

Universitat Politècnica de Catalunya

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
(ESEIAAT)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

Diseño y Medición de una Antena Wearable

AUTOR: Mohamed El Bouchti

DIRECTOR: Ignacio Gil Gali

GRADO: Ingeniería de Sistemas Audiovisuales

Terrassa, 18 de Octubre de 2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle Ignacio Gil Gali el trabajo y la dedicación que realiza como profesor porque gracias a la forma en la que nos inculca la pasión por las antenas, hice este proyecto. Y, por supuesto, darle las gracias por su guía y consejos durante todo el proceso de este proyecto porque sin eso este proyecto no habría sido posible.

Quiero dar las gracias a Eduardo Bernal por haber sido un verdadero amigo. Gracias por cada momento que hemos vivido en la universidad, por cada lágrima de risa que nos ha salido y, como no, por toda la ayuda que me has brindado durante estos cuatro años.

Quiero dar las gracias a todas aquellas personas que me han ayudado en cualquier aspecto de mi vida y han hecho de mi la persona que soy ahora.

Muchas gracias.

Moha.

RESUMEN

En este proyecto se ha diseñado y construido una serie de antenas planares destinadas a funcionar en el sistema de comunicaciones inalámbricas Ultra-Wideband.

Estas antenas se han fabricado en tecnología planar, sobre sustrato textil y alimentadas mediante una línea de transmisión microstrip. Se ha comprobado su correcto funcionamiento mediante el software CST además de su efecto sobre la cabeza humana.

Una vez diseñada la antena, se ha procedido a su fabricación y posterior medida para analizar su comportamiento final.

Palabras Clave

UWB, antena planar, usable, antena microstrip, parámetros S, coeficiente de reflexión, ancho de banda, diagrama de radiación, ganancia, sustrato, CST.

ABSTRACT

In this project, some planar antennas have been designed and constructed which can operate in the wireless telecommunication system Ultra-Wideband.

These antennas are manufactured in planar technology on textile substrate and fed by a microstrip transmission line. It has been tested the correct operation of the antennas by CST software in addition to its effect on the human head.

Once the antenna is designed, we proceeded to manufacture and subsequent action to analyse its final performance.

Key Words

UWB, planar antenna, wearable, microstrip antenna, S-parameters, reflection coefficient, bandwidth, radiation pattern, gain, substrate, CST.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract.....	4
Índice de contenido	5
Índice de figuras.....	7
Capítulo 1	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Organización de la memoria	10
1.3 Motivación	11
1.4 Objetivos	11
1.5 Metodología.....	12
Capítulo 2	13
2.1 Introducción.....	13
2.2 Teoría de las antenas	13
2.2.1 Introducción a las antenas	13
2.2.2 Parámetros característicos	14
2.2.3 Tipos de antenas básicas.....	20
2.2.4 UWB <i>wearable</i>	23
2.2.5 Características electromagnéticas del cuerpo humano.....	27
2.2.6 SAR	29
2.2.7 Software de diseño	30
Capítulo 3	32
3.1 Introducción.....	32

3.2	Criterios de diseño de la antena	32
3.2.1	Diseño Base	32
3.2.1	Antena Base	33
3.3	Diseño y Simulación de la antena mediante CST	34
3.3.1	Introducción	34
3.3.2	Proceso de diseño con CST	34
3.3.3	Modificaciones Implementadas	41
3.3.4	Pruebas realizadas	47
3.3.5	Resultados SAR.....	52
3.4	Construcción y mediciones de la antena	56
3.4.1	Introducción	56
3.4.2	Especificaciones de los materiales (usados)	56
3.4.3	Proceso de montaje	58
3.4.4	Especificaciones de las herramientas de medida	61
3.4.5	Pruebas realizadas	62
3.5	Cronograma	66
3.6	Presupuesto	68
Capítulo 4	69
4.1	Introducción.....	69
4.2	Conclusiones	69
4.3	Líneas Futuras	70
Referencias.....	71
Anexo	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de una antena.....	13
Figura 2: Sistema de coordenadas esféricas.....	15
Figura 3: Diagrama de radiación en 3D y en 2D.....	16
Figura 4: Esquema de un generador, una línea de transmisión y una antena.	17
Figura 5: Directividad.....	18
Figura 6: Polarización.....	20
Figura 7: Antenas tipo hilo.....	21
Figura 8: Antenas de apertura.....	21
Figura 9: Antenas Reflectoras.....	21
Figura 10: Antenas Microstrip.....	22
Figura 11: Diagrama de antena Microstrip.....	22
Figura 12: Diferentes configuraciones del patch.....	23
Figura 13: UWB y otras tecnologías en el espectro de frecuencias.....	25
Figura 14: Los datos medidos de permitividad tejido humano para diferentes tipos de tejidos [6].....	28
Figura 15: Los datos medidos de conductividad tejido humano para diferentes tipos de tejidos [6].	28
Figura 16: Dimensiones de la Antena Base.....	33
Figura 17: Simulación del dieléctrico en el CST.....	35
Figura 18: Simulación del plano de masa (color gris) en el CST.....	36
Figura 19: Simulación de P1 (color gris) en el CST.....	37
Figura 20: Simulación de P1 y P2 (ambos de color gris) en el CST.....	38
Figura 21: Simulación de P1, P2 y P3 (color gris) en el CST.....	39
Figura 22: Simulación del Patch (color gris) con las componentes fusionadas en el CST.....	39
Figura 23: Simulación del puerto discreto y sus parámetros en el CST.....	40
Figura 24: Simulación de la Antena Base en el CST.....	40
Figura 25: S_{11} de la Antena Base.....	41
Figura 26: S_{11} de la Antena Base obtenida en el artículo.....	41
Figura 27: Parámetro del material dieléctrico correspondientes a la tela tejana.....	42
Figura 28: S_{11} de la Antena Base después de modificar los parámetros del sustrato dieléctrico.....	43
Figura 29: Patch de la antena donde P3 está marcado en rojo.....	43

Figura 30: S_{11} de la Antena Base con P3.	44
Figura 31: S_{11} de la antena Base sin P3.	44
Figura 32: Simulación de la Antena Final.	45
Figura 33: Dimensiones de la Antena Final.	45
Figura 34: S_{11} de la Antena Final.	46
Figura 35: S_{11} de la Antena Final.	47
Figura 36: Diagrama de radiación a 3Ghz y 4GHz.	48
Figura 37: Diagrama de radiación a 5Ghz y 6GHz.	48
Figura 38: Diagrama de radiación a 7Ghz y 8GHz.	49
Figura 39: Realized Gain (dBi) para cada frecuencia de la Antena Final.	50
Figura 40: Directividad. La flecha indica el cuadro de resultados donde "Dir" corresponde al valor de la directividad.	51
Figura 41: Valores de la Directividad para cada frecuencia.	51
Figura 42: Diferentes vista del modelo de cabeza humana.	52
Figura 43: Modelado del interior y la piel correspondientes a una cabeza humana y debajo sus parámetros electromagnéticas.	53
Figura 44: Antena colocada al lado de la oreja izquierda del modelo de cabeza.	53
Figura 45: Distancia entre el modelo de cabeza humana y la antena.	53
Figura 46: Parámetros del SAR.	54
Figura 47: Tira adhesiva WURTH ELEKTRONIK 3003350A.	57
Figura 48: Conector SMA 5-1814832-1 de TE Connectivity.	57
Figura 49: Dimensiones de la Antena Final.	57
Figura 50: Materiales y herramientas utilizadas.	58
Figura 51: Recorte del pantalón tejano (a la derecha).	59
Figura 52: Dibujo del Patch en la tira adhesiva de cobre y recortes de la tira adhesiva y el dieléctrico de la tela tejana.	59
Figura 53: Patch enganchado en el dieléctrico.	60
Figura 54: Soldador, estaño, antena y el puerto.	60
Figura 55: Antena finalizada. Vista superior a la izquierda y planta a la derecha.	61
Figura 56: Agilent Technologies FieldFox microwave analyzer N9916A.	61
Figura 57: Agilent Technologies CalKit 85521A.	62
Figura 58: Montaje de la antena en el Agilent Technologies FieldFox microwave analyzer N9916A.	62

Figura 59: Resultado S_{11} visualizado en Agilent Technologies FieldFox microwave analyzer N9916A.....	63
Figura 60: Resultado S_{11} de la Antena Final (el mejor resultado).	63
Figura 61: Grafico comparativo de S_{11} de la antena real y la simulación.	64
Figura 62: Cronograma del proyecto.	66
Figura 63: Resultado S_{11} de las antenas construidas.	73
Figura 64: 4 prototipos de la Antena Final.....	74
Figura 65: Comparativa entre una Antena Final, a la derecha, y una Antena Final x2, a la izquierda.	74

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

Este documento describe el proyecto técnico de ingeniería consistente en el diseño, construcción, medida y análisis de una antena planar que operan en el sistema Ultra-Wideband (UWB).

El proyecto ha sido llevado a cabo íntegramente en las instalaciones de Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa (ESEIAAT), en el edificio de la antigua Escola d'Enginyeria de Terrassa (EET).

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La memoria de este proyecto consta de 4 capítulos:

- En el primer capítulo, se presenta el estado del arte que introduce las motivaciones para el desarrollo del trabajo, los objetivos que se pretenden conseguir con el mismo y la metodología que se va a seguir.
- El segundo capítulo incluye el marco teórico del proyecto. En primer lugar se hace la introducción a las antenas y sus parámetros característicos.

En segundo, se muestra una breve descripción del sistema UWB, sus características técnicas, se detallan las aplicaciones del sistema y las ventajas y desventajas de la tecnología.

Seguidamente, se plantean las características electromagnéticas del cuerpo humano.

Y finalmente se detalla la tasa de absorción específica (SAR) y el software utilizado para la simulación de la antena.

- El tercer capítulo corresponde al diseño y construcción de la antena.
Primeramente se definen los criterios y las especificaciones iniciales para el diseño de la antena. A continuación se detalla el proceso de diseño y simulación de la antena mediante el software CST. Así mismo, se incluyen las pruebas y medidas llevadas a cabo con dicho software.
Seguidamente se describe el proceso de construcción de la antena en el laboratorio y las medidas realizadas para comprobar el buen funcionamiento de la antena.
Este capítulo también incluye la temporización del proyecto y el presupuesto.
- El cuarto, y último capítulo, contiene las conclusiones del proyecto y las líneas futuras del mismo.

1.3 MOTIVACIÓN

Los continuos cambios en las necesidades de la sociedad han provocado la aparición de nuevas tecnologías y su correspondiente mejora, especialmente en los últimos 30 años.

Desde la aparición de las tecnologías y los protocolos de transmisión siempre ha existido el deseo de transmitir la mayor cantidad de datos en el menor tiempo y consumo de recursos. Estos deseos culminaron dando lugar a la tecnología Ultra-Wideband (UWB). Dicha tecnología ha sido diseñada para su uso en Redes de Área Personal Inalámbrica (*Wireless Personal Area Network* (WPAN), en inglés) con el objetivo de interconectar todo tipo de dispositivos entre sí consiguiendo transmisiones con un consumo mínimo, una tasa de transmisión elevada y un bajo coste.

En este escenario, las antenas se consideran un componente vital para esta nueva tendencia, cuando la aplicación de dispositivos inalámbricos puede evitar el uso de conexiones físicas entre dispositivos. Son especialmente interesantes las antenas “wearable”, a las que nos referiremos en castellano como usables, aquellas que se pueden integrar en la ropa del usuario sin interferir en sus actividades o movimientos. Por tanto, estas antenas combinan la robustez, la flexibilidad y al comodidad de la ropa con el bajo consumo de la tecnología UWB.

Por estos motivos, el diseño y, sobretodo, la construcción de la antena ayudaría comprender y aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo del grado cursado especialmente los adquiridos en la asignatura Emisores y Receptores.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño de una antena planar sobre sustrato textil que opera como una parte del sistema UWB, por lo que debe cubrir la banda de frecuencias desde los 3,1 GHz hasta los 10,6 GHz.

Para el diseño y la simulación de la antena se utilizará el software CST *Microwave Studio*, por lo que, nuestro primer objetivo será conocer y aprender a utilizar este software.

El siguiente objetivo será construir varios prototipos físicos de la antena diseñada. Para ello, primero buscaremos la mejor manera de construir la antena teniendo en cuenta los materiales y herramientas disponibles.

Por último, las mediciones sobre la antena. Aprenderemos a utilizar las herramientas y aparatos de medida del laboratorio para obtener aquellas medidas que necesitamos.

1.5 METODOLOGÍA

En este proyecto se toma como punto inicial una antena existente [1] con el fin de simularla, estudiar y analizar su funcionamiento mediante un software de simulación, CST, con el que se estudiará el coeficiente de reflexión de la antena. Esta primera parte servirá para poder ganar cierto dominio de uso del software.

A continuación, se modificará el material dieléctrico por uno con características textiles, lo que implica la necesaria variación de algunos parámetros de diseño de la antena con el fin de mantener la misma respuesta de forma que se mantienen las prestaciones para las comunicaciones inalámbricas de UWB. Se analizará el correcto funcionamiento de la antena mediante el software de simulación, con el que se estudiarán los parámetros más importantes: el coeficiente de reflexión, patrón de radiación, la ganancia y la directividad.

Finalmente se procederá a la fabricación de varios prototipos de la antena a los que se realizarán las mediciones del coeficiente de reflexión con la posterior comparación de los resultados entre las medidas reales y la simulación

El sustrato textil empleado será un tejido del tipo tejano del cual son conocidas sus características eléctricas y dieléctricas. El empleo de un sustrato dieléctrico textil dotará a la antena de la flexibilidad necesaria para ser empleada en redes de sensores que trabajen en entornos de área corporal.

CAPÍTULO 2

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se da la visión general teórica asociada al presente proyecto. Se hará una breve introducción a las antenas y a sus parámetros característicos; también se incluye una explicación de la tecnología UWB, sus fundamentos, ventajas y desventajas. Finalmente en este capítulo se presentan las características electromagnéticas del cuerpo humano y una breve introducción del software utilizado para la simulación de la antena. Todo esto permitirá una comprensión adecuada de todo el proyecto.

2.2 TEORÍA DE LAS ANTENAS

2.2.1 Introducción a las antenas

El *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) define la antena como aquel dispositivo capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas [2]. Asimismo, la antena es una estructura de transición entre el espacio libre y un medio guiado o línea de transmisión que se usa para transmitir energía de la fuente a la antena y viceversa, como muestra el esquema en la Figura 1.

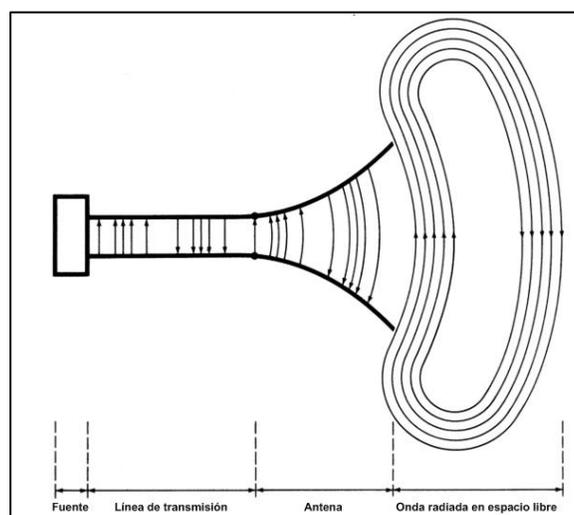


Figura 1: Esquema de una antena.

Una antena tiene como principal función la radiación de una potencia suministrada. Dependiendo del sistema para la que esté diseñada, la antena radiará en todas las direcciones (antena omnidireccional) como las usadas en los sistemas de radiodifusión, o en una dirección (antena directiva) como en radiocomunicaciones [2].

2.2.2 Parámetros característicos

Impedancia

La impedancia de entrada (Z_A) de una antena es la relación de la tensión entre la corriente que presenta en su terminal. Consta de una parte real (R_A) y una parte imaginaria (X_A), dependientes de la frecuencia [3].

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.1)$$

Es necesario que tanto el transmisor, el receptor y la línea de transmisión que los une, estén adaptados, es decir, que tengan la misma impedancia de entrada. De esta manera la antena receptora radia a la máxima potencia que el transmisor entrega ya que es cuando las pérdidas son mínimas [3].

Las pérdidas se producen tanto pérdidas de potencia hacia el espacio, modeladas como resistencia de radiación R_r , como pérdidas óhmicas, R_L . De esta manera, y teniendo en cuenta la ley de Ohm, la potencia entregada (P_{in}) a la antena es la potencia radiada (P_r) y la de pérdidas (P_L) [2].

$$\begin{aligned} R_A &= R_r + R_L \\ P_{in} &= P_r + P_L = I^2 R_r + I^2 R_L \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde I es el valor de la corriente de entrada de la antena.

Intensidad de radiación

Estableciendo un sistema de coordenadas esféricas, donde θ i Φ son los ángulos para especificar una dirección, obtenemos un marco de referencia donde situar la antena a caracterizar (Figura 2).

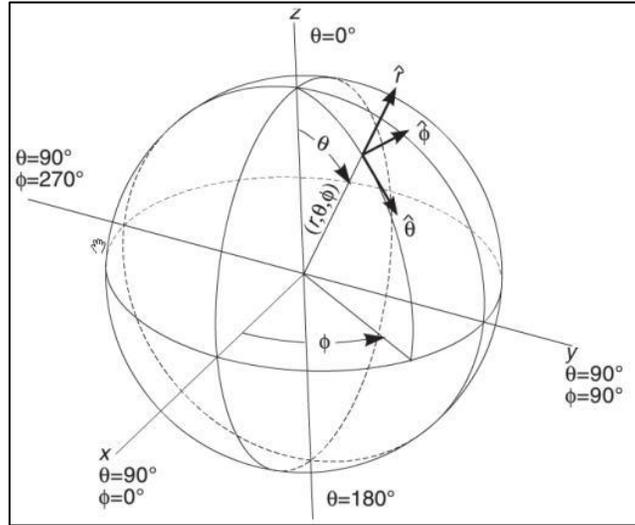


Figura 2: Sistema de coordenadas esféricas.

Se puede demostrar que a partir de las ecuaciones de Maxwell y de los valores eficaces de campos eléctrico y magnético, se obtiene la densidad de flujo por unidad de superficie (W/m^2) [3]:

$$\vec{\rho}(\theta, \Phi) = \text{Re} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (2.3)$$

Para los campos radiados, los módulos del campo eléctrico y magnético están relacionados por la impedancia característica del medio η , que en el vacío vale $120\pi \Omega$ [3].

La densidad de potencia radiada se calcula a partir de las componentes transversales del campo eléctrico como [3]:

$$\rho(\theta, \Phi) = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\Phi|^2}{\eta} \quad (2.4)$$

La potencia total radiada se puede calcular a partir de la integral de la densidad de potencia en una superficie esférica que cierre la antena [3]:

$$P_r = \iint_S \vec{\rho}(\theta, \Phi) d\vec{s} \quad (2.5)$$

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección. La relación entre la intensidad de radiación y la densidad de potencia radiada es [3]:

$$K(\theta, \Phi) = \rho(\theta, \Phi)r^2 \quad (2.6)$$

Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de todas las direcciones en el espacio, a una distancia fija. Normalmente, se utilizan coordenadas esféricas.

Situando la antena en el origen y manteniendo la distancia constante se expresa el campo eléctrico en función de las variables θ i Φ . Como el campo magnético deriva directamente del eléctrico, su representación también se podría llevar a cabo pero es más frecuente la primera. Como la densidad de potencia es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico, la información que nos proporciona su representación gráfica es la misma que la del campo eléctrico [3].

Se puede representar tanto tridimensional como bidimensionalmente, manteniendo en este caso las variables θ i Φ constantes, como se puede observar en la Figura 3.

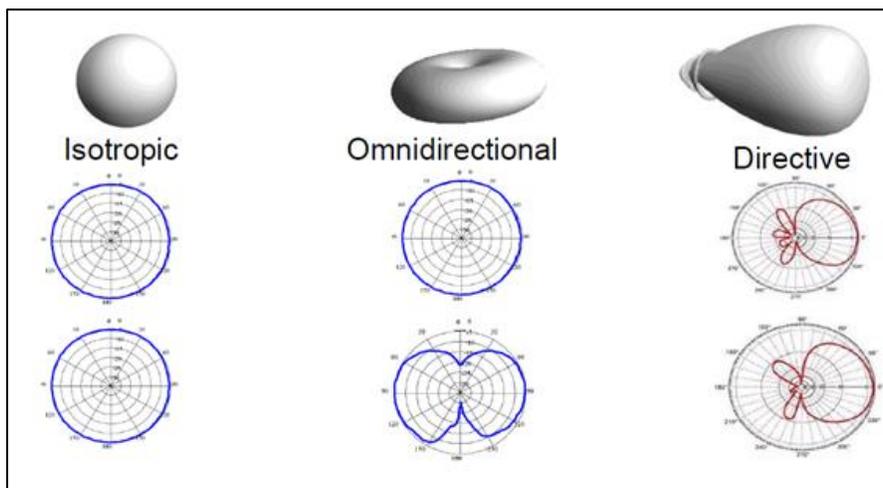


Figura 3: Diagrama de radiación en 3D y en 2D.

Adaptación

En recepción, la antena se conecta a una línea de transmisión o bien directamente a un receptor. Para una transferencia máxima de potencia, la impedancia de la antena a $Z_a = R_a + jX_a$ y la impedancia de carga Z_L deben ser complejas conjugadas $Z_L = Z_a^*$ [3]. Cumpliéndose:

$$P_{L\max} = \frac{|V_{\text{Generador}}|^2}{4R_a} \quad (2.7)$$

La figura 4 muestra el esquema básico de una antena conectada a un generador mediante una línea de transmisión.

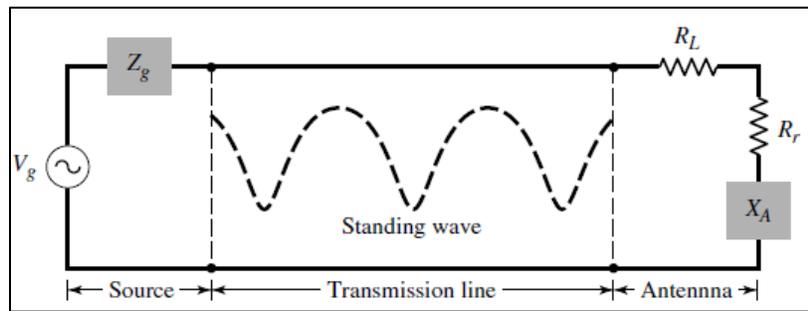


Figura 4: Esquema de un generador, una línea de transmisión y una antena.

En la práctica interesa que la impedancia de la antena sea lo más parecida a la del generador y la línea de transmisión. Esto implica que la onda reflejada es muy pequeña y por lo tanto no se pierde potencia. El parámetro coeficiente de reflexión, de ahora en adelante S_{11} , indica la relación entre la onda incidente en la antena y la onda reflejada por la misma. Se puede calcular el coeficiente de reflexión de la antena como:

$$S_{11} = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (2.8)$$

donde Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión y Z_a la impedancia de entrada de la antena.

Relación de onda estacionaria

La relación de onda estacionaria SWR (*Standing Wave Ratio*, en inglés) es la relación entre el máximo y el mínimo de la onda estacionaria de tensión o de corriente que se crea a la salida del generador, como muestra la Figura 4. Para el caso concreto de la relación en tensión, las siglas utilizadas son VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*). Este parámetro está directamente relacionado con la adaptación de la antena ya que se puede escribir como [3]:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (2.9)$$

Directividad y Ganancia

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección $\varphi(\theta, \Phi)$, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría antena isotrópica con la misma potencia y a esta misma distancia [3] (Figura 5).

Se calcula como:

$$D(\theta, \Phi) = \frac{\varphi(\theta, \Phi)}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (2.10)$$

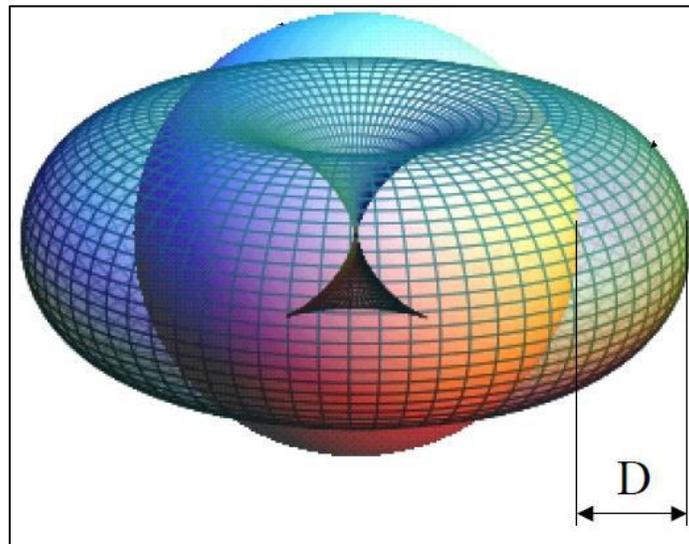


Figura 5: Directividad.

Generalmente se suele hablar de directividad de una antena para la dirección de máxima de radiación [3]:

$$D = \frac{\mathcal{P}_{MAX}}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (2.11)$$

La ganancia de una antena está directamente relacionada con la directividad. A diferencia de ésta, la ganancia tiene en cuenta las pérdidas, por lo que utiliza la potencia entregada [3].

$$G(\theta, \Phi) = \frac{\mathcal{P}(\theta, \Phi)}{P_{in} / (4\pi r^2)} \quad (2.11)$$

Dichos parámetros vienen relacionados por la eficiencia de la antena que se define de la siguiente manera [3]:

$$\eta = \frac{P_r}{P_{in}} \rightarrow \eta = \frac{G}{D} \quad (2.12)$$

Polarización

En la radiación de una antena existe un vector de campo $\vec{E}(\vec{r}, t)$, en función de la posición y el tiempo, para cada punto del espacio. La polarización viene definida por la trayectoria que describe el vector de campo eléctrico o magnético, cuando se observa en el sentido de propagación de la onda [2]. Así mismo se observan tres grandes grupos:

- **Polarización lineal:** las variaciones del vector de campo eléctrico están en una sola dirección. Aquí englobamos las polarizaciones vertical y horizontal (Figura 6).
- **Polarización circular:** el vector de campo eléctrico describe una trayectoria circular. Si rota en el sentido horario, la polarización es a derechas, si rota en sentido anti-horario es a izquierdas (Figura 6).
- **Polarización elíptica:** el vector de campo eléctrico describe una trayectoria elíptica. Al igual que la circular se puede distinguir entre a derechas y a izquierdas con el mismo criterio.

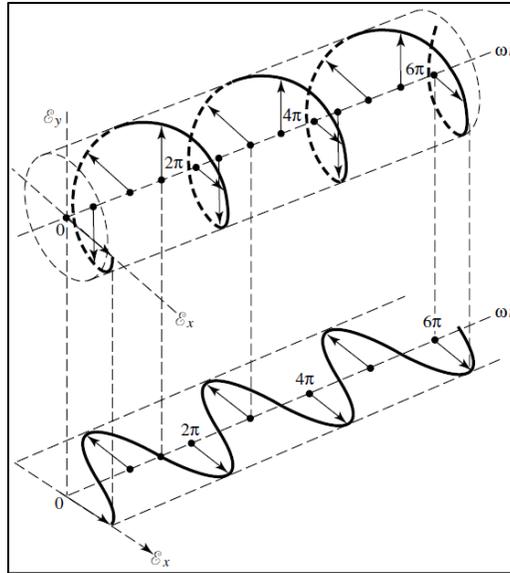


Figura 6: Polarización

Ancho de banda

Debido a su geometría finita, las antenas están limitadas a funcionar bajo las especificaciones deseadas para un rango de frecuencias limitado. Este rango de frecuencias se define como ancho de banda.

El ancho de banda (*Bandwidth* (BW)), se puede especificar como la relación entre el margen de frecuencias en que se cumplen las especificaciones y la frecuencia central:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (2.12)$$

donde f_{max} , f_{min} y f_0 son las frecuencias máxima, mínima y central, respectivamente.

2.2.3 Tipos de antenas básicas

En un mundo donde la telecomunicación es un pilar muy importante y en el que la tecnología ha avanzado a pasos agigantados se ha culminado en la creación de múltiples sistemas de comunicación adaptados para cada necesidad. Esto lleva a su vez la existencia de diferentes tipos de antena que se adaptan a las necesidades en cuanto a prestaciones electromagnéticas, forma y tamaño.

Las antenas se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- **Antenas de hilo**

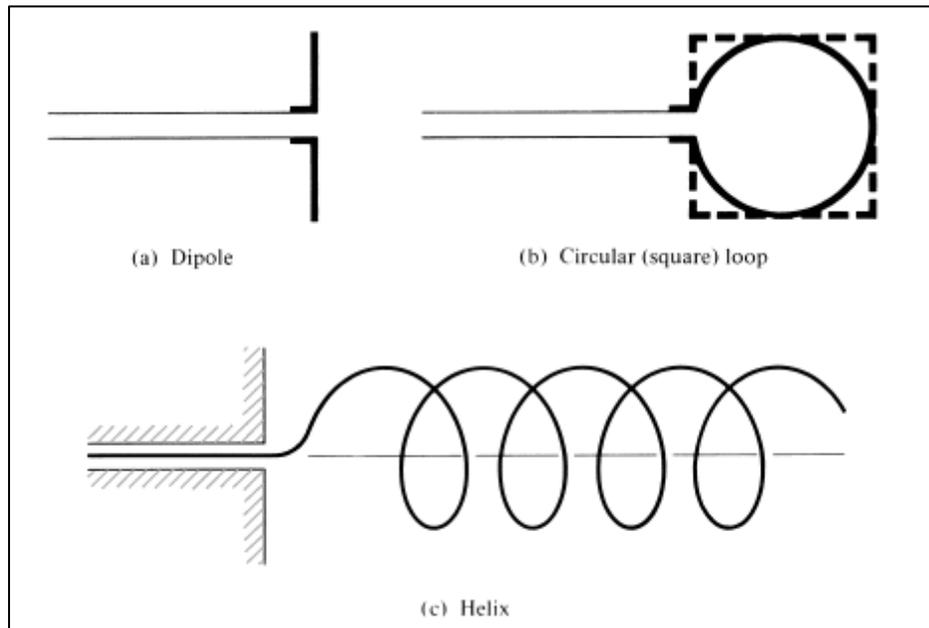


Figura 7: Antenas tipo hilo

- **Antenas de apertura**

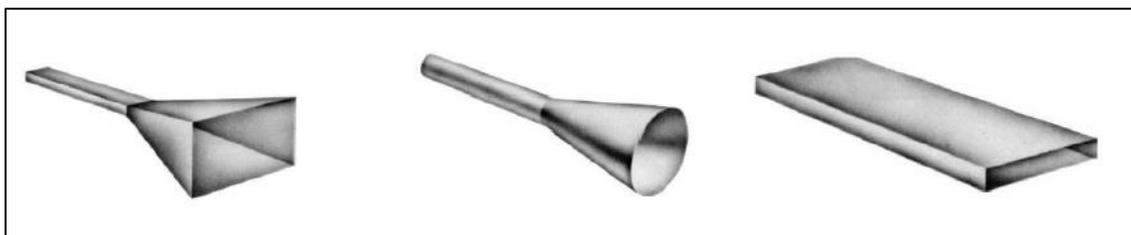


Figura 8: Antenas de apertura

- **Antenas reflectoras**

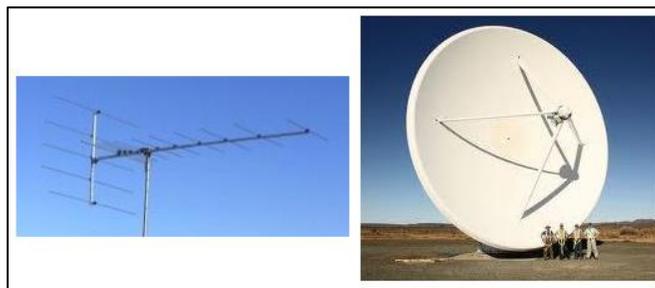


Figura 9: Antenas Reflectoras.

- **Antenas Microstrip**



Figura 10: Antenas Microstrip.

A continuación comentaremos más en profundidad las antenas Microstrip o *Patch* ya que es la que se ha usado para llevar a cabo este proyecto.

Antenas Microstrip

Las antenas Microstrip se hicieron muy popular en la década de 1970 principalmente para transmisiones espaciales. Hoy en día se ha extendido su uso para aplicaciones comerciales. Estas antenas consisten en un parche metálico sobre un sustrato conectado a tierra, como se puede observar en la Figura 11. El parche metálico puede tener muchas configuraciones diferentes, como se puede ver en la Figura 12. Sin embargo, los parches rectangulares y circulares, son los más populares debido a la facilidad de análisis y fabricación.

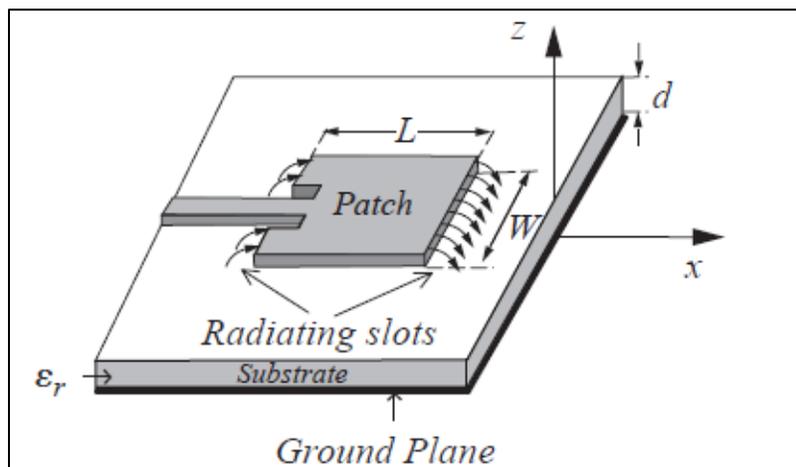


Figura 11: Diagrama de antena Microstrip.

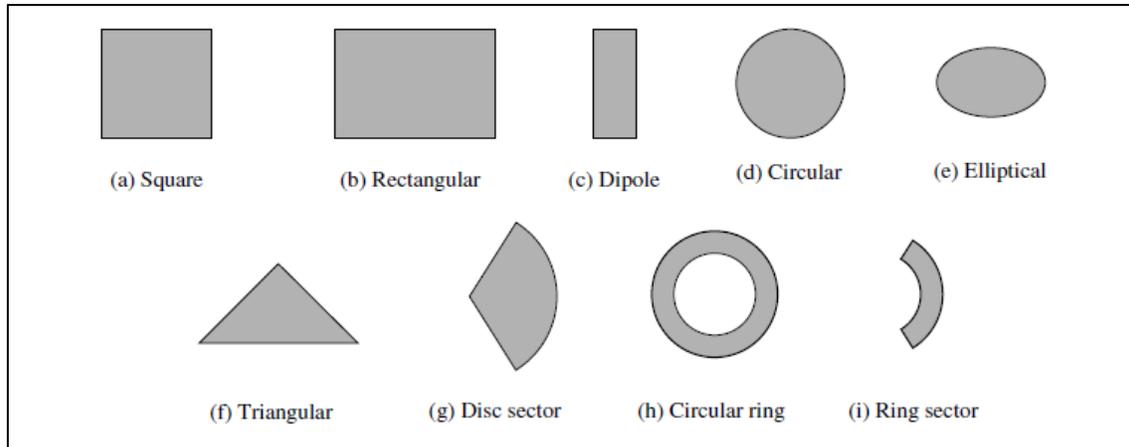


Figura 12: Diferentes configuraciones del patch.

Las antenas *Microstrip* son de perfil bajo, adaptables a superficies planas y no planas, simples y baratas de fabricar utilizando tecnología de circuito impreso moderno, y muy versátiles en cuanto a la frecuencia de resonancia, la polarización, el patrón y la impedancia. Actualmente su uso es muy extendido en todos los ámbitos de la telecomunicación como naves espaciales, satélites, misiles, automóviles o teléfonos móviles.

En cuanto a los elementos que conforman la antena, hay numerosos sustratos que se pueden utilizar para el diseño de antenas *Microstrip*, y sus constantes dieléctricas son por lo general en el intervalo de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Constantes dieléctricas más bajas proporcionan una mejor eficiencia y mayor ancho de banda, pero usualmente estas constantes corresponden con sustratos más gruesos por lo que siempre se busca un compromiso entre el buen desempeño de la antena y el diseño de circuitos.

2.2.4 UWB wearable

Introducción a la UWB

Debido a la evolución de las tecnologías de comunicación, en la actualidad hay una abundancia de aplicaciones de radio lo que provoca creciente agotamiento del espectro electromagnético, ya que estas tecnologías, como GPS o GSM, deben compartir el espectro sin que haya interferencias en las telecomunicaciones. Una solución a este problema es el desarrollo de una nueva tecnología que permita volver a utilizar las bandas de frecuencias atribuidas a otros servicios y trabajar con ellos sin causar

interferencias; dicha solución se conoce como la Ultra-Wideband, que es capaz de proporcionar comunicaciones inalámbricas de corto alcance.

Aunque, como lo define la FCC (*Federal Communication Commission*), la UWB es cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas que ocupa un ancho de banda mayor de 500 MHz o del 20 % de la frecuencia central [4].

Fundamentos de la UWB

UWB es una tecnología de radiofrecuencia que se ha desarrollado desde la década de los años 60 en empresas relacionadas con instituciones militares y gubernamentales norteamericanas. Por esto, la FCC, organismo regulador de las telecomunicaciones en EE.UU, sentó las bases de la tecnología UWB para uso civil. Los sistemas de UWB deben funcionar con un ancho de banda a -10 dB en el interior del margen de frecuencias que se extiende desde los 3,1 GHz hasta los 10,6 GHz, con una densidad espectral de potencia de emisión máxima de -41.3 dBm/MHz [4].

El funcionamiento de UWB se basa en la transmisión de secuencias de pulsos extremadamente estrechos y de baja potencia, con una duración del orden de picosegundos [4]. Dicha duración es mucho menor que el intervalo de tiempo de un bit, por lo se requiere una secuencia de varios pulsos de baja potencia para transmitir un bit de información.

Al disponer de un ancho de banda tan grande, puede realizarse una compartición del espectro, mediante el uso de sub-bandas para aplicaciones con múltiples usuarios.

Además, la densidad espectral de dicha energía es muy pequeña, lo que proporciona una carencia prácticamente absoluta de interferencias con otras señales que utilicen la misma porción de espectro, ya que este nivel de señal corresponde con el nivel de ruido de la mayoría de los sistemas de comunicaciones convencionales (Figura 13).

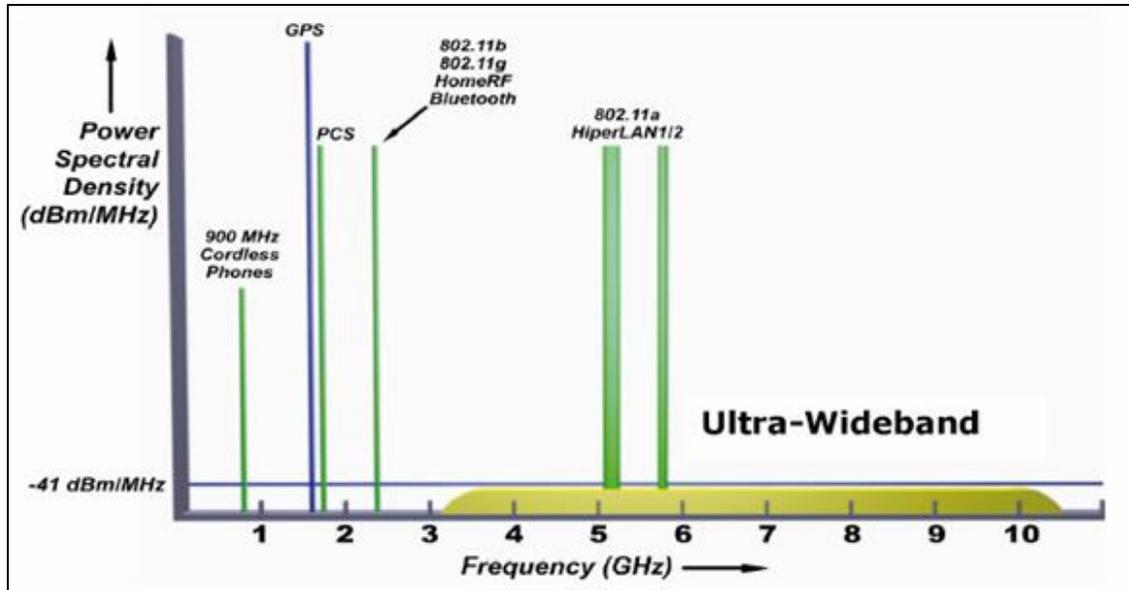


Figura 13: UWB y otras tecnologías en el espectro de frecuencias.

Aplicaciones

Principalmente la tecnología UWB en el ámbito civil fue diseñada para ser utilizada en redes de área personal, es decir, la electrónica en el hogar o en la oficina:

- Se usa en dispositivos multimedia (cámaras de fotos o vídeo, reproductores MP3,...) con conectividad inalámbrica.
- Permitir conectividad WUSB (*Wireless Universal Serial Bus*) de gran velocidad (periféricos de ordenador, como escáneres, impresoras o dispositivos de almacenamiento externo).
- Aplicaciones con uso de *streaming* de vídeo.
- Aplicaciones en el campo de los radares como el rescate de víctimas enterradas o detección de minas terrestres.

Wireless Personal Area Network

La *Personal Area Network* (PAN o red de área personal) se trata de una red formada por uno o más ordenadores conectados, física o inalámbricamente, con otros periféricos, como impresoras o *scanners*,

u otros aparatos, como teléfonos móviles o tabletas, que se intercambian información de uso personal. Estos aparatos no deben superar una distancia de 30 m.

La *Wireless Personal Area Network* (WPAN o red de área personal inalámbrica) se trata de una PAN dónde la conexión entre los aparatos es inalámbrica.

El IEEE estandariza la WPAN bajo el grupo 802.15, en el que se incluye el Bluetooth, 802.15.1, o el ZigBee, 802.15.4.

Recientemente se ha incluido una nueva clasificación; se trata de la *Body Area Network* (BAN o red de área corporal), que se caracteriza por incluir varios aparatos conectados e integrados en el cuerpo humano o en su vestimenta. Son interesantes ya que principalmente se usan con fines médicos como por ejemplo monitorizar la presión sanguínea de un paciente.

Ventajas y desventajas

En cuanto a las ventajas de la UWB, se pueden enumerar las siguientes [5]:

- Altas tasas binarias de transmisión, llegándose hasta 480 Mbps.
- Bajo consumo, lo que permite el desarrollo de dispositivos portátiles de gran autonomía.
- Baja potencia de transmisión, lo que nos permite la reutilización del espectro.
- Robustez frente al multitrayecto.
- Bajo coste de transmisores y receptores y alta productividad, lo que marca esta tecnología como el futuro de las WPAN/BAN.

No obstante, esta tecnología presenta la siguiente gran desventaja:

- La característica negativa más destacada de UWB es el alcance, que aunque es comparable al de otras tecnologías como el Bluetooth, el aumento del alcance provoca una disminución de la velocidad de transmisión ya que las emisiones se realizan a potencias muy bajas.

2.2.5 Características electromagnéticas del cuerpo humano

Introducción

El último aspecto a tener en cuenta en el diseño de antenas *wearables* es la influencia de la cuerpo humano.

El cuerpo humano, como plataforma para antenas, presenta unas determinadas características relacionadas con la absorción, el retardo, el distorsionado y la atenuación de señales, por lo que el diseño de una potencia y espectro inalámbrico eficiente sistema requiere un análisis y comprensión del canal de propagación de radio en la cuerpo humano.

Para antenas portátiles, la proximidad de los tejidos del cuerpo humano a la estructura radiante reduce la eficacia de la radiación debido a la absorción electromagnética en los tejidos del cuerpo, causando un desplazamiento de las frecuencias y la distorsión del patrón de radiación. La compensación de estos efectos no solo depende de la tipología de la antena sino también de la ubicación de la antena en el cuerpo humano.

Características electromagnéticas del cuerpo humano

Los parámetros importantes de las propiedades eléctricas de tejidos del cuerpo humano a considerar en antenas de diseño son la permitividad relativa y la conductividad. Las figuras 14 y 15 muestran sus características en función de la frecuencia para diferentes tipos de tejidos.

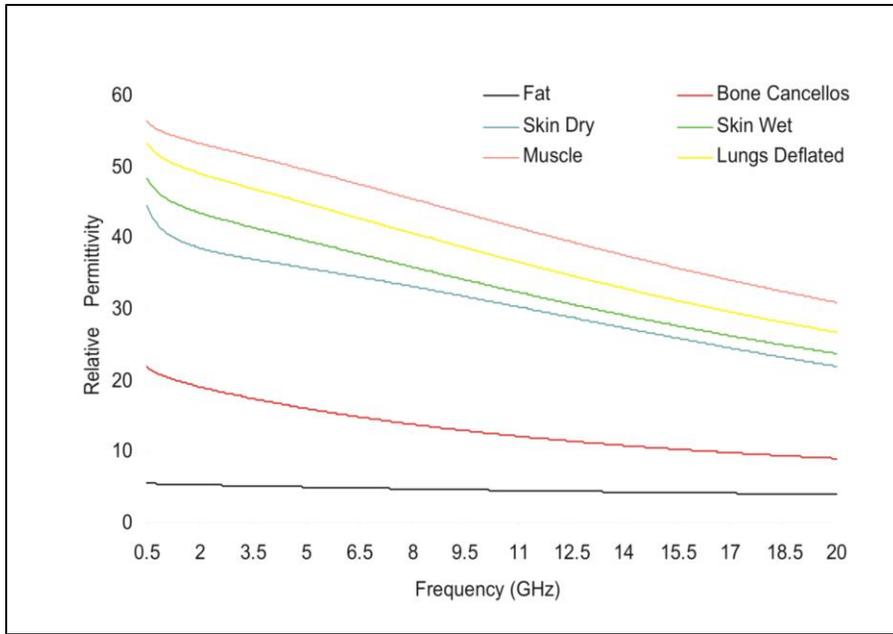


Figura 14: Los datos medidos de permitividad tejido humano para diferentes tipos de tejidos [6].

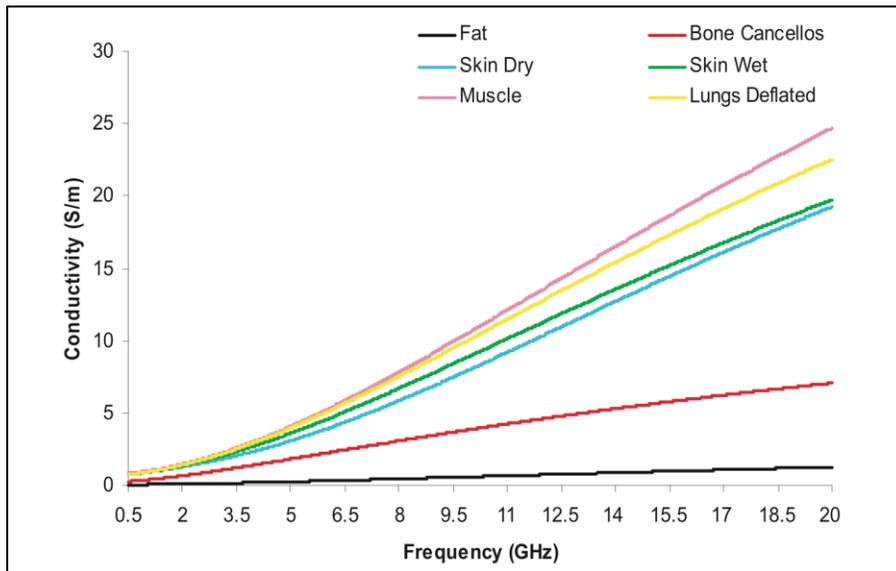


Figura 15: Los datos medidos de conductividad tejido humano para diferentes tipos de tejidos [6].

Como se puedes observar en las figuras anteriores, a frecuencias más bajas, la permitividad es alta y la baja conductividad. Por lo tanto, la onda electromagnética se puede propagar a través del cuerpo humano.

A frecuencias más altas el efecto con pérdida es mayor, por lo que la profundidad de la piel disminuye. El efecto del cuerpo humano sobre el comportamiento de la antena será más relevante en altas frecuencias.

2.2.6 SAR

La tasa de absorción específica (*Specific Absorption Rate* (SAR), en inglés) es una medida de la energía absorbida por el tejido biológico, como ahora un campo electromagnético de radiofrecuencia. El empleo más común de esta medida se refiere a teléfonos móviles.

Se define como la energía electromagnética absorbida por la masa de tejido biológico y tiene unidades de vatios por kilogramo (W/kg) [7].

SAR se define como la derivada respecto al tiempo del incremental de energía, ΔW absorbida por un incremental de masa, Δmasa , contenida en un elemento de volumen, dV , de una densidad de masa dada, ρ , y se expresa de la siguiente manera [8]:

$$\text{SAR} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta \text{masa}}{\rho dV} \right) \quad (2.13)$$

La regulación para la medida del valor SAR y sus máximos admisibles son establecidas establecida por la ANSI y IEEE (EE.UU) y la ICNIRP (UE). Para aquellos aparatos de uso general que quieren son comercializados al público general, principalmente teléfonos móviles, los valores de SAR máximos son los siguientes:

- En los Estados Unidos de América, la FCC exige un valor de SAR igual o inferior a 1.6 W/kg promediados en un volumen de 1 gramo de tejido [7].
- Mientras que la UE, y el resto del mundo, fija como límite 2 W/kg, promediados en 10 gramos de tejido [7].

Estos límites se refieren a aquellas mediciones sobre la exposición a local a partes del cuerpo, como por ejemplo la cabeza.

Como límite de exposición para el cuerpo entero, se ha fijado un tope de 0,08 W/kg promediado en toda la masa corporal [8].

No obstante, en caso de los trabajadores expuestos a radiofrecuencia, existen otros límites de SAR menos restrictivos ya que la exposición a las radiaciones se consideran controladas. Se conocen con el nombre de *Occupational SAR*, tienen los siguientes límites [9]:

- En los EE.UU, se exige un valor de SAR máximo para todo el cuerpo menor a 0.4 W/kg, y exposición local menor a 8 W/kg promediados en un volumen de 1g de tejido.
- En UE se fija un valor de SAR máximo para todo el cuerpo menor a 0.4 W/kg, y exposición local menor a 10 W/kg promediados en un volumen de 10g de tejido.

2.2.7 Software de diseño

CST *Microwave Studio*® (CST® MWS®) es una herramienta especializada para la simulación 3D de componentes de alta frecuencia. Permite el análisis rápido y preciso de los dispositivos de alta frecuencia, tales como antenas, filtros, acopladores, etc.

CST® ofrece la opción de múltiples módulos de cálculo:

- *Transient solver*
- *Frequency domain solver*
- *Eigenmode solver*
- *Resonant solver*
- *Integral Equation Solver*
- *Asymptotic Solver*
- *TLM Solver*

Para llevar a cabo la simulación en este proyecto se ha usado el *Transient solver*.

El *Transient solver* es un simulador de propósito general que ofrece simulaciones a tiempo real en el dominio de tiempo. Es útil para estudiar el campo de propagación a través de uno o varios componentes.

Además permite simulaciones de *Broadband*, en varias frecuencias, con una muy buena resolución en frecuencia.

En cuanto al diseño, CST permite crear todo tipo de superficies, formas y volúmenes por lo que ofrece unos diseños muy versátiles.

En este proyecto no se ha utilizado todo el potencial que ofrece este programa debido a la su complejidad y a la dificultad de aprendizaje para el uso de las herramientas. La gran cantidad de opciones hacen que resulte difícil de manejar para un proyecto corto como este.

El apartado menos complejo del programa es el de diseño y creación en 3D de la antena, ya que después de unas cuantas horas, resulta bastante intuitivo.

CAPÍTULO 3

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo trataremos el diseño y simulación de la antena y posteriormente la construcción y medición de los prototipos de la antena.

Primeramente se presentan los principios para el diseño de la antena donde se comenta en qué se basa la antena, los materiales que se utilizarán para su diseño y la posterior construcción.

A continuación se desarrolla el proceso simulación, diseño y medición, de la antena mediante el software CST.

Y finalmente, se plasma el proceso de construcción y las mediciones llevadas a cabo con los diferentes prototipos reales de antena.

3.2 CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ANTENA

3.2.1 Diseño Base

Como el principal objetivo del presente trabajo es el diseño de una antena plana sobre sustrato textil que opera como una parte del sistema UWB, debemos cumplir los requisitos presentes en la Tabla 1:

Tabla 1: Requisitos de prestaciones de la antena.

Parámetro	Valor
Rango de frecuencias	3.1 – 10.6 GHz
Coefficiente de reflexión	<-10 dB
Patrón de radiación	Omnidireccional
Tamaño	Pequeña, planar y compacta

Para diseñar esta antena, nos hemos basado en una antena ya existente extraída de un artículo [1], que nombraremos Antena Base, de la cual conocemos los parámetros necesarios para su simulación además de su coeficiente de reflexión y que cumple con nuestros requisitos iniciales.

Dicha antena se diseñará en el CST y se simulará para obtener su coeficiente de reflexión. Una vez se consiga un coeficiente de reflexión parecido al del artículo, se modificará el material dieléctrico por uno con características textiles, lo que implica la necesaria variación de algunos parámetros de diseño de la antena con el fin de mantener la misma respuesta, principalmente, el mismo coeficiente de reflexión, de forma que se mantienen las prestaciones para las comunicaciones inalámbricas de UWB.

3.2.1 Antena Base

A continuación se presentarán los parámetros de la Antena Base (Tabla 2 y Figura 16) descritos en el artículo [1]:

Tabla 2: Dimensiones y parámetros de la Antena Base.

Parámetro	Valor
Altura	30 mm
Anchura	25 mm
Grosor (total)	2.5 mm
Constante dieléctrica	3.38

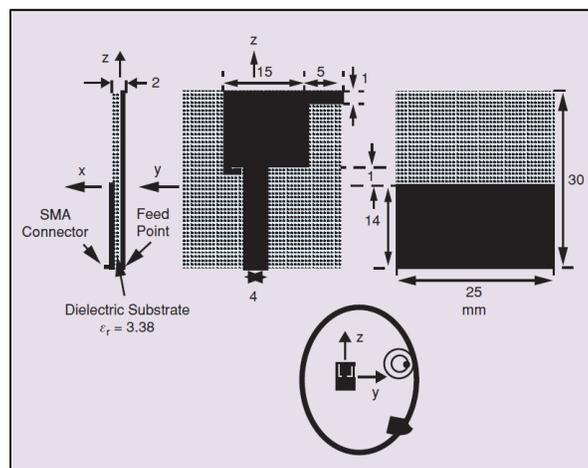


Figura 16: Dimensiones de la Antena Base.

3.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA ANTENA MEDIANTE CST

3.3.1 Introducción

En este apartado explicaremos el proceso de diseño mediante el software CST, en el cual desarrollaremos el proceso de réplica de la Antena Base y las modificaciones realizadas hasta llegar a nuestra Antena Final.

3.3.2 Proceso de diseño con CST

Inicialmente el proceso empieza por estudiar los parámetros de la antena para así poder replicarla en el CST.

En un primer momento dividimos la antena sus tres grandes componentes:

- Sustrato dieléctrico.
- Plano Tierra.
- *Patch* (o conductor).

Para la simulación tenemos que tener en cuenta los a parámetros iniciales de la antena descritos en la Tabla 1. Por ello decidimos que nuestras frecuencias de trabajo comprenderán el rango de frecuencias de 2 a 12 GHz, ya que el software nos permite trabajar con un ancho de banda muy amplio con mucha precisión.

A continuación presentaremos el proceso de simulación de la antena en el CST en formato de tablas con los parámetros necesarios y capturas del diseño en CST:

- Simulación del sustrato dieléctrico (Tabla 3 y Figura 17):

Tabla 3: Dimensiones y parámetros del material dieléctrico.

Parámetro	Valor
Altura	30 mm
Anchura	25 mm
Grosor	1 mm
Constante dieléctrica	3.38

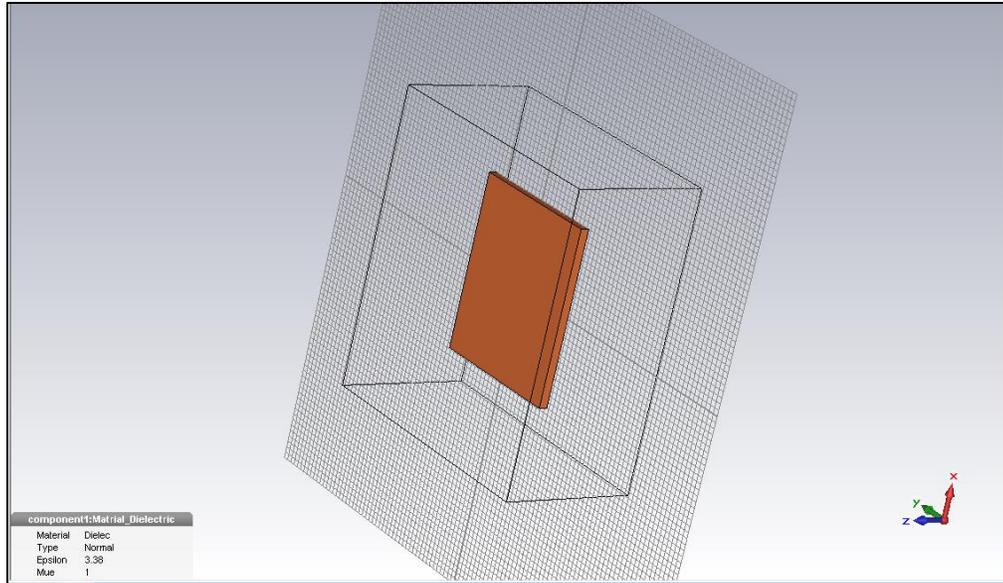


Figura 17: Simulación del dieléctrico en el CST.

- Simulación del plano de masa (Tabla 4 y Figura 18):

Tabla 4: Dimensiones y parámetros del plano de masa.

Parámetro	Valor
Altura	14 mm
Anchura	25 mm
Grosor	0.5 mm
Material	PEC ¹

¹ PEC: *Perfect Electric Conductor*, metal conductor cuya resistividad es negligible.

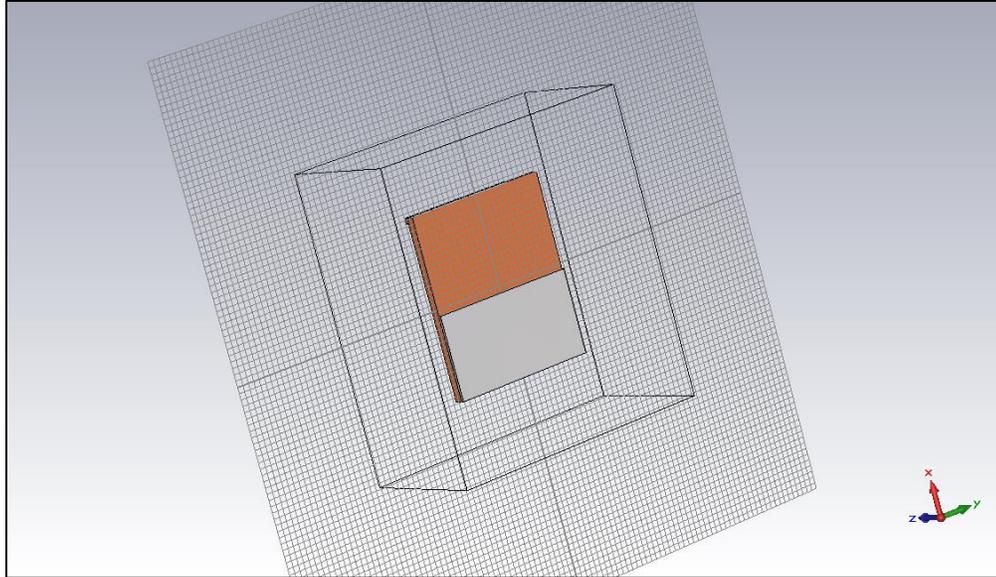


Figura 18: Simulación del plano de masa (color gris) en el CST.

- *Patch:*

Para la construcción del *Patch*, lo dividimos en 3 partes: P1 (línea de transmisión), P2 (parche rectangular) y P3 (parche rectangular), que además se incluyeron en este orden y posteriormente las unimos con una de las opciones que nos ofrece el programa para obtener una única superficie.

- Simulación de P1 (Tabla 5 y Figura 19):

Tabla 5: Dimensiones y parámetros de P1.

Parámetro	Valor
Altura	15 mm
Anchura	4 mm
Grosor	0.5 mm
Material	PEC

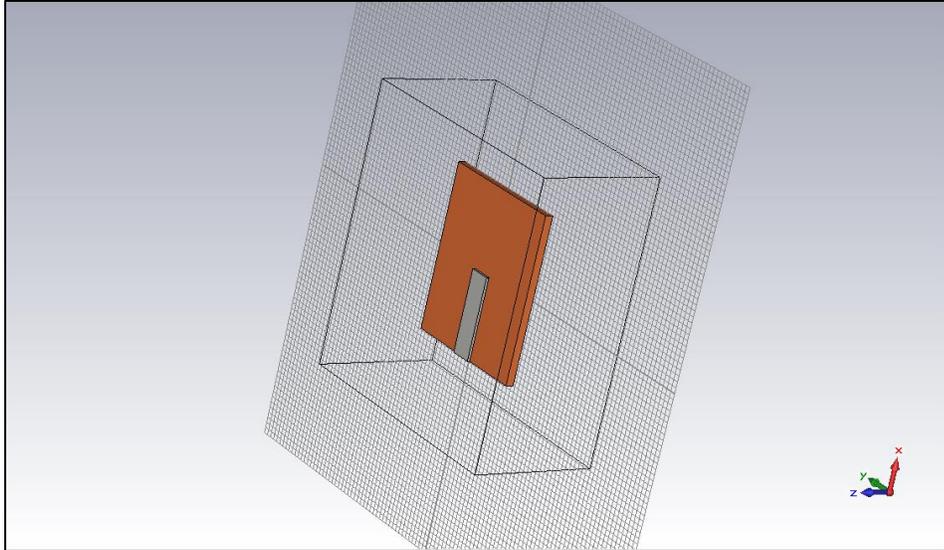


Figura 19: Simulación de P1 (color gris) en el CST.

- Simulación de P2 (Tabla 6 y Figura 12):

Tabla 6: Dimensiones y parámetros de P2.

Parámetro	Valor
Altura	15 mm
Anchura	15 mm
Grosor	0.5 mm
Material	PEC

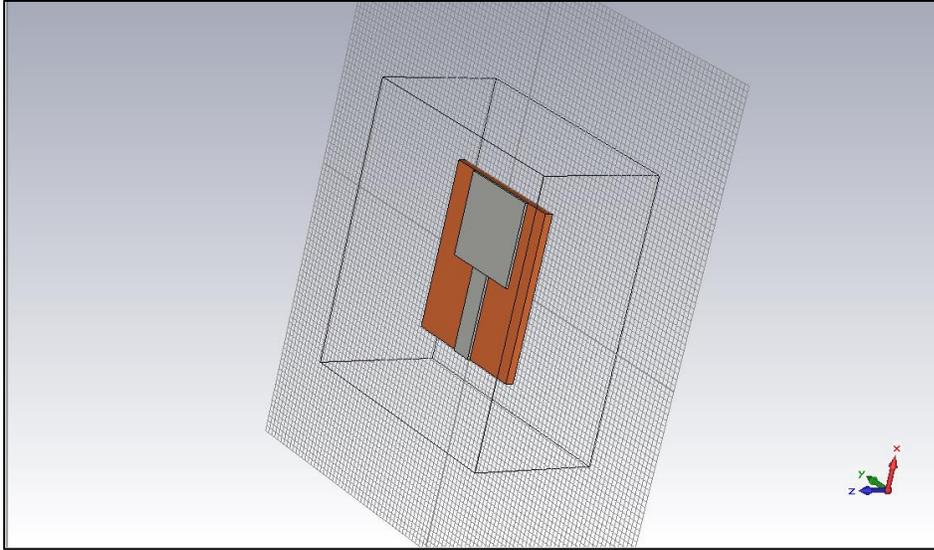


Figura 20: Simulación de P1 y P2 (ambos de color gris) en el CST.

- Simulación de P3 (Tabla 7 y Figura 20):

Tabla 7: Dimensiones y parámetros de P3.

Parámetro	Valor
Altura	1 mm
Anchura	5 mm
Grosor	0.5 mm
Material	PEC

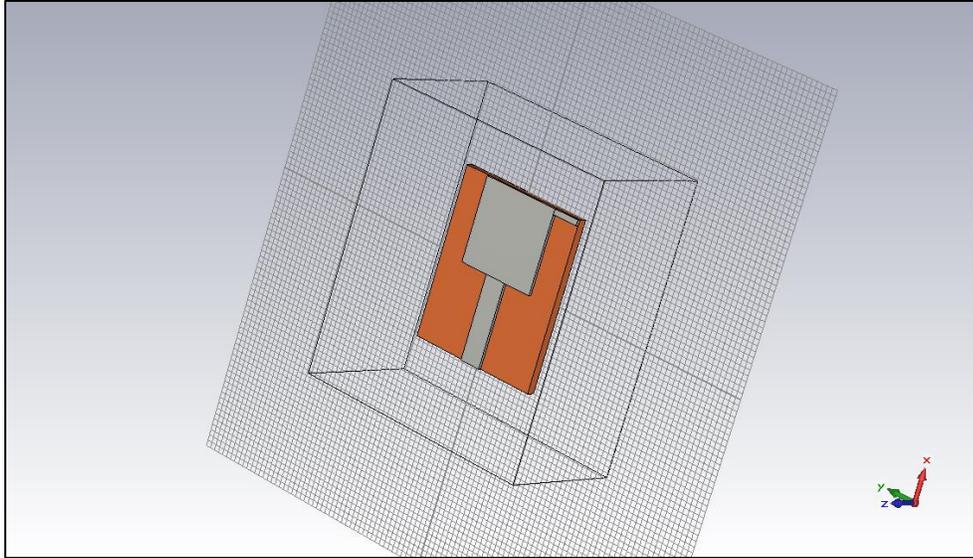


Figura 21: Simulación de P1, P2 y P3 (color gris) en el CST.

Patch Completo (Figura 22):

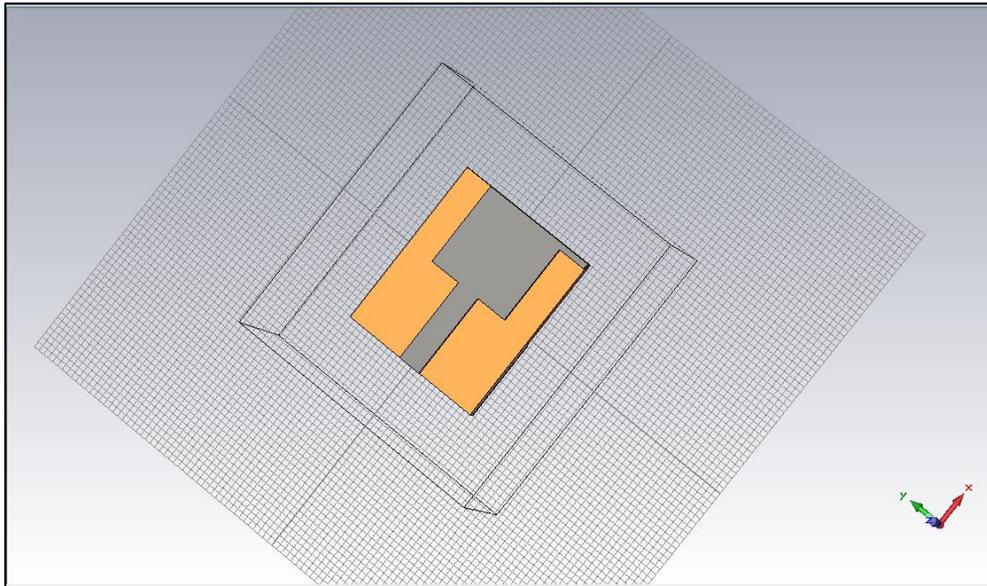


Figura 22: Simulación del Patch (color gris) con las componentes fusionadas en el CST.

Finalmente incluimos un puerto discreto a la antena (Tabla 8 y Figura 23):

Tabla 8: Parámetros del puerto discreto.

Parámetro	Valor
Impedancia	50 Ω

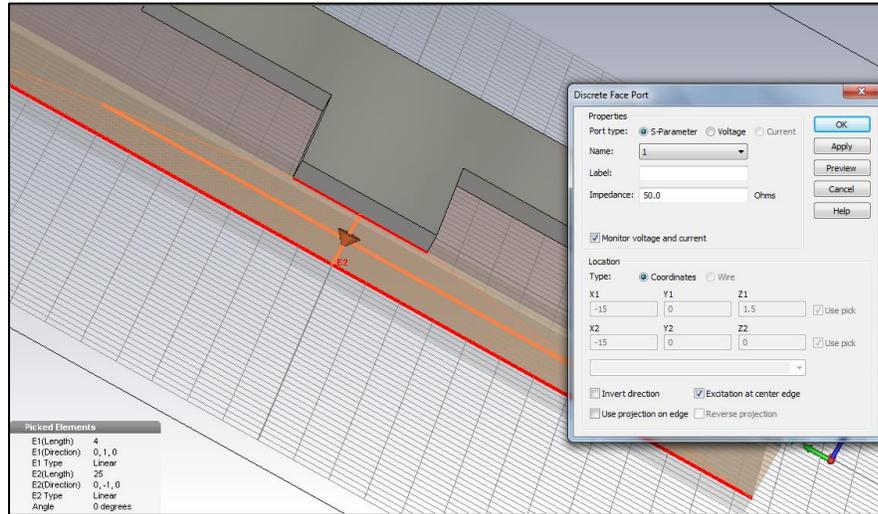


Figura 23: Simulación del puerto discreto y sus parámetros en el CST.

La antena finalizada tiene el siguiente diseño en el CST (Figura 24):

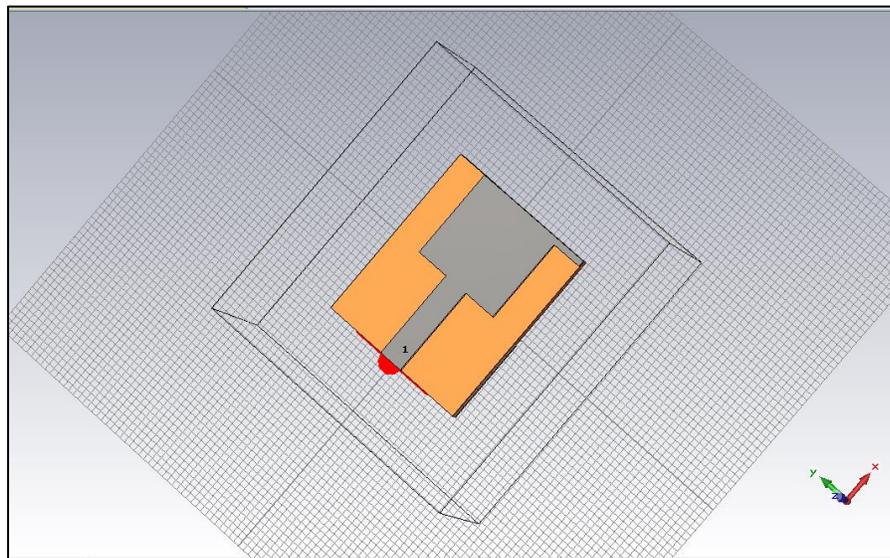


Figura 24: Simulación de la Antena Base en el CST.

3.3.3 Modificaciones Implementadas

Una vez simulada la antena en el CST, pasamos al proceso de realización de las pruebas necesarias para obtener su coeficiente de reflexión o S_{11} .

S_{11} de la Antena Base (Figura 25):

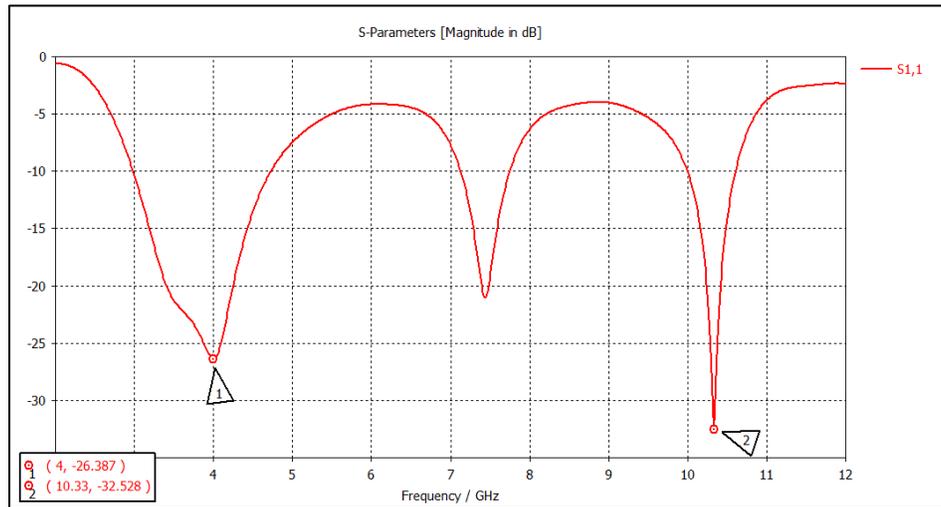


Figura 25: S_{11} de la Antena Base.

El S_{11} de la Antena Base es bastante parecido al que obtiene en el artículo (Figura 26), aunque no cumple todos los requisitos ya que está por encima de los -10 dB.

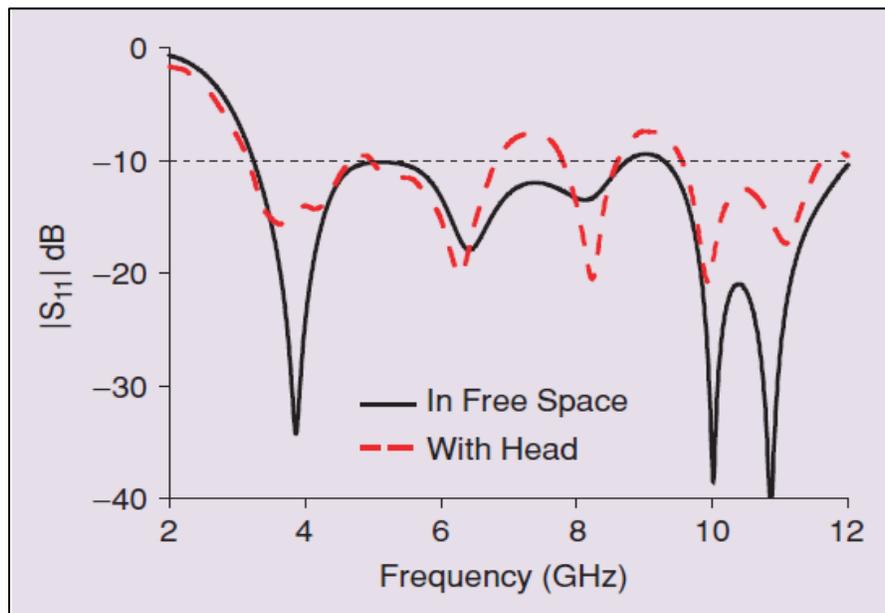


Figura 26: S_{11} de la Antena Base obtenida en el artículo.

Como hemos indicado anteriormente, esta prueba sirvió para familiarizarse con el software. De hecho el objetivo de esta primera prueba era simular la Antena Base y obtener el gráfico S_{11} . Por tanto, finalizada esta prueba empezamos con los cambios necesarios para obtener nuestra Antena Final.

El primer cambio que introdujimos fue cambiar el sustrato dieléctrico por uno textil conocido. En nuestro caso el tejido tipo tejano. Además también modificamos el grosor del metal ya que el metal que utilizaremos, cobre, tendrá un grosor distinto al utilizado en un inicio (Tabla 9). Los materiales tienen las siguientes características:

Tabla 9: Parámetros de la antena correspondientes a los materiales con los que se construirá la antena.

Parámetro	Valor
Constante dieléctrica sustrato	1.7 [10]
Pérdida Tangencial sustrato	0.025 [10]
Grosor Sustrato	1 mm [10]
Grosor Metal	0.07 mm

La Figura 27 muestra los cambios introducidos en el CST:

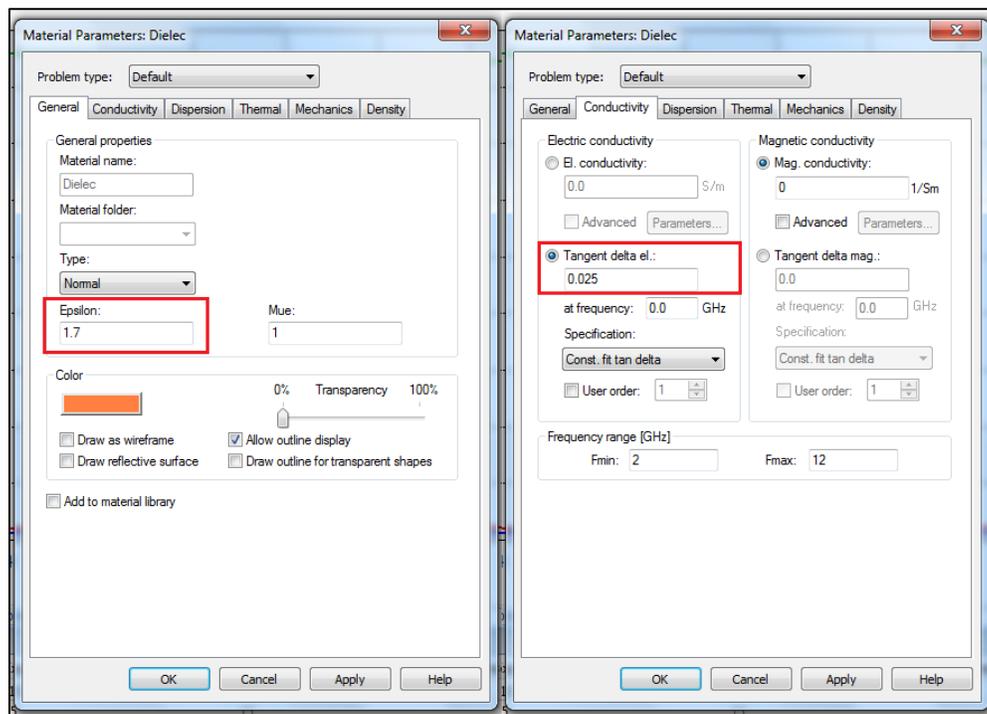


Figura 27: Parámetro del material dieléctrico correspondientes a la tela tejana.

Al realizar estas modificaciones, el coeficiente de reflexión de la antena se ve drásticamente modificado perdiendo su adecuado funcionamiento bajo el sistema UWB (Figura 28).

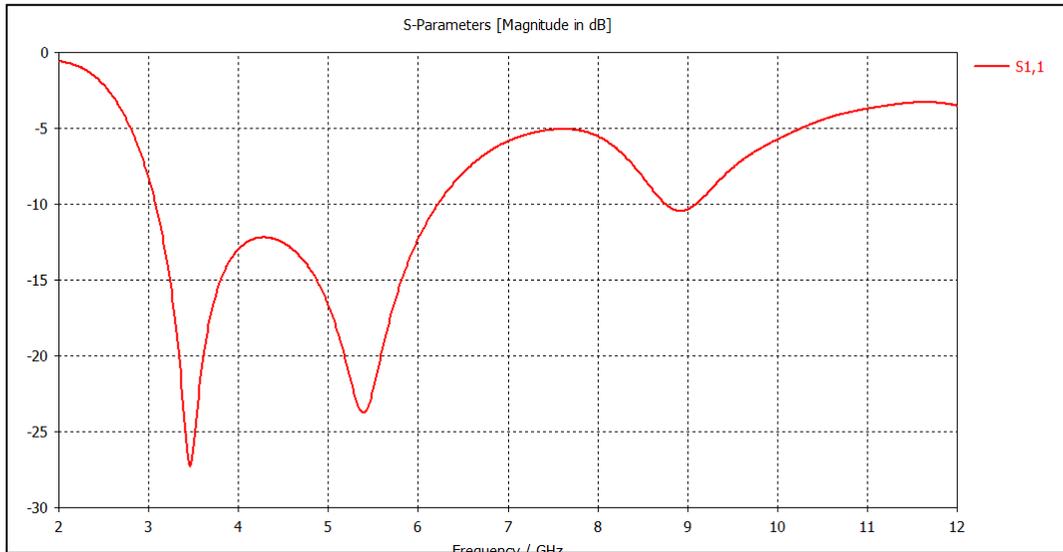


Figura 28: S_{11} de la Antena Base después de modificar los parámetros del sustrato dieléctrico.

Esto hace necesario una serie de modificaciones en el diseño de la antena para poder obtener una antena con una respuesta adecuada para nuestros objetivos, enumerados en la Tabla 1.

Las modificaciones estaban dirigidas al *Patch*, es decir, se harían pequeñas modificaciones en el tamaño de cada componente del *Patch*, P1, P2 y P3, y se analizarán sus efectos sobre el S_{11} . Primero se buscará la adaptación en la banda de trabajo y después, enschar el ancho de banda hasta igualarlo al de la UWB.

Durante las modificaciones, decidimos eliminar la componente P3 del *Patch* (Figura 29) ya que tenía un efecto mínimo sobre el S_{11} . Las figuras 30 y 31 muestran el S_{11} con y sin la componente P3 del *Patch*:

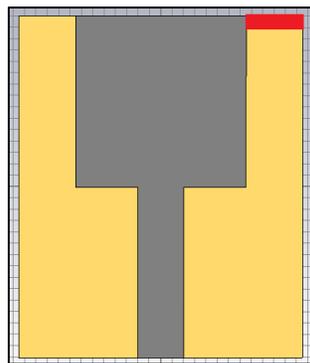


Figura 29: Patch de la antena donde P3 está marcado en rojo.

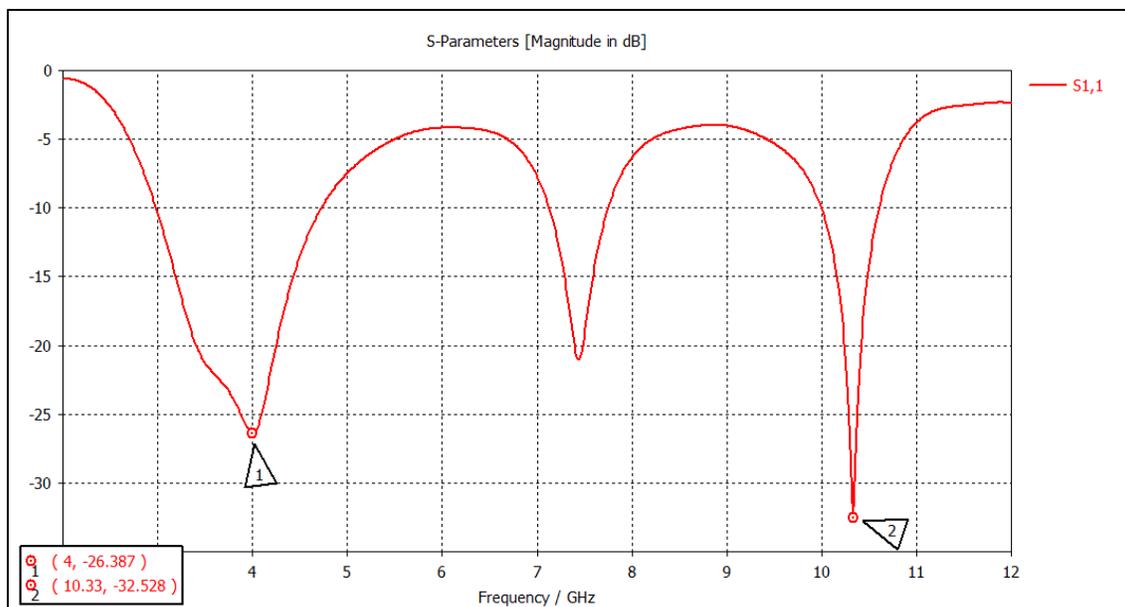


Figura 30: S_{11} de la Antena Base con P3.

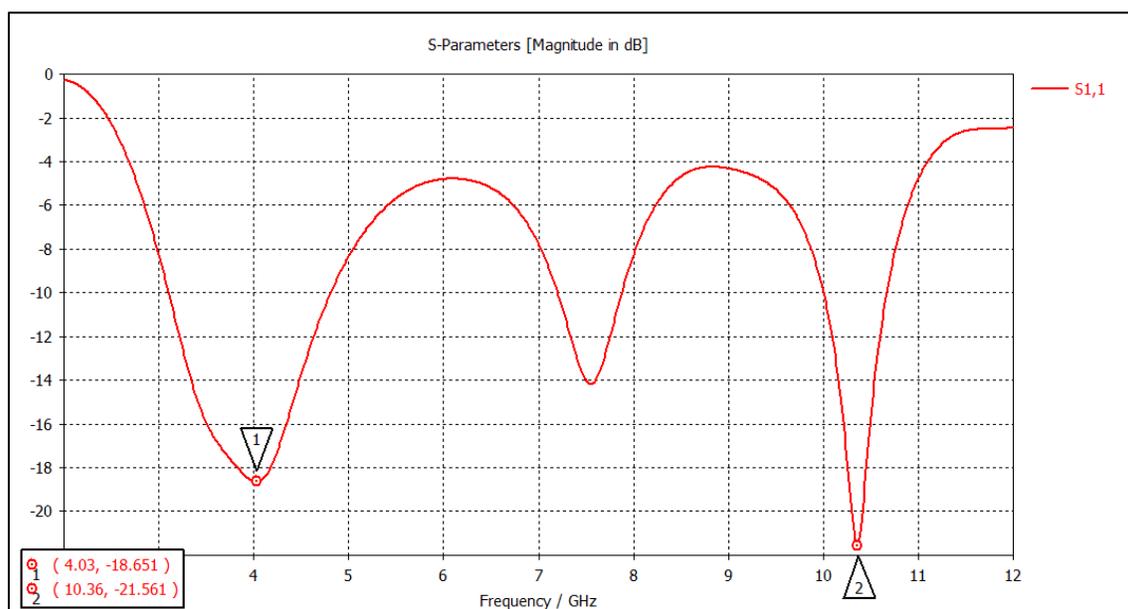


Figura 31: S_{11} de la antena Base sin P3.

Después de realizar más de 500 pruebas, llegamos a una antena que cumple en gran medida nuestros objetivos iniciales (Figura 32 y 33):

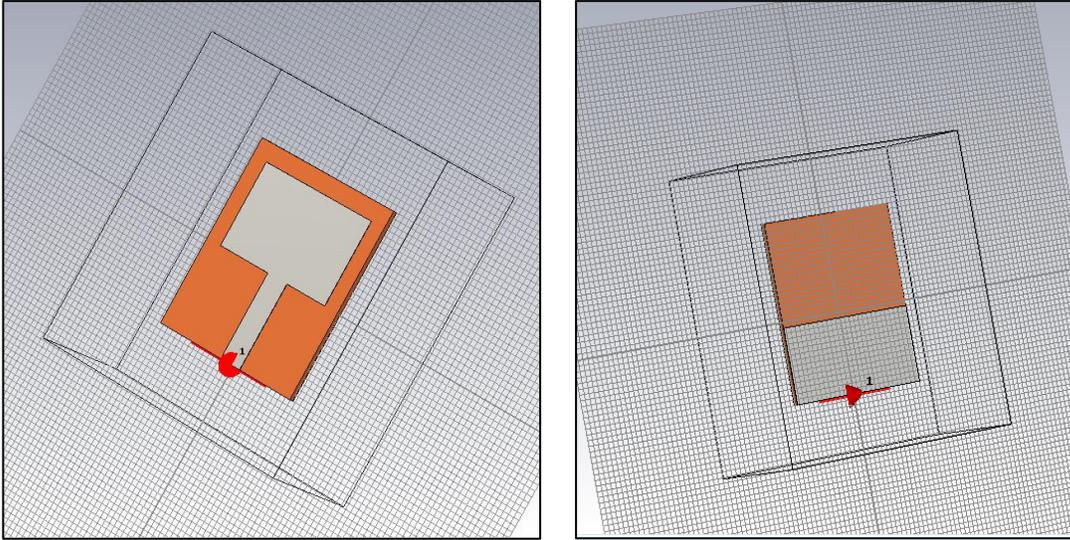


Figura 32: Simulación de la Antena Final.

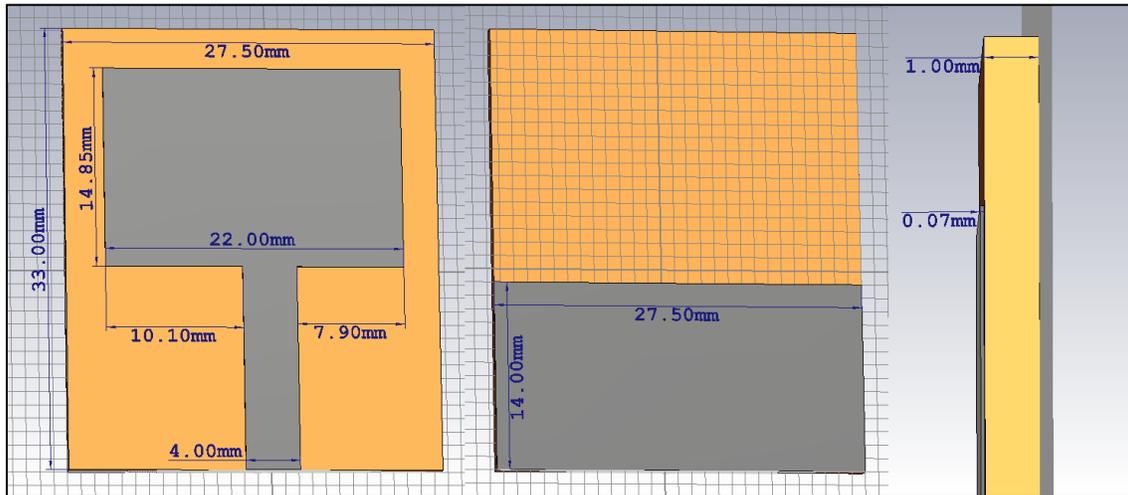


Figura 33: Dimensiones de la Antena Final.

La altura de la línea de trasmisión es de 15.15 mm

Con esta antena se obtiene el siguiente S_{11} (Figura 34):

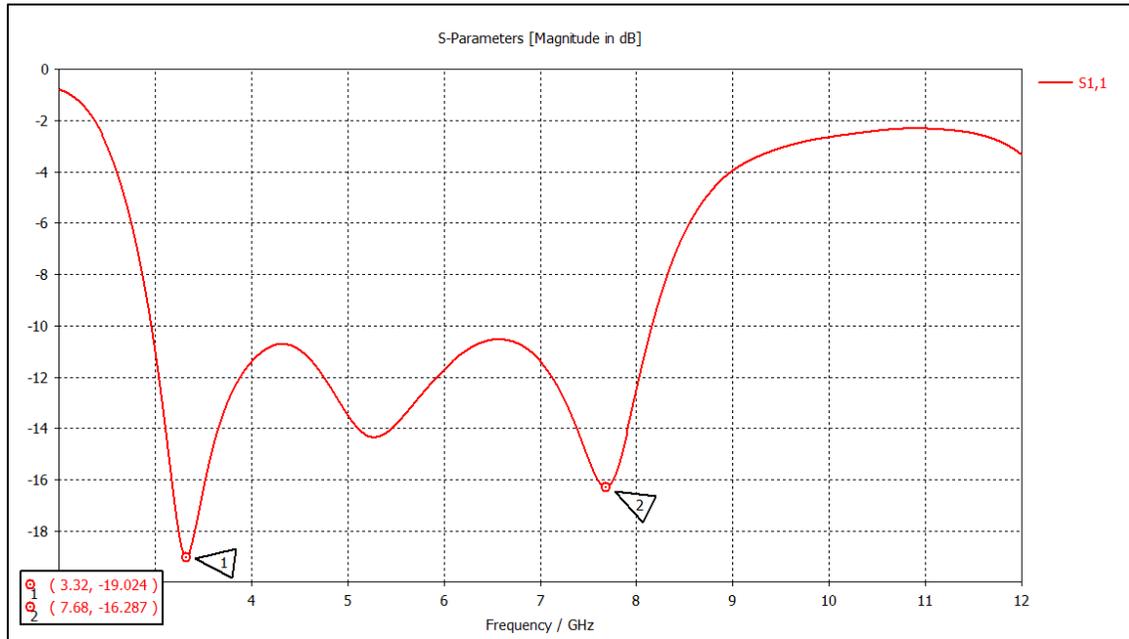


Figura 34: S_{11} de la Antena Final.

Teniendo en cuenta los requisitos descritos en la Tabla 1 y la definición de la tecnología UWB, punto 2.2.4, podemos decir que la antena simulada cumple dichos requisitos, o una gran mayoría de ellos, ya que la banda de trabajo está por debajo de los -10 dB por lo que la antena está adaptada en toda la banda y es una antena pequeña y compacta.

Aunque el ancho de banda es bastante menor al deseado, se trata de una antena que cumple con las especificaciones de la UWB en este aspecto ($BW > 500$ MHz).

La Tabla 10 muestra los valores de f_{\max} , f_{\min} y BW de la antena:

Tabla 10: Valores frecuenciales de la Antena Final.

Parámetro	Valor
f_{\min}	3.32 GHz
f_{\max}	7.68 GHz
BW	4.36 GHz

3.3.4 Pruebas realizadas

Para comprobar el correcto funcionamiento de la antena se realizaron las siguientes pruebas: el coeficiente de reflexión, patrón de radiación, la ganancia y la directividad.

Coefficiente de Reflexión (S_{11}):

La prueba se ha realizado en el rango de frecuencias de 2 a 12 GHz, ya que comprende el rango de frecuencias de la UWB y el equipo informático y el software nos permite una prueba tan exigente en cuanto a requisitos en poco tiempo.

La Figura 35 muestra el resultado del S_{11} :

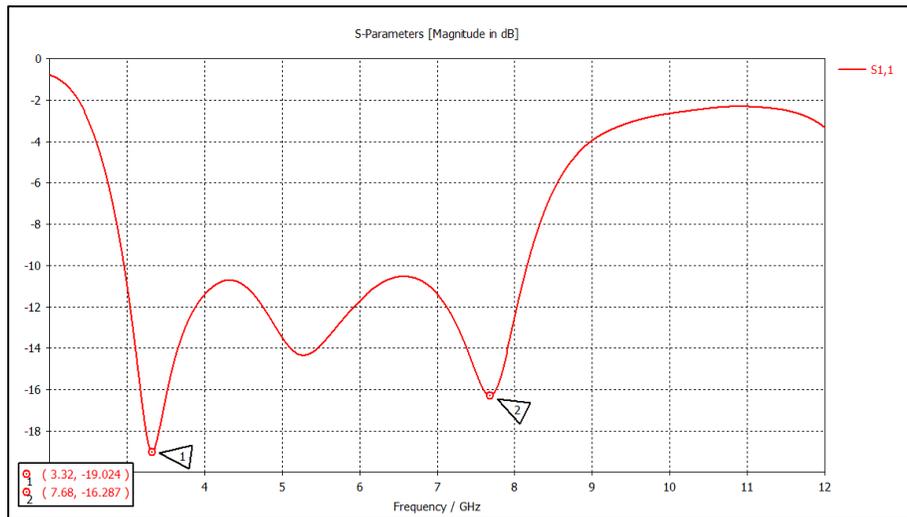


Figura 35: S_{11} de la Antena Final.

Patrón de radiación:

Se ha realizado el análisis del patrón o diagrama de radiación en las frecuencias 3, 4, 5, 6, 7 y 8 GHz ya que el ancho de banda de la antena se encuentra dentro de este rango de frecuencias.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación primero en forma gráfica en las que se observa el diagrama de radiación en 3D (Figuras 36, 37 y 38). Después, en la Tabla 11, se presenta para cada frecuencia la ganancia máxima a la que radia la antena.

- Diagrama de radiación a 3 GHz y 4 GHz:

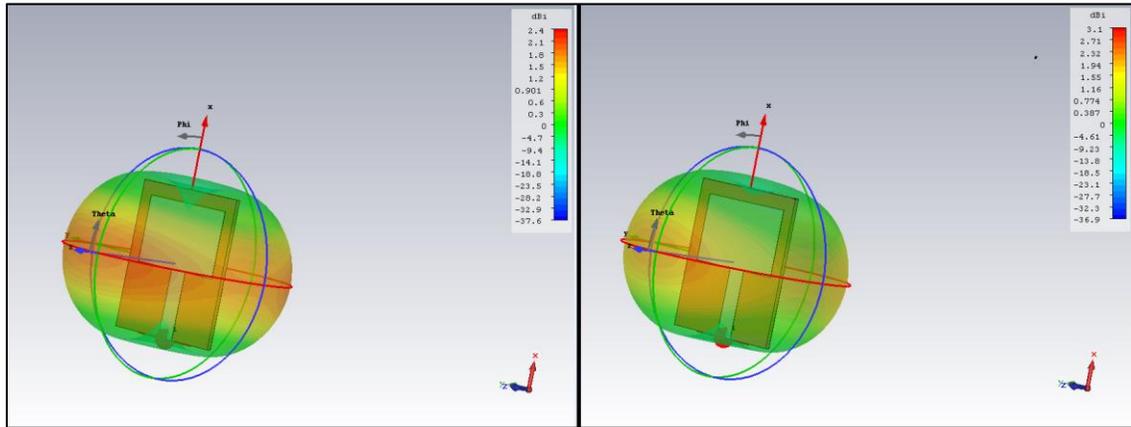


Figura 36: Diagrama de radiación a 3Ghz y 4Ghz.

- Diagrama de radiación a 5 GHz y 6 GHz:

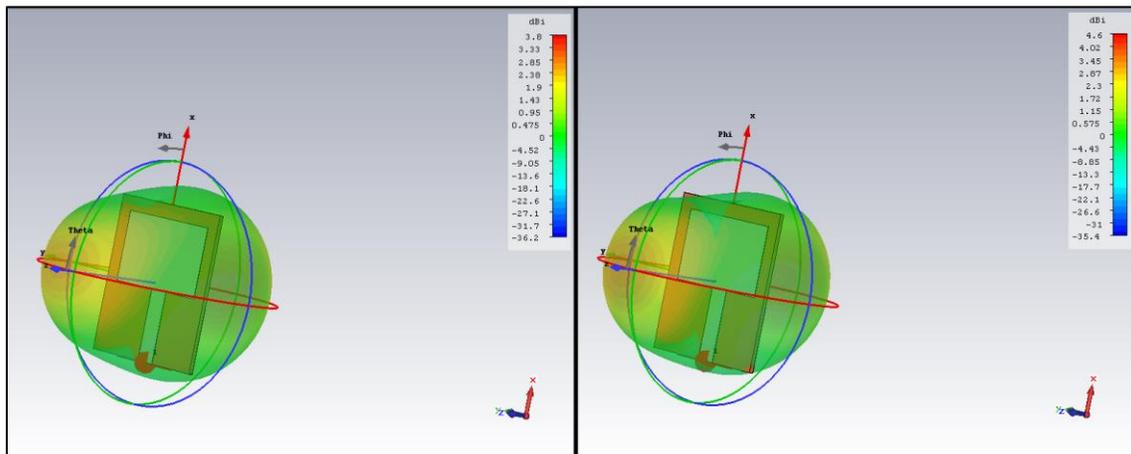


Figura 37: Diagrama de radiación a 5Ghz y 6Ghz.

- Diagrama de radiación a 7 GHz y 8 GHz:

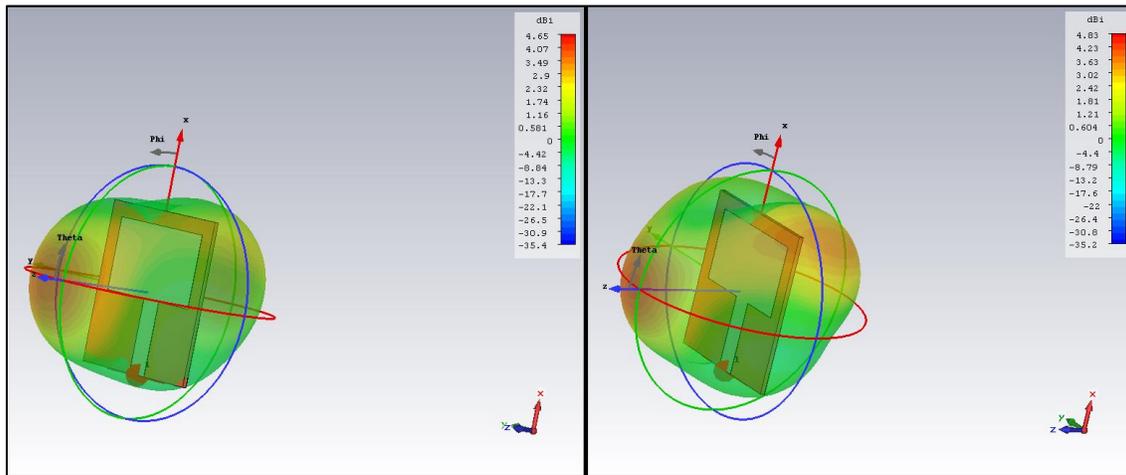


Figura 38: Diagrama de radiación a 7GHz y 8GHz.

Tabla 11: Potencia máxima radiada respectiva a cada frecuencia analizada.

Frecuencia (GHz)	Ganancia máxima (dBi)
3	2.4
4	3.1
5	3.8
6	4.6
7	4.65
8	4.83

Ganancia:

Para conocer la ganancia real de la antena, hemos obtenido el *Realized Gain* ya que tiene en cuenta las pérdidas por reflexión en la entrada de la antena [11].

La ganancia es obtenida para cada frecuencia del rango de frecuencias de análisis, es decir, entre los 2 y los 12 GHz, como se muestra en la Figura 39.

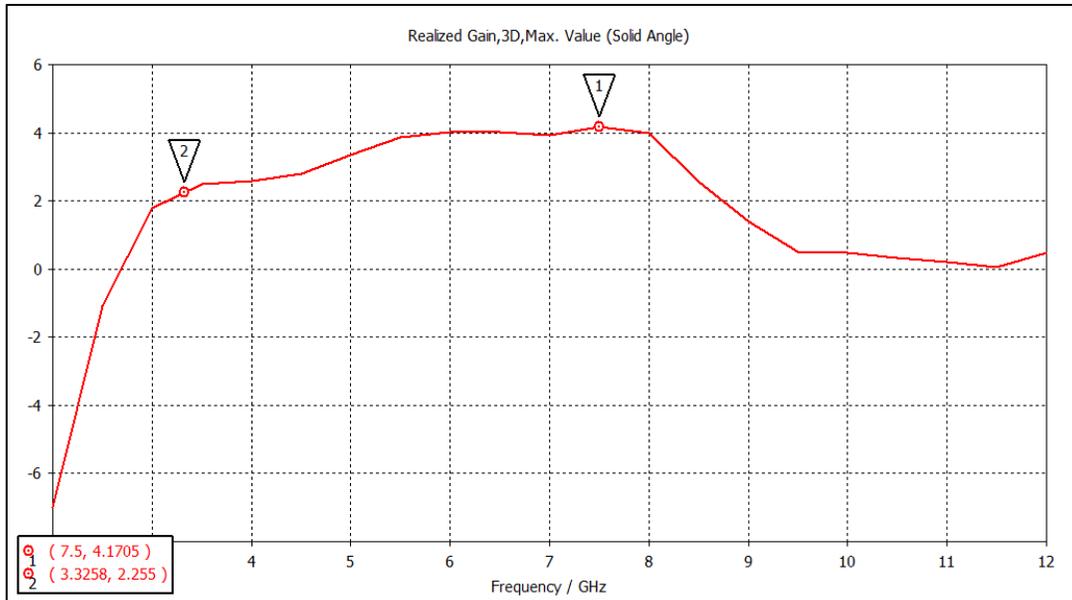


Figura 39: Realized Gain (dBi) para cada frecuencia de la Antena Final.

Del gráfico de *Realized Gain* de la Antena final podemos obtener que el máximo de ganancia se obtiene en la frecuencia de 7.5 GHz mientras que el mínimo a la de 3.32 GHz.

Directividad:

A partir del diagrama de radiación, obtenemos la directividad de la antena que cambia para cada frecuencia. Estos datos se encuentran en la esquina inferior de la pantalla del CST como se ve en la Figura 40:

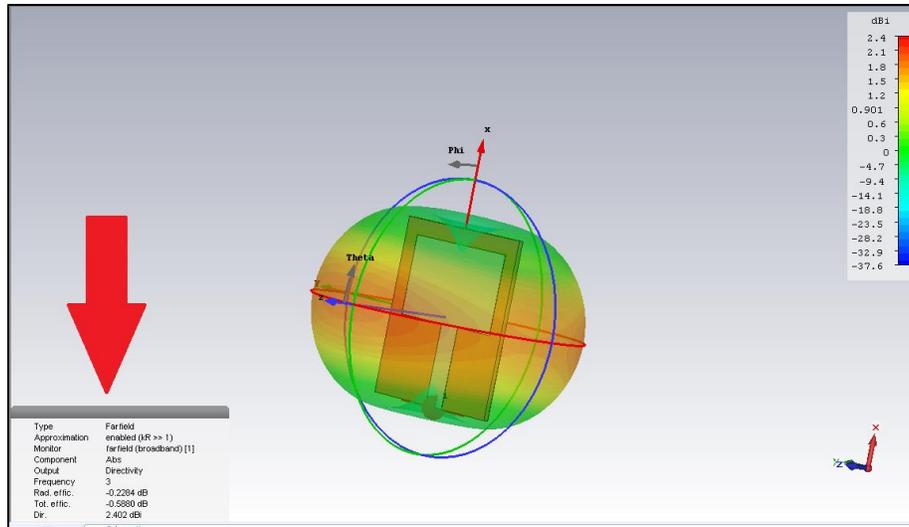


Figura 40: Directividad. La flecha indica el cuadro de resultados donde "Dir" corresponde al valor de la directividad.

En el siguiente gráfico, Figura 41, se muestra la directividad de la antena para cada frecuencia en la banda de trabajo de la antena, y para un resultado más completo, se han analizado las frecuencias de 3, 4, 5, 6, 7 y 8 GHz:

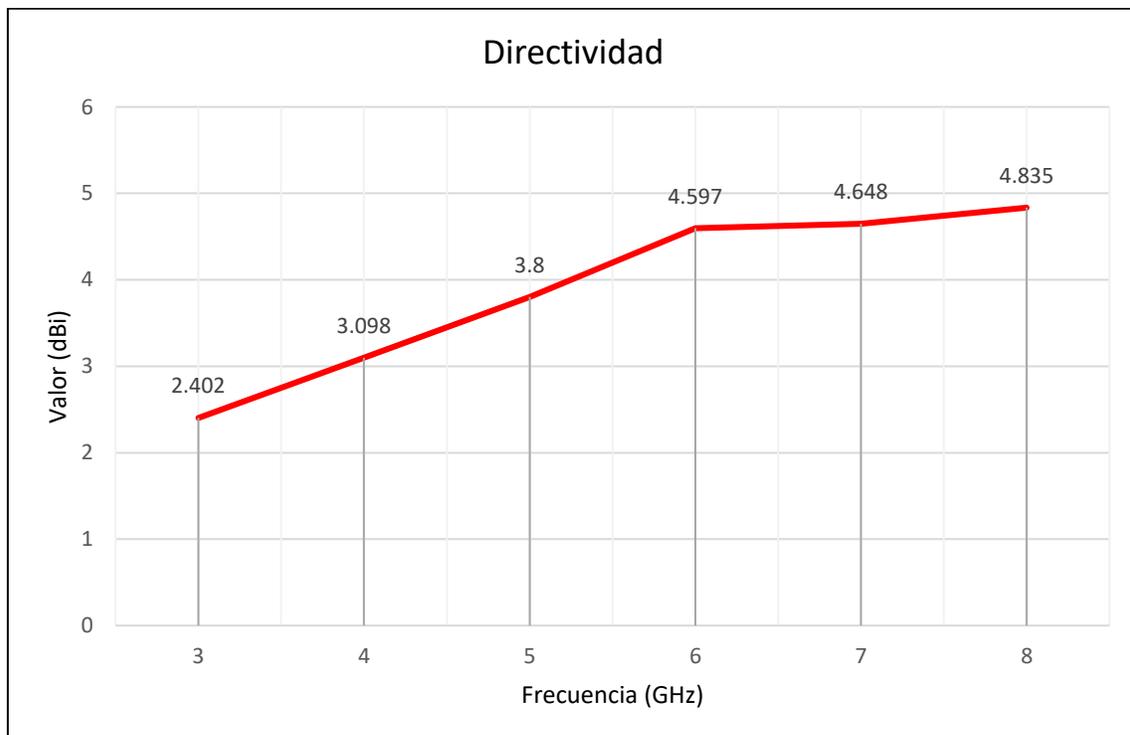


Figura 41: Valores de la Directividad para cada frecuencia.

Como se observa en el anterior gráfico, se obtiene un máximo de directividad en los 8 GHz que corresponden a 4.835 dBi mientras que el mínimo se encuentra en los 3 GHz y la directividad a esta frecuencia es de 2.402 dBi.

3.3.5 Resultados SAR

Recordemos que el SAR o tasa de absorción específica es la energía electromagnética absorbida por la masa de tejido biológico y tiene unidades de vatios por kilogramo (W/kg).

Para poder realizar las pruebas del SAR, se necesita un modelado de un cuerpo humano o una parte de el a la cual se le aplicará la emisión y se comprobará la energía absorbida. En este caso, y para ser fieles a las pruebas realizadas en el artículo inicial, hemos usado el modelado de una cabeza humana. Dicho modelo ha sido aportado por el Equipo de investigación RF-EMC (Radiofrecuencia y Compatibilidad Electromagnética en Redes de Comunicaciones) de la UPC. Como se puede observar en las Figuras 42 y 43, este modelo consta de dos capas: la capa externa modela la piel humana y la capa interior modela el interior de la cabeza humana (tejido, huesos, líquidos y cavidades).

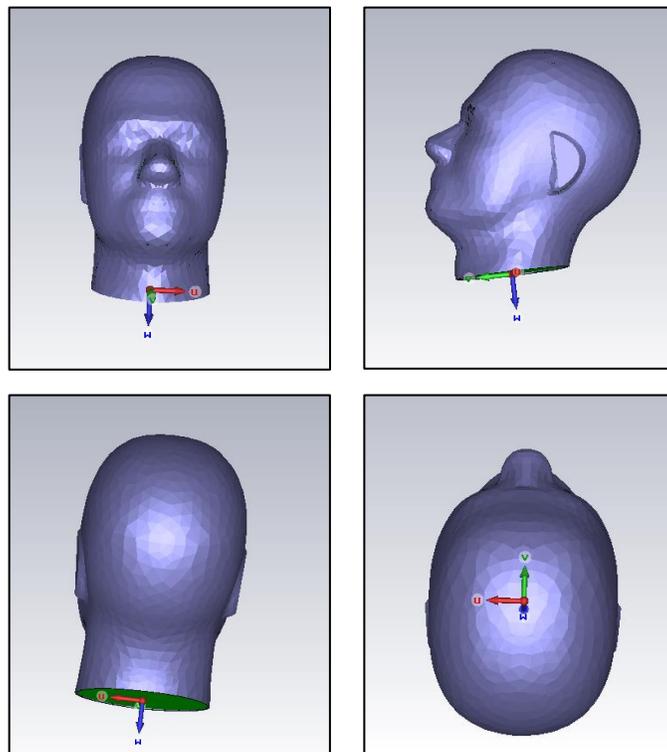


Figura 42: Diferentes vista del modelo de cabeza humana.

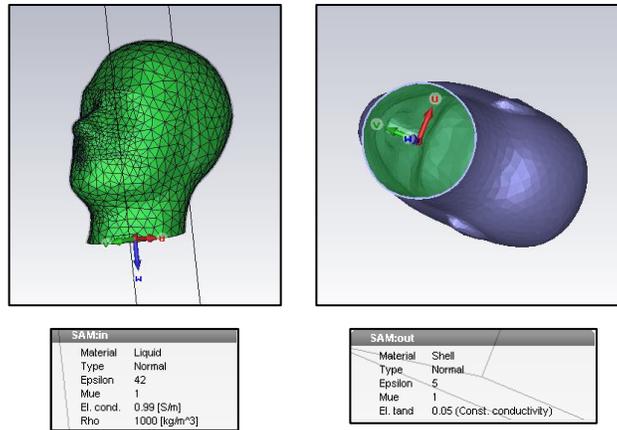


Figura 43: Modelado del interior y la piel correspondientes a una cabeza humana y debajo sus parámetros electromagnéticos.

Una vez comprobado el modelo, le incluimos (o exportamos) la antena. En estas pruebas, como se ve en las figuras 44 y 45, la antena está a 25.06 mm de la oreja izquierda. Se ha escogido esta distancia porque la prueba de SAR es muy costosa computacionalmente especialmente a altas frecuencias (>4 GHz) y después de varias pruebas, de una media de 3 h por prueba, a esta distancia se obtenía un nivel de SAR aceptable.

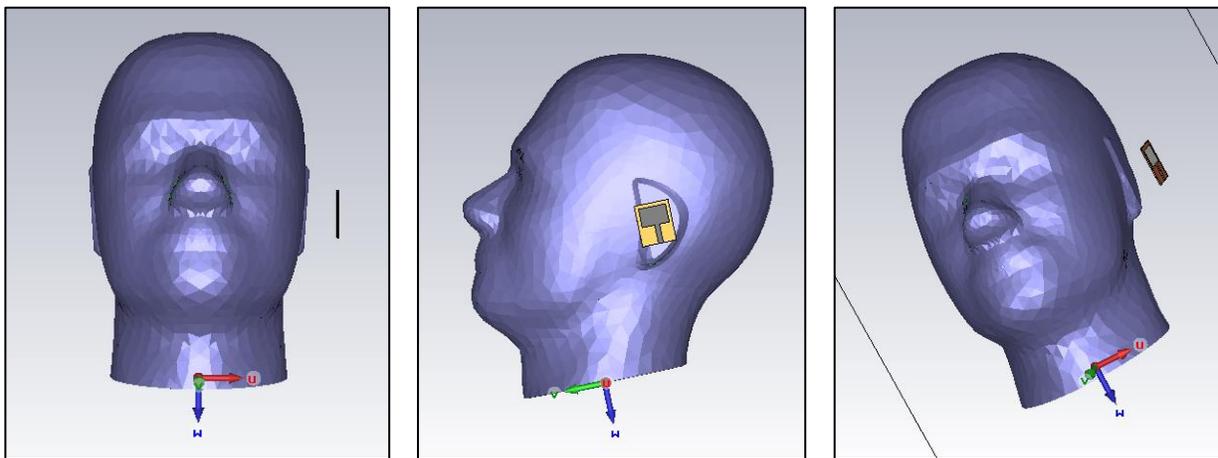


Figura 44: Antena colocada al lado de la oreja izquierda del modelo de cabeza.

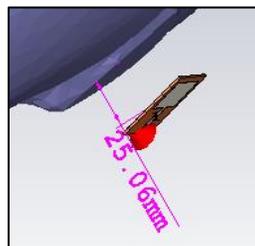


Figura 45: Distancia entre el modelo de cabeza humana y la antena.

En cuanto al estándar que utiliza el CST, provee varios estándares aunque el que ofrece por defecto es el IEEE 95.3, el estándar que regula la simulación del SAR [7]. Además el software realiza la prueba con una potencia de 1 W (rms) (Figura 46):

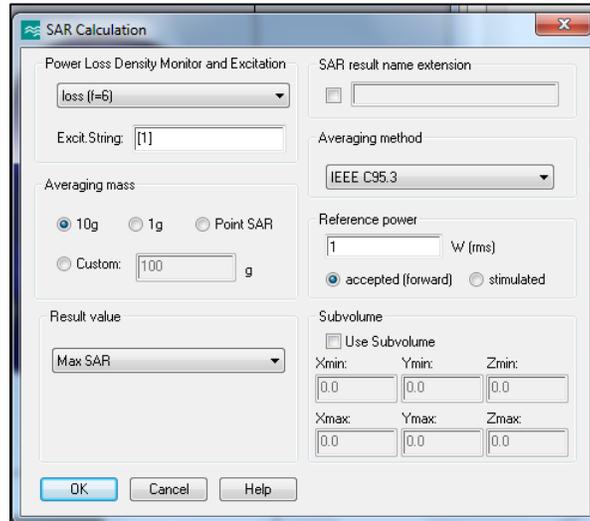
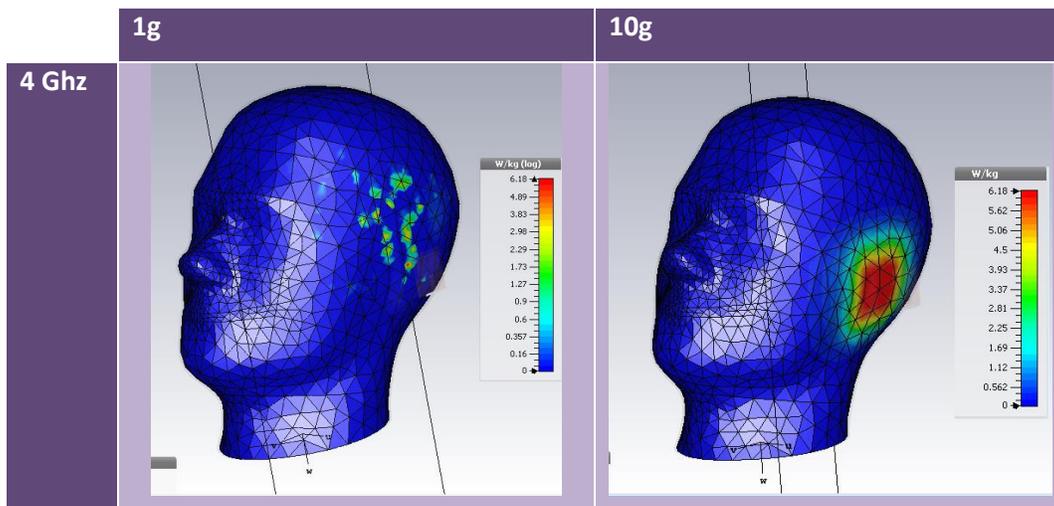


Figura 46: Parámetros del SAR.

Una vez hecha la configuración necesaria, procedemos a las pruebas. Se han llevado a cabo 4 pruebas con resultado positivo: a 4 GHz y 6 GHz, ambas con un promediado a 1 g y a 10 g de tejido. Los resultados se pueden observar en las tablas 12 y 13:

Tabla 12: Resultados gráficos de SAR.



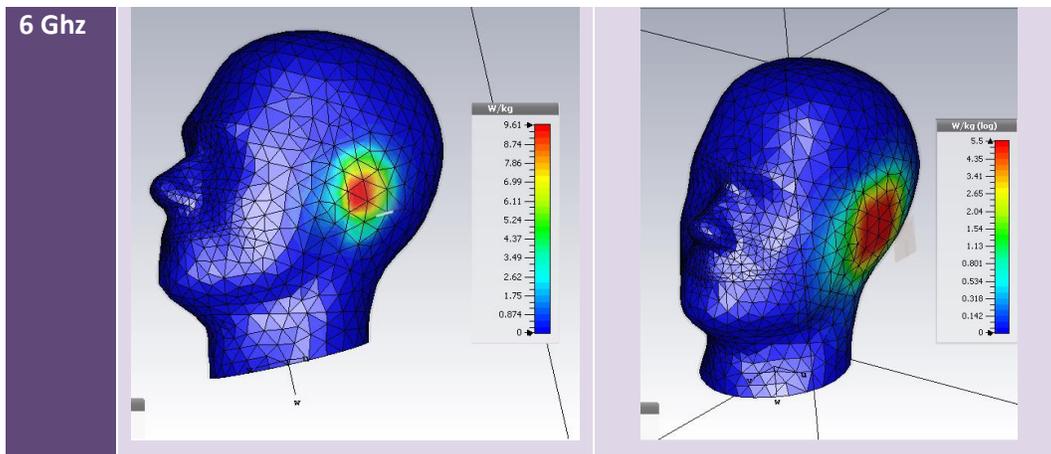


Tabla 13: Valores de SAR máximo.

	1 g (W/kg)	10 g (W/kg)
4 Ghz	6.183 W/kg	6.18 W/kg
6 Ghz	9.609 W/kg	5.504 W/kg

Como podemos observar en anteriores dos tablas, los resultados obtenidos superan concreces los límites dedicados al público general europeos de exposición a la radiofrecuencia, que se sitúan en 2 W/kg prodediados sobre 10 g de tejido. No obstante, podemos concluir, que nuestra antena cumple con los límites del *Occupational SAR*, en la cabeza y a una distancia minima de 25.06 mm, ya que estan bastante por debajo. Recordemos que los límites europeos del *Occupational SAR* son 10 W/kg promediados sobre 10 g de tejido.

3.4 CONSTRUCCIÓN Y MEDICIONES DE LA ANTENA

3.4.1 Introducción

En este apartado, explicaremos el proceso de construcción de la antena.

Primero especificaremos los materiales usados para la antena.

A continuación explicaremos el proceso de montaje de la antena.

Seguidamente especificaremos los equipos de medida usados.

Finalmente especificaremos las pruebas realizadas para conocer el funcionamiento y expondremos los resultados obtenidos.

3.4.2 Especificaciones de los materiales (usados)

Para la construcción de la antena tenemos que tener en cuenta las siguientes exigencias:

La antena se divide en dos partes principales: Parte metálica, que engloba el *Patch* y el plano de masa y sustrato, en este caso será textil.

Además la antena requiere de un puerto por el que se transmiten las señales recibidas.

Tabla 14: Especificaciones de los materiales utilizados en la construcción de la antena.

Material	Tipo
Metálico	Cobre
Sustrato	Tela Tejana
Puerto	Estándar de 50 Ω de impedancia nominal

El metal usado consiste en una tira adhesiva de cobre, WURTH ELEKTRONIK 3003350A [12].



Figura 47: Tira adhesiva WURTH ELEKTRONIK 3003350A.

Mientras que la tela Tejana proviene de un antiguo pantalón del alumno.

El puerto utilizado es el Conector SMA 5-1814832-1 de TE Connectivity de 50 Ω de impedancia nominal [13].



Figura 48: Conector SMA 5-1814832-1 de TE Connectivity.

En cuanto a las medidas de la antena son las descritas en la siguiente Figura 49:

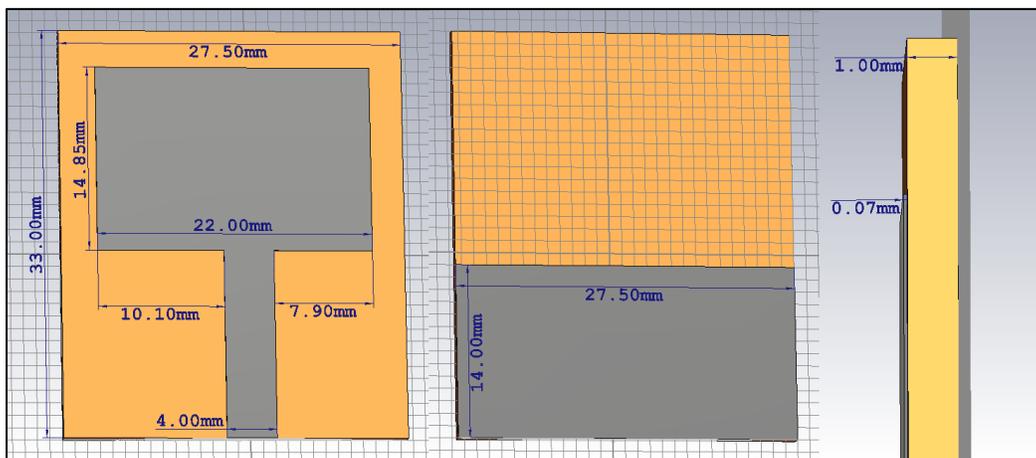


Figura 49: Dimensiones de la Antena Final.

3.4.3 Proceso de montaje

El proceso de fabricación de todas las antenas es bastante simple aunque había que tener mucho cuidado en todos los pasos ya que cualquier pequeña modificación podía afectar al rendimiento final de la antena.

Como se ha indicado en el apartado anterior, los materiales que componen la antena son una tela tejana, tira adhesiva de cobre y un puerto.

Las herramientas que se han usado para la construcción han sido: lápiz, goma de borrar, bolígrafo, una regla horizontal de 20 cm (el instrumento tiene una apreciación de 1 mm), unas tijeras, un soldador y estaño (Figura 50).



Figura 50: Materiales y herramientas utilizadas.

Hay que puntualizar que el proceso de la fabricación es sencillo pero al mismo tiempo complicado. No se trata de un proceso complejo pero, debido al tipo de herramientas disponibles que no ofrecían una gran exactitud para fabricar antenas pequeñas y a la fabricación manual de las éstas, lo que implica errores humanos, las antenas no han sido exactamente iguales.

El proceso de fabricación se describe a continuación, que además se muestra en las siguientes figuras.

El primer paso de todos fue recortar un trozo de tela del pantalón tejero para usarlo de sustrato (Figura 51).



Figura 51: Recorte del pantalón tejero (a la derecha).

Seguidamente procedemos a la construcción de las antenas, cuyo primer paso fue recortar un trozo de tela de unos 50x50 mm.

Después dibujamos el *Patch* y la masa de la antena de la forma y medidas obtenidas a partir de la simulación (Figura 52).

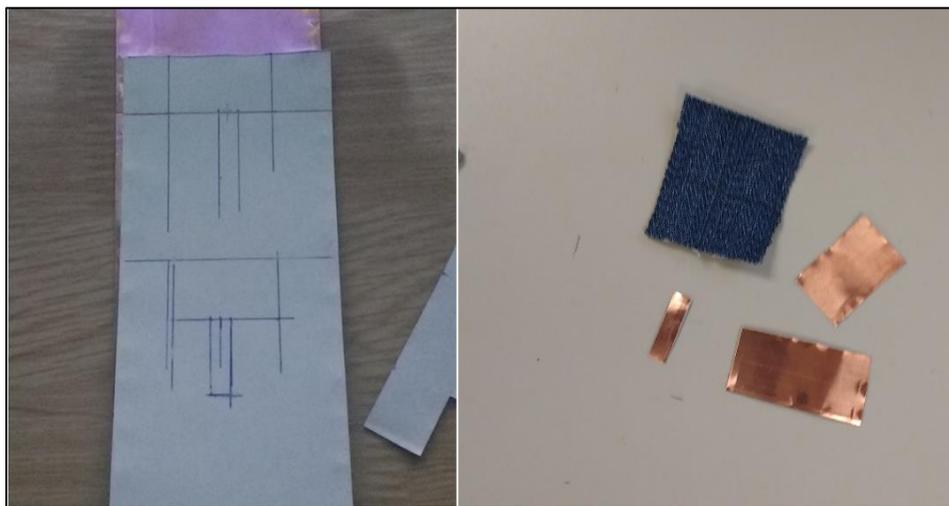


Figura 52: Dibujo del Patch en la tira adhesiva de cobre y recortes de la tira adhesiva y el dieléctrico de la tela tejana.

El siguiente paso consiste en enganchar las el *Patch* y la masa en la tela tejana que conforma el sustrato, ya recortada con las medidas indicadas (Figura 53).



Figura 53: Patch enganchado en el dieléctrico.

Como último paso, procedemos a la soldadura de la antena con el puerto (Figura 54).



Figura 54: Soldador, estaño, antena y el puerto.

Finalmente obtenemos nuestra antena ya completada y lista para funcionar (Figura 55).

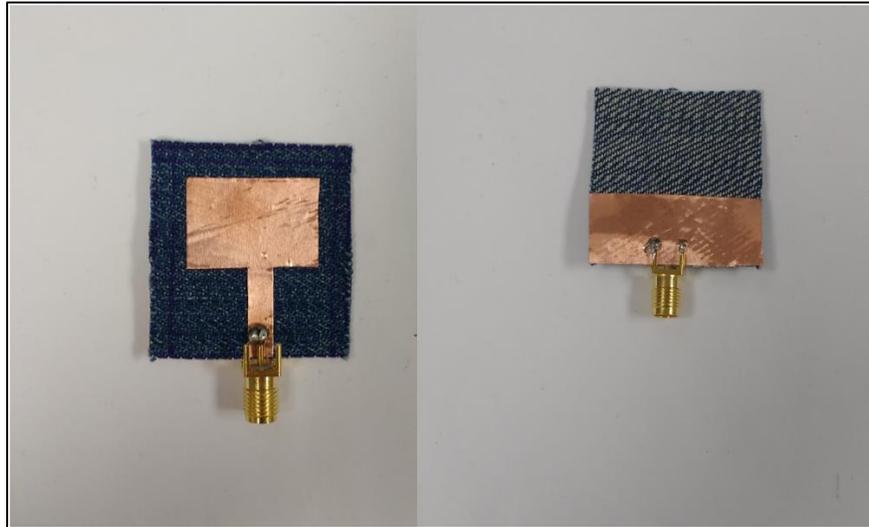


Figura 55: Antena finalizada. Vista superior a la izquierda y planta a la derecha.

3.4.4 Especificaciones de las herramientas de medida

Las medidas de las antenas se realizaron mediante el uso de Agilent Technologies FieldFox *handheld microwave analyzer* N9916A como se muestra en la Figura 56. El rango de frecuencia de este dispositivo es de 30 kHz a 14 GHz, la temperatura de trabajo es de -10 a 55 °C, la impedancia de entrada es de 50 Ω (nominal) [14]. Para calibrar el dispositivo de medición se ha utilizado el Agilent 85521A CalKit con impedancia de entrada 50 Ω [15] (Figura 57).



Figura 56: Agilent Technologies FieldFox microwave analyzer N9916A.



Figura 57: Agilent Technologies CalKit 85521A.

3.4.5 Pruebas realizadas

En la práctica, el parámetro más representativo del desempeño de las antenas es el coeficiente de reflexión o S_{11} que representa la cantidad de energía se refleja de la antena.

Por tanto como prueba básica, se ha hecho la medición del S_{11} de todas las antenas fabricadas. En las siguientes figuras (Figuras 55 y 59), que corresponden a la antena que ha dado el mejor resultado en cuanto a las prestaciones, se observa el montaje y como se visualiza el resultado en el Agilent Technologies *FieldFox* microwave analyzer N9916A:

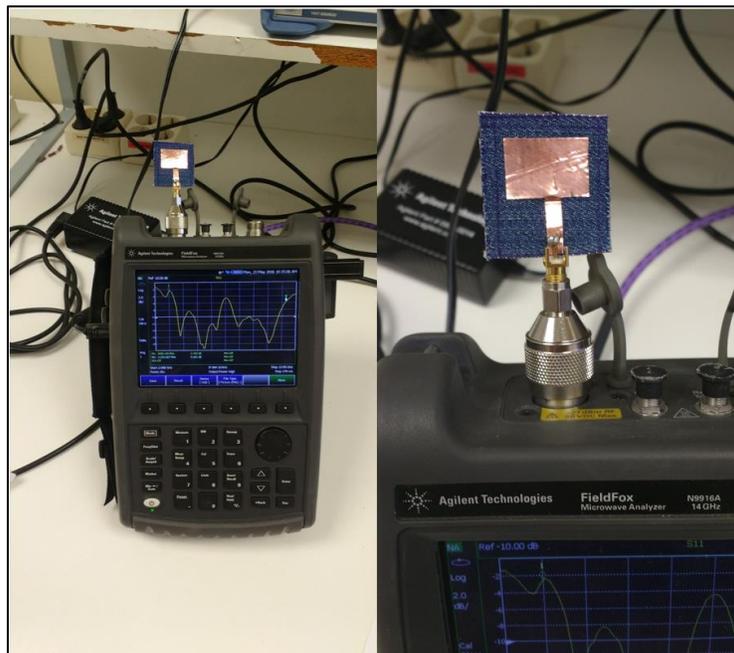


Figura 58: Montaje de la antena en el Agilent Technologies *FieldFox* microwave analyzer N9916A.

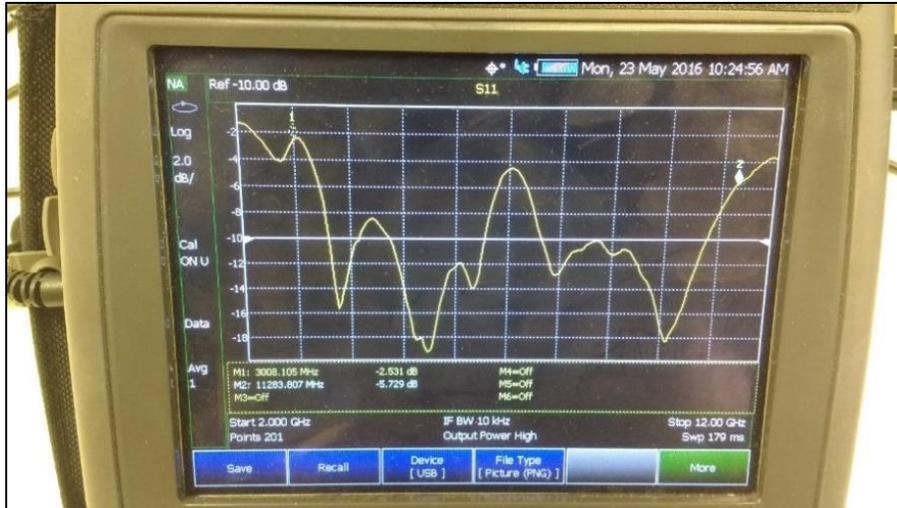


Figura 59: Resultado S_{11} visualizado en Agilent Technologies FieldFox microwave analyzer N9916A.

A continuación, la gráfica de la Figura 60 presenta el resultado S_{11} de la mejor antena:

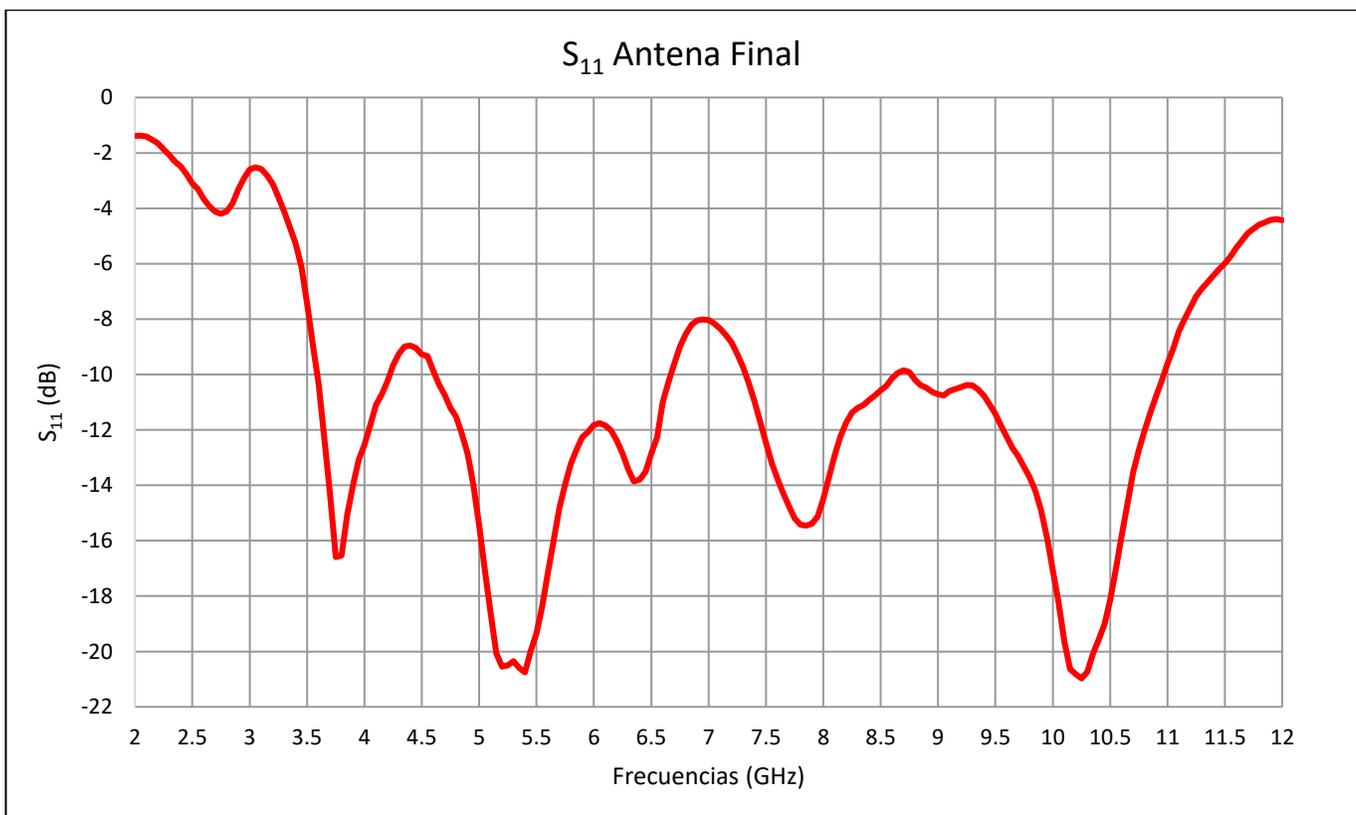


Figura 60: Resultado S_{11} de la Antena Final (el mejor resultado).

Teniendo en cuenta los requisitos descritos en la Tabla 1 podemos concluir que la antena cumple en gran medida dichos requisitos:

El ancho de banda de la antena es prácticamente el mismo que el de la UWB, es de unos 7 GHz, ya que comprende el espectro entre los 3.5 y 10 GHz. No obstante, la banda de trabajo no es muy estable aunque en su mayoría no supera los -10 dB, es decir, está adaptada, excepto la banda que comprende entre 4.25 y 4.7 GHz y la banda entre los 6.2 y 7.6 GHz.

Se trata, efectivamente, de una antena cuya radiación es omnidireccional y en cuanto a tamaño, es una antena pequeña, 33x27.5x2.5 mm, compacta y sobretodo flexible.

Podemos concluir que hemos obtenido, satisfactoriamente, una antena *wearable* funcional en el espectro de la UWB.

La Figura 61 muestra un gráfico comparativo de S_{11} de la antena construida (Real) y la antena simulada con el CST (Simulación):

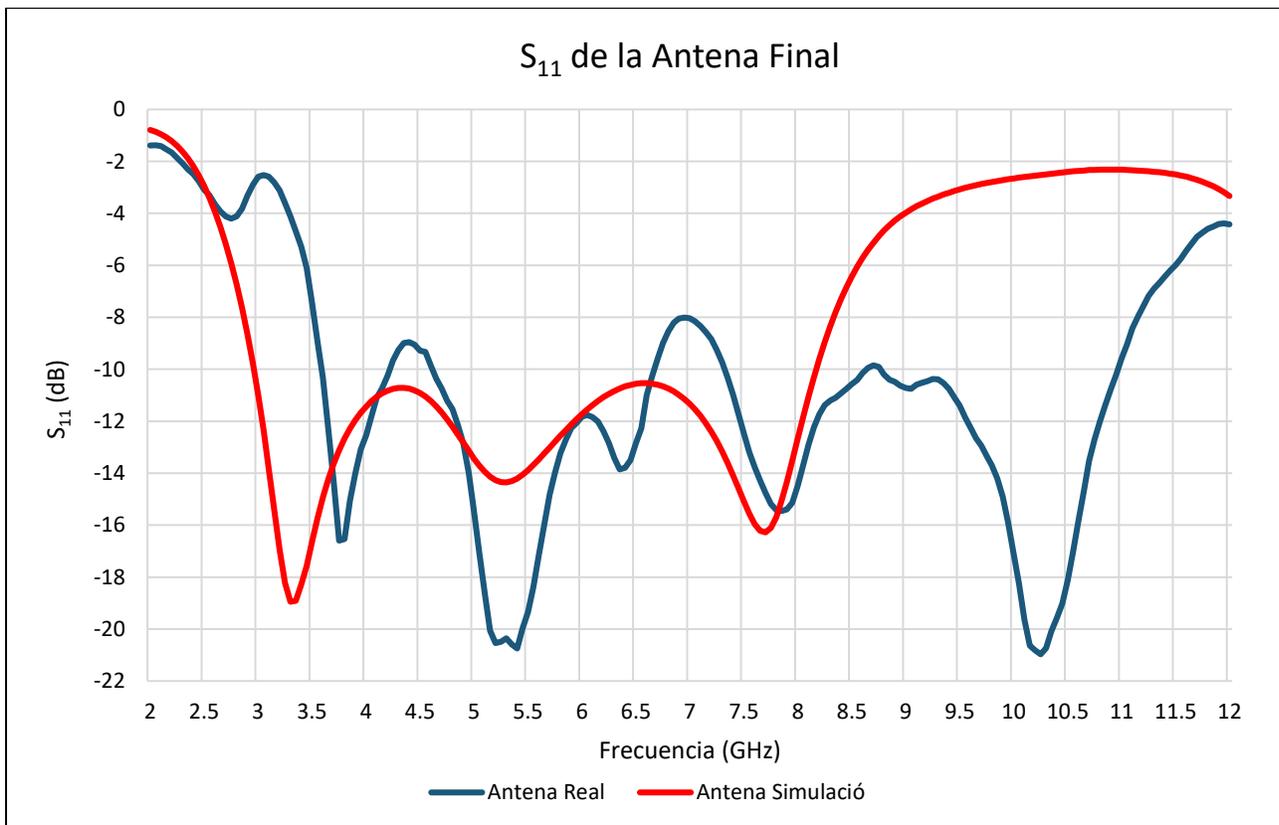


Figura 61: Gráfico comparativo de S_{11} de la antena real y la simulación.

Como podemos observar en el anterior gráfico, la antena real tiene un ancho de banda mayor que la antena de la simulación, no obstante no tiene una banda de trabajo estable por lo que no está adaptada en las bandas anteriormente indicadas.

En cambio la antena de la simulación sí que está adaptada en toda la banda de trabajo aunque su ancho de banda es más reducido.

3.5 CRONOGRAMA

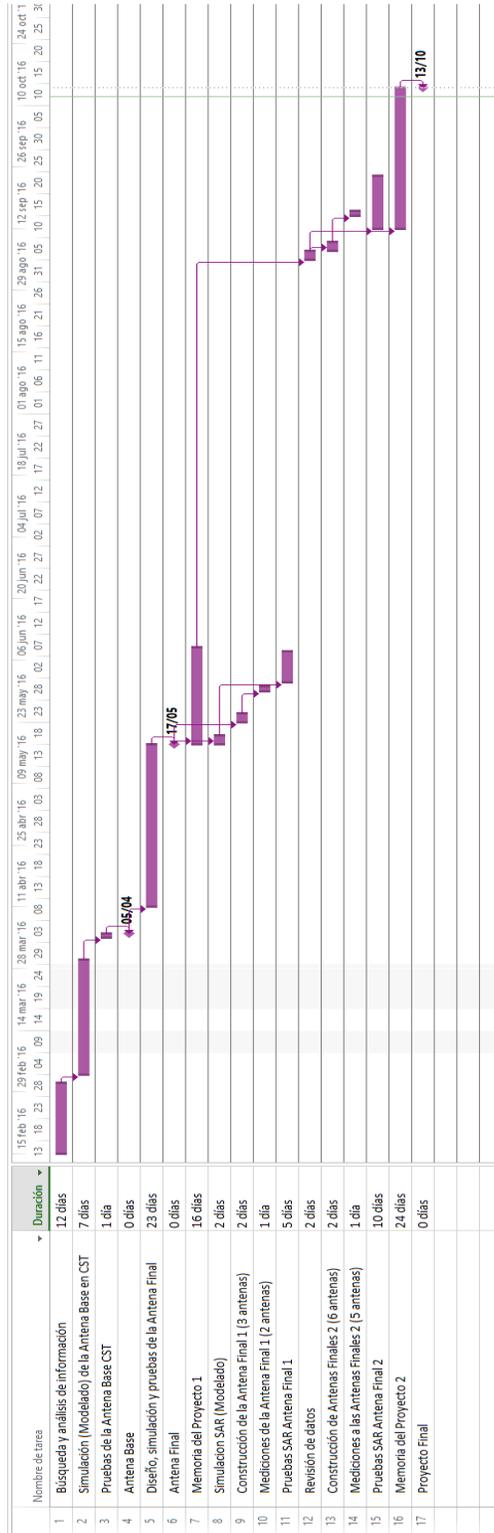


Figura 62: Cronograma del proyecto.

En cuanto a la cronología del proyecto, Figura 62, hay que hacer varias puntualizaciones para su mejor comprensión:

Este proyecto estaba previsto ser finalizado en junio del año 2016, pero por varios motivos no se pudo acabar entonces. A mediados de dicho mes ya se había completado alrededor del 70% del proyecto, lo que incluye las simulaciones de las antenas, algunas pruebas del SAR, la construcción y medición de antenas y parte de la memoria. Estas aparecen en el cronograma con un "1". A partir del setiembre, volvimos a hacer varias pruebas SAR para finalizarlas y además construimos varias antenas modificadas (doblando las dimensiones, por ejemplo) para intentar así obtener un mejor resultado. También se ha finalizado la presente memoria. Aparecen con un "2" en el cronograma.

El cronograma está expresado en días; cada día corresponde a una jornada de 4 horas de trabajo. Con esto obtenemos que el trabajo ha requerido 430 horas de trabajo, divididas entre 8 horas, las que corresponden a una jornada laboral, nos da un total 53.75 días (54 días).

3.6 PRESUPUESTO

La Tabla 15 presenta el presupuesto, aproximado, del proyecto. El presente proyecto tiene un coste de 4.698,32 € y vienen desglosados de la siguiente manera:

Tabla 15: Presupuesto del proyecto.

	Cantidad	Precio Unitario	Precio Equivalente ²	Precio total
Salario³				
Horas de trabajo	430 horas	8,00 €	8,00 €	3.440,00 €
Equipamiento				
Ordenador	60 días	1.400,00 €	233,33 €	233,33 €
Licencia CST	60 días	1.500,00 €/año	250,00 €	250,00 €
Alquiler del equipo de medida Agilent FieldFox N9916A y CalKit 85521A	6 horas	100 €/hora	100,00 €	600,00 €
Material fungible				
Material de oficina	-----	30,00 €	30,00 €	30,00 €
Material de construcción de la antena				
Tela tejana	0.5 m ²	10,00 €/m ²	5,00 €	5,00 €
Tira adhesiva de cuero [12] WÜRTH ELEKTRONIK 3003350A	1 m	212,29 €/33m	6,43 €	6,43 €
Puertos TE Connectivity SMA 5-1814832-1	5 unidades	2,02 €	2,02 €	10,10 €
Estaño	2 m	10,00 €/15m	0,7 €	1,3 €
Soldador	1 unidades	30,00 €	30,00 €	30,00 €
Otros gastos				
Luz, Calefacción	-----	2% ⁴	-----	92,12 €
			Total	4.698,32 €

² El Precio Equivalente, es el precio de la proporción en cuanto a tiempo, unidades o medida que usamos.

³ El Salario es el estándar de los alumnos de la UPC que realizan prácticas en empresas.

⁴ El gasto de Luz y calefacción es una aproximación, ya que no se puede saber el gasto real.

CAPÍTULO 4

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a tratar las conclusiones del presente proyecto y las líneas futuras de trabajo que se abren.

4.2 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta nuestro principal objetivo: diseño y construcción de una antena plana sobre sustrato textil que opera como una parte del sistema UWB, podemos decir que se ha cumplido.

En el presente proyecto se han diseñado, simulado y construido varios prototipos de antenas planares sobre sustrato textil destinadas a trabajar en sistemas UWB.

Hemos comprobado, tanto con simulaciones como por medio de medidas, que la antena es aceptable en cuanto a prestaciones. Tiene una banda de trabajo muy ancha y, en gran medida, adaptada.

Primeramente se ha comprobado a través del software CST que la antena descrita en el artículo cumple con los requisitos de la UWB, o al menos se acerca. A continuación se han realizado la modificación del sustrato a un sustrato de tela tejana lo que ha llevado a la modificación de la estructura de la antena.

Las modificaciones se han centrado en el *Patch*, primero consiguiendo la adaptación de la antena en la banda de trabajo y después ampliando el ancho de banda.

Después se ha llevado a cabo la construcción de la antena, de varias antenas, y se ha procedido a la medición del S_{11} de cada una, que, en al menos un caso, resultó mejor que el de la simulación.

Paralelamente con el CST se han hecho las pruebas del SAR para comprobar que la antena es apta para el uso cerca del cuerpo humano cuyos resultados en las simulaciones son positivos.

4.3 LÍNEAS FUTURAS

Debido a la juventud del sistema UWB, aún existen numerosos campos en los que investigar. Tras este proyecto aparecen varias líneas de investigación, a partir de las cuales continuar el trabajo.

Una primera continuación del trabajo sería profundizar en el estudio de la antena con la finalidad de conseguir una banda de paso estable y adaptado en todo el ancho de banda, esto se podría llevar a cabo haciendo un pequeño estudio de las modificaciones necesarias partiendo de la Antena Base.

Lo segundo a estudiar, sería la viabilidad de la *“wearabilidad”* o portabilidad de la antena en el cuerpo humano, ya que teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la antena, al menos cerca de la cabeza y a 25.06 mm no cumple los requisitos para ser comercializada al público general, lo que comportaría un nuevo abanico de posibilidades en las que puede estar implementada la antena. Un comienzo podría ser el estudio del SAR sobre el cuerpo humano usando la antena real que se ha creado en este proyecto y no restringiéndola solamente a la cabeza humana sino que también se puede llevar a cabo la prueba en diferentes partes del cuerpo, como las extremidades.

Por último, sería interesante un estudio dedicado a las posibles aplicaciones que esta antena podría tener en un futuro próximo, investigando tanto en el ámbito del hogar como de fuera de éste, así como también la coexistencia con otras tecnologías.

Implementar aplicaciones y estudiar su comportamiento en algún uso particular es el modo de observar las características y el alcance de la tecnología UWB y sus antenas.

REFERENCIAS

- [1] M. J. A. X. Q. X. H. W. T. S. S. A. C. Zhi Ning Chen, «Planar Antennas,» *IEEE Microwave Magazine*, pp. 70-72, 2006.
- [2] C.A.Balanis, *Antenna theory - Analysis and design*, 3rd ed ed., New Jersey: Jhon Wiley & Sons Inc, 2005.
- [3] L. J. J. R. J. R. S. B. i. M. F. A.Cardama, *Antenas*, 2a ed., Edicions UPC, 2002.
- [4] «First Report and Order (FCC 02-48). Action by the Comission February 14, 2002. New Public Safety Applications and Broadband internet access among uses envisioned by FCC authorization of Ultra-Wideband Technology.».
- [5] M. Pausini, *Autocorrelation Receivers for Ultra Wideband Wireless Communications*, pp 10-12, 2007.
- [6] A. Alomainy, *Antennas and radio propagation for body-centric wireless networks*, University of London, 2007.
- [7] T. Wittig, «SAR Overview,» de *UGM*, 2007.
- [8] D. Seabury, «An Update On SAR Standards And The Basic Requirements For SAR Assessment,» *Conformity*, 2005.
- [9] E. F. K. L. H. a. C. T. Kjell Hansson Mild, *OCCUPATIONAL RF EXPOSURE FROM BASE STATION ANTENNAS ON ROOF-TOPS AND BUILDINGS*.
- [10] D. (. L. M. P. D. Mr. P.C. Dhanawade, «Simulation of Rectangular Patch Antenna with Jeans Substrate,» *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, pp. PP: 42-45.
- [11] "*IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*". *IEEE Std 145-1993: 1–32. 1993-07-01, 1993*.

- [12] F. Company, «Farnell,» [En línea]. Available: <http://uk.farnell.com/wurth-elektronik/3003350a/tape-copper-50mm/dp/1909684>. [Último acceso: 13 10 2016].
- [13] R. España, «RS España,» [En línea]. Available: <http://es.rs-online.com/web/p/conectores-f/6163422/>. [Último acceso: 13 10 2015].
- [14] A. Technologies, «Agilent FieldFox Handheld Analyzers Datasheet».
- [15] K. Technologies, «85521A Datasheet».

ANEXO

La Figura 63 muestra el gráfico de los resultados de las mediciones S_{11} sobre prototipos de antena construidos.

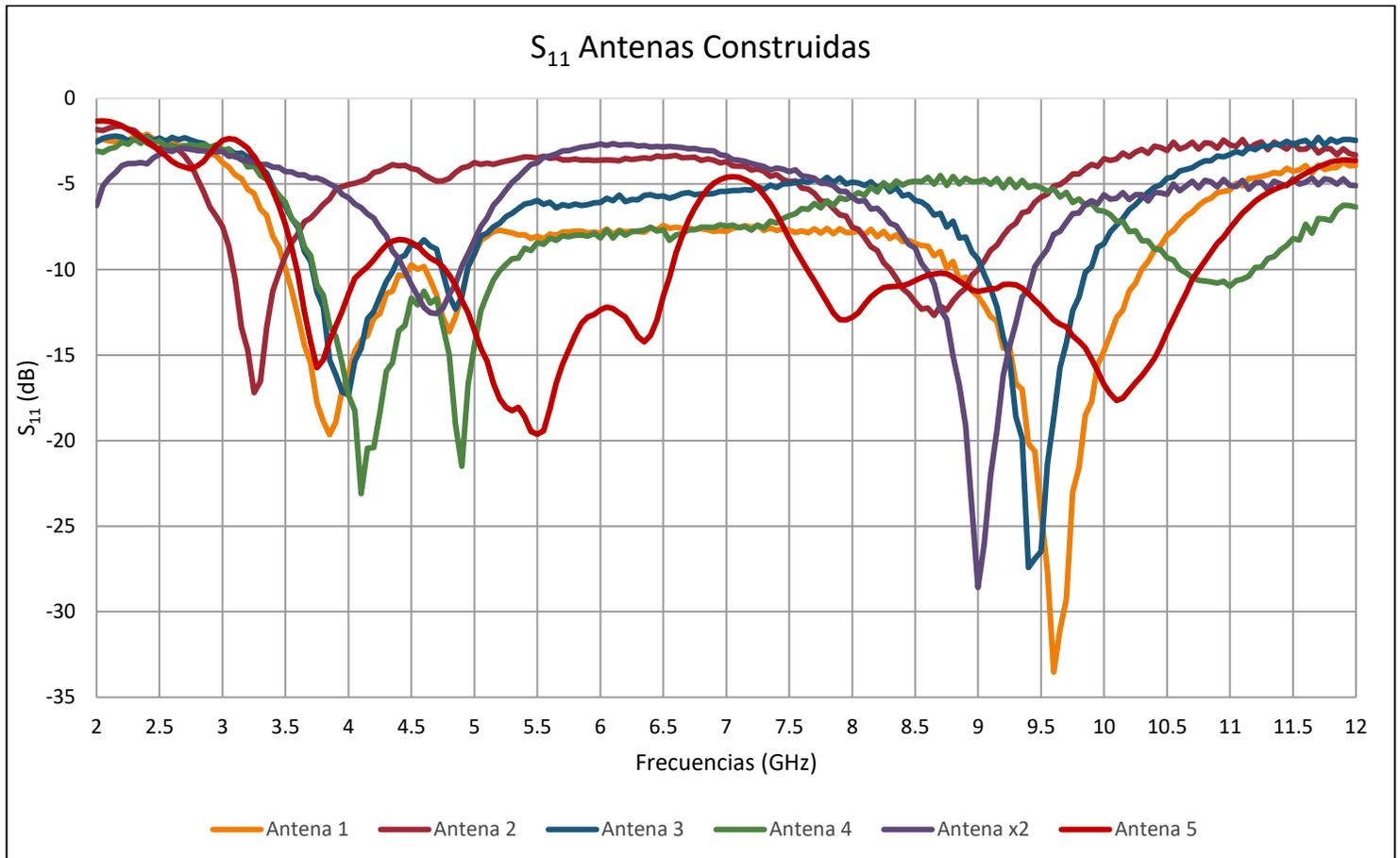


Figura 63: Resultado S_{11} de las antenas construidas.

Como se puede observar, salvo una antena, Antena 5 que corresponde a la antena con el mejor resultado cuyo gráfico individual se muestra en la Figura 63, el resto de antenas no cumplen el requisito de tener una banda de trabajo por debajo de los -10 dB.

Antena 1, 2, 3 4 y 5 son antenas construidas según las medidas obtenidas en la simulación.

Antena x2 es una antena del mismo diseño que la Antena Final salvo que las medidas son el doble.

En la Figura 64 se presentan 4 prototipos de la Antena Final:

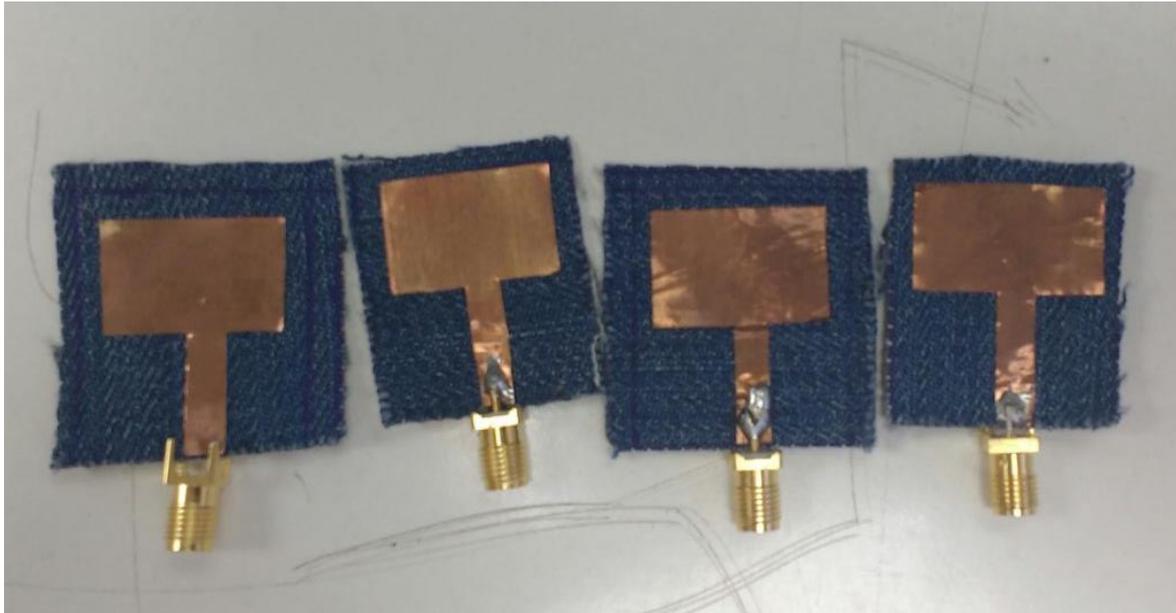


Figura 64: 4 prototipos de la Antena Final.

La Figura 65 muestra una comparativa entre una Antena Final con las dimensiones correctas, en bolígrafo, y una Antena Final x2, cuyas dimensiones son el doble.



Figura 65: Comparativa entre una Antena Final, a la derecha, y una Antena Final x2, a la izquierda.

