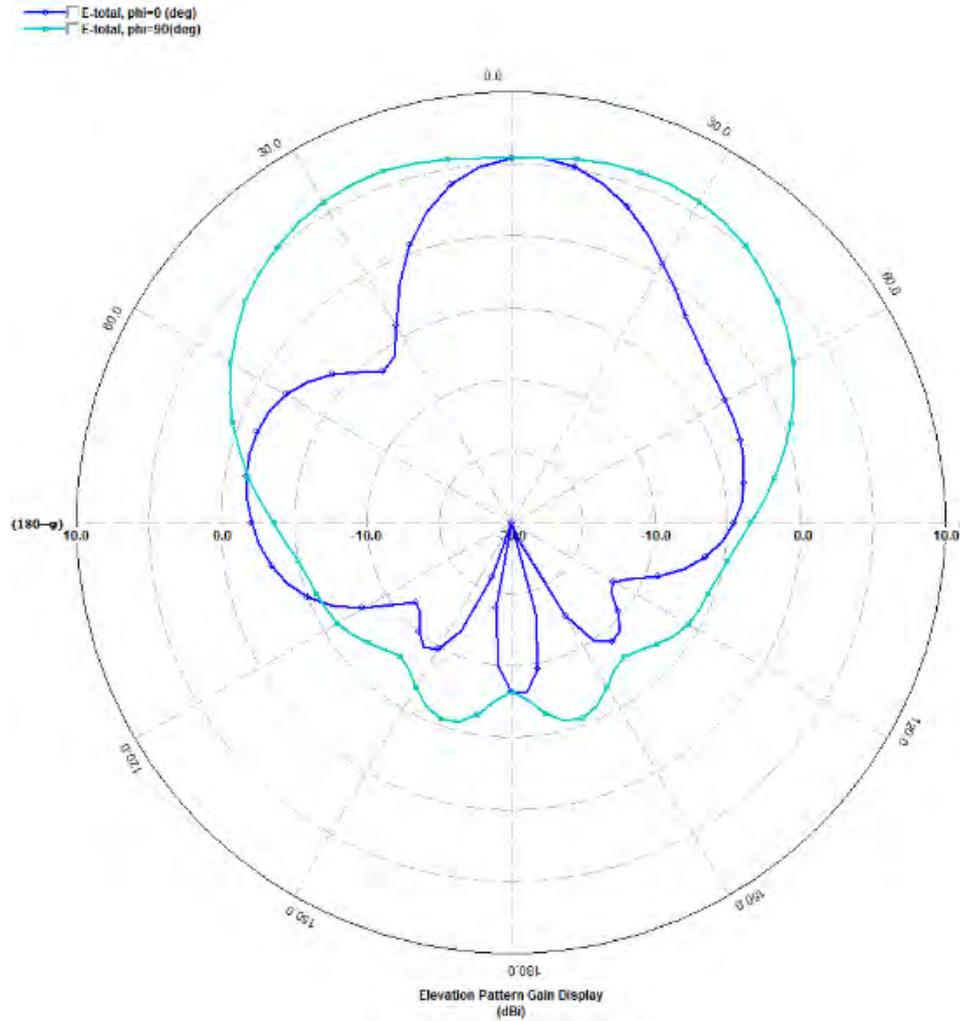


Figura 33 Diagrama de radiación para una antena microstrip con parche radiante de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea azul oscuro) y PHI = 90 (línea celeste).

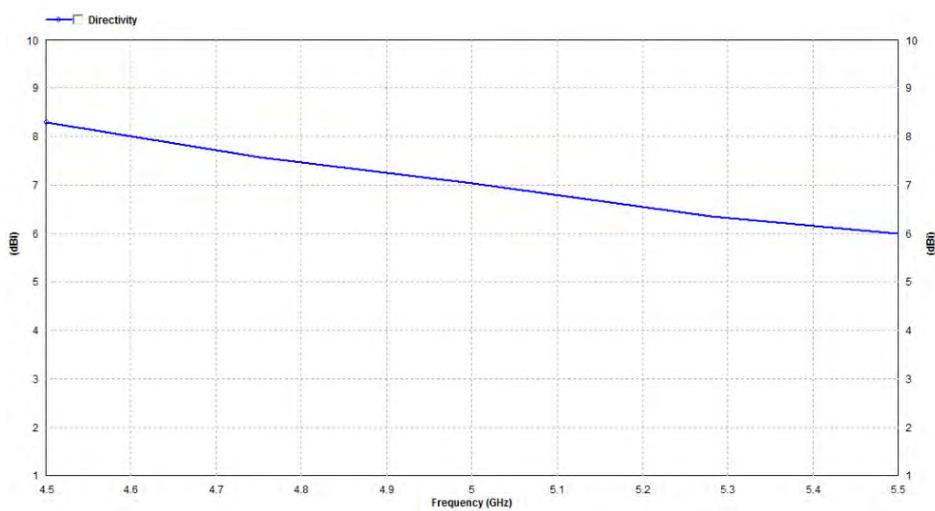


Figura 34 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip con parche radiante de agua con alimentador por acople capacitivo.

2.5.4 Antena microstrip con plano de masa de agua y alimentador por acople capacitivo

2.5.4.1 Geometría de antena

A continuación se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip con plano de masa de agua. En este diseño se conserva el parche radiante de cobre (Tabla 8). Para conseguir adaptar el diseño, después de varias simulaciones, se han reducido las dimensiones del alimentador en forma de "L" 0.5 mm y acercado al centro 2 mm. Se ha mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Cobre Agua	27x27x1	100x100x5	13.5	5	7

Tabla 8 Geometrías de la antena microstrip con plano de masa de agua y con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.5.4.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo, obteniéndose un BW del 8% superior al mínimo requerido con una ROE inferior a 3.

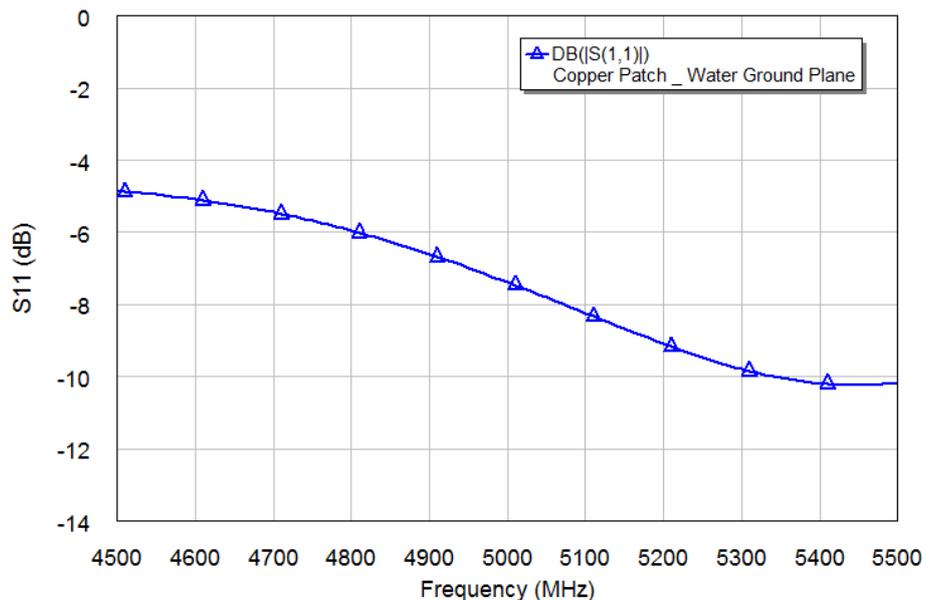


Figura 35 Parámetros S_{11} (dB) para una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.5.4.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip con un plano de masa de agua, se obtienen buenos resultados de eficiencia habiendo optimizado al máximo las dimensiones del diseño, puesto que se obtiene una media del 74.4% de eficiencia de antena en la banda de interés. En términos de eficiencia de radiación se ha producido una ligera disminución respecto a la antena microstrip de cobre con una media de 91%.

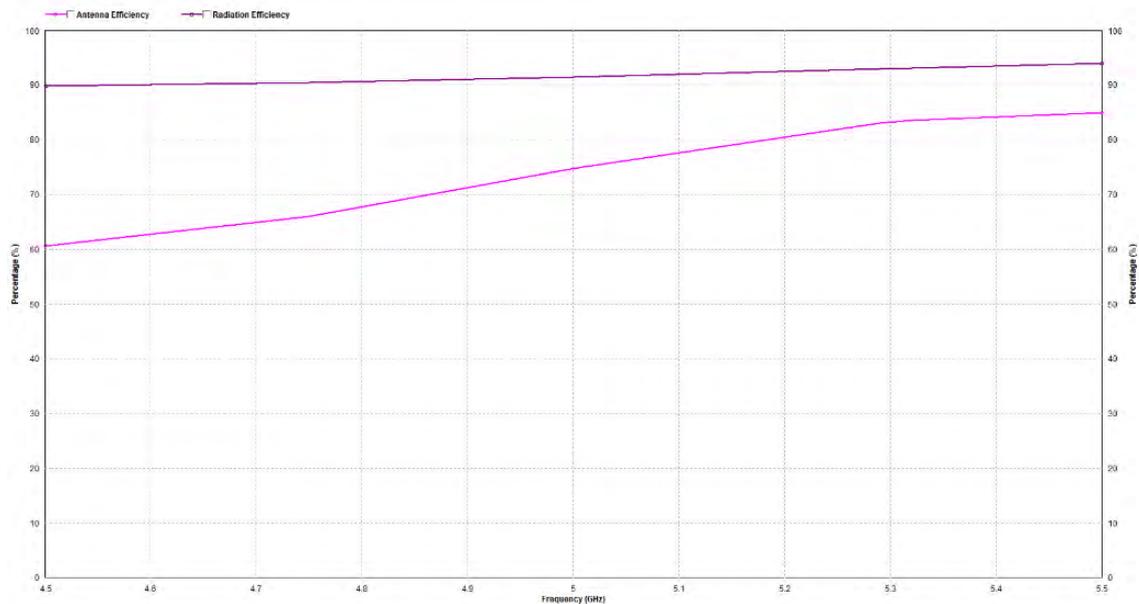


Figura 36 Eficiencia de antena y de radiación para una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.5.4.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se tiene un ancho de haz de 120° y de 55° en el plano H (phi 0). Se puede observar que en este diseño (Figura 37) la radiación hacia atrás es algo mayor que en casos anteriores, puesto que afecta al aislamiento el hecho de haber sustituido un plano de masa de cobre por uno de agua. La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip con el plano de masa de agua es de 7 dB.

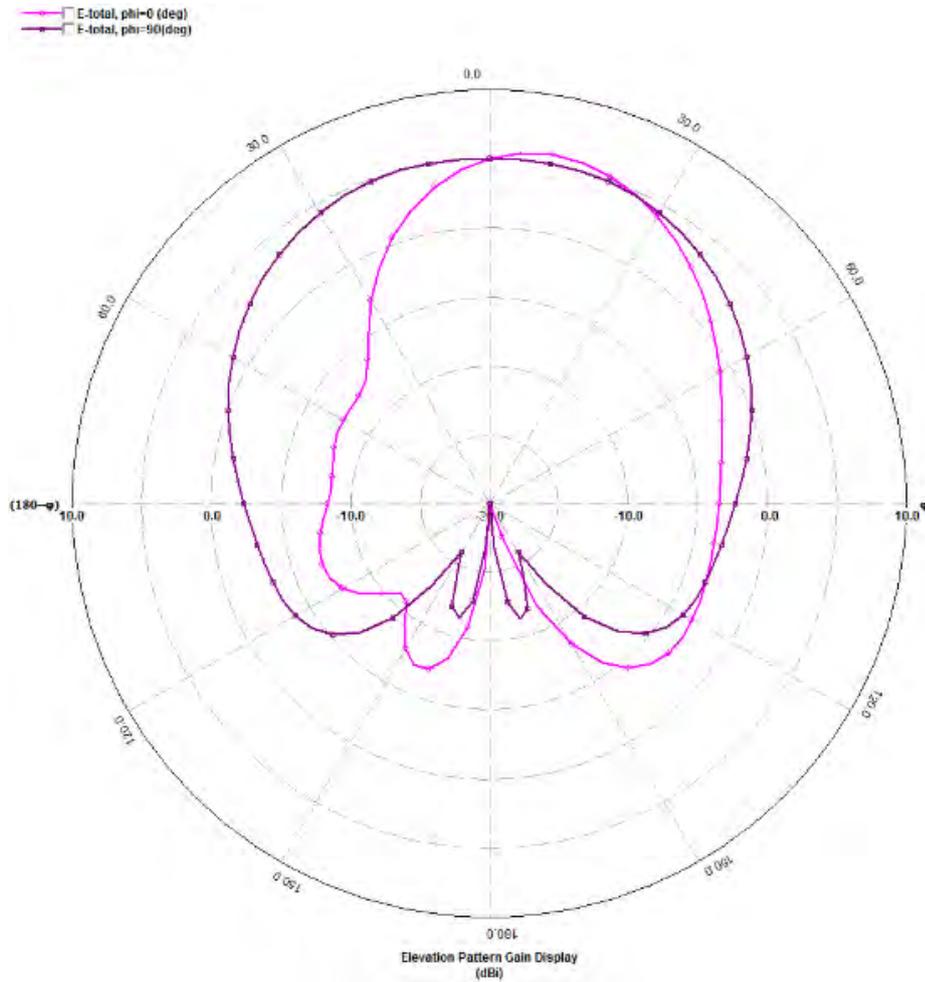


Figura 37 Diagrama de radiación para una antena microstrip con plano de masa de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea rosa) y PHI = 90 (línea lila).

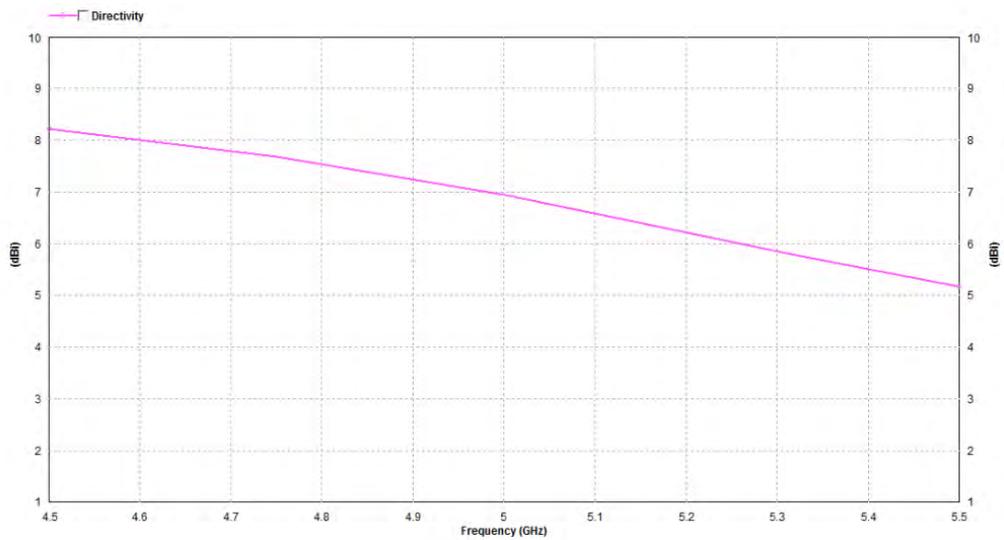


Figura 38 Directividad máxima (dB) en una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.5.5 Antena microstrip completamente de agua y alimentador por acople capacitivo

2.5.5.1 Geometría de antena

A continuación, se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip hecha completamente de agua. En este diseño se llevan a cabo las geometrías que se implementarán en el capítulo siguiente. Para conseguir adaptar el diseño, el resultado final después de varias simulaciones ha sido corregir ligeramente las dimensiones del parche radiante y desplazar el alimentador por acople capacitivo, alejándolo del centro 3 mm respecto al diseño de la antena de cobre. Se han mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Agua	28x28x5	100x100x5	13.5	5	13

Tabla 9 Geometrías de una antena microstrip hecha completamente de agua. Cotas en mm.

2.5.5.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo. Con una adaptación de -10dB a la frecuencia centrada de 5 GHz, se obtiene un BW insuficiente para una ROE inferior a 2. En cambio, tenemos un amplio BW (=20%) cumpliendo con los criterios de $ROE < 3$ (Figura 39).

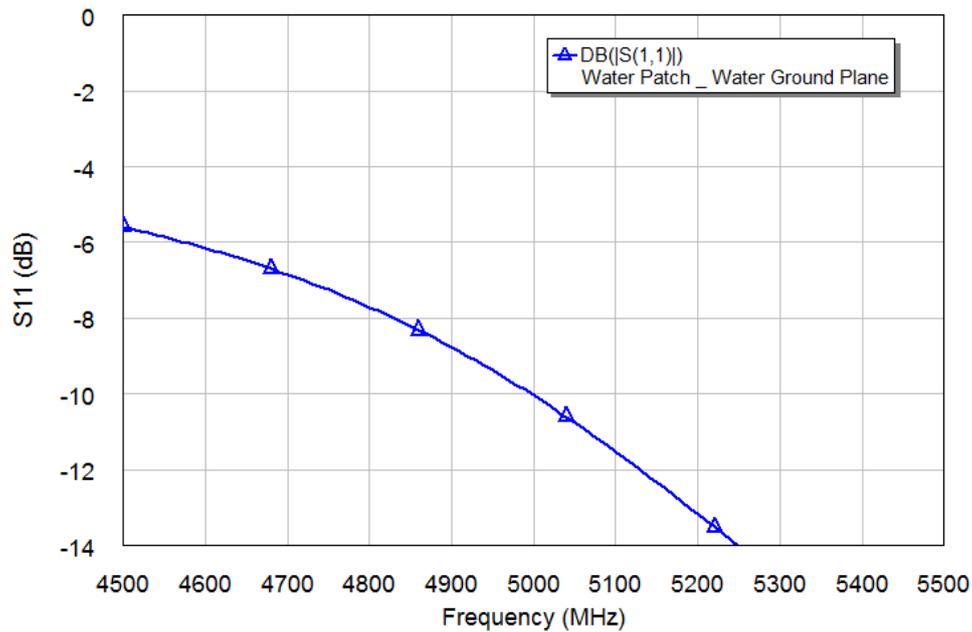


Figura 39 Parámetros S11 (dB) para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.5.5.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado (Figura 40).

Para una antena microstrip hecha completamente de agua se obtiene una disminución considerable en eficiencia debido al material que se está utilizando, pues genera muchas pérdidas en comparación al uso de materiales conductivos.

En términos de eficiencia de antena se obtiene un 41.9% a la frecuencia de 5 GHz y una media de 42% en la banda de interés cumpliendo los requisitos mínimos de BW=4% (4.9 – 5.1 GHz). La eficiencia de radiación media en la banda de interés está en el 46.4%

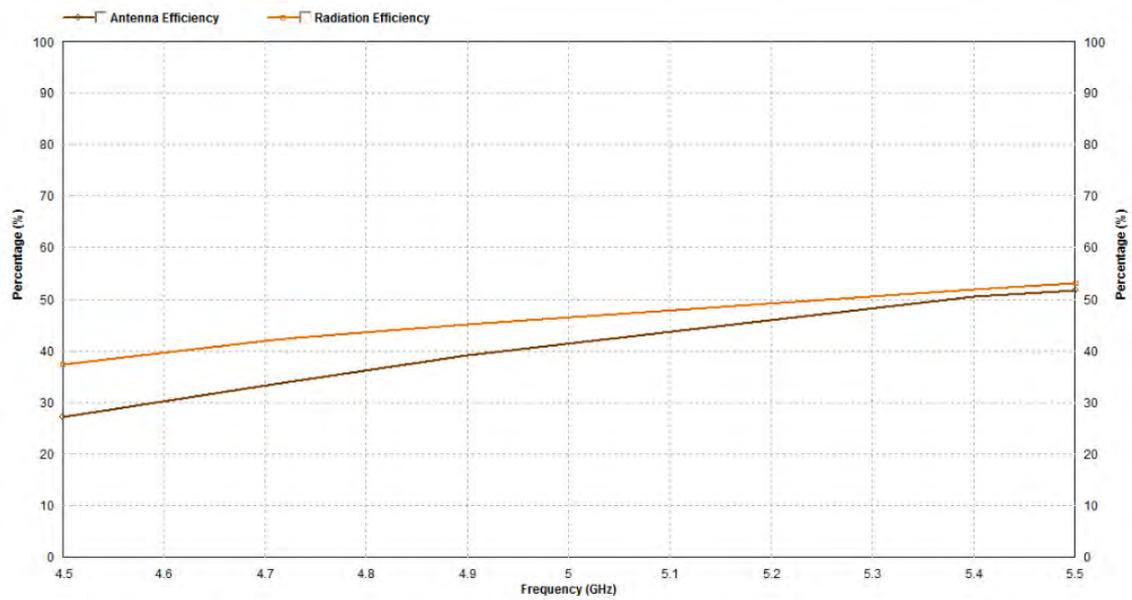


Figura 40 Eficiencia de antena y radiación para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.5.5.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes ϕ 0 (plano H) y ϕ 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo está centrado respecto al ángulo 0 paralelo al eje Z (Figura 41). El diagrama de radiación de este diseño tiene anchos de haz más estrechos comparando con diseños anteriores con parte o completamente de cobre. Para el plano E (ϕ 90) se tiene un ancho de haz de 115° y de 47° en el plano H (ϕ 0). La Directividad media en la banda de interés es de 7.6 dB.

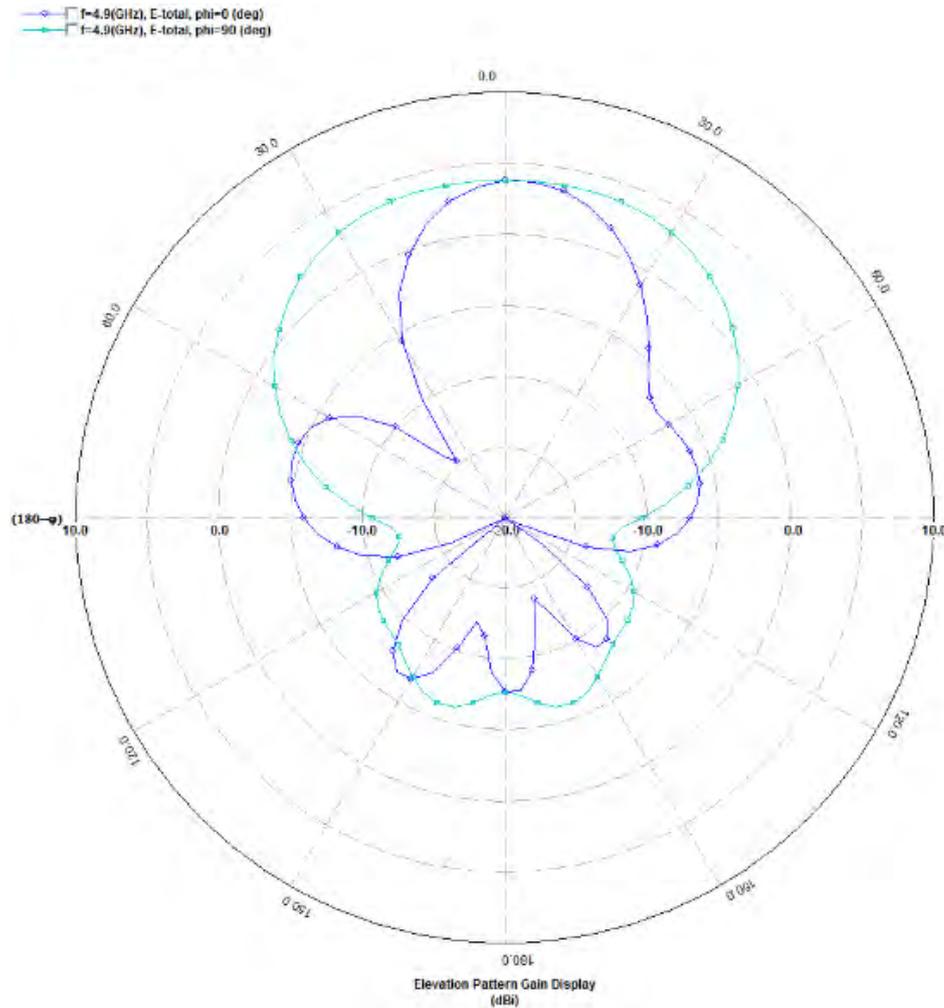


Figura 41 Diagrama de radiación para una antena microstrip hecha completamente de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea azul oscuro) y PHI = 90 (línea celeste).

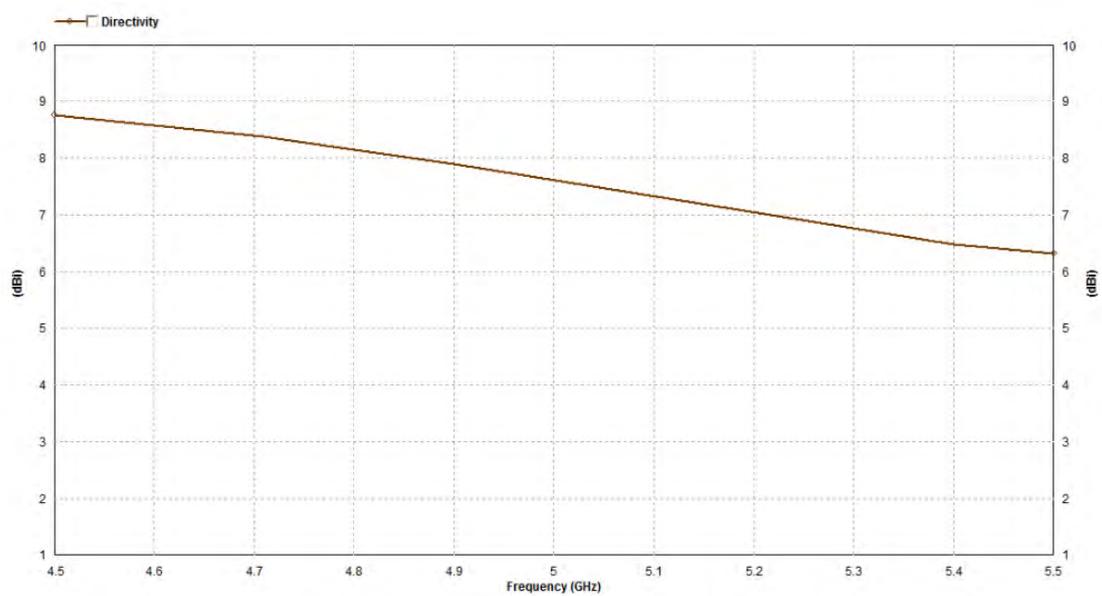


Figura 42 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.6 Simulación de una antena microstrip @0.9 GHz

2.6.1 Introducción

En este capítulo se expondrán los resultados de las simulaciones realizadas para la implementación de una antena microstrip completamente de agua a la frecuencia de 0.9 GHz. El proceso será el comentado anteriormente, diseño y adaptación de una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo, e ir añadiendo paso a paso componentes de agua para readaptar el diseño, cumpliendo así con los criterios mínimos de adaptación ($ROE < 3$, $BW_{\min} = 4\%$). También se analizan para cada caso resultados de eficiencia, diagrama de radiación y directividad.

2.6.2 Antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo

2.6.2.1 Geometría de antena

Las dimensiones del parche radiante varían ligeramente de la aproximación inicial realizada según el método de líneas de transmisión, en calidad de corrección adaptativa. El largo del hilo conductor estará fijado con un techo superior, en el caso de la antena resonando a 0.9 GHz, tendrá que ser menor a la longitud de una antena monopolo $\lambda/4$ (83 mm).

Las dimensiones del plano de masa se modifican para obtener unos resultados de eficiencia y de diagrama de radiación óptima, no suponen un impacto significativo para otras características como la adaptación.

A continuación, se exponen las geometrías del primer diseño de una antena microstrip de cobre alimentada por acople capacitivo (ver Tabla 10).

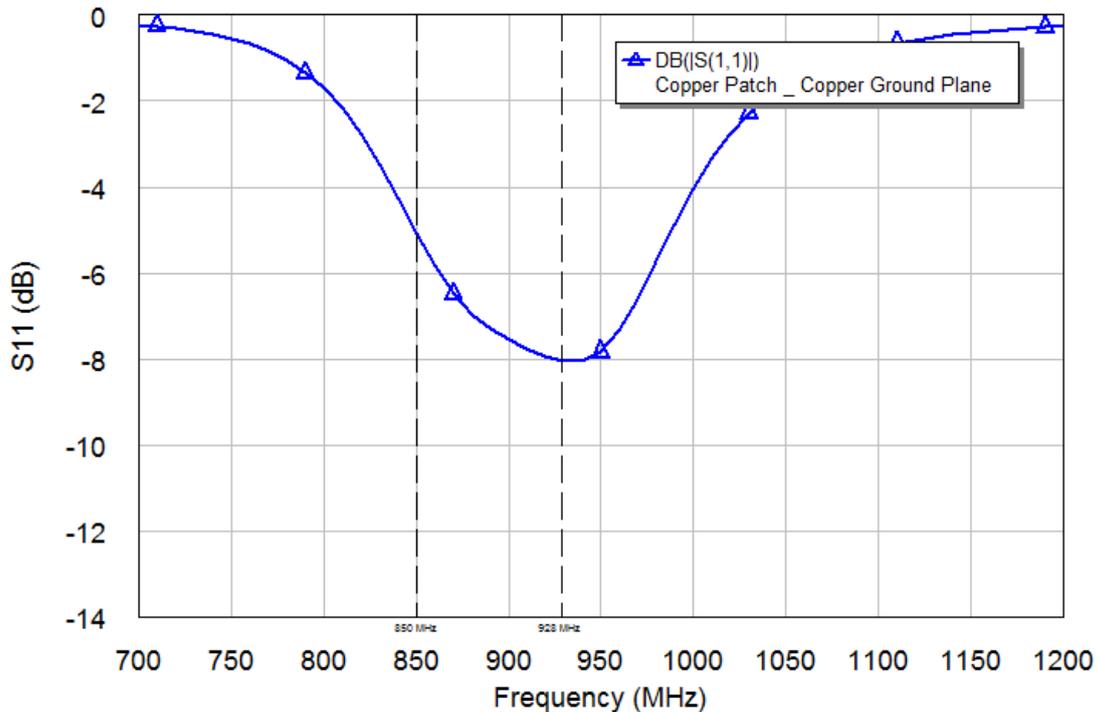
	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Cobre Cobre	148x148x1	450x450x1	79	10	40

Tabla 10 Geometrías de la antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.6.2.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño

simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados de $ROE < 3$ se cumple un BW superior al 4%, este BW correspondería al ancho correspondiente con una frecuencia centrada a 0.9 GHz.



Parámetros S11 (dB) para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.6.2.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip de cobre, se puede ver como la eficiencia de radiación está cerca del máximo, eso es lo que se espera de un diseño bien optimizado para una antena con materiales altamente conductivos. En términos de eficiencia de antena se obtienen valores muy constantes debido al alto ancho de banda adaptado que se ha podido observar en el apartado anterior. A la frecuencia de 0.9 GHz se tiene una eficiencia de antena del 80% con un máximo de eficiencia de radiación del 97.9%. En la banda de interés, cumpliendo con un BW superior al 4%, se obtiene una media de eficiencia de antena del 78%, y una eficiencia de radiación media de 96.5%.

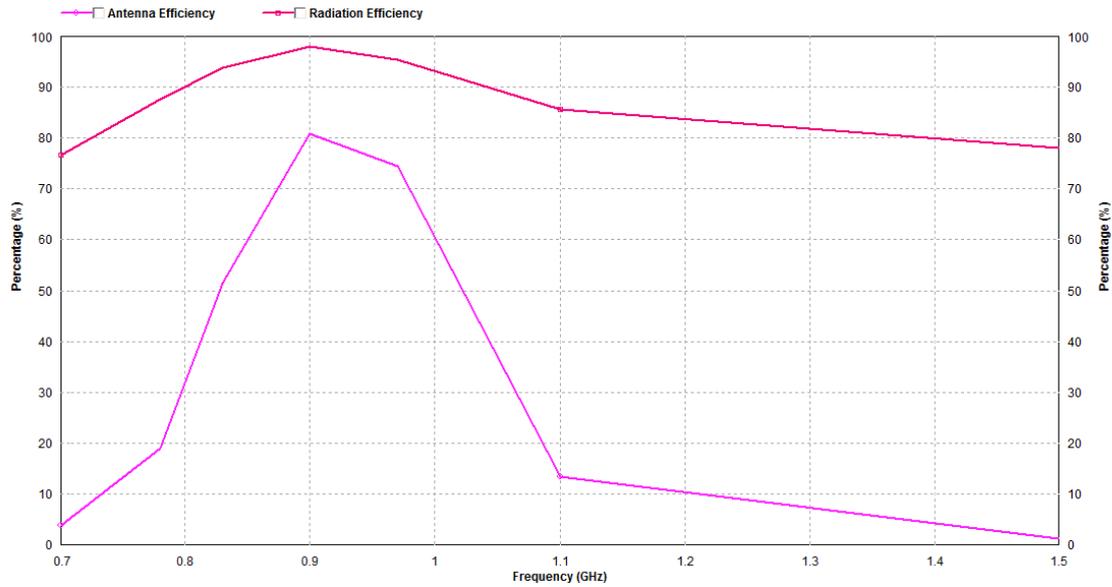


Figura 43 Eficiencia de antena y radiación para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.6.2.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo tiende al ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. El diagrama de radiación de este diseño tiene un ancho de haz de 74° en el plano E (phi 90) y de 60° en el plano H (phi 0). La Directividad de la antena microstrip de cobre es de 9.1 dB en la frecuencia de interés (0.9 GHz).

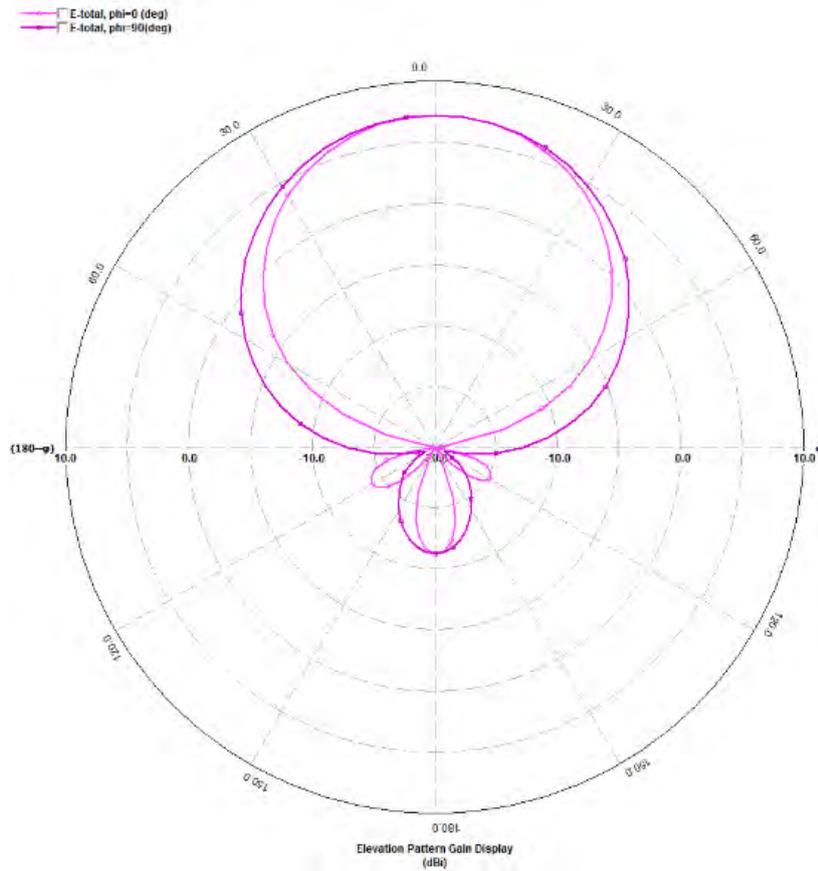


Figura 44 Diagrama de radiación para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea rosa) y PHI = 90 (línea lila).

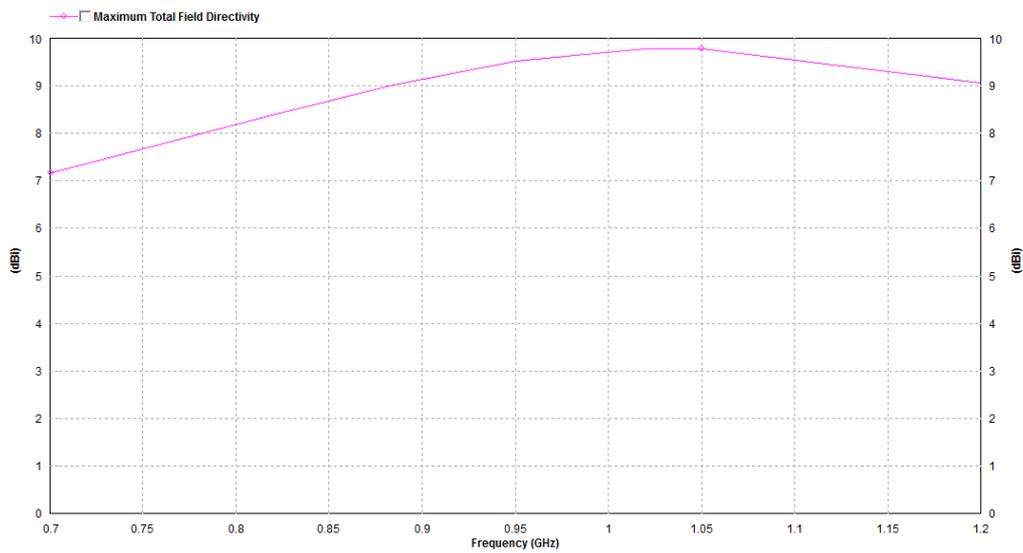


Figura 45 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip de cobre con alimentador por acople capacitivo.

2.6.3 Antena microstrip con parche radiante de agua y alimentador por acople capacitivo

2.6.3.1 Geometría de antena

A continuación, se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip con parche radiante de agua. En este diseño se conserva el plano de masa de cobre alimentado por acople capacitivo. Para conseguir adaptar el diseño se han modificado todos los componentes de la antena, se ha aumentado el parche radiante 12 mm por lado y desplazado el alimentador en forma de "L" 8 mm del centro, también sus dimensiones. Se ha mantenido la altura entre parche radiante y plano de masa (ver Tabla 11).

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Cobre	160x160x5	400x400x1	73	10	20

Tabla 11 Geometrías de la antena microstrip con parche radiante de agua y con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.6.3.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo ($ROE < 3$). Para este diseño, el máximo de adaptación está centrado a la frecuencia de interés (0.9 GHz). En términos de ancho de banda se cumple con los criterios marcados para un diseño válido ($BW_{min} > 4\%$, $ROE < 3$).

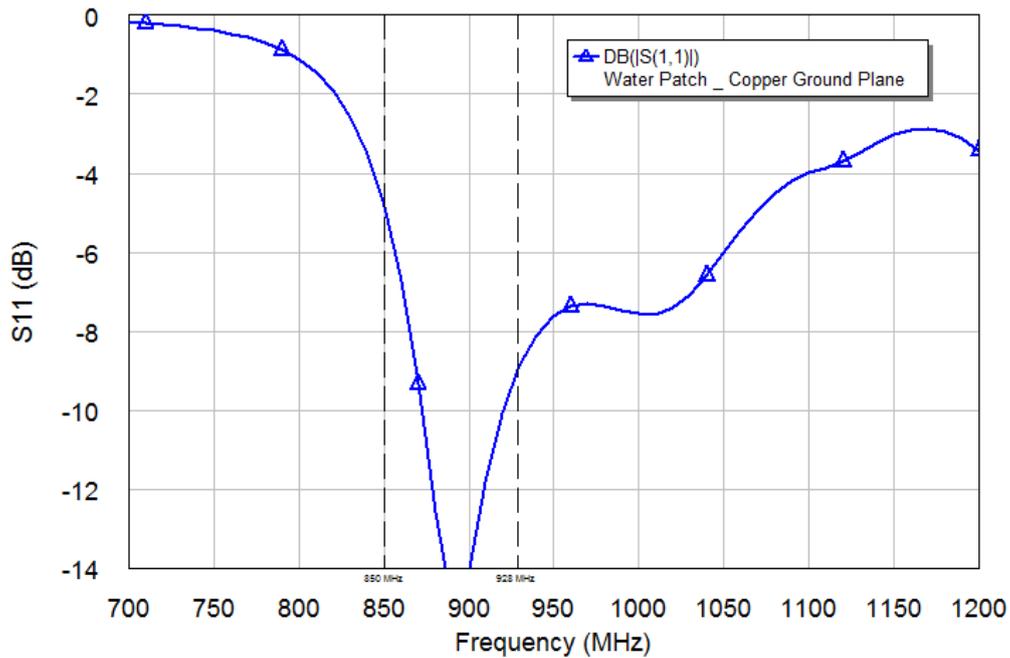


Figura 46 Parámetros S11 (dB) para una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.6.3.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para una antena microstrip con un parche radiante de agua, se puede ver como la eficiencia ha disminuido considerablemente respecto al caso de la antena de cobre, siendo lógico puesto que se ha sustituido un material conductor por un dieléctrico. Pese a eso, se obtienen resultados decentes, habiendo optimizado al máximo las dimensiones del diseño, se obtiene un 42.6% de eficiencia de antena a la frecuencia de 0.9 GHz. La eficiencia media de antena con un BW del 4% es del 43%. La eficiencia de radiación en la banda de interés es de un 46.4%.

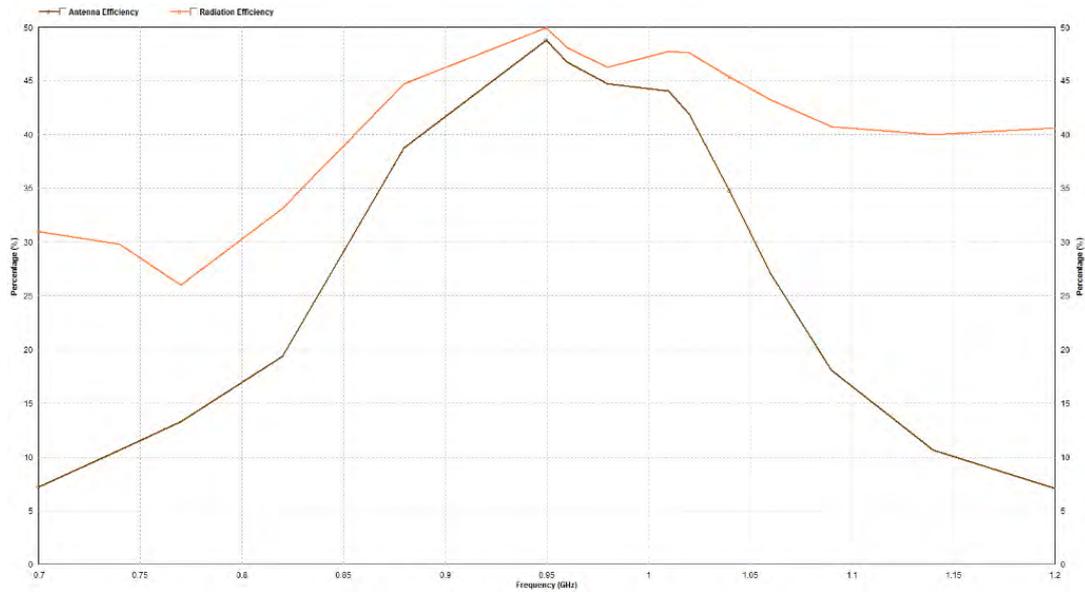


Figura 47 Eficiencia de antena y de radiación para una antena microstrip con parche radiante de agua.

2.6.3.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes ϕ 0 (plano H) y ϕ 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se observa un comportamiento propio de una antena microstrip, cuyo máximo está situado en el ángulo 0 radiando paralelo al eje Z. El diagrama de radiación de este diseño tiene anchos de haz más grandes en el corte $\phi = 0^\circ$ comparando con la antena microstrip completamente de cobre. Para el plano E (ϕ 90) se tiene un ancho de haz de 90° y de 57° en el plano H (ϕ 0). La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip con el parche radiante de agua es de 8.1 dB.

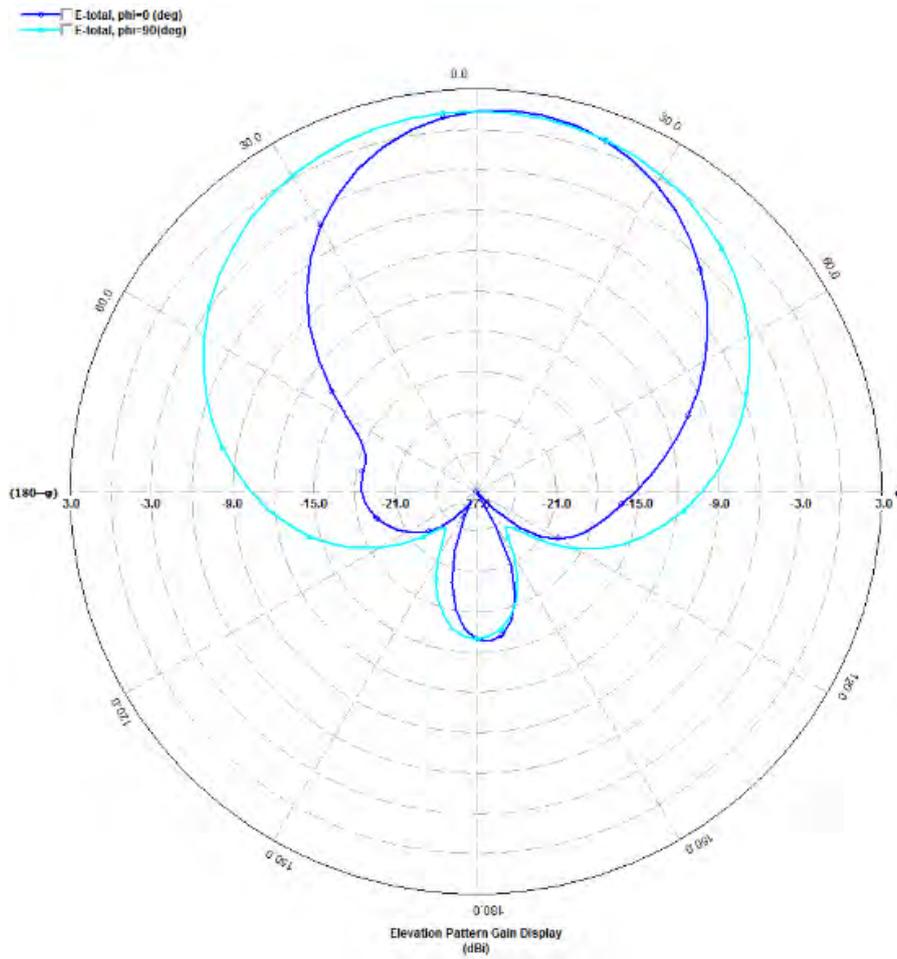


Figura 48 Diagrama de radiación para una antena microstrip con parche radiante de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea azul oscuro) y PHI = 90 (línea celeste).

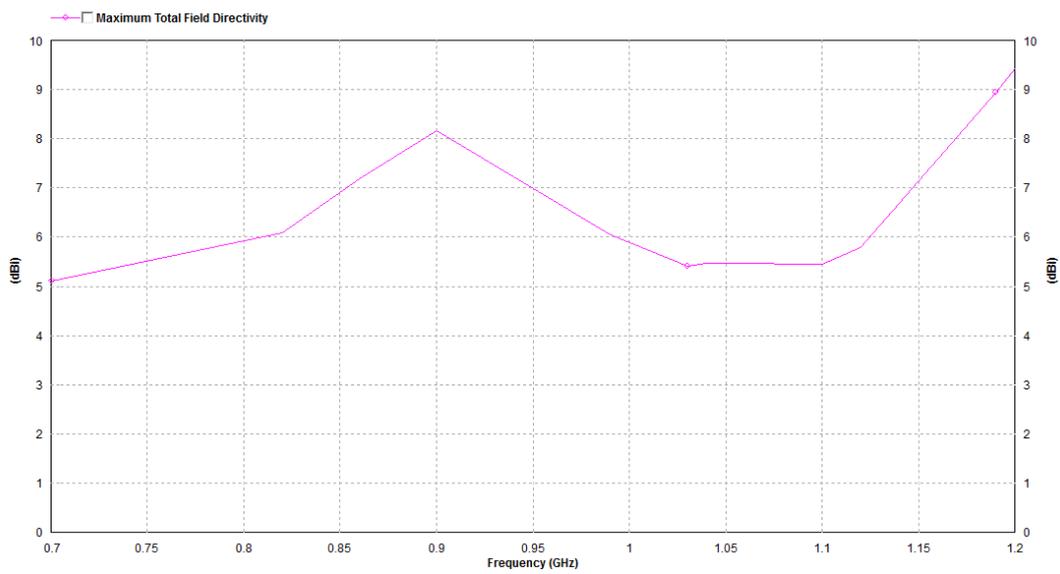


Figura 49 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip con parche radiante de agua con alimentador por acople capacitivo.

2.6.4 Antena microstrip con plano de masa de agua y alimentador por acople capacitivo

2.6.4.1 Geometría de antena

A continuación, se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip con plano de masa de agua. En este diseño se conserva el parche radiante de cobre (Tabla 12). Para conseguir adaptar el diseño, después de varias simulaciones, se aumentan las dimensiones del parche 15 mm por lado y se mantienen las dimensiones del alimentador respecto a la antena con parche radiante de agua, pero se desplaza sobre el plano de masa alejándolo del centro a 96 mm. Se ha mantenido el resto de elementos.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Cobre Agua	175x175x1	400x400x5	73	10	96

Tabla 12 Geometrías de la antena microstrip con plano de masa de agua y con alimentador por acople capacitivo. Cotas en mm.

2.6.4.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo ($ROE < 3$), obteniéndose un BW del 20%, superior al mínimo requerido con una ROE inferior a 3.

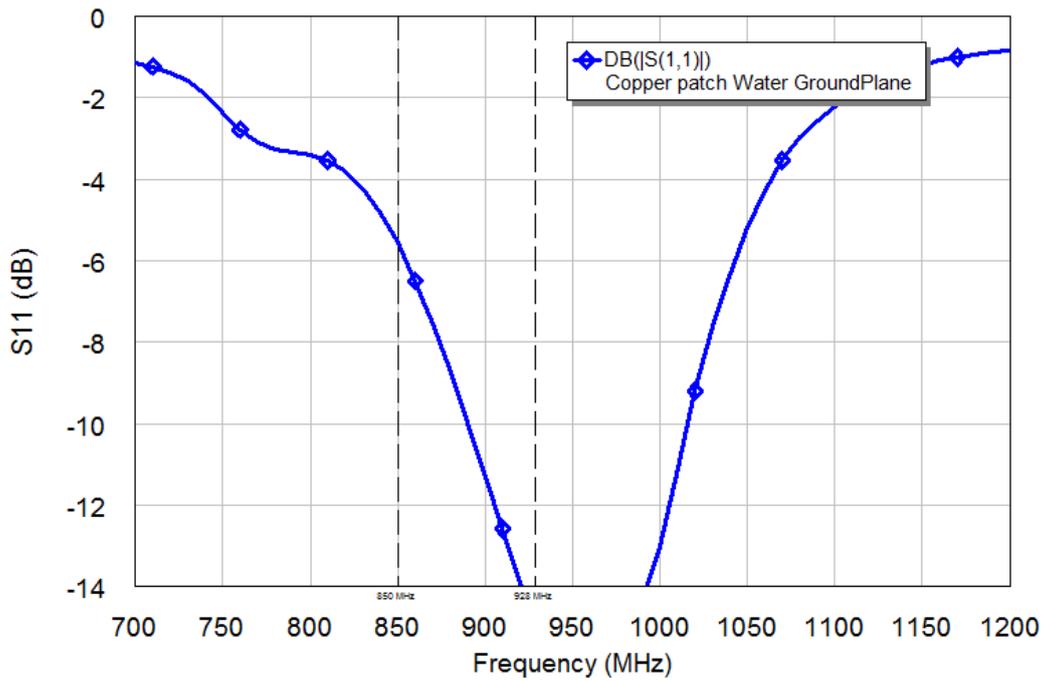


Figura 50 Parámetros S11 (dB) para una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.6.4.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado.

Para este caso, se ha sufrido una disminución muy considerable para una antena microstrip con un plano de masa de agua. Respecto a casos anteriores para antenas trabajando a otras frecuencias, se obtienen buenos resultados de eficiencia, en este caso se ha de tener en cuenta el considerable tamaño del plano de masa (ver Tabla 12). Habiendo seguido el mismo procedimiento que en casos anteriores, para optimizar las dimensiones del diseño, se ha obtenido una media del 21.5% de eficiencia de antena en la banda de interés (BW>4%). En términos de eficiencia de radiación se obtiene una media de 23%.

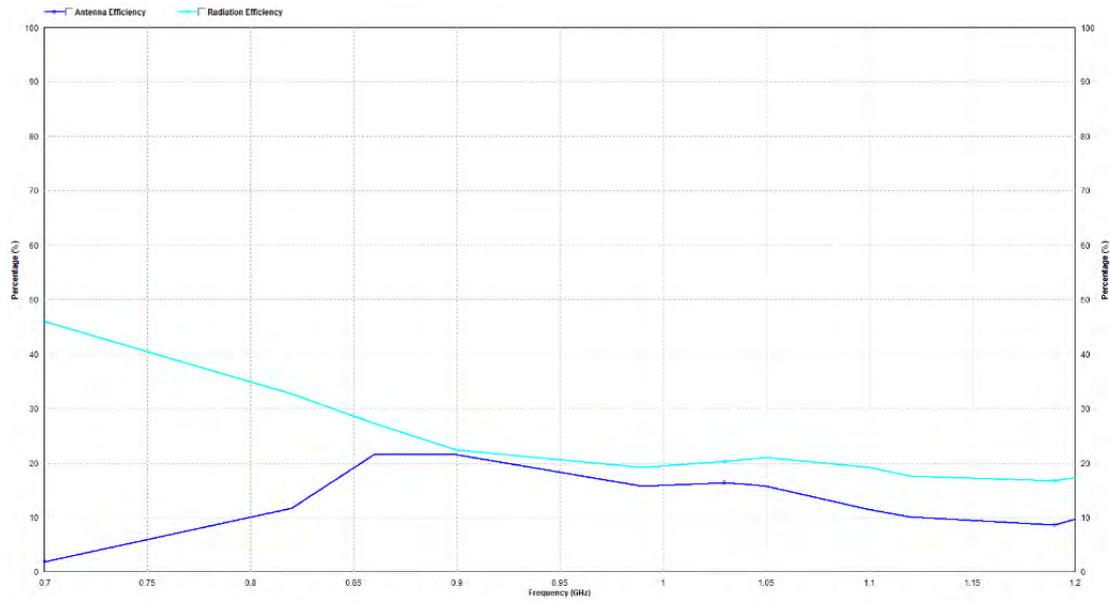


Figura 51 Eficiencia de antena y de radiación para una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.6.4.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se puede observar que en este diseño (Figura 52) la radiación hacia atrás está desmesuradamente elevada respecto a casos anteriores, puesto que afecta al aislamiento el hecho de haber sustituido un plano de masa de cobre por uno de agua. Es necesario estudiar más profundamente este caso dado que tras varios cambios en la geometría de este diseño, la relación F/B del diagrama de radiación es negativa, es decir, hay máximos hacia atrás mayores que los máximos hacia delante. La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip con el plano de masa de agua es de 7 dB.

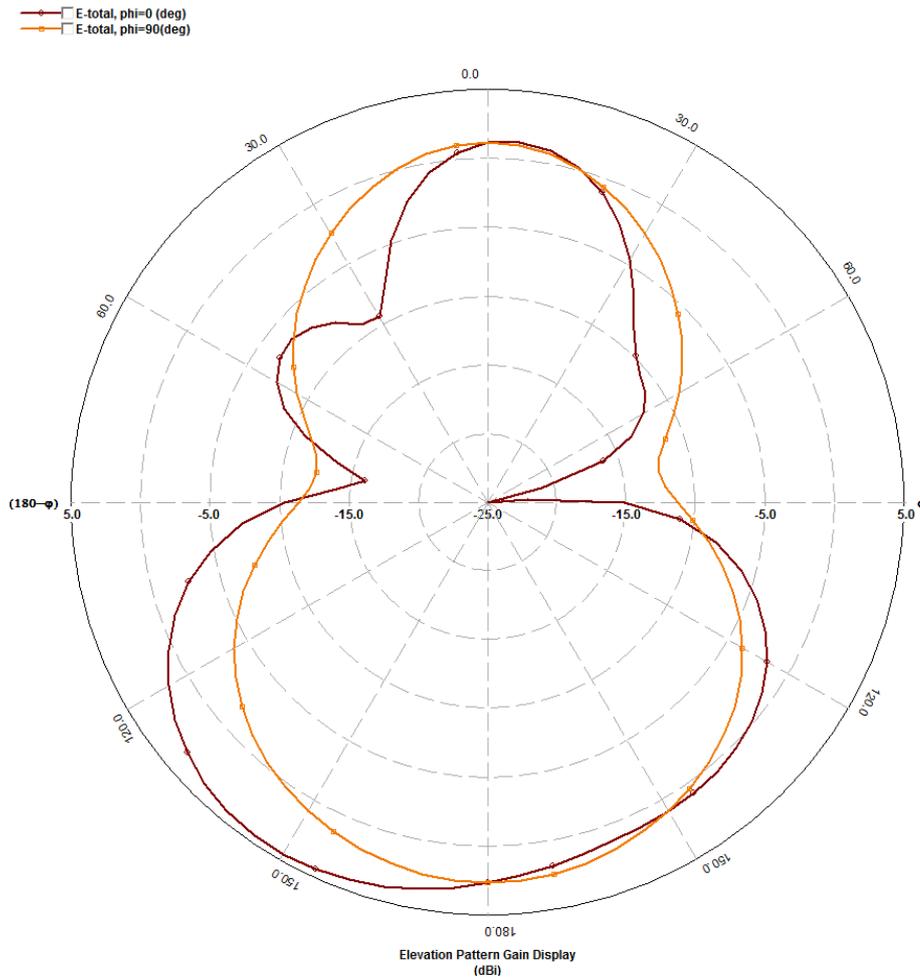


Figura 52 Diagrama de radiación para una antena microstrip con plano de masa de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea naranja) y PHI = 90 (línea marrón).

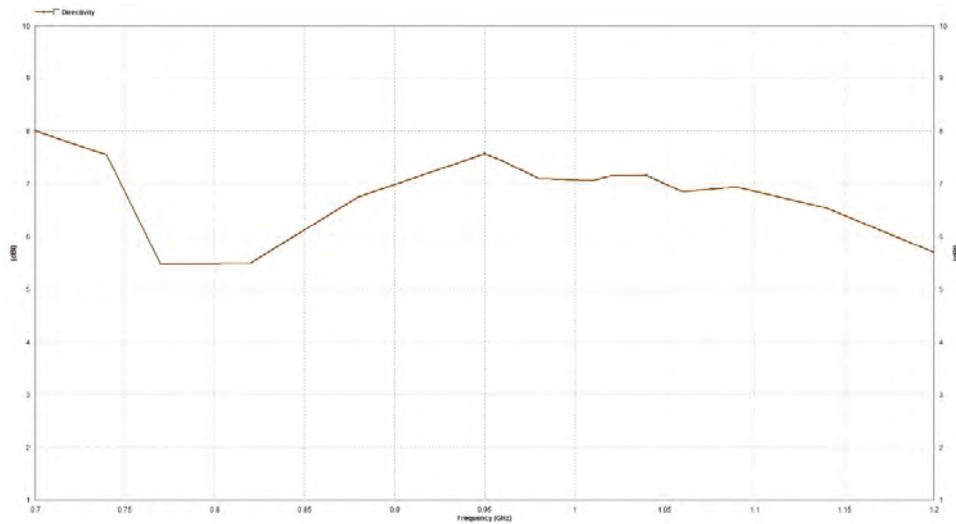


Figura 53 Directividad máxima (dB) en una antena microstrip con plano de masa de agua.

2.6.5 Antena microstrip completamente de agua y alimentador por acople capacitivo

2.6.5.1 Geometría de antena

A continuación, se exponen las geometrías del diseño de una antena microstrip hecha completamente de agua. En este diseño se tendrán en cuenta las inconveniencias sufridas en el apartado anterior, analizando los resultados de este apartado para tener en cuenta si llevar a cabo la implementación del diseño. Para conseguir adaptar una antena microstrip completamente de agua, el resultado final después de varias simulaciones ha sido corregir ligeramente las dimensiones del parche radiante, disminuir ligeramente las dimensiones y desplazar el alimentador por acople capacitivo, alejándolo del centro 98 mm. Se han mantenido el resto de elementos (ver Tabla 13).

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Agua	175x175x5	400x400x5	70	10	98

Tabla 13 Geometrías de una antena microstrip hecha completamente de agua. Cotas en mm.

2.6.5.2 Parámetros S

A continuación, se exponen los resultados de adaptación, S_{11} (dB), para el diseño simulado. Se puede observar que para los criterios estipulados se cumplen los criterios de ROE en este capítulo ($ROE < 3$, $BW_{min} > 4\%$). Con un máximo de adaptación a la frecuencia de 0.9 GHz, se cumple con un BW superior al 4% para una ROE inferior a 2. Por otro lado, tenemos un amplio BW (=19.4%) cumpliendo con los criterios de $ROE < 3$ (Figura 54).

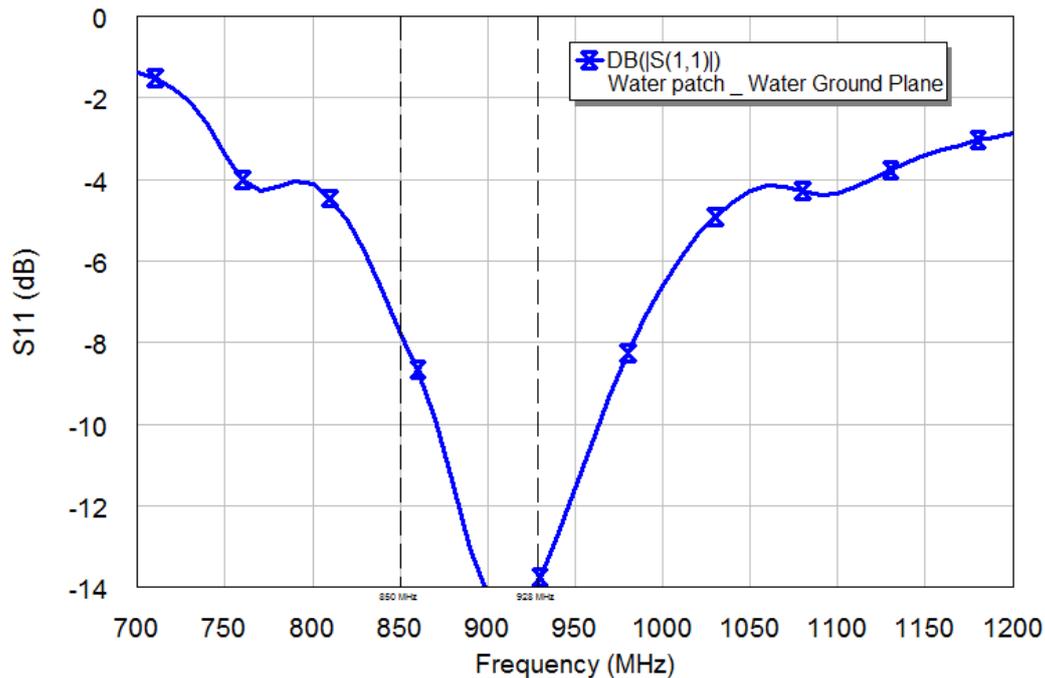


Figura 54 Parámetros S11 (dB) para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.6.5.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez validados los resultados y adaptado el diseño se procede a extraer los resultados de eficiencia de radiación y antena del diseño simulado (Figura 55).

Para una antena microstrip hecha completamente de agua se obtiene una disminución considerable en eficiencia debido al material que se está utilizando, pues genera muchas pérdidas en comparación al uso de materiales conductivos. En este caso, se obtiene una disminución inferior al 20% de eficiencia de antena en la banda de interés. Tal y como se ha podido ver para el diseño de una antena microstrip con un plano de masa de agua y parche radiante de cobre en la sección anterior, la eficiencia de antena estaba en un 21.5%, comparado con el diseño actual, quiere decir que el mayor peso en la disminución del rendimiento del diseño lo tiene el plano de masa de agua. Sería conveniente en líneas futuras, realizar un estudio sobre el efecto y las consecuencias de un plano de masa de dimensiones óptimas para bajas frecuencias, a fin de optimizar al máximo las prestaciones de una antena trabajando a esta frecuencia.

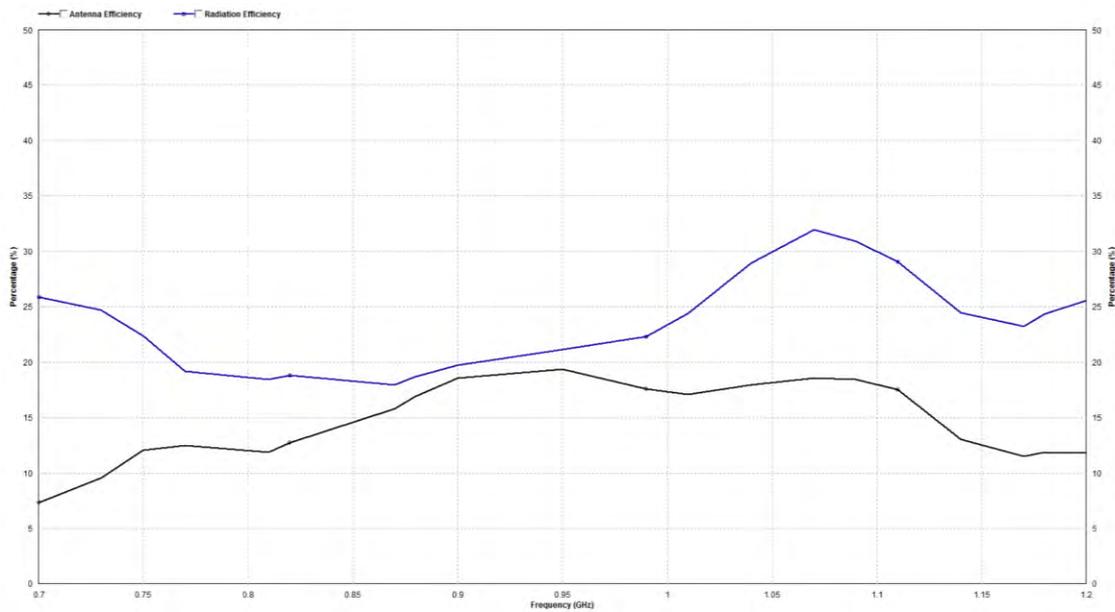


Figura 55 Eficiencia de antena y radiación para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.6.5.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes ϕ 0 (plano H) y ϕ 90 (plano E). Analizando el diagrama de radiación se puede observar que en este diseño (Figura 56) la radiación hacia atrás está desmesuradamente elevada, como se observó en el caso de una antena microstrip con plano de masa de agua del apartado anterior. Esto puede suceder debido al efecto del aislamiento y el hecho de haber sustituido un plano de masa de cobre por uno de agua, y hacerlo en dimensiones mucho mayores que trabajando a frecuencias más altas. Es necesario estudiar más profundamente este caso dado que tras varios cambios en la geometría de este diseño, la relación F/B del diagrama de radiación es negativa, es decir, hay máximos hacia atrás mayores que los máximos hacia delante. La Directividad media en la banda de interés de una antena microstrip hecha completamente de agua es de 5 dB.

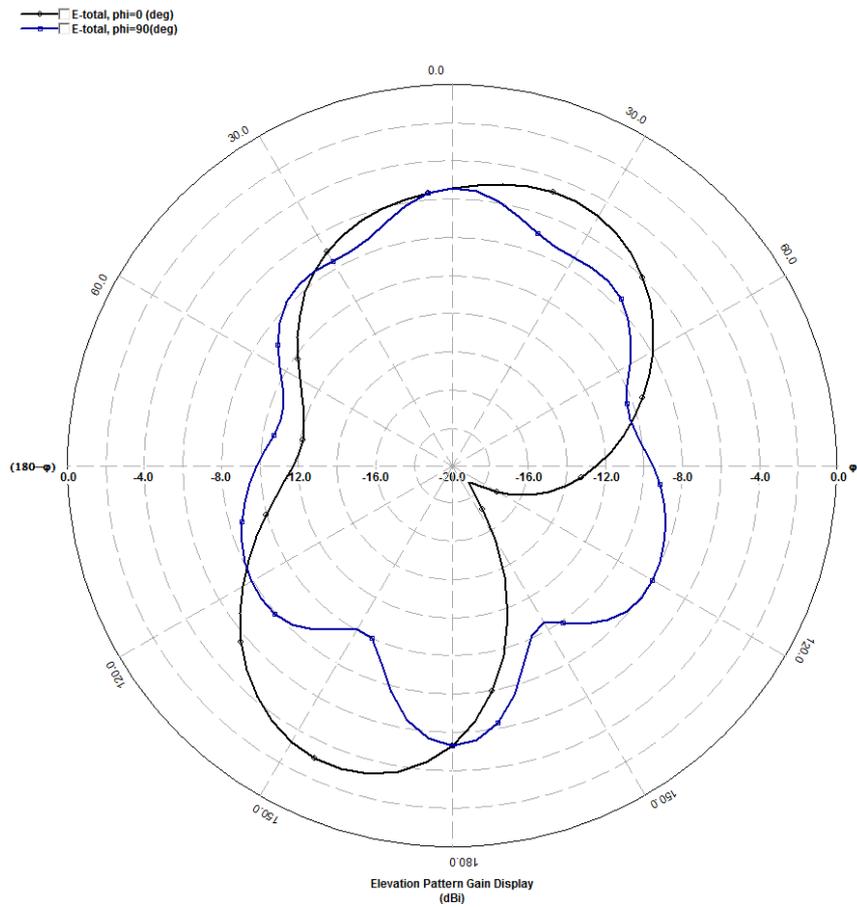


Figura 56 Diagrama de radiación para una antena microstrip hecha completamente de agua y con alimentador por acople capacitivo. PHI = 0 (línea negra), PHI = 90 (línea azul).

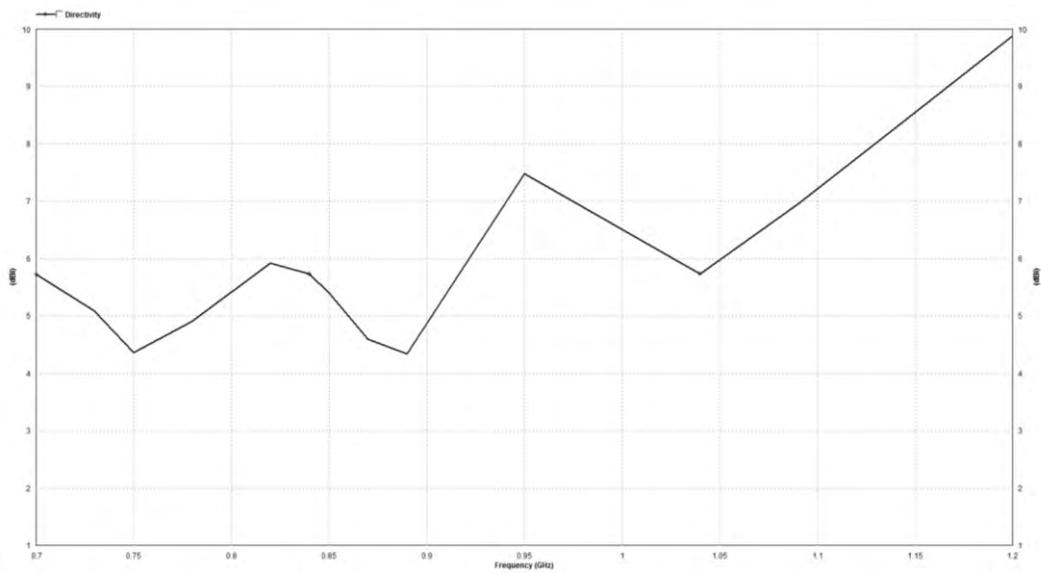


Figura 57 Directividad máxima (dB) para una antena microstrip hecha completamente de agua.

2.7 Conclusiones

Para el diseño de una antena microstrip trabajando en la banda 2.4 – 2.5 GHz, cuyo parche radiante y plano de masa están hechos de agua encapsulada, se han obtenido resultados satisfactorios para pasar al proceso de implementación. Con un máximo de adaptación entre 2.4 GHz y 2.5 GHz, se obtiene un amplio BW (14%) para una ROE inferior a 2. En términos de eficiencia de antena se obtiene un 62.5% a la frecuencia de 2.4 GHz y un 67.3% a 2.5 GHz, trabajando con una media de eficiencia de antena de 64.75% y 68% de eficiencia de radiación. Analizando el diagrama de radiación se obtienen anchos de haz para el plano E (ϕ 90) de 135° y de 60° en el plano H (ϕ 0). La Directividad media en la banda de interés es de 6.5 dB. Las dimensiones del diseño final simulado lo podemos ver en la tabla a continuación:

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Versión final	47x47x5	160x160x5	28	10	7

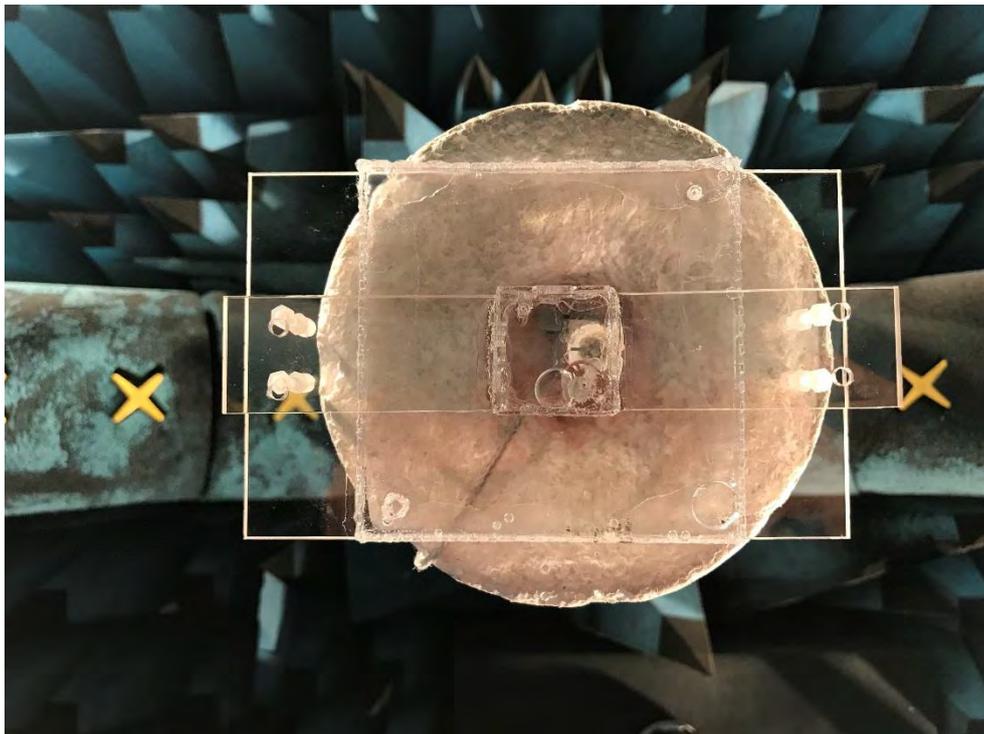
En el caso de un diseño trabajando a la frecuencia de 5GHz, también se han obtenido resultados satisfactorios para proceder a implementar el diseño final. Con una adaptación de -10dB a la frecuencia centrada de 5 GHz, se obtiene amplio BW (=20%) cumpliendo con los criterios de ROE<3. En términos de eficiencia de antena se obtiene un 41.9% a la frecuencia de 5 GHz y una media de 42% en la banda de interés (4.9 – 5.1 GHz). La eficiencia de radiación media está en el 46.4% para la misma banda. Las dimensiones del diseño final simulado lo podemos ver en la tabla a continuación:

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Agua Agua	28x28x5	100x100x5	13.5	5	13

Para el caso de una antena microstrip trabajando a la frecuencia de 0.9 GHz hecha completamente de agua, han ocurrido inconvenientes en el diseño de la misma. Es necesario estudiar más profundamente este caso dado que tras varios cambios en la geometría de este diseño, la relación F/B del diagrama de radiación es negativa, obteniendo máximos en el sentido negativo del eje Z y viendo disminuido enormemente el rendimiento de la antena en términos de eficiencia, se interrumpe el proceso de implementación a esta frecuencia.

Capítulo 3

Implementación de antenas microstrip de agua a la frecuencia de 5 GHz y 2.45GHz.



3.1 Introducción

En los capítulos anteriores se ha explicado la teoría que engloba a la tecnología microstrip y se han simulado las diferentes antenas diseñadas caracterizando todos los elementos que la componen. En este capítulo se explicará el proceso de prototipado. Se empezará por explicar el proceso para conseguir encapsular agua dentro del metacrilato y aislar el conector SMA que atraviesa el plano de masa del prototipo.

Una vez dejado claro todo el proceso se procederá a exponer los resultados de rendimiento de la antena. Se analizarán los parámetros S_{11} con un analizador de redes y se analizarán los diagramas de radiación, directividad y eficiencias con una cámara anecoica.

Para finalizar, se realiza una descripción de los equipos de medida y software utilizados para construir los prototipos y las conclusiones a las que se llega a partir de los resultados obtenidos.

Según se ha configurado el alcance del proyecto se ha dado prioridad a la frecuencia de 5GHz. A continuación se explica el procedimiento de implementación seguidos.

3.2 Procedimiento de fabricación

3.2.1 Cortadora láser

Una vez obtenido el diseño final de los modelos simulados con el software de Zeland IE3D, se realizarán los planos de corte pertinentes con el software de diseño 3D SketchUp. Estos ficheros exportados en formato “.DXF” permiten, mediante el software RDWORKS, lanzar los cortes sobre las planchas de metacrilato. Los cortes se realizan con cortadora láser modelo Ignis del fabricante BCN3D (Figura 58). Cabe añadir que el software que utiliza esta máquina requiere de, a parte de los modelos en formato “.DXF”, configurar ciertos parámetros de corte. Para grosores de 4mm necesitamos configurar la potencia de corte en los rangos 90% y 100% a una velocidad de 8mm/s. Para grosores de 1mm configuraremos la máquina a la misma potencia con una velocidad superior, 28mm/s.

De esta manera, y una vez finalizado el procedimiento de corte de todas las piezas de metacrilato, podemos proceder al montaje del prototipo. Se han utilizado grosores de 4mm de metacrilato, para establecer fijaciones al parche y a la base del plano de masa. De esta manera, añadimos robustez al prototipo y fijamos con tornillería de nylon el plano de masa y el parche dando más estabilidad a la antena. Para el plano de masa y el parche, se ha utilizado metacrilato de grosor 1mm.

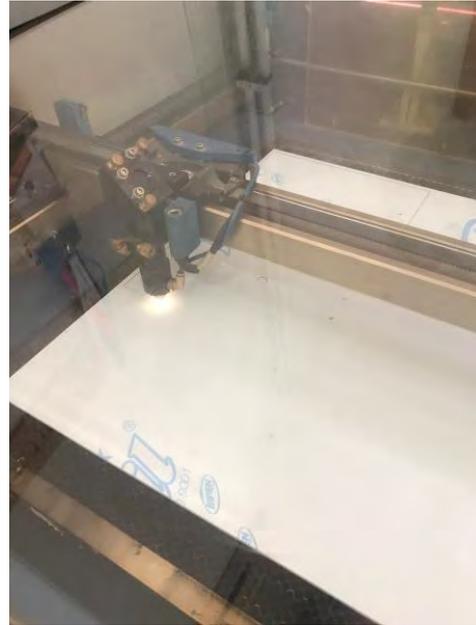


Figura 58 Cortadora láser modelo IGNIS BCN3d cortando metacrilato de 4mm

3.2.2 Impresora 3D

Este aparato ha sido utilizado para conseguir aislar el conducto del plano de masa, por el cual se instala el conector SMA y el hilo conductor que se utiliza para el acople capacitivo del prototipo. El modelo utilizado es el BCN3D Sigma R19 (Figura 59). El proceso es sencillo. Con la cortadora láser, mencionada en el apartado anterior, se realizan agujeros en las planchas de diámetro 10.4 mm, coincidiendo con el diámetro del conector SMA. Eso dejará en la caja de metacrilato dos agujeros alineados en la parte superior e inferior. Para conectar dichos agujeros se diseña un tubo cilíndrico (Figura 60), con grosor de material 0.5mm, longitud 10mm y diámetro 10.4 mm mediante el software SketchUP. Exportaremos el fichero del diseño en formato “.STL” y lo abriremos con el software CURA. Este software nos permitirá poder generar el fichero con extensión “.Gcode” para poder generar el código final que requiere la impresora 3D para generar el diseño realizado (incluye parámetros como grosor de la boquilla inyectora, temperatura, material utilizado etc.).

El material utilizado para realizar la construcción del tubo, que aislará del agua el conector y el hilo conductor es denominado PLA. El filamento PLA también llamado ácido poli-láctico, es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Es un material altamente versátil. Se hace a partir de recursos ecológicos y renovables, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Para evitar filtraciones de agua, dado que es un material ligeramente poroso, se le aplicó una capa de resina transparente, marca Poxyglass 3D. Esta resina, tiene una resistencia térmica de 75°C y es utilizada para recubrir piezas impresas permitiendo en nuestro caso impermeabilizar el tubo impreso.

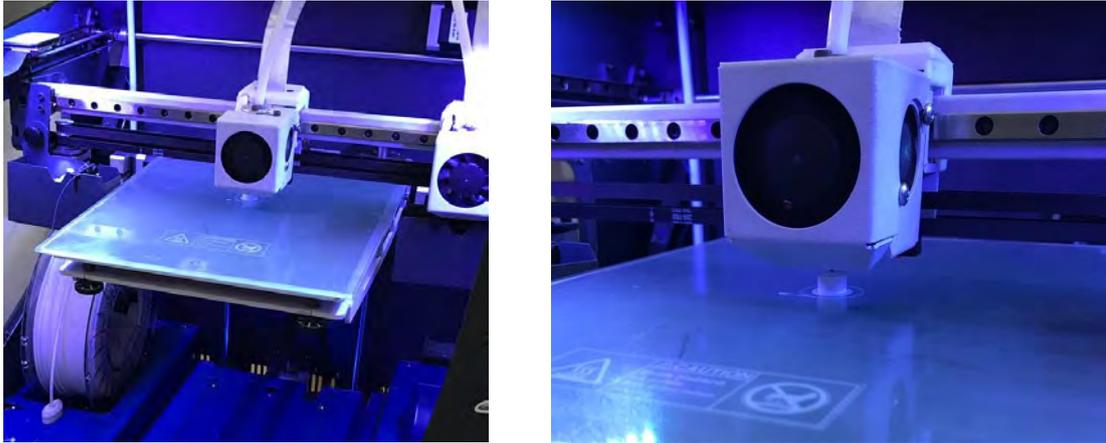


Figura 59 Impresora 3D modelo BCN3D Sigma R19

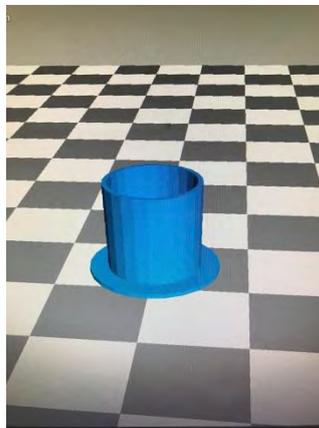


Figura 60 Figura generada con el software CURA correspondiente al tubo impreso diseñado con SketchUP.

3.2.3 Ensamblaje y montaje

Una vez hecho todos los cortes en las planchas de metacrilato e impresos los tubos con la impresora 3D, se procede al montaje de la antena microstrip. Para realizar de manera exitosa el proceso de ensamblaje de las planchas de metacrilato, se han diseñado dichos elementos con pestañas en todos los extremos de cada pieza para que sea más fácil encajarlas y evitar así posibles filtraciones.

Para realizar el proceso de ensamblaje (Figura 61) se utiliza un adhesivo de polimerización exclusivo para metacrilato marca ACRIFIX® 1R 0192.



Figura 61 Componentes de la antena microstrip en proceso de secado del adhesivo.

3.3 Antena microstrip fabricada con materiales transparentes @5GHz

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior (capítulo 2), dado los resultados obtenidos tras simular las diferentes antenas microstrip, interesa priorizar el diseño que mejor rendimiento ha ofrecido. Por lo tanto, en este apartado se muestran los resultados obtenidos en la antena microstrip a la frecuencia de 5 GHz.

3.3.1 Geometría y dimensiones

Con las geometrías diseñadas en el software de simulación IE3D se procede a construir el primer prototipo de antena microstrip a la frecuencia de 5GHz. A continuación se presenta el desglose de los componentes de la antena microstrip con las geometrías de cada una. Para entender la tabla que se verá a continuación (Tabla 14) hay un conjunto de variables que se han de explicar:

- W: Ancho del parche o plano de masa.
- L: Largo del parche o plano de masa.
- H: Altura del parche o plano de masa.
- l: Longitud del acople capacitivo.
- h: Altura del sustrato.
- center - x: distancia del centro al acople capacitivo respecto al plano de masa.

Una vez aclaradas las variables relacionadas con la geometría del prototipo, las dimensiones de la antena serían las siguientes:

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Simulado	28x28x5	100x100x5	13	5	13

Tabla 14 Geometría de la antena microstrip simulada. Cotas en mm.

Una vez construido el prototipo de la antena a las dimensiones mencionadas, se procede a medir la antena microstrip en un analizador de redes de Agilent Technologies modelo E5071B (300KHz – 8.5 GHz).

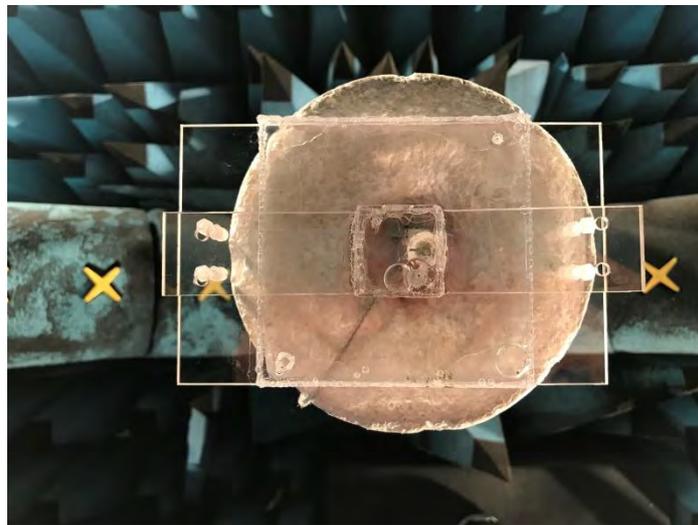


Figura 62 Antena microstrip fabricada a partir de agua, trabajando en la banda ISM a 5 GHz.

3.3.2 Parámetros S

A continuación, se presentan los resultados de adaptación de la antena microstrip a la frecuencia de 5GHz. Como se ha comentado en el apartado anterior, estos datos presentados corresponden al prototipo construido con la geometría de la simulación.

Como se puede observar en los resultados obtenidos (Figura 63), se obtiene un BW amplio (ROE<2) pero el máximo de adaptación no está centrado a la frecuencia de interés, por lo que sería conveniente realizar modificaciones sobre el prototipo.

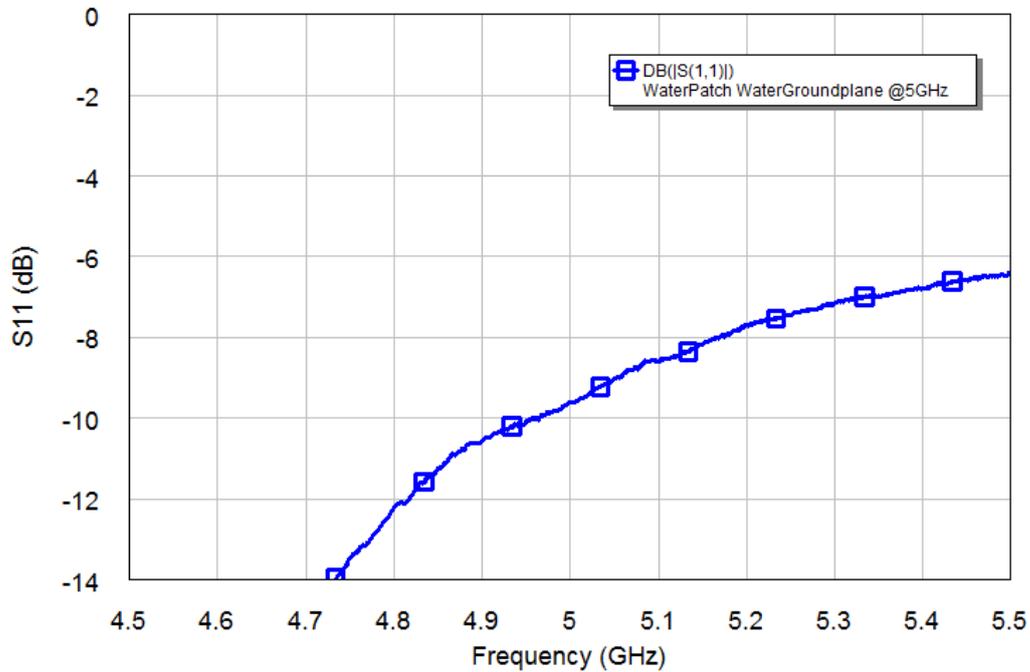


Figura 63 Parámetros S_{11} (dB) del prototipo de antena microstrip a la frecuencia de 5GHz.

Teniendo contemplados la caracterización de cada uno de los componentes de la antena microstrip vistos en el capítulo anterior, se llega a la conclusión que reduciendo la longitud del acople capacitivo (longitud del hilo calibrado Tabla 14) se consigue desplazar el máximo de adaptación del prototipo a la frecuencia de interés.

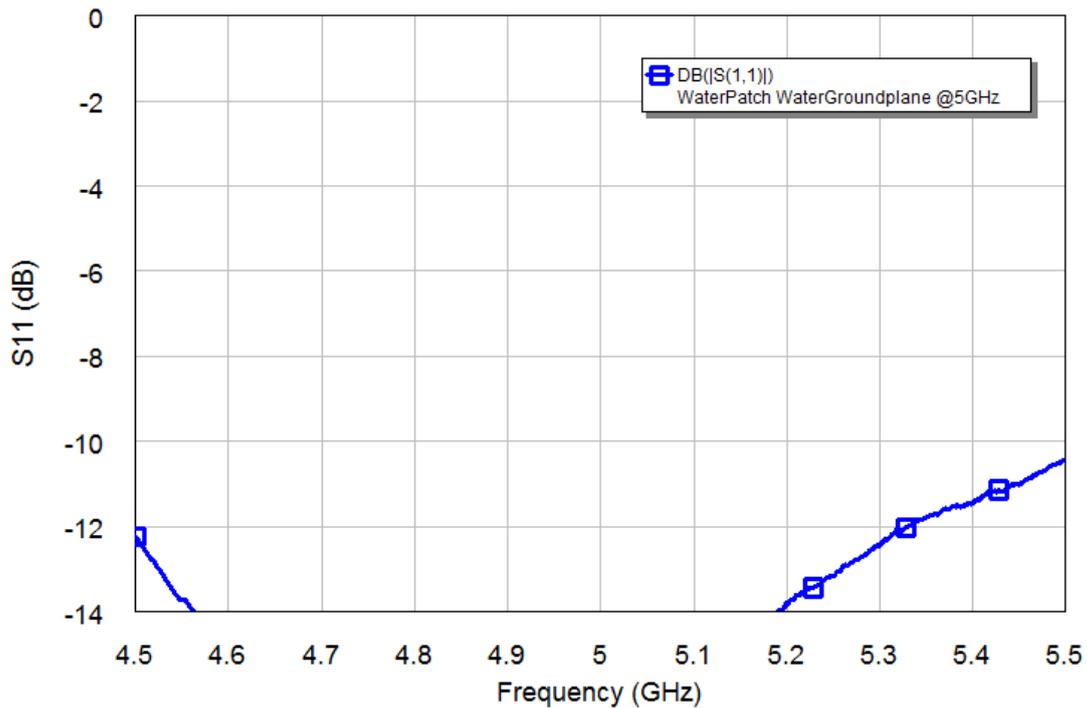


Figura 64 Parámetros S_{11} (dB) del prototipo de antena microstrip modificando la longitud del acople capacitivo a la frecuencia de 5GHz.

Una vez modificado el acople capacitivo de la antena microstrip (Tabla 15), se observa el desplazamiento en frecuencia a la banda de interés. Obteniendo un BW amplio (>20%, ROE<2) y un máximo de adaptación en la banda de 5GHz.

Una vez validadas las condiciones de diseño de la antena se procede a medirla para obtener valores de eficiencia (radiación y antena), directividad y diagramas de radiación. Para ello, tenemos a disposición una cámara anecoica modelo SATIMO Stargate 32.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Real	28x28x5	100x100x5	12.5	5	13

Tabla 15 Geometría de la antena microstrip a la frecuencia de 5GHz implementada. Cotas en mm.

3.3.3 Eficiencia de radiación y antena

Una vez obtenidos los resultados de eficiencia para el diseño implementado, se ha de tener en cuenta que los valores de eficiencia no serán elevados ni similares a un diseño convencional con materiales de alta conductividad como el cobre. Según los resultados obtenidos (Figura 65) vemos como tanto en la banda de interés como en un

amplio BW obtenemos eficiencias, de radiación y de antena superiores al 30%. En la Tabla 16 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos.

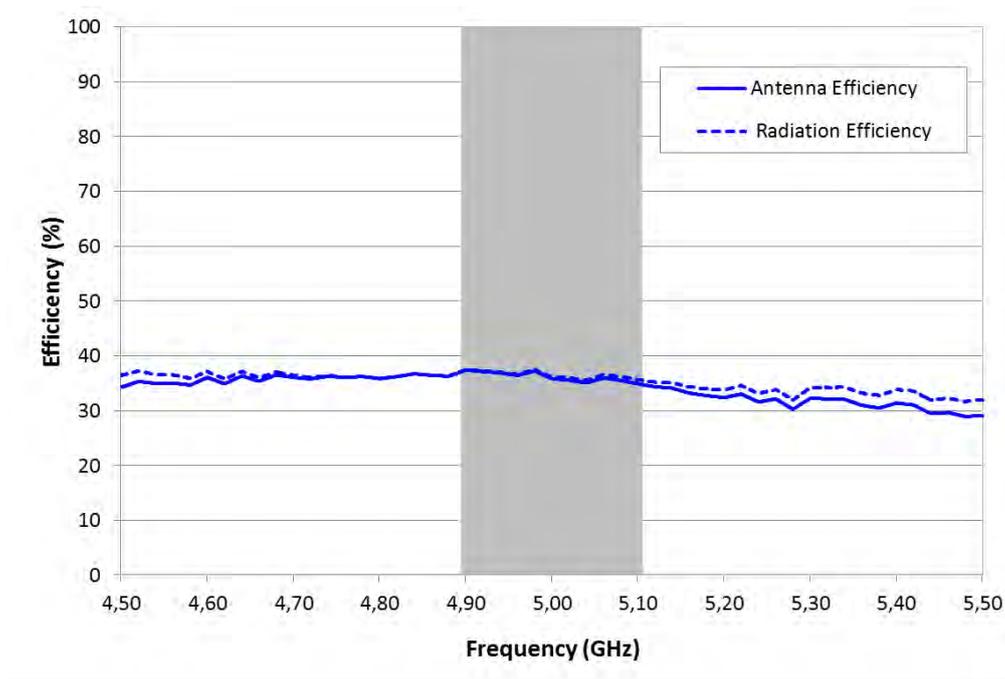


Figura 65 Eficiencia de radiación y antena del prototipo de antena microstrip de agua @5GHz.

	Ant. Eff. 4.9 GHz (%)	Ant. Eff. 5.1 GHz (%)	Ant. Eff. Avg. (%)	Rad. Eff. Avg. (%)
Prototipo implementado	37.1	34.8	36.2	36.6

Tabla 16 Resumen de resultados de eficiencia para la antena microstrip @5GHz

3.3.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E) normalizados. Analizando el diagrama de radiación cuyo comportamiento es el de una antena microstrip con un ancho de haz de 142.7° en el plano E (phi 90) y de 88.5° en el plano H (phi 0). La Directividad media en la banda de interés de la antena microstrip de agua es de 3 dB en la banda de interés (BW=4%) (Figura 67).

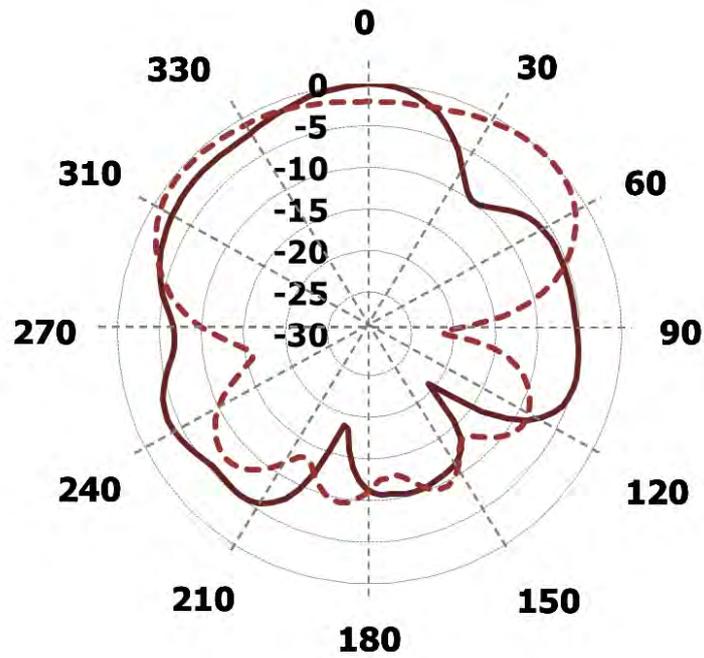


Figura 66 Diagramas de radiación: antena de agua @5 GHz PLANO H (línea continua) y PLANO E (línea discontinua).

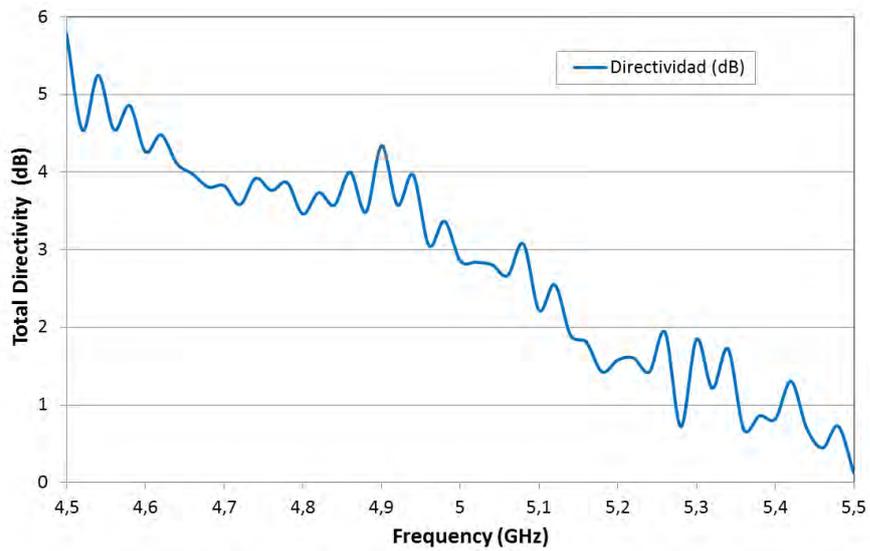


Figura 67 Directividad (dB): antena de agua @5GHz

3.4 Antena microstrip fabricada con materiales transparentes @2.4-2.5 GHz

Una vez implementada la antena microstrip funcionando a 5GHz, se empieza a implementar el primer prototipo radiando en la banda de interés de 2.4 a 2.5 GHz. Para ello se seguirá el mismo procedimiento seguido en el anterior caso. Empezando con la geometría diseñada con el software IE3D.

3.4.1 Geometría y dimensiones

Con las geometrías diseñadas en el software de simulación IE3D se procede a construir el prototipo de antena microstrip a la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz. La geometría está desglosada en los diferentes elementos que componen a la antena microstrip y sus dimensiones.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Simulado	47x47x5	160x160x5	28	10	7

Tabla 17 Geometría de la antena microstrip a la frecuencia de 2.45 GHz (simulado). Cotas en mm.

Una vez construido el prototipo de la antena a las dimensiones mencionadas, se procede a medir la antena microstrip en un analizador de redes de *Agilent Technologies modelo E5071B (300KHz – 8.5 GHz)* proporcionado por la empresa Fractus Antennas.



Figura 68 Antena microstrip de agua trabajando en la banda ISM a 2.4-2.5 GHz.

3.4.2 Parámetros S

A continuación, se presentan los resultados de adaptación de la antena microstrip a la frecuencia de 2.4-2.5 GHz. Como se ha comentado en el apartado anterior, estos datos presentados corresponden al prototipo construido con la geometría de la simulación.

Se sigue el mismo procedimiento para la antena microstrip de 5 GHz, construyendo la antena con las mismas dimensiones del diseño simulado.

Una vez construido el prototipo y como se puede observar en los resultados obtenidos (Figura 69), se obtiene un BW amplio ($ROE < 3$) y la banda de interés está bien adaptada ($ROE < 2$). Con las dimensiones simuladas obtenemos buena adaptación aunque sería conveniente realizar modificaciones en el prototipo dado que el máximo de adaptación no está centrado a la banda de interés.

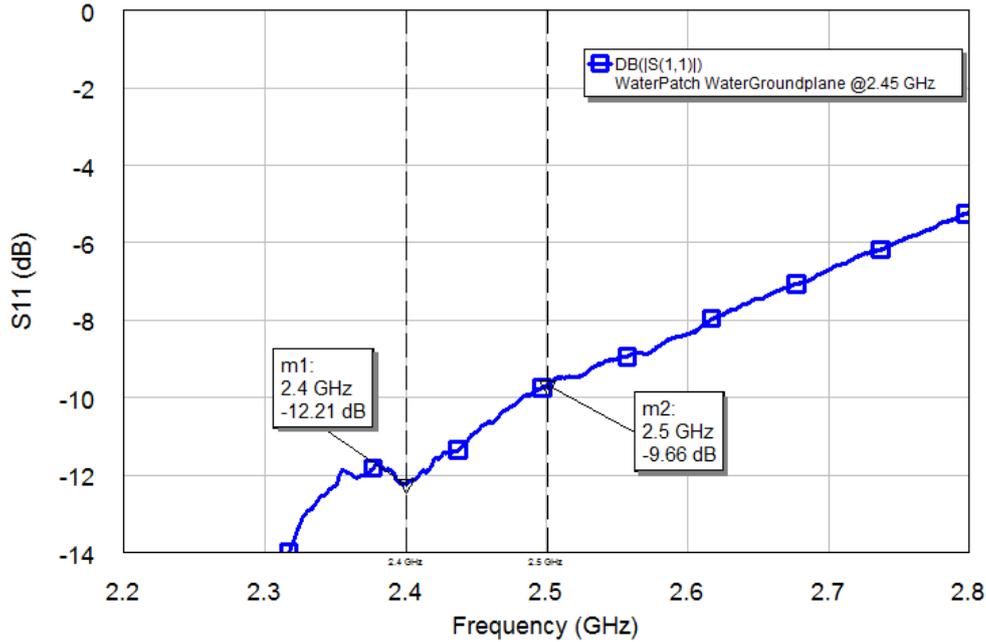


Figura 69 Parámetros S_{11} (dB) del prototipo de antena microstrip a la frecuencia de 2.45 GHz.

Se considera interesante, antes de realizar ninguna modificación sobre el prototipo, analizar el comportamiento de la antena sin el parche, para determinar el comportamiento de la antena funcionando como un monopolo (Figura 70).

Se observa que en la figura referenciada en el párrafo anterior, la adaptación para el prototipo funcionando como un monopolo con un plano de masa de agua está demasiado alto ($ROE < 3$). Para garantizar un comportamiento correcto de nuestra antena funcionando como antena microstrip, se requieren modificaciones sobre el acople capacitivo dado que su longitud está cercana a la de una antena monopolo de $\lambda/4$ (30 mm). Teniendo en cuenta que la longitud de nuestro acople capacitivo (Tabla 17) es de 28 mm, una corrección de longitud es necesaria.

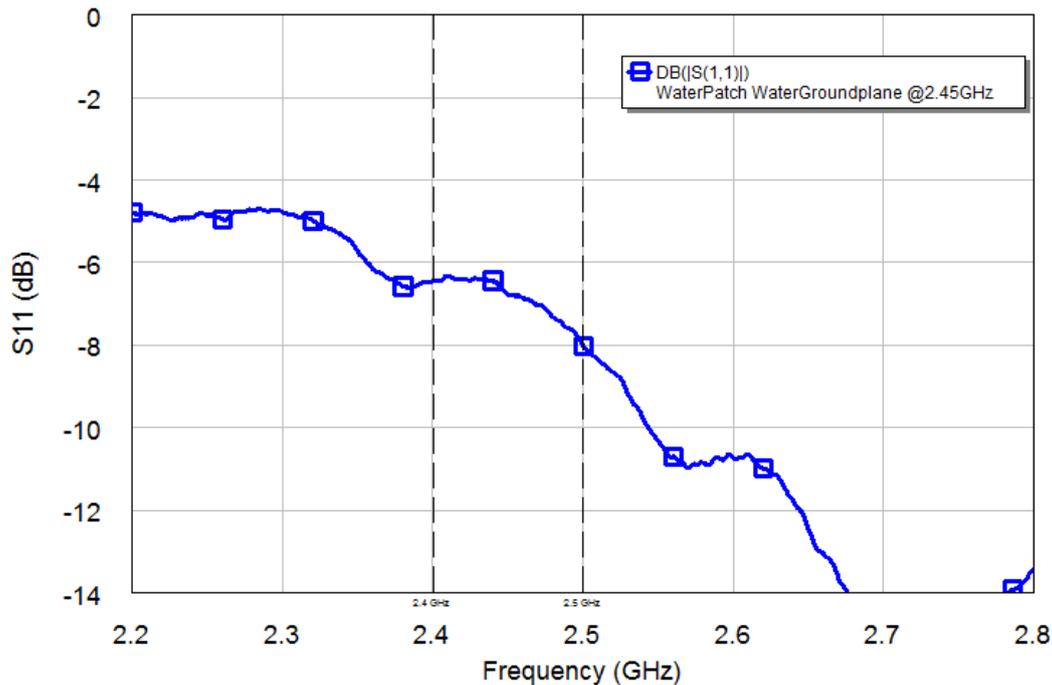


Figura 70 Parámetros S_{11} (dB) del prototipo sin el parche instalado solo con el acople capacitivo a la frecuencia de 2.45 GHz.

3.4.2.1 Modificaciones sobre el prototipo

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior donde caracterizábamos cada uno de los componentes de una antena microstrip, se llega a la conclusión que para desplazar en frecuencia el máximo de adaptación, la mejor manera es reducir las dimensiones de nuestro acople capacitivo moviendo a alta frecuencia el comportamiento de antena monopolo $\lambda/4$. A nivel de implementación es la solución más viable, dado que desplazar el centro del acople capacitivo sobre el plano de masa supondría rediseñar los planos de corte y gastar más material en la cortadora láser para reconstruir el prototipo. De esta manera, modificando solamente el acople capacitivo supone un ahorro de recursos considerable.

Una vez reducidas las dimensiones del hilo calibrado funcionando como acople capacitivo de la antena microstrip, se observa un desplazamiento a alta frecuencia del máximo de adaptación de nuestro dispositivo (Figura 71).

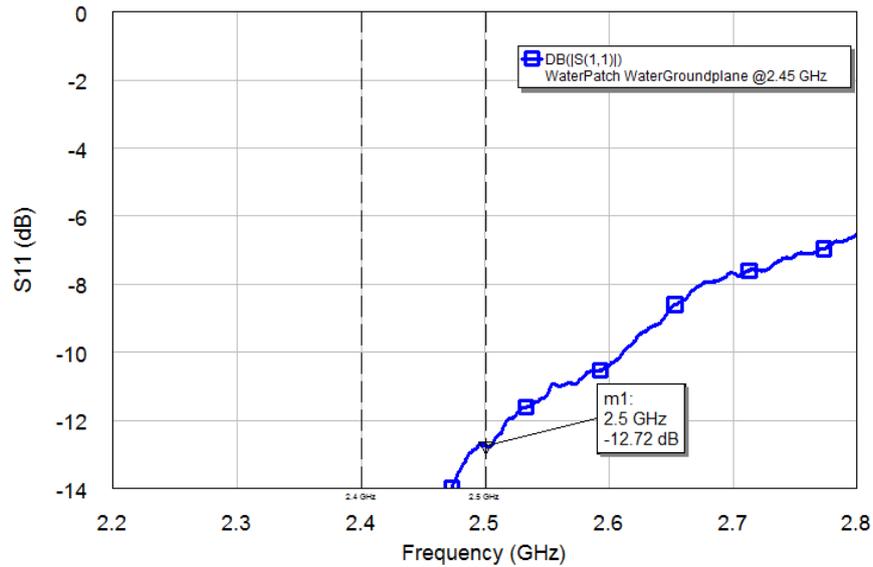


Figura 71 Parámetros S_{11} (dB) del prototipo de antena microstrip a la frecuencia de 2.45 GHz modificando la longitud del acople capacitivo.

Visto que los resultados de la modificación realizada son satisfactorios y siguen la evolución esperada sobre la adaptación del dispositivo podemos forzar un poco más las dimensiones sobre el acoplo capacitivo para terminar de centrar el máximo de adaptación a la banda de interés.

El resultado final, una vez hechas las modificaciones pertinentes, muestran un BW amplio (>20%, ROE<2) con buenos valores de adaptación (Figura 72).

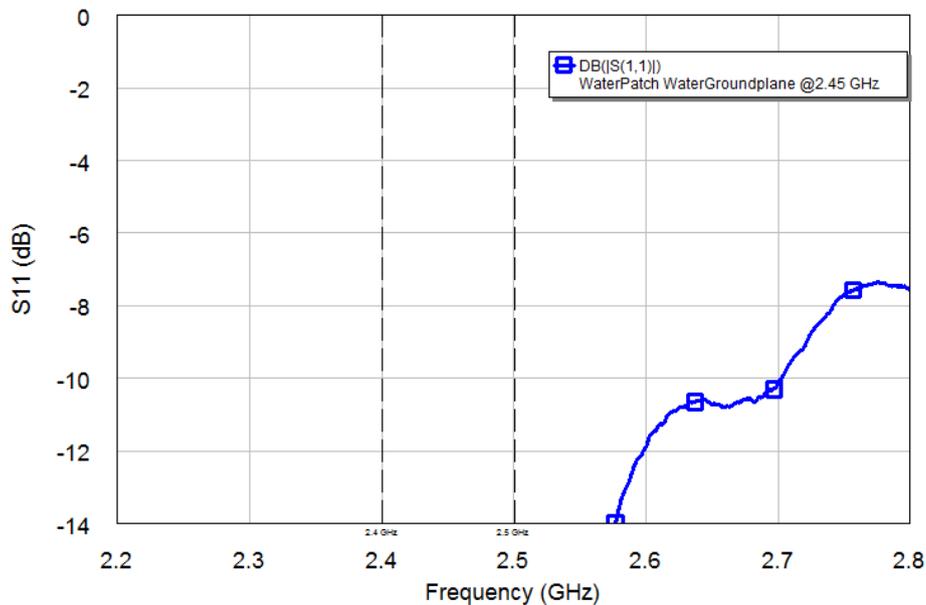


Figura 72 Parámetros S_{11} (dB) del prototipo de antena microstrip a la frecuencia de 2.45 GHz.

Cabe añadir que una vez reducidas las dimensiones del acople capacitivo se puede asegurar que la antena no se comportará como un monopolo $\lambda/4$ en nuestra banda de interés (Tabla 18).

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Real	47x47x5	160x160x5	27	10	7

Tabla 18 Geometría de la antena microstrip a la frecuencia de 2.45 GHz (real). Cotas en mm.

Una vez validadas las condiciones de diseño de la antena se procede a medirla para obtener valores de eficiencia (radiación y antena), directividad y diagramas de radiación. Para ello, siguiendo el procedimiento del apartado anterior, tenemos a disposición una cámara anecoica modelo SATIMO Stargate 32 en Fractus Antennas.

3.4.3 Eficiencia de radiación y antena

Según los resultados obtenidos (Figura 73) vemos en la banda de interés un rendimiento máximo de eficiencia de antena ($\geq 60\%$) en comparación al resto de la banda medida. Cabe añadir que la antena microstrip opera en un amplio BW obteniendo eficiencias, de radiación y de antena superiores al 50%. En la (Tabla 19) se puede observar un resumen de los resultados obtenidos.

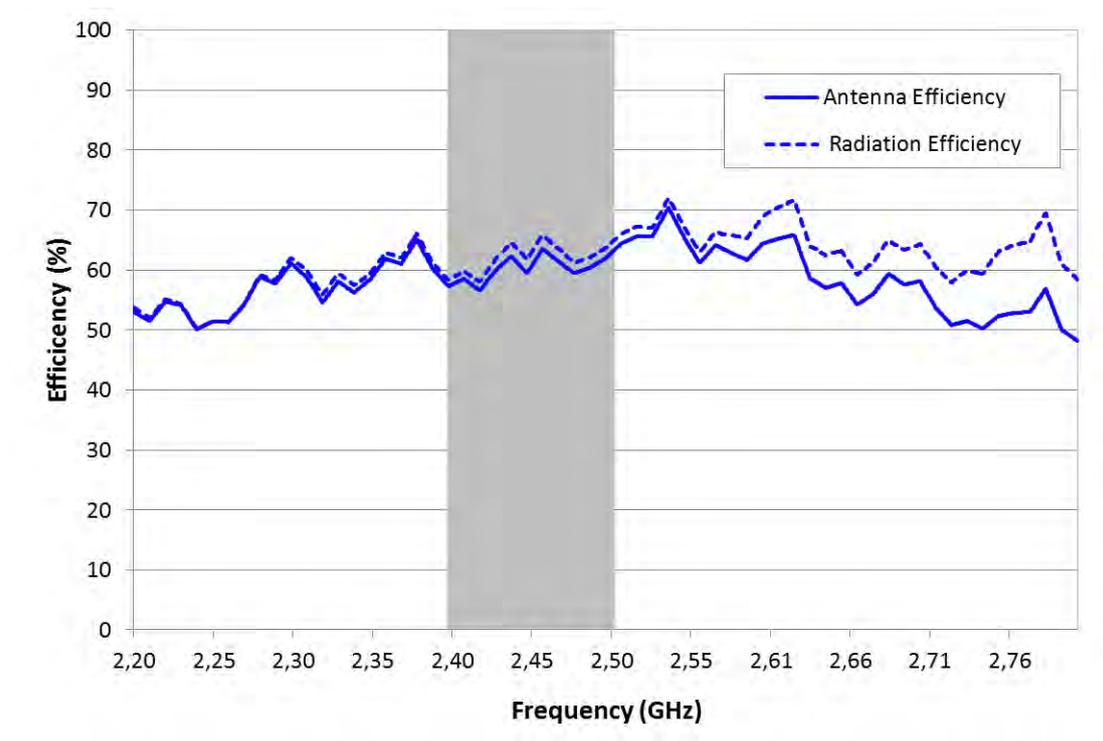


Figura 73 Eficiencia de antena y radiación de antena microstrip implementada a 2.45 GHz.

	Ant. Eff. 2.4 GHz (%)	Ant. Eff. 2.5 GHz (%)	Ant. Eff. Avg. (%)	Rad. Eff. Avg. (%)
Prototipo implementado	57.6	63.3	60.3	62.1

Tabla 19 Resumen de resultados de eficiencia para la antena microstrip @2.45GHz

3.4.4 Diagrama de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E) normalizados. Como se puede observar en los resultados (Figura 74) existe una no conformidad en la relación delante-atrás (Front/Back o F/B) en el prototipo, pues el máximo valor de ganancia radiando hacia delante es similar radiando hacia atrás. Eso quiere decir que la antena no está funcionando de manera adecuada, pues un comportamiento de antena tipo microstrip debería tener una relación F/B significativa (mínimo 5-6 dB).

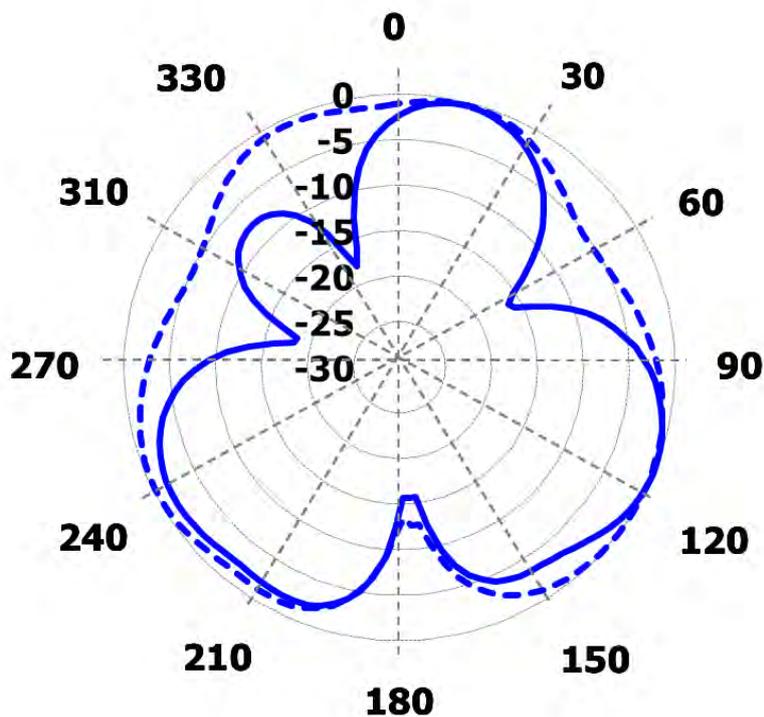


Figura 74 Diagramas de radiación: antena de agua @2.45 GHz. PHI = 0 (línea continua) y PHI = 90 (línea discontinua).

Analizando el diagrama de radiación obtenido y sin tener en cuenta la relación F/B centrándose en el haz hacia arriba (ángulo 0) se ve que el comportamiento es el de una antena microstrip con un ancho de haz de 102° en el plano E y de 51° en el plano H. Además la directividad en la banda de interés es de 3.6dB (Figura 75). Cabe añadir entonces que se debería estudiar el porqué de esta anomalía en el diagrama de radiación.

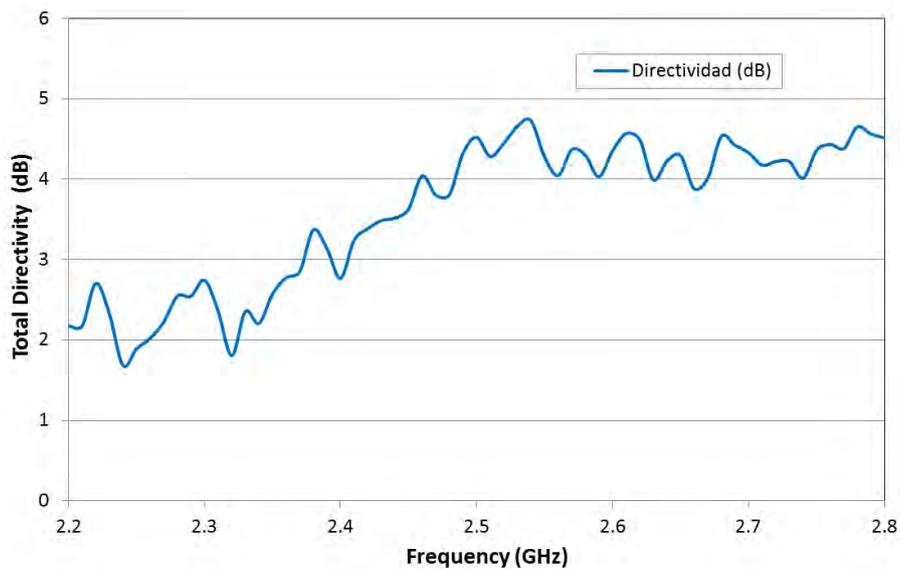


Figura 75 Directividad (dB): antena de agua @2.45GHz

3.4.5 Otros experimentos

Habiendo analizado los resultados del apartado anterior se ha dispuesto a estudiar el motivo de la anomalía producida por el prototipo a 2.45GHz. Para ello, se realizan diferentes experimentos sobre las dimensiones del acople capacitivo, sobre las dimensiones del parche y el plano de masa, la localización del centro del acople capacitivo y la altura del sustrato.

Todos los experimentos han concluido en el mismo resultado, una relación F/B anómala para el tipo de antena que estamos diseñando.

Se expone a modo de ejemplo uno de los experimentos realizados sobre las dimensiones del plano de masa (ver Tabla 20) que resultan ser los más satisfactorios comparando con el resultado obtenido en el apartado anterior.

Se puede observar que al aumentar el plano de masa se ve afectada la eficiencia (Tabla 21, Figura 76) comparado con el caso anterior, a fin de aislar la radiación hacia atrás.

	Parche (WxLxH)	Plano de masa (WxLxH)	Acople capacitivo (l)	Sustrato (h)	Posición del feeding (center – x)
Real	47x47x5	200x200x5	27	10	10

Tabla 20 Dimensiones del experimento sobre el plano de masa y centro de acople capacitivo en el dispositivo de antena microstrip de agua a la frecuencia de 2.45GHz. Cotas en mm.

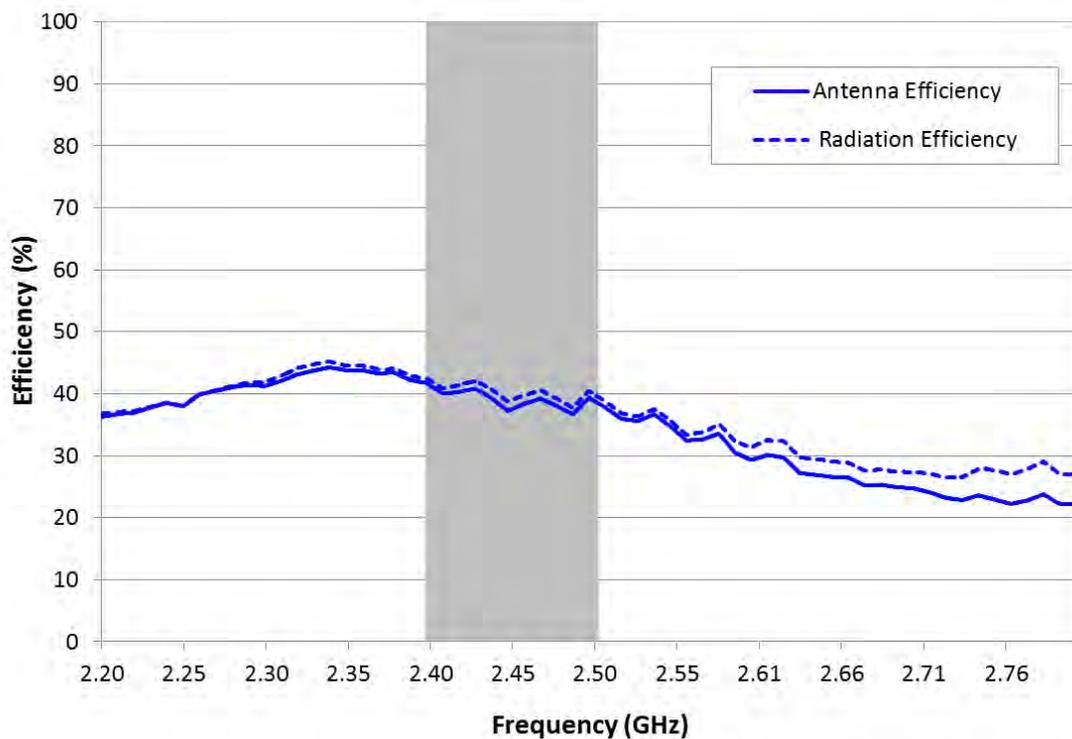


Figura 76 Eficiencia de antena y radiación de antena microstrip implementada a 2.45 GHz con un plano de masa de 200 mm x 200 mm x 5 mm

	Ant. Eff. 2.4 GHz (%)	Ant. Eff. 2.5 GHz (%)	Ant. Eff. Avg. (%)	Rad. Eff. Avg. (%)
Prototipo implementado	41.7	39.3	39.1	40.2

Tabla 21 Resumen de resultados de eficiencia para la antena microstrip @2.45GHz

En términos de diagrama de radiación seguimos observando una relación F/B cercana a 0, donde existen máximos similares tanto radiando hacia delante como atrás. Tal y como hemos comentado en el apartado anterior, analizando solo la radiación hacia delante, el ancho de haz a -3dB en el plano H ($\phi = 0$) es de 42.8° y de 105.7° en el plano E ($\phi = 90$).

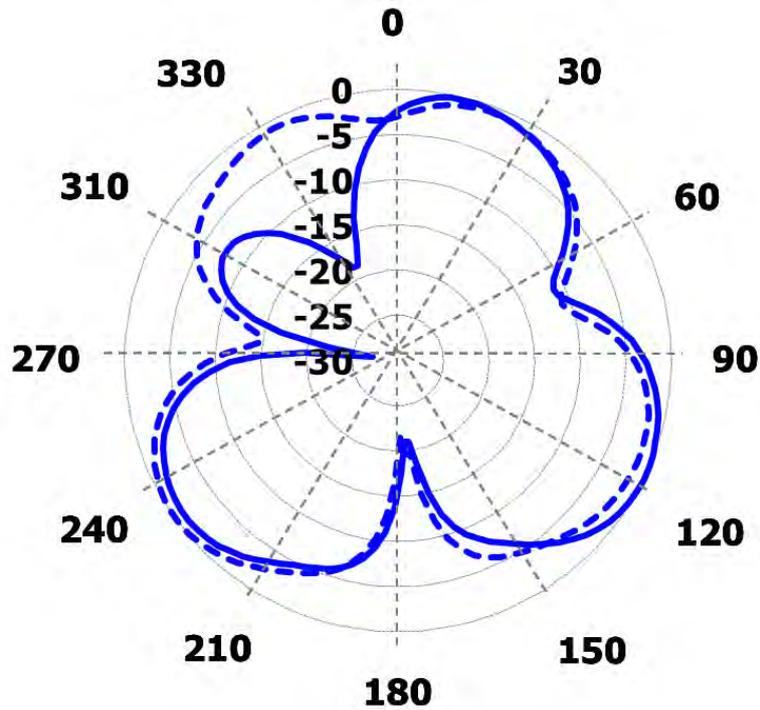


Figura 77 Diagramas de radiación: antena de agua con plano de masa ampliado @2.45GHz. PHI = 0 (línea continua) y PHI = 90 (línea discontinua).

Una vez analizados los resultados y viendo que pese al aumento de plano de masa, a fin de aislar la radiación hacia atrás, se siguen obteniendo relaciones de F/B demasiado cercanas a 0, se propone aplazar la implementación de este prototipo y estudiar este comportamiento en un futuro.

3.5 Conclusiones

A la hora de implementar los diseños realizados en el capítulo 2, se encontraron varios inconvenientes. Por un lado, estuvo el problema de la fragilidad del dispositivo, dado que el grosor del metacrilato era de 1mm podía incurrir en problemas de rotura al ser una estructura débil, e incluso podría influir en problemas en el rendimiento de la antena microstrip, al ser vulnerable a vibraciones. Se resolvió, en el caso del plano de masa, utilizando una base de mayor grosor (4 mm) para que la estructura fuera más robusta. En el caso del parche, se utilizaron unos brazos enganchados al mismo, para colocar la tornillería de nylon que se fijaría al plano de masa.

Por otro lado, estuvo el principal inconveniente de este proyecto. El conseguir realizar un conducto en el encapsulado de metacrilato del plano de masa, para pasar un conector e instalar el acople capacitivo que alimenta a la antena microstrip. Tras varios experimentos fallidos, se llegó a la solución del conducto realizado por impresión 3D. El consiguiente inconveniente de esta solución fue la precisión de la maquinaria disponible y la porosidad del material que utiliza la impresora 3D. Se llegó a la solución final, haciendo diseños que permitieran una tolerancia de error superior a 1mm en los cortes sobre el metacrilato y en la impresión 3D del tubo de PLA. En el caso de la porosidad del material, se dieron varias capas de resina sobre el tubo impreso para impermeabilizarlo.

Después de implementar la antena microstrip de agua a la frecuencia de 5GHz se confirma que:

- El BW que cumple los criterios de $ROE < 2$ es superior al 20%.
- Los diagramas de radiación en antenas microstrip compuestas totalmente de agua radian con haces de 88.5° en el plano H y 142.7° en el plano E. Es necesario añadir que, comparando con las simulaciones realizadas con antenas microstrip, cuyos componentes ya sea el parche o el plano de masa, fueran de cobre la radiación hacia atrás era menor en el caso de antenas de cobre. Respaldándose además en el proyecto anterior [5] se llegó a la misma conclusión, en el caso de sustituir el parche de cobre por uno de agua. Es lógico pensar entonces que, la radiación hacia atrás del dispositivo hecho completamente de agua tendrá acentuado este efecto con una relación F/B menor que una antena de cobre.
- Las eficiencias de antena disminuyen al implementar una antena completamente de agua. En simulaciones se obtuvieron eficiencias cercanas al 90% en caso de una antena microstrip de cobre y alrededor del 60% sustituyendo el parche de cobre por uno de agua. Ahora se obtienen unas eficiencias del 36% con antenas completamente de agua.

Después de implementar la antena microstrip de agua a la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz se confirma que:

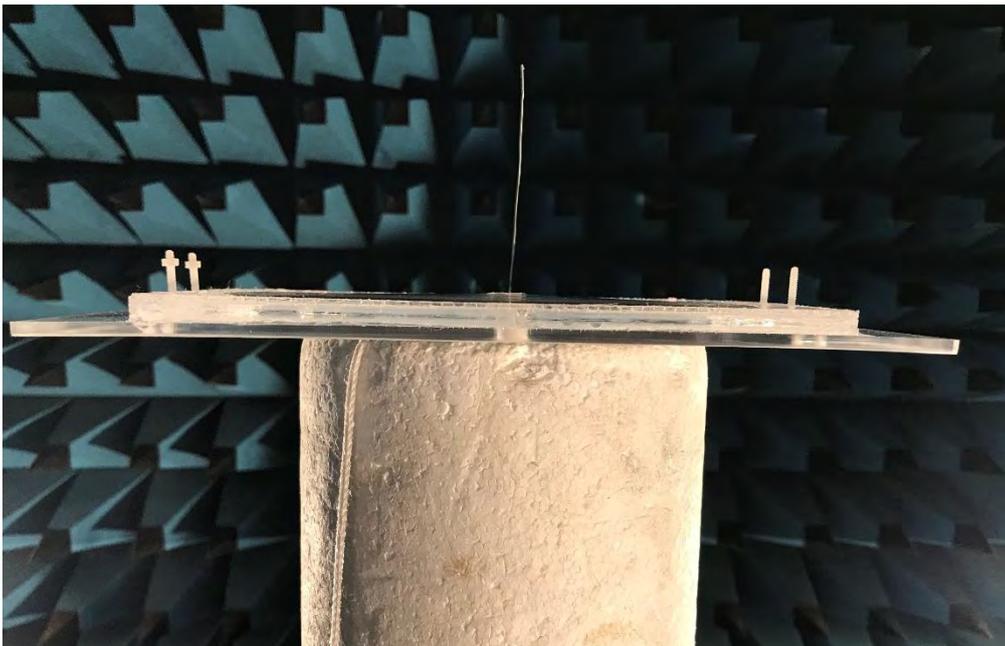
- El BW que cumple los criterios de $ROE < 2$ es superior al 20%.
- Los diagramas de radiación en antenas microstrip compuestas totalmente de agua para un plano de masa de 100 mm x 100 mm y una altura de 5mm, radian con haces de 51° en el plano H y 102.9° en el plano E. En el caso de un plano de masa de 200 mm x 200 mm manteniendo la altura, se obtienen haces

de 42.9° en el plano H y 105.7° en el plano E. Cabe añadir que tras varios experimentos realizados sobre este dispositivo, no se ha conseguido aislar la radiación hacia atrás así que se deja para líneas de investigación futuras para tratar de solventar esta inconveniencia.

- Las eficiencias de antena disminuyen al implementar una antena completamente de agua, el mismo caso que la antena a la frecuencia de 5 GHz. La eficiencia de antena es del 60% con antenas hechas completamente de agua, y un plano de masa de 160 mm x 160 mm y una altura de 5 mm. En el caso de implementar un plano de masa de 200 mm x 200 mm y una altura de 5mm la eficiencia de antena disminuye al 39%.

Capítulo 4

Antenas monopolo con plano de masa de agua en la banda ISM



4.1 Introducción

Como se ha visto en el capítulo anterior, en el que se realizaba la implementación de 2 antenas microstrip completamente de agua a la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz y 5 GHz, se construyeron varios prototipos de diferentes dimensiones, en lo que a plano de masa se refiere, para intentar conseguir un resultado óptimo de eficiencia y diagrama de radiación. Aprovechando entonces estos planos de masa y viendo que, en la primera fase de implementación, se daba el caso en el que el acople capacitivo que alimentaba a la antena se comportaba como un monopolo $\lambda/4$. Se propone estudiar el rendimiento de varias antenas monopolo a la frecuencia de 0.9GHz, 2.4 – 2.5 GHz y 5 GHz, las frecuencias de trabajo de este proyecto. Para evaluar si sería factible implementar este tipo de antenas sobre planos de masa transparentes.

4.2 Geometrías y dimensiones

Para la implementación de este experimento se aprovechan los planos de masa realizados en el capítulo anterior (Tabla 23). Para la realización de los diferentes prototipos de antenas monopolo ($\lambda/4$) con planos de masa de agua, se han calculado las dimensiones para obtener resonancias a las frecuencias de interés. El procedimiento seguido para obtener antenas monopolos resonantes a las frecuencias de 0.9 GHz, 2.4 - 2.5 GHz y 5 GHz es el mostrado en las ecuaciones (14), (15 y (16 respectivamente.

$$\text{Longitud monopolo} = \frac{\lambda}{4} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (15)$$

$$\text{Longitud monopolo} = \frac{c}{4 \cdot f} \quad (16)$$

Siendo f la frecuencia de interés en cada caso (0.9 GHz, 2.4 - 2.5 o 5GHz), se obtienen las longitudes de las antenas monopolo (ver Tabla 22). Para ser precisos a la hora de obtener un hilo calibrado a la longitud requerida. Se fija una tira de hilo calibrado y midiendo la longitud con el pie de rey se realiza el corte para obtener una tira a la longitud requerida (ver ejemplo en Figura 78).



Figura 78 Ejemplo de corte de hilo calibrado para una antena monopolo a la frecuencia centrada de 2.45 GHz (30mm)

	Longitud (mm)
Monopolo @0.9 GHz	83
Monopolo @2.45 GHz	30
Monopolo @5 GHz	15

Tabla 22 Longitudes de las antenas monopolo a las frecuencias de interés (columna izquierda)

	Ancho	Largo	Altura	Posición de antena (center – x)
1r Plano de Masa	100	100	5	13
2o Plano de Masa	160	160	5	7
3r Plano de Masa	200	200	5	10

Tabla 23 Desglose de geometrías de los diferentes planos de masa utilizados en este experimento.

4.3 Parámetros S

En este apartado se medirá la adaptación en S_{11} (dB) de la antena monopolo implementada a distintas frecuencias sobre los planos de masa de agua de diferentes dimensiones. Se empieza con la antena monopolo de dimensiones más grandes (@0.9GHz, 83 mm) y se irá reduciendo hasta llegar a la más pequeña (@5GHz, 15 mm).

4.3.1 Antenas monopolo en la banda de 0.9 GHz.

Para la antena monopolo resonando a la frecuencia de 0.9 GHz se ve como, para planos de masa de 100 mm x 100 mm (traza marrón) se obtiene un BW amplio ($\geq 20\%$), con unos criterios de ROE inferiores a 3, que cubre la banda de interés. Cabe añadir que puede mejorarse los parámetros de adaptación para cumplir con criterios de ROE inferiores a 2. Tal y como se puede ver para planos de masa más grandes como es el caso del 160 mm x 160 mm (traza azul), mejora la adaptación considerablemente, cumpliendo con un BW similar pero con ROE inferior a 2.

El mejor caso para trabajar a esta frecuencia, tal y como se puede observar, es la antena monopolo instalada sobre un plano de masa de 200 mm x 200 mm con una altura de 5 mm, en el que tenemos un pico de adaptación centrado en la frecuencia de interés con un BW relativo del 12% con ROE inferior a 2.

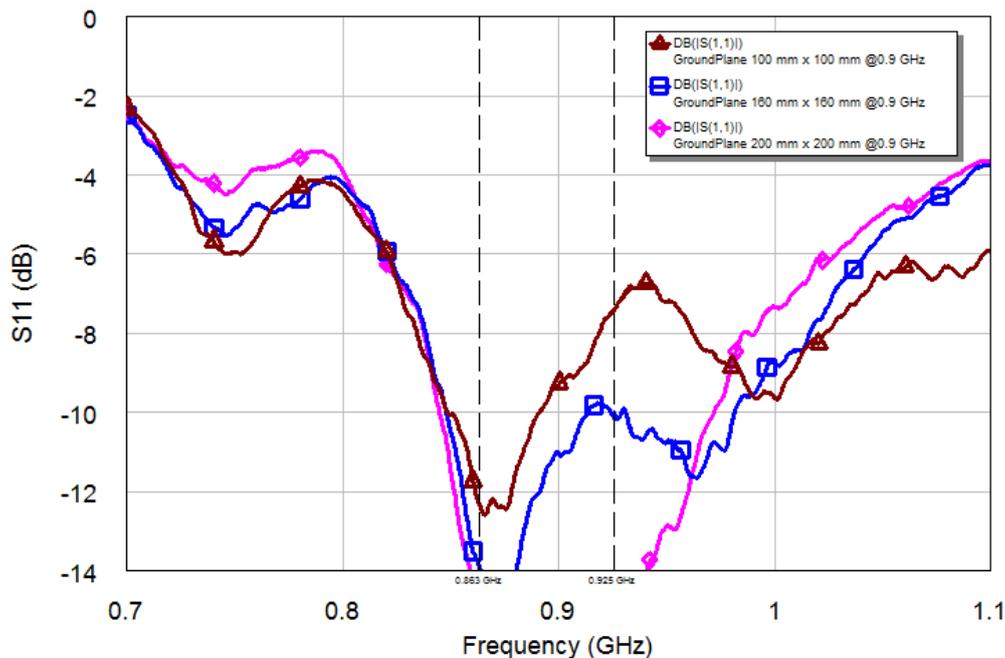


Figura 79 Comparación de parámetros S_{11} (dB) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia de 0.9 GHz.

4.3.2 Antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz.

Para el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 2.4 – 2.5 GHz (30 mm), se puede observar como hay 2 casos bastante similares (ver Figura 80). Para planos de masa de 100 mm x 100 mm y de 160 mm x 160 mm se ve como el máximo de adaptación está desplazado a alta frecuencia y apenas se cumplen ROE inferiores a 2 para la banda de interés. Por otro lado, para planos de masa de 200 mm x 200 mm se obtiene un máximo de adaptación centrado en la banda de interés con un BW amplio (>20%, ROE<2). En conclusión, para antenas monopolo resonando en la banda de 2.4 – 2.5GHz, se implementará sobre planos de masa de agua de 200 mm x 200 mm con una altura de 5 mm.

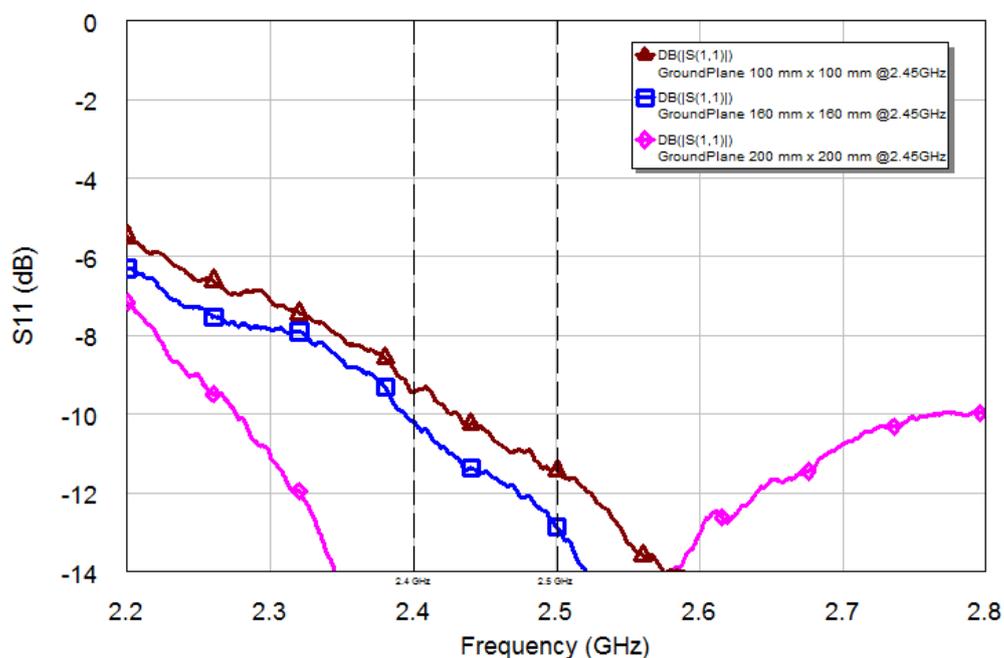


Figura 80 Comparación de parámetros S_{11} (dB) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia centrada de 2.45 GHz.

4.3.3 Antenas monopolo en la banda de 5 GHz.

Para el caso de una antena monopolo resonando a la frecuencia de 5 GHz, se obtienen buenos resultados de adaptación (ver Figura 81) para todos los planos de masa realizados. En los 3 casos implementados, obtenemos BW superiores al 15% con ROE inferior a 2. Cabe añadir que en el caso de implementar un plano de masa de agua de 200 mm x 200 mm, el máximo de adaptación está desplazado a alta frecuencia y no está tan centrado, comparando con los otros planos de masa medidos.

Es por esto que se esperará a validar que dimensiones de plano de masa son más óptimos, una vez analizados los resultados de eficiencia y diagrama de radiación.

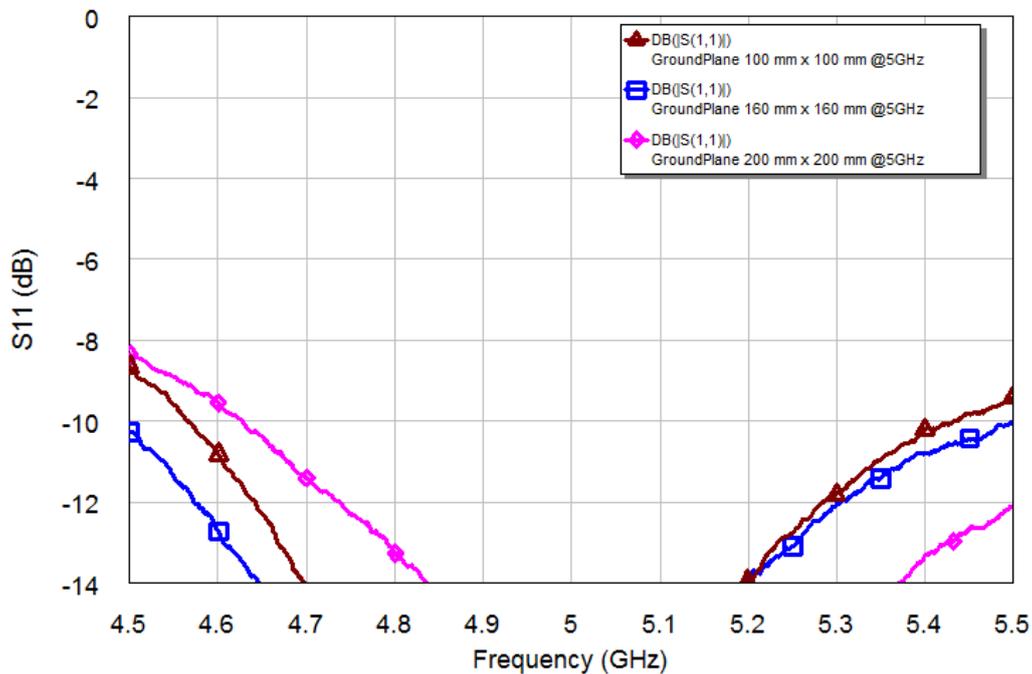


Figura 81 Comparación de parámetros S_{11} (dB) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia de 5 GHz.

4.4 Eficiencia de radiación y de antena

Habiendo medido los prototipos de antena monopolo sobre planos de masa de agua en la cámara anecoica, se procede a analizar los resultados de eficiencia de radiación y antena obtenidos.

Este apartado servirá para validar la elección de las dimensiones del plano de masa, que se había hecho en términos de adaptación.

4.4.1 Antenas monopolo en la banda de 0.9 GHz.

Para el caso de la antena monopolo resonando a la frecuencia de 0.9 GHz, se puede observar que los mejores resultados de eficiencia (ver Figura 82) se obtienen utilizando un plano de masa de 200 mm x 200 mm, tal y como se había elegido en el apartado anterior. En la Tabla 24 se puede observar un resumen comparativo de la eficiencia de antena y radiación obtenidas.

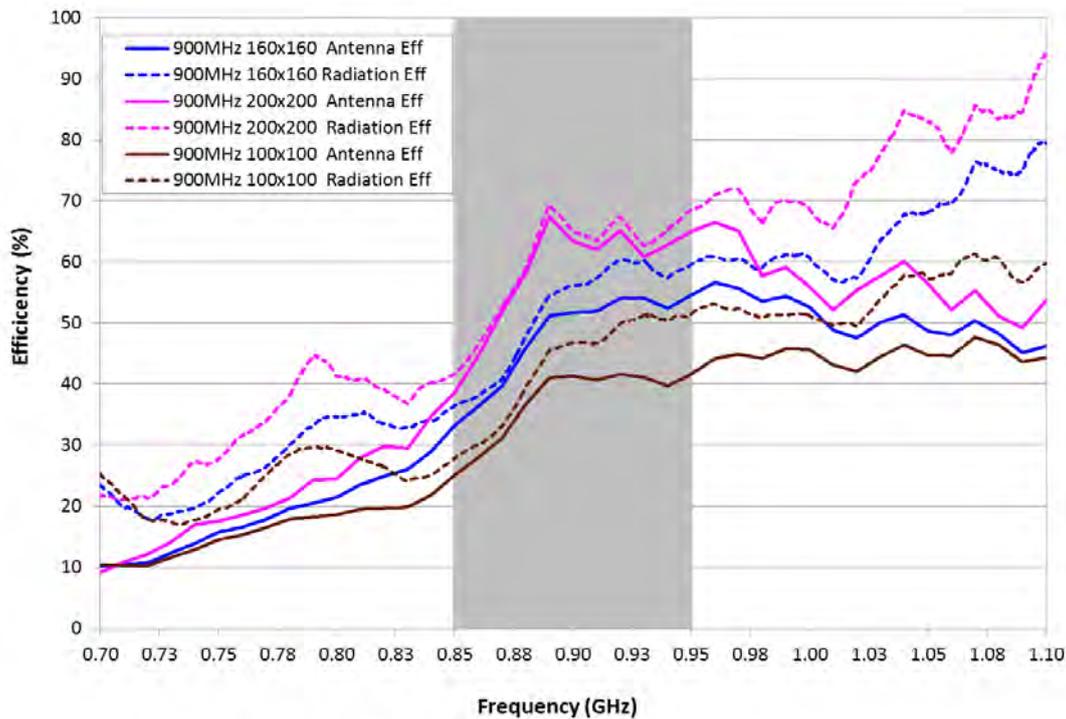


Figura 82 Comparación de eficiencia de antena y radiación (%) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia de 0.9 GHz.

	Ant. Eff. 0.85 GHz (%)	Ant. Eff. 0.928 GHz (%)	Ant. Eff. Avg. (%)	Rad. Eff. Avg. (%)
100x100 mm ²	25.0	41.1	36.6	41.3
160x160 mm ²	33.1	54.1	46.7	50.3
200x200 mm ²	38.6	61.1	57.6	62.7

Tabla 24 Resumen comparativo de las eficiencias de antena y radiación obtenidas para los diferentes planos de masa implementados sobre una antena monopolo a la frecuencia de 0.9 GHz.

4.4.2 Antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz.

Para el caso de la antena monopolo resonando a la frecuencia centrada de 2.45 GHz, se puede observar que los mejores resultados de eficiencia (ver Figura 83) se obtienen utilizando un plano de masa de 200 mm x 200 mm, tal y como se había elegido en el

apartado anterior. En la Tabla 25 se puede observar un resumen comparativo de la eficiencia de antena y radiación obtenidas.

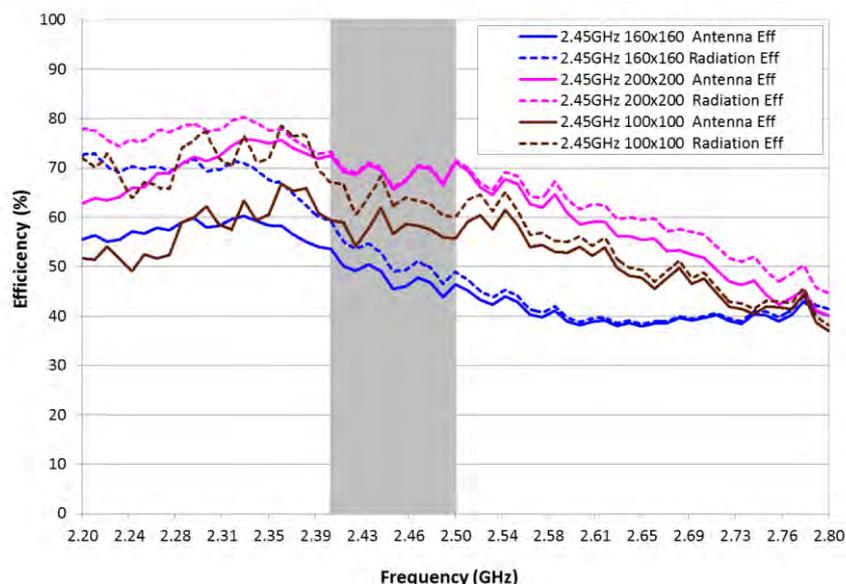


Figura 83 Comparación de eficiencia de antena y radiación (%) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia centrada de 2.45 GHz.

	Ant. Eff. 2.4 GHz (%)	Ant. Eff. 2.5 GHz (%)	Ant. Eff. Avg. (%)	Rad. Eff. Avg. (%)
100x100 mm ²	59.4	55.8	57.7	63.6
160x160 mm ²	53.6	46.4	47.9	51.6
200x200 mm ²	72.5	71.1	69.0	69.4

Tabla 25 Resumen comparativo de las eficiencias de antena y radiación obtenidas para los diferentes planos de masa implementados sobre una antena monopolo a la banda de 2.4 - 2.5 GHz.

4.4.3 Antenas monopolo en la banda de 5 GHz.

Para el caso de la antena monopolo resonando a la frecuencia centrada de 5 GHz, se puede observar que los mejores resultados de eficiencia (ver Figura 84) se obtienen utilizando un plano de masa de 100 mm x 100 mm, tal y como se había elegido en el apartado anterior. En la Tabla 26 se puede observar un resumen comparativo de la eficiencia de antena y radiación obtenidas.

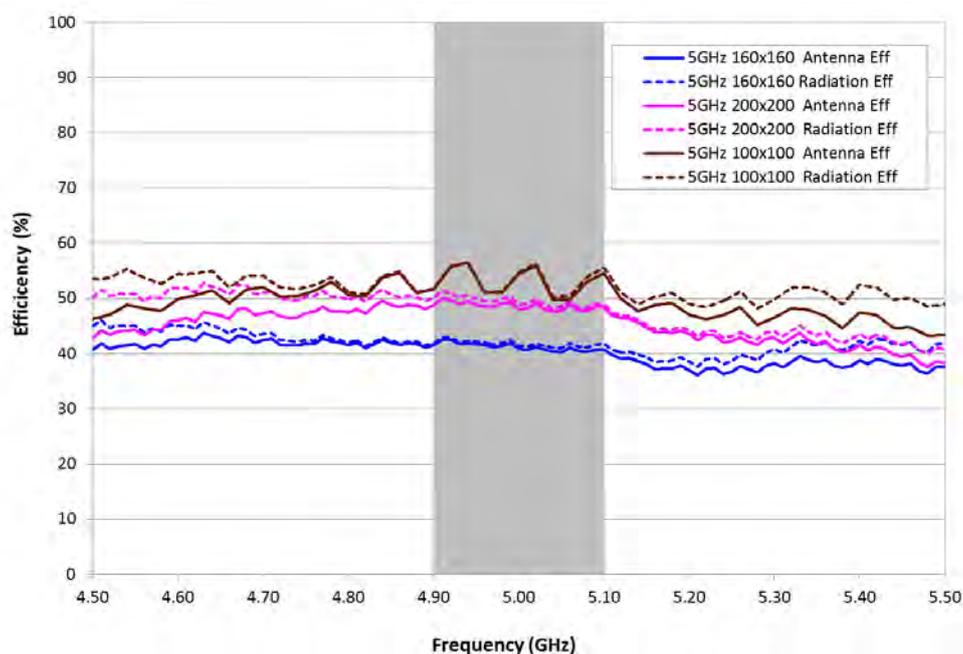


Figura 84 Comparación de eficiencia de antena y radiación (%) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia de 5 GHz.

	Ant. Eff. 4.9 GHz (%)	Ant. Eff. 5.1 GHz (%)	Ant. Eff. Avg. (%)	Rad. Eff. Avg. (%)
100x100 mm ²	51.6	54.6	53.0	53.4
160x160 mm ²	41.5	40.8	41.2	41.8
200x200 mm ²	48.8	48.4	48.6	49.5

Tabla 26 Resumen comparativo de las eficiencias de antena y radiación obtenidas para los diferentes planos de masa implementados sobre una antena monopolo a la frecuencia de 5 GHz.

4.5 Diagramas de radiación y directividad

Una vez extraídos los resultados de diagrama de radiación, se presentan los cortes phi 0 (plano H) y phi 90 (plano E) normalizados.

4.5.1 Antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz.

Para los diagramas de radiación obtenidos para antenas monopolo en la banda de 2.4 – 2.5 GHz, se puede observar en los resultados (Figura 85) que existe una no conformidad en la relación delante-atrás (Front/Back o F/B), pues el máximo valor de ganancia radiando hacia delante es similar al obtenido radiando hacia atrás. Esta no conformidad en el diagrama de radiación es el mismo que se obtenía en el capítulo anterior (Antena microstrip fabricada con materiales transparentes @2.4-2.5 GHz). Eso quiere decir, que existen inconvenientes para trabajar a esta frecuencia con componentes de agua.

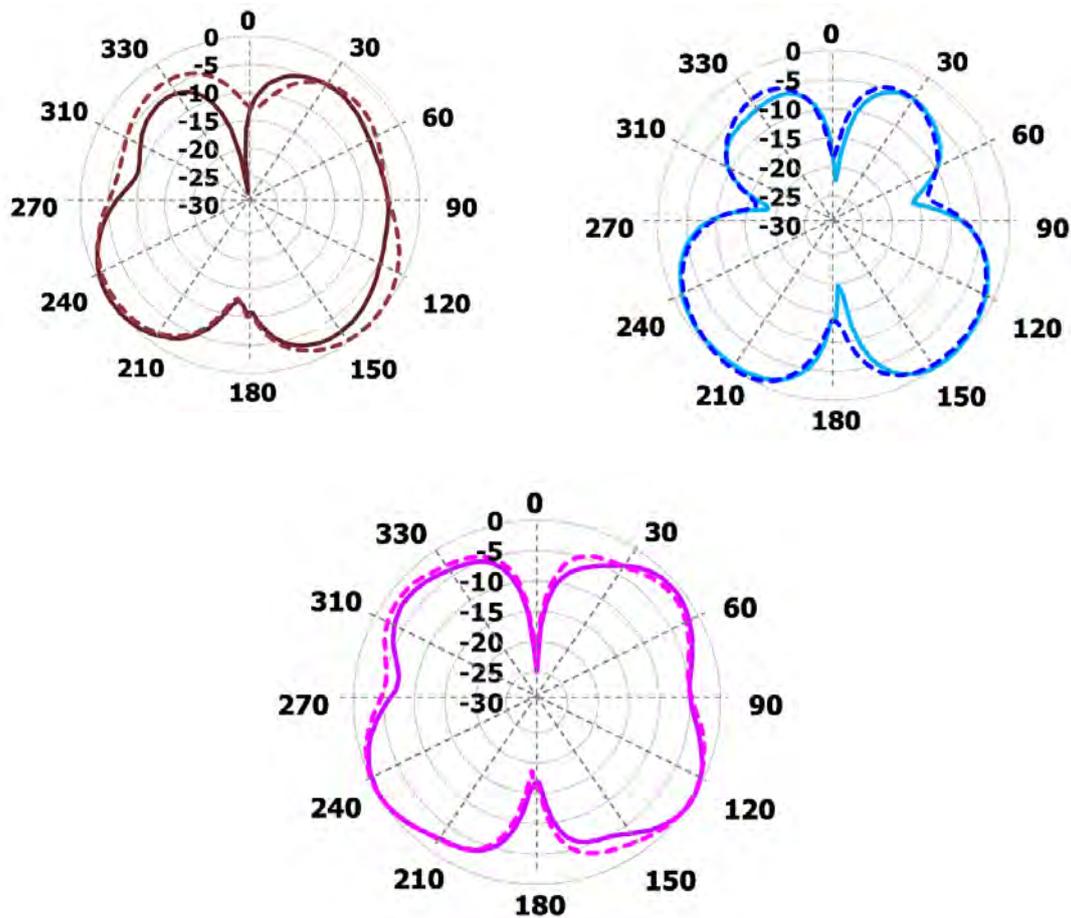


Figura 85 Diagramas de radiación: antena monopolo con plano de masa de agua @2.45 GHz. PHI = 0 (línea continua) y PHI = 90 (línea discontinua). Dimensiones plano de masa de agua: 100x100x5 (Marrón), 160x160x5 (Azul) y 200x200x5 (Rosa)

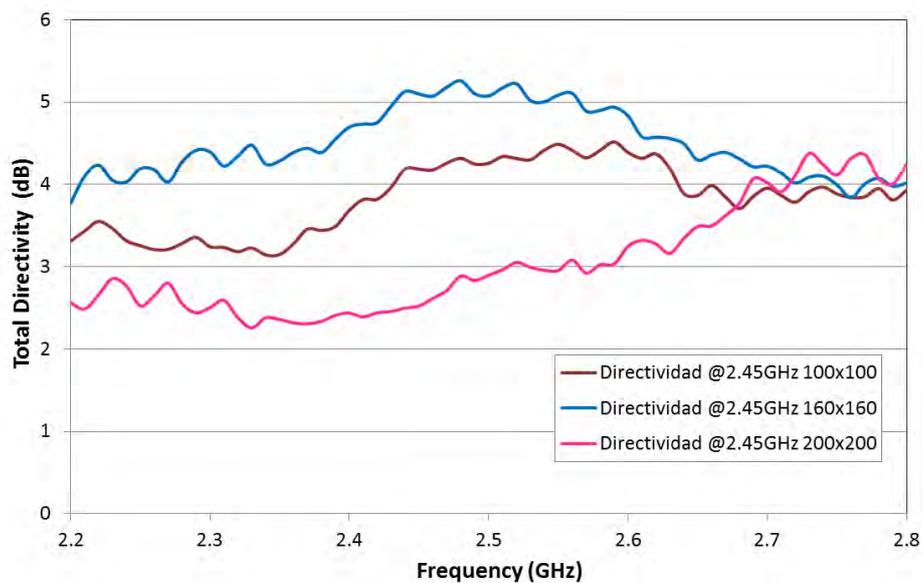


Figura 86 Comparación de Directividad (dB) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia centrada de 2.45 GHz.

4.5.2 Antenas monopolo a 5GHz.

Para los diagramas de radiación obtenidos para antenas monopolo a la frecuencia de 5GHz, instaladas en planos de masa de agua, se puede observar un claro comportamiento característico de este tipo de antenas. En los 3 casos se experimentan nulos en el eje Z y dos lóbulos principales claramente diferenciados respetando cierta simetría respecto al eje Z. Cabe añadir y tal como se comentó en el capítulo anterior, la radiación hacia atrás es mayor en cuanto sustituimos los componentes de cobre de una antena conductiva por agua.

Analizando los resultados obtenidos, se válida la elección del plano de masa de 100 mm x 100 mm, pese a obtener mejores resultados de directividad (ver Figura 88) en el caso de un plano de masa de 200 mm x 200 mm. Pues es el caso con un valor de ganancia más elevado proporcional al ancho de haz comparado con el resto de casos investigados. Se obtiene un ancho de haz de 48.6° en el plano E y 40° en el plano H. En la Tabla 27 se puede ver un resumen comparativo de los anchos de haz obtenidos para los diferentes casos implementados.

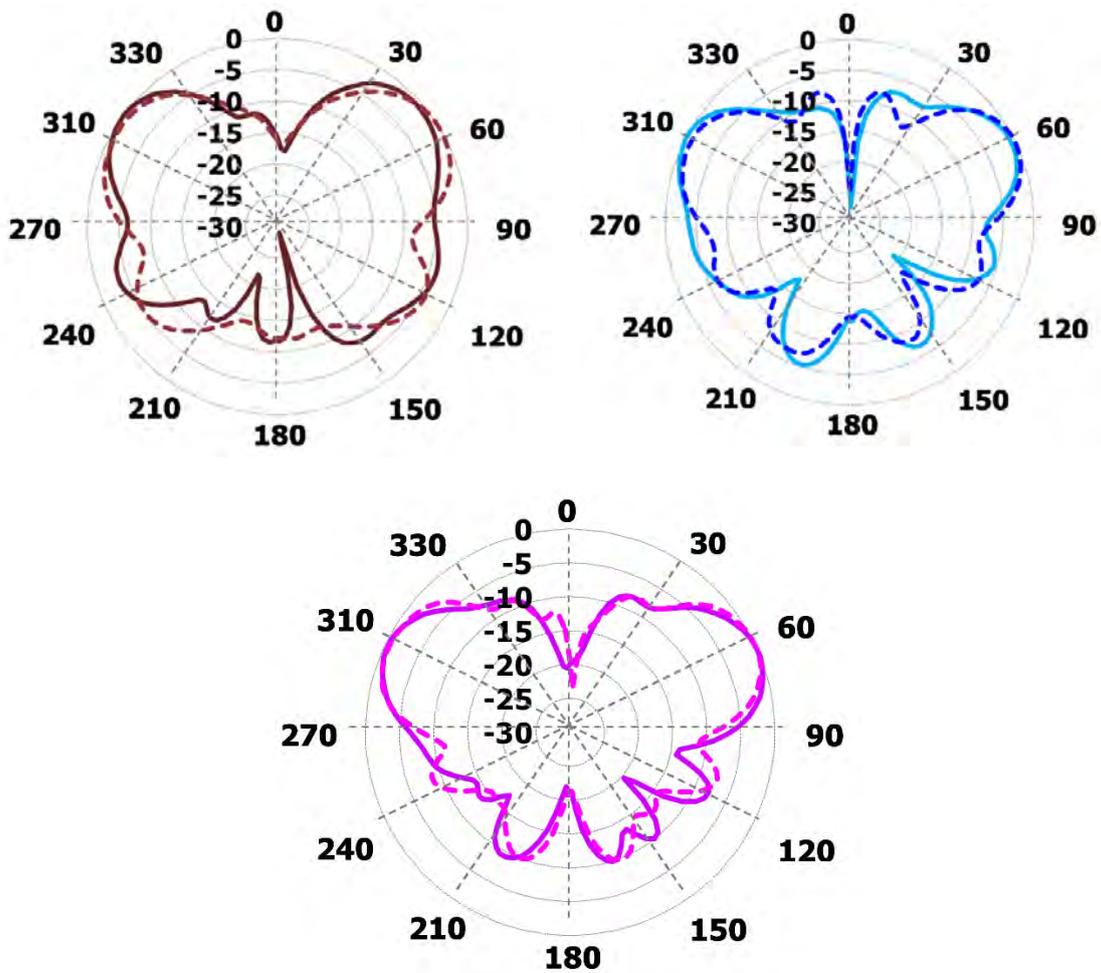


Figura 87 Diagramas de radiación: antena monopolo con plano de masa de agua @5 GHz. PHI = 0 (línea continua) y PHI = 90 (línea discontinua). Dimensiones plano de masa de agua: 100x100x5 (Marrón), 160x160x5 (Azul) y 200x200x5 (Rosa)

	phi = 90°	phi = 0°
100x100 mm ²	48.6°	40°
160x160 mm ²	40.0°	34.3°
200x200 mm ²	34.5°	34.3°

Tabla 27 Ancho de los haces (Phi = 90 y Phi = 0) de antenas monopolo implementadas sobre planos de masa de agua de dimensiones diferentes.

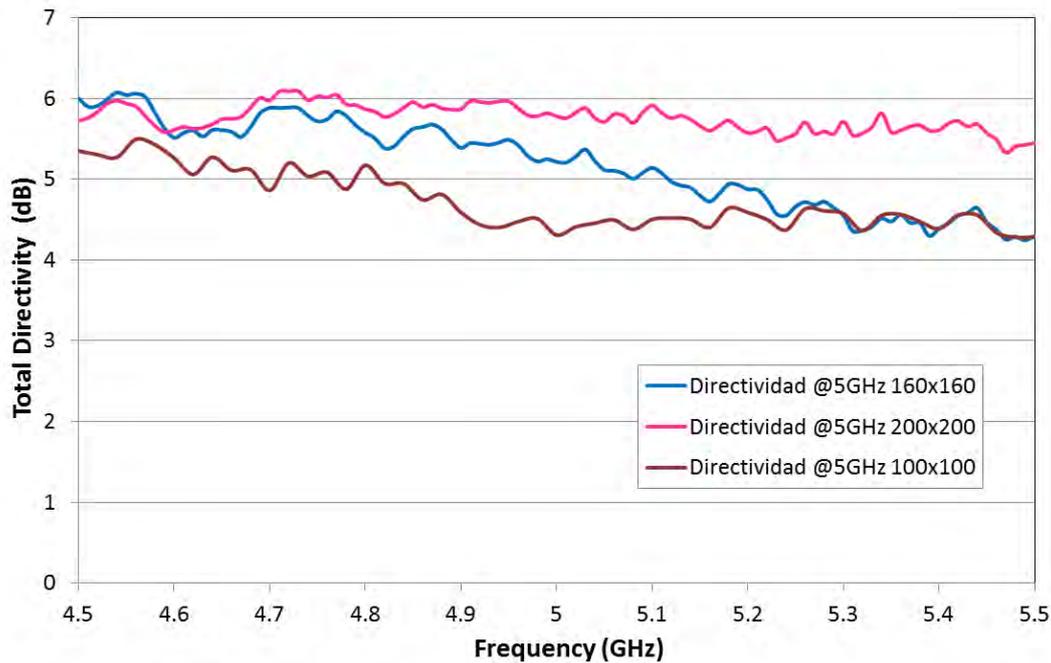


Figura 88 Comparación de Directividad (dB) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia centrada de 5 GHz.

4.5.1 Antenas monopolo en la banda de 0.9 GHz.

Para los diagramas de radiación obtenidos para antenas monopolo a la frecuencia de 0.9 GHz, instaladas en planos de masa de agua, no se observa un comportamiento característico de este tipo de antenas (ver Figura 89). No es hasta que se llega al plano de masa de mayores dimensiones, que no se empieza a observar un nulo en el eje Z, como se esperaría de una antena monopolo radiando orientada en el eje Z. La conclusión a la que se llega en este apartado es, que el plano de masa que requiere una antena monopolo a esa frecuencia ha de ser al menos del orden de 500 mm por lado. Estos valores salen de una simple escala, siendo requerido, el caso de la antena monopolo resonando a 5 GHz, unas dimensiones óptimas de plano de masa de 100 mm por lado.

Al no disponer de unas dimensiones tales, se pospone este prototipo para líneas futuras.

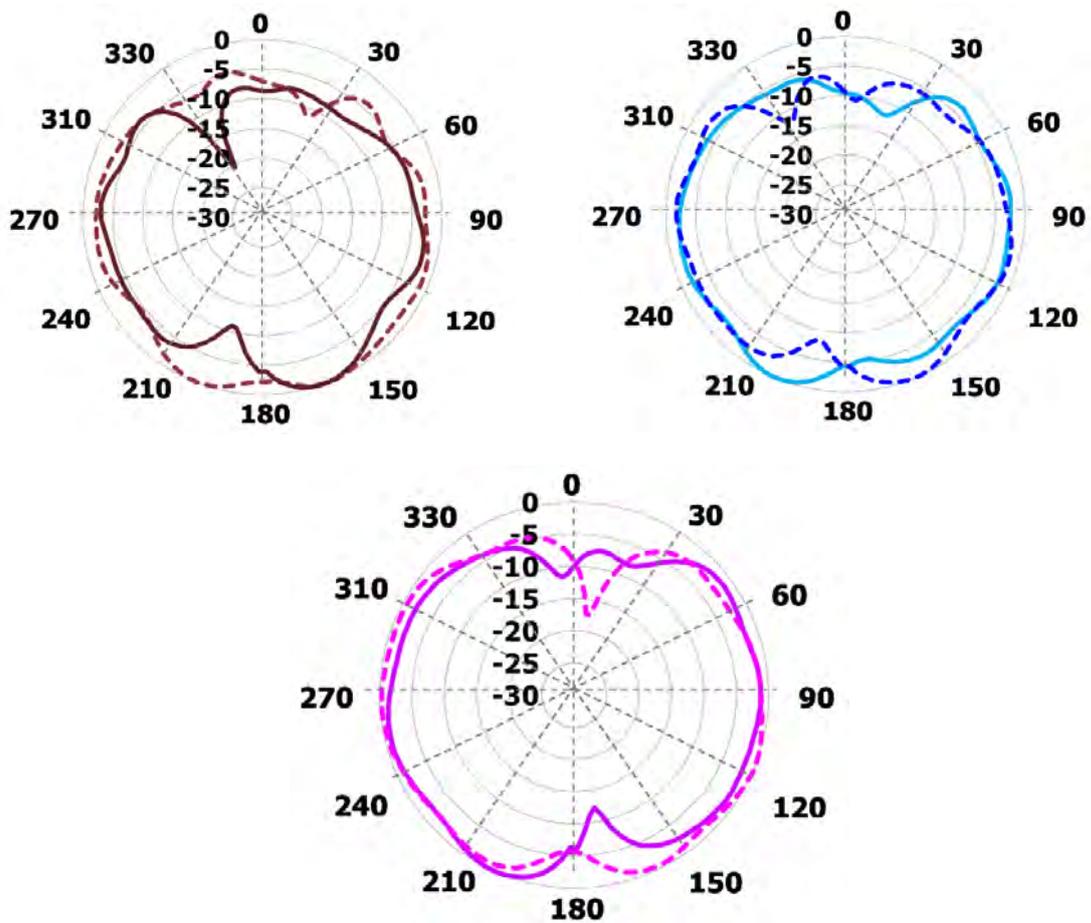


Figura 89 Diagramas de radiación: antena monopolo con plano de masa de agua @0.9 GHz. PHI = 0 (línea continua) y PHI = 90 (línea discontinua). Dimensiones plano de masa de agua: 100x100x5 (Marrón), 160x160x5 (Azul) y 200x200x5 (Rosa)

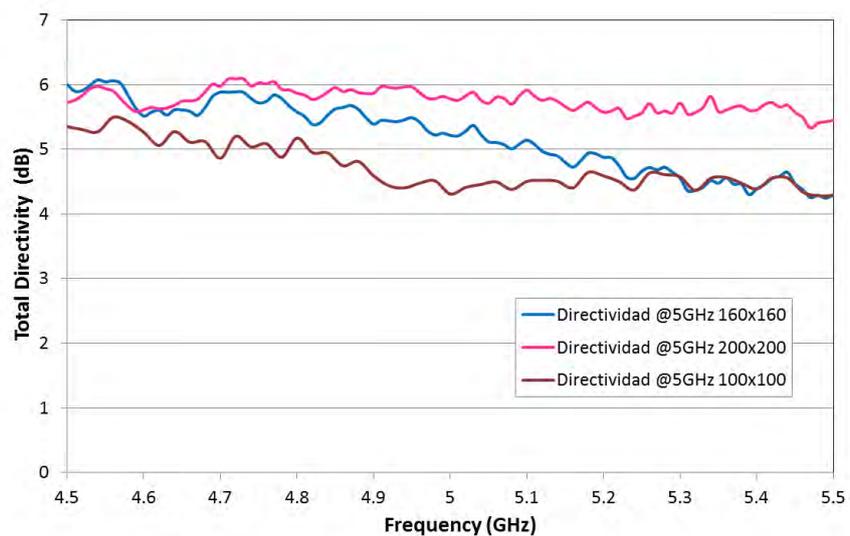


Figura 90 Comparación de Directividad (dB) para los prototipos de antena monopolo con diferentes planos de masa de agua a la frecuencia centrada de 0.9 GHz.

4.6 Conclusiones

Este capítulo ha tenido como objetivo estudiar el comportamiento de antenas tipo monopolo sobre planos de masa hechos de agua. Dado que en el capítulo anterior se habían realizado numerosos experimentos para tratar de aislar la radiación hacia atrás en antenas microstrip, se disponía de varios planos de masa de diferentes dimensiones para realizar un estudio satisfactorio.

Para cada frecuencia de trabajo se ha elegido un plano de masa de unas dimensiones concretas, en función de los resultados de adaptación, eficiencia y diagrama de radiación.

En el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 2.4 – 2.5 GHz, las dimensiones de plano de masa son de 200 mm por lado y una altura de 5 mm. Aunque los resultados en este prototipo resultan ser anómalos, dado que no hay un aislamiento en términos de radiación hacia atrás, los mejores resultados de adaptación y eficiencia se dan con estas dimensiones de plano de masa, en el que se tiene un pico de adaptación centrado en la frecuencia de interés con un BW relativo del 12% con ROE inferior a 2 y una eficiencia de antena media del 69%.

En el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 5 GHz, las dimensiones de plano de masa son de 100 mm por lado y una altura de 5 mm. Para esta geometría, se obtiene un máximo de adaptación centrado en la frecuencia de interés, con un BW relativo superior al 15% con ROE inferior a 2 y una eficiencia de antena media del 53%. Aunque se obtengan resultados similares, en términos de adaptación y BW, para un plano de masa de 160 mm por lado y una altura de 5 mm, la eficiencia de antena en este caso es menor, descartando así estas dimensiones respecto a las de 100 mm.

En el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 0.9 GHz, no se obtiene un comportamiento similar al de una antena monopolo, en términos de diagrama de radiación, hasta que no se llega a dimensiones de 200 mm por lado y una altura de 5 mm. La conclusión a la que se llega en este apartado es, que el plano de masa que requiere una antena monopolo a esa frecuencia ha de ser al menos del orden de 500 mm por lado. Al no disponer de unas dimensiones tales, se pospone este prototipo para líneas futuras.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras del proyecto

5.1 Conclusiones

Durante el estudio del proyecto se han ido recogiendo una serie de conclusiones sobre el proceso de diseño e implementación de una antena *microstrip* de agua, que a continuación se resumirán en este capítulo:

En el capítulo 1 tenía como objetivo realizar un estudio del arte e introducir conceptos básicos de las antenas *microstrip* y de agua.

En el capítulo 2 tenía como objetivo estudiar la estructura de una antena *microstrip* y la caracterización del agua como dieléctrico para proceder así con el diseño y simulación de antenas *microstrip* de agua operando en la banda ISM, concluyendo que:

- Para el diseño de una antena *microstrip* trabajando en la banda 2.4 – 2.5 GHz, cuyo parche radiante y plano de masa están hechos de agua encapsulada, se han obtenido resultados satisfactorios para pasar al proceso de implementación.
- En términos de adaptación se obtiene un amplio BW (14%) para una ROE inferior a 2.
- En términos de eficiencia de antena se obtiene un 62.5% a la frecuencia de 2.4 GHz y un 67.3% a 2.5 GHz.
- En el caso de un diseño trabajando a la frecuencia de 5GHz, también se han obtenido resultados satisfactorios para proceder a implementar el diseño final.
- Con una adaptación de -10dB a la frecuencia centrada de 5 GHz, se obtiene amplio BW (=20%) cumpliendo con los criterios de $ROE < 3$.
- En términos de eficiencia de antena se obtiene un 41.9% a la frecuencia de 5 GHz y una media de 42% en la banda de interés (4.9 – 5.1 GHz).

En el capítulo 3 tenía como objetivo implementar los diseños simulados con el software de simulación IE3D de Zeland, concluyendo que:

- Es necesario usar soportes robustos de metacrilato para hacer el prototipo más estable, evitando así alteraciones del rendimiento de la antena frente a posibles vibraciones.
- Es recomendable utilizar diseños con rangos de tolerancia aceptable para la maquinaria que se va a utilizar, evitando así problemas en la fabricación del prototipo.

Después de implementar la antena *microstrip* de agua a la frecuencia de 5GHz se confirma que:

- El BW que cumple los criterios de $ROE < 2$ es superior al 20%.
- Las eficiencias de antena disminuyen al implementar una antena completamente de agua. En simulaciones se obtuvieron eficiencias cercanas al 90% en caso de una antena *microstrip* de cobre y alrededor

del 60% sustituyendo el parche de cobre por uno de agua. Ahora se obtienen unas eficiencias del 36% con antenas completamente de agua.

Después de implementar la antena microstrip de agua a la frecuencia de 2.4 – 2.5 GHz se confirma que:

- El BW que cumple los criterios de $ROE < 2$ es superior al 20%.
- La eficiencia de antena es del 60% con antenas hechas completamente de agua, un plano de masa de 160 mm x 160 mm y una altura de 5 mm.
- Se obtiene relaciones de radiación F/B demasiado cercanas a 0, se propone aplazar la implementación de este prototipo y estudiar este comportamiento en un futuro.

En el capítulo 4 tenía como objetivo estudiar el comportamiento de antenas monopolo implementadas sobre planos de masa de agua. De este estudio se concluye que:

- En el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 2.4 – 2.5 GHz (30 mm), las dimensiones óptimas de plano de masa son de 200 mm por lado y una altura de 5 mm. Para este prototipo la radiación hacia atrás supone un inconveniente y se propone estudiar este caso en líneas futuras para mejorar el aislamiento de radiación. A pesar de esta anomalía los mejores resultados de adaptación y eficiencia se dan con estas dimensiones de plano de masa, en el que se tiene un pico de adaptación centrado en la frecuencia de interés con un BW relativo del 12% con ROE inferior a 2 y una eficiencia de antena media del 69%.
- En el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 5 GHz, las dimensiones de plano de masa son de 100 mm por lado y una altura de 5 mm. Para esta geometría, se obtiene un máximo de adaptación centrado en la frecuencia de interés, con un BW relativo superior al 15% con ROE inferior a 2 y una eficiencia de antena media del 53%.
- En el caso de una antena monopolo resonando en la banda de 0.9 GHz se concluye que el plano de masa que requiere una antena monopolo a esa frecuencia ha de ser al menos del orden de 500 mm por lado. Al no disponer de unas dimensiones tales, se pospone este prototipo para líneas futuras.

Se concluye la memoria del proyecto confirmando que se ha logrado el diseño y la implementación de una antena *microstrip* de agua y se ha estudiado el comportamiento de antenas monopolo con planos de masa de agua.

5.2 Líneas futuras

Posibles líneas futuras de trabajo para dar continuidad al presente proyecto podrían ser:

- El estudio para mejorar las características radioeléctricas de la antena *microstrip* de agua utilizando sistemas de *arrays*.
- El diseño y la implementación de una nueva antena *microstrip* transparente utilizando diferentes conductores translucidos tales como grafeno u otros materiales.
- La Implementación de un sistema de telecomunicaciones IoT compuesto emisor y receptor utilizando como elemento radiante la antena *microstrip* de agua.

Bibliografía

- [1] A. Garg, "Microstrip Patch Antenna." .
- [2] Salgado . L., "Materiales MICROSTRIP," 2016.
- [3] A. Cardama, L. Jofre, J. M. Rius, J. Romeu, S. Blanch, and M. F. Bataller, *Antenas*. Edicions UPC, 2002.
- [4] "MITSUBISHI ELECTRIC News Releases Mitsubishi Electric's SeaAerial Antenna Uses Seawater Plume." [Online]. Available: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2016/0127.html>.
- [Último acceso: 18 de Mayo 2019].
- [5] S. Diaz, "El agua como elemento radiante : Aplicación al diseño de una antena microstrip." Barcelona: La Salle (TFM), 2016.
- [6] J. Anguera, A. Pérez, *TEORÍA DE ANTENAS Guía de estudio*. 2008.
- [7] Balanis, C. A., y Huang, J., "Modern antenna handbook", Honoken, Canadá: John Wiley and Sons, 2005.
- [8] "La Antena Microstrip," *TEORÍA DE RADIADORES ELECTROMAGNÉTICOS*, noviembre 11, 2017, [En línea] pp. 1–7. <http://oeec970214.blogspot.com/2017/11/antena-microstrip.html>
- [9] Anguera, J, Puente, C., Borja, C., Font, G., y Soler, J., "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas," *Microwave and optical technology letters*, vol. 31, nº 1, pp. 185-188, 2001.
- [10] "BCN3D (Impresora Sigma)," [En línea]. <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/bcn3d-sigma/>.
- [Último acceso: 5 de Mayo de 2019].
- [11] "Sketchup," [En línea]. <https://www.sketchup.com/es>.
- [Último acceso: 12 de Mayo de 2019].
- [12] "BCN3D Ignis," [En línea]. <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/bcn3d-ignis/>.
- [Último acceso: 21 de Abril 2019].
- [13] "RDWorks," [En línea]. <http://thinklaser.com/thinklaser-partner-russ-rdworks/>.
- [Último acceso: 22 de Febrero de 2019].
- [14] J. Anguera, C. Puente, C. Borja, G. Font, and J. Soler "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.31, no. 3, pp.185-188, Nov 2001.

