



DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE ANTENAS CON POLARIZACIÓN CIRCULAR PARA APLICACIONES CORPORALES

Carlos Rodríguez Paños

Tutora: Marta Cabedo Fabrés

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Curso 2017-18

Valencia, 11 de Septiembre de 2018

Resumen

En este trabajo se desarrolla el diseño y la posterior optimización de parámetros de una antena con polarización circular y que tiene un diagrama de radiación unidireccional, que trabaja con tecnología Ultra Wide Band (UWB) en la banda de frecuencias de 3 a 5 GHz, y cuyo propósito final es la aplicación en el ámbito de las redes de área corporal inalámbricas (WBAN), reguladas por el estándar IEEE 802.15.6. Concretamente, la aplicación práctica consiste en el establecimiento de una comunicación inalámbrica con una cápsula endoscópica que se encuentra situada en el interior del cuerpo humano. Se realiza un estudio del estado del arte de las tecnologías planteadas en el trabajo, así como un estudio de modificación de parámetros de la antena diseñada y su efecto correspondiente en el funcionamiento de la antena. Se presentan los resultados de simulación obtenidos en términos de diagrama de radiación en campo lejano, ancho de banda de adaptación, relación axial en frecuencia, impedancia de la antena y acoplamiento mutuo entre los puertos de excitación.

Abstract

This paper develops the design and the subsequent optimization of parameters of an antenna with circular polarization and has a unidirectional radiation diagram, which works with Ultra Wide Band (UWB) technology in the frequency band from 3 to 5 GHz , and whose final purpose is the application in the field of wireless body area networks (WBAN), regulated by the IEEE 802.15.6 standard. Specifically, the practical application consists in the establishment of a wireless communication with an endoscopic capsule that is located inside the human body. A study of the state of the art of the technologies proposed in the work is carried out, as well as a study of modification of parameters of the initially designed antenna and its corresponding effect on the operation of the antenna. The simulation results obtained are presented in terms of the far-field radiation pattern, matching bandwidth, axial ratio against frequency, antenna impedance and mutual coupling between the excitation ports.

Resúm

En aquest treball es desenvolupa el disseny i la posterior optimització de paràmetres d'una antena amb polarització circular i que té un diagrama de radiació unidireccional, que treballa amb tecnologia Ultra Wide Band (UWB) en la banda de freqüències de 3 a 5 GHz, i el propòsit final és l'aplicació en l'àmbit de les xarxes d'àrea corporal sense fils (WBAN), regulades per l'estàndard IEEE 802.15.6. Concretament, l'aplicació pràctica consisteix en l'establiment d'una comunicació inalàmbrica amb una càpsula endoscòpica que es troba situada a l'interior del cos humà. Es realitza un estudi de l'estat de l'art de les tecnologies plantejades en el treball, així com un estudi de modificació de paràmetres de l'antena dissenyada inicialment i el seu efecte corresponent en el funcionament de l'antena. Es presenten els resultats de simulació obtinguts en termes de diagrama de radiació en camp llunyà, ample de banda de ressonància, relació axial en freqüència, impedància de l'antena i acoblament mutu entre els ports d'excitació.

Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	2
1.1	Motivaciones del trabajo.....	2
1.2	Objetivos planteados.....	6
1.3	Requerimientos de software	7
1.4	Metodología de trabajo	10
Capítulo 2.	Estudio del estado del arte.....	13
2.1	Tecnología para aplicaciones corporales.....	13
2.1.2	Clasificación de las redes de acceso inalámbricas.....	14
2.1.3	Redes de área corporal inalámbricas (WBAN).....	15
2.1.4	Arquitectura de comunicación de las WBAN.....	17
2.1.5	Revisión del estándar IEEE 802.15.6.....	19
2.2	Tecnología Ultra Wide Band (UWB).....	23
2.2.1	Revisión histórica de la tecnología.....	23
2.2.2	Características principales.....	24
Capítulo 3.	Metodología de diseño de la antena.....	28
3.1	Propuesta de diseño de la antena.....	28
3.2	Principales fundamentos teóricos del diseño.....	30
3.2.1	Ondas con polarización circular.....	30
3.2.2	Diagrama de radiación unidireccional.....	32
3.3	Estructura de la antena	38
3.4	Red de alimentación de la antena	40
3.5	Resultados.....	45
3.5.1	Ancho de banda de adaptación.....	45
3.5.2	Diagrama de radiación en campo lejano.....	46
3.5.3	Relación axial en función de la frecuencia.....	50
3.5.4	Impedancia de la antena.....	52
3.5.5	Acoplamiento mutuo entre los puertos.....	53
3.6	Estudio paramétrico de la antena.....	54
3.6.1	Modificación de la geometría del substrato.....	54
3.6.2	Modificación de la separación entre parches.....	58
	Conclusiones y propuesta de trabajo futuro.....	61
	Bibliografía.....	67

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivaciones del trabajo

En nuestra historia reciente, la Medicina y las Telecomunicaciones se han convertido en piedras angulares del proceso de evolución y mejora de calidad de vida de los seres vivos. Tanto es así, que el progreso de un ámbito casi siempre ha tenido como factor influyente la intervención del otro. Así, entre otros ejemplos, ténganse en cuenta la aparición del telégrafo a principios del siglo XIX y su uso como herramienta clave para la comunicación médica de entonces, pasando por la radiología, especialidad médica cuyo objetivo es la transmisión digital de imágenes radiológicas, hasta la reciente aparición de Internet, facilitando la conexión entre médicos especialistas con pacientes mediante dispositivos audiovisuales, una revolución en términos tanto educacionales como de atención sanitaria.

De esta simbiosis nace el término “*telemedicina*”, como Ciencia que estudia la medicina a distancia, y que ha seguido el ritmo de desarrollo de las telecomunicaciones. Los sistemas de telemedicina permiten transferir información médica por medio de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), y utilizarlas para el correcto diagnóstico, tratamiento y vigilancia del paciente. Su uso permite, optimizar los recursos disponibles en los centros de salud y aumentar el intercambio de conocimientos entre profesionales[1]. La primera implementación práctica data del año 1959 en la Universidad de Nebraska (EEUU), donde se utilizó la telemedicina para transmitir exámenes neurológicos. Fue en los comienzos de la década de los 60 cuando la Administración Espacial Aeronáutica Nacional (NASA) de los Estados Unidos de América (EEUU) desarrolló programas de investigación en el ámbito de la telemedicina, promoviendo la futura liberación de muchos de los equipos médicos de salud actuales, debido principalmente al comienzo del envío de seres humanos al espacio exterior, y ante la imposibilidad de éstos de viajar con un médico a su lado, requiriendo monitorización de sus constantes vitales desde un equipo médico en tierra[2].

La telemedicina es una de las directrices planteadas por la Comisión Europea a través de la Agenda Digital Europea para el año 2020, con el fin de beneficiar a los pacientes y profesionales de la salud de todos los Estados miembro de la Unión Europea, y como estrategia Europea de investigación e innovación en la red pública de salud [3].

Los grandes progresos mundiales en estas ciencias han sido precedidos por grandes inversiones públicas en investigación, desarrollo e innovación. Ello en los últimos años, especialmente durante y tras la grave crisis económica mundial del año 2009, contrasta con el hecho que en España ciertos gobiernos hayan descuidado a través de sus políticas presupuestarias la inversión en estas materias, véase la figura 1, permitiendo el exilio forzado de gran cantidad de investigadores a otros países europeos, véase la figura 2, que realmente sí han valorado el potencial de un material humano que ha sido formado y educado en un Estado que finalmente no está obteniendo beneficio del potencial para el cual invirtió tanto dinero y tiempo en su formación.

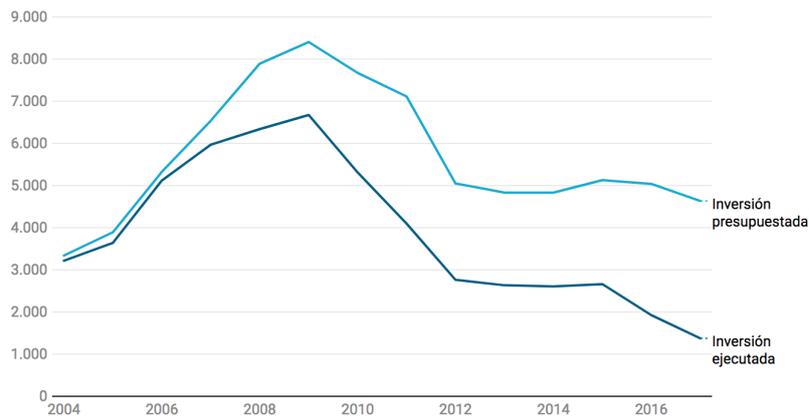


Figura 1. Inversión presupuestada en I+D+i en España durante el periodo 2004-2017 . [Fuente: OCDE]

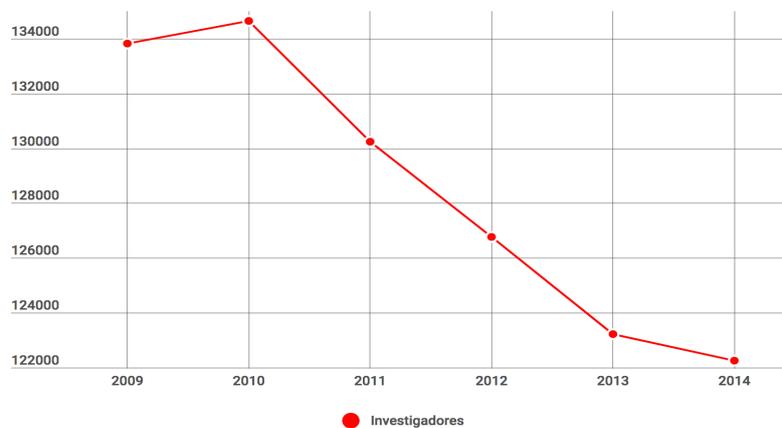


Figura 2. Éxodo de investigadores en España a países Europeos durante el periodo 2009-2014 . [Fuente: INE]

Otro de los grandes problemas a los que se enfrenta la comunidad científica, y por ende, la sociedad, es la llamada “brecha de género”, ya que a pesar de que en la Universidad española hay más matrículas de mujeres que de hombres, y que hay un número similar de tesis leídas entre géneros, paradójicamente sólo un 39 % de la comunidad son mujeres. La situación empeora en relación con los cargos de dirección en órganos de investigación, dónde el 79% son ocupados por hombres [6].

La motivación de este trabajo surge ante la necesidad existente en diferentes ámbitos de investigación de obtener datos de dispositivos intracorporales, es decir, situados en el interior del cuerpo humano, como pueden ser cápsulas endoscópicas, mediante técnicas mínimamente invasivas para el cuerpo humano. De esta manera, se propone el uso de una antena situada en la parte superficial del cuerpo humano (término “on-body” en su traducción al inglés) que permita recibir datos de contenido multimedia, tales como imágenes o vídeos, recogidos por una cápsula endoscópica, y que permitan ser procesados posteriormente sin necesidad de tener que recuperar ningún dispositivo integrado en la cápsula endoscópica para poder tratar dicha información.



Figura 3. Estructura de una cápsula endoscópica [MIRALLES GÓMEZ, E. (2017)]

El diseño de una antena para una aplicación, en general, no requiere radiación fuera del ancho de bando necesario, es decir, antenas de banda estrecha como dipolos o monopolos funcionan generalmente correctamente, pero en ciertas aplicaciones como la propuesta en este trabajo, donde se requiere de un considerable ancho de banda para la correcta recepción de los datos, se requiere el diseño de una antena en banda ancha, y más concretamente el uso de una tecnología que soporte dicha comunicación.

Por ello, se propone el uso de tecnología de Banda Ultra Ancha, más conocida como Ultra Wide Band (UWB), que permite la transmisión de información a altas tasas sobre un elevado ancho de banda bajo distancias cortas de comunicación, lo que supone una ventaja adicional de cara al novedoso mundo del Internet de las cosas, o en su traducción inglesa, “Internet of Things” (IoT) y en la futura implementación de la tecnología 5G. En el año 2002, la FCC (“Federal Communications Commission”), comisión encargada de regular, entre otras, el espectro electromagnético de los Estados Unidos de América, aprobó la banda UWB para su comercialización [7].

1.2 Objetivos planteados

En este trabajo se desarrolla el diseño de una antena con polarización circular y su posterior análisis y optimización aplicado al ámbito de las aplicaciones corporales, las cuales han sufrido un auge tecnológico considerable en los últimos años dado el continuo avance e investigación en este ámbito, y que ha permitido el desarrollo de diferentes proyectos y prototipos con un único fin común, la aplicación de la tecnología para la mejora en el ámbito corporal y humano.

Con este fin común se ha desarrollado este trabajo, que cuenta como objetivos fundamentales:

1. Estudio del estado del arte de las tecnologías propuestas en el proyecto, como son las tecnologías para aplicaciones corporales y la tecnología de banda ultra ancha (Ultra Wide Band, UWB).
2. Conocimiento de las herramientas necesarias para un correcto diseño, análisis y optimización de parámetros de una antena con polarización circular para una aplicación concreta.
3. Desarrollar una antena que permita la correcta recepción de los datos transmitidos por una cápsula endoscópica situada en el interior del cuerpo humano.
4. Simplificar mecanismos de invasión en intervenciones tanto sanitarias como humanitarias.

1.3 Requerimientos de software

Los datos que se presentan en este trabajo son obtenidos a través de estudios teóricos realizados para cada tecnología planteada, realizando simulaciones numéricas y adaptando prototipos de antenas ya diseñadas para la aplicación particular de este diseño. Es por ello que se requiere software de simulación electromagnética que gestione el diseño y posterior optimización de la antena.

1.3.1 CST Microwave Studio

Principalmente, se ha utilizado el software de simulación electromagnética CST Microwave Studio (CST MWS), en su última versión del año 2018, para recoger todos los datos presentados en este trabajo. CST MWS es una herramienta de software de simulación electromagnética en 3D para componentes de alta frecuencia. Permite análisis precisos y rápidos de dispositivos de alta frecuencia como antenas, filtros, acopladores, y estructuras planares y multicapa. La interfaz de usuario del software se muestra en la figura 4.

Las principales herramientas que ofrece el software son:

- Modelado de antenas según los requerimientos necesarios.
- Simulación electromagnética del modelado tanto en dominios temporales como frecuenciales.
- Optimización de los resultados obtenidos a través de algoritmos propios del software.
- Post-procesado de los resultados obtenidos para gestionarlos según interese.

Se ha escogido este software de simulación principalmente por las posibilidades de desarrollo que ofrece en torno al modelado de cualquier tipo de antena según las características que se requieran, además permite simular y obtener un volumen de resultados acorde a un proyecto de ingeniería de radiofrecuencia de este nivel.

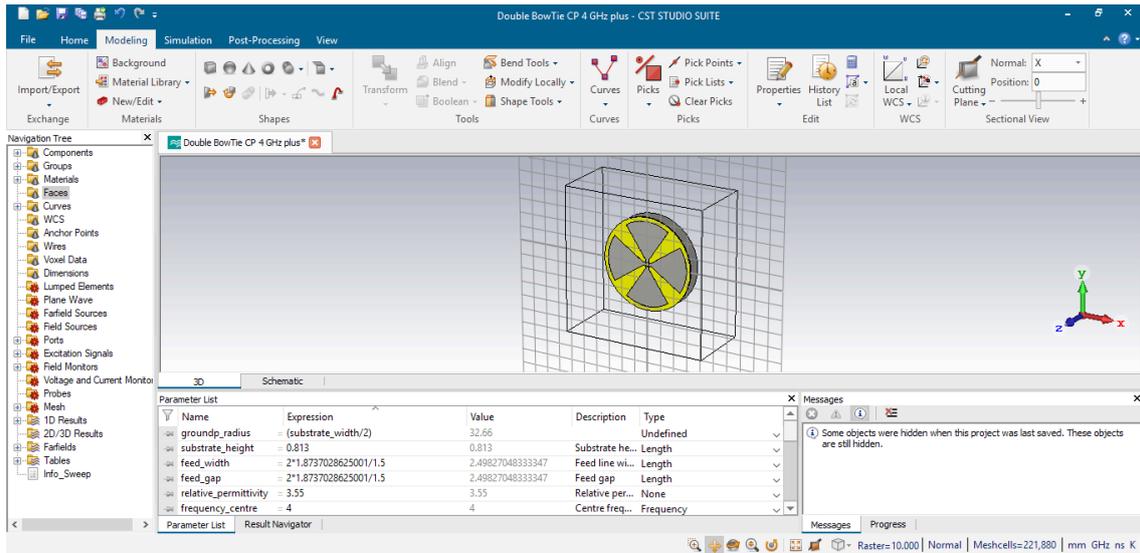


Figura 4. Interfaz de usuario del software CST MWS 2018

1.3.2 Antenna Magus

En menor medida, se ha utilizado el software Antenna Magus, igualmente en su última versión del año 2018, con el fin de poder conocer a través de su librería interna distintos posibles diseños que, en su versión más inicial, se pudieran adaptar y cumplir con los requisitos planteados en este trabajo. La interfaz de usuario del software se muestra en la figura 5.

Antenna Magus es un software de diseño de antenas que, por un lado, posee una librería interna de más de 300 antenas, las cuales son accesibles para elegir la topología óptima de la antena, están diseñadas para poder conocer los propios criterios de diseño de cada antena y, por otro lado, incorpora lo que puede ser su herramienta principal aplicable a este proyecto, la que permite exportar los diseños entre otros programas a CST MWS para así poder tener un punto de partida en el diseño. Además de su librería interna y su herramienta de exportación, es un software que permite igualmente desarrollar un proyecto de antena, simular y obtener resultados, pero a diferencia de CST MWS, los tiempos de simulación son muy altos, no ofrece las mismas posibilidades en el modelado y procesado del diseño, y el volumen de resultados en las simulaciones y su posterior post-procesado no es ni mucho menos tan alto.

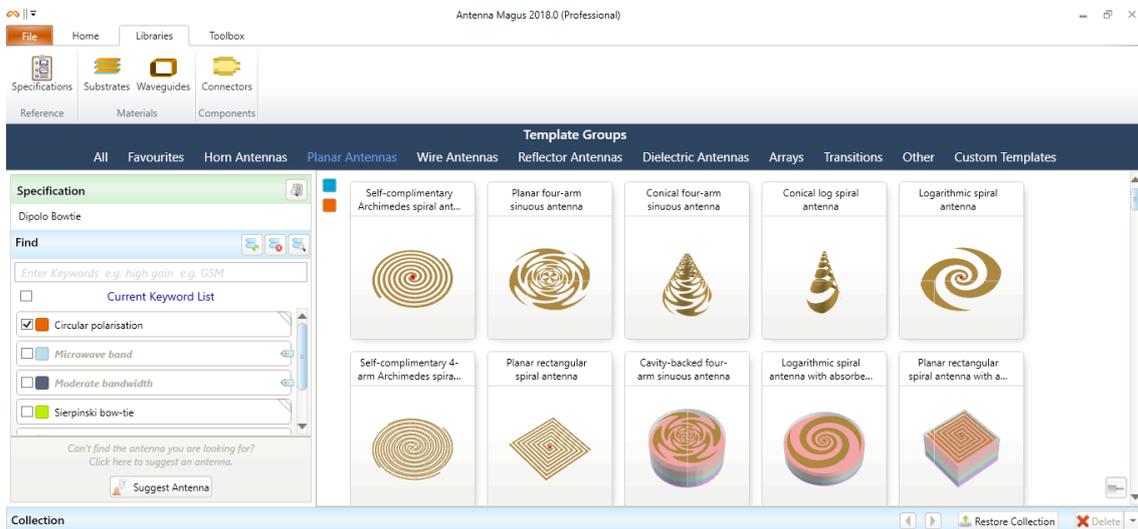


Figura 5. Interfaz de usuario del software Antenna Magus 2018

1.4 Metodología de trabajo

En este apartado se describe la metodología de trabajo llevada a cabo para desarrollar este trabajo final de máster. La gestión del proyecto, con su conveniente distribución de tareas y diagrama temporal son elementos clave para conocer cómo se ha podido llevar a cabo un proyecto de este tipo ajustándose a los tiempos requeridos para desarrollar cada tarea correctamente.

- Gestión del proyecto

Resulta de gran importancia diferenciar los conceptos de diseño y análisis de la antena, ya que el análisis forma una parte importante del diseño de la antena, pero el proceso de diseño de la antena debe ser estudiado teóricamente, planteando siempre un diseño que sea implementable en la práctica y que, en última medida, permita tener un correcto análisis y posterior optimización de la antena. La duración total estimada del trabajo ha sido de 111 días, teniendo en cuenta una jornada laboral a tiempo completo de 8 horas, se ha trabajado en este trabajo aproximadamente durante 880 horas. La correspondiente distribución de tareas, así como el diagrama temporal del diseño se muestran a continuación.

- Distribución de tareas

- Tarea 1: Búsqueda y análisis de la información

Inicialmente, la tarea principal fue la de la búsqueda y análisis de información, estimada en una duración de 30 días aproximadamente, con el fin de encontrar un diseño de antena que se adaptara a los requerimientos necesarios en el trabajo.

- Tarea 2: Estudio de las tecnologías aplicables al trabajo.

A continuación, se realizó un estudio del estado del arte de las tecnologías aplicables a las aplicaciones corporales, así como una revisión histórica y de actualidad de la tecnología de banda ultra ancha (UWB) y sus principales características. El desarrollo de esta tarea requirió una duración aproximada de 7 días.

- Tarea 3: Familiarización con el software CST MWS

La siguiente tarea consistió en la familiarización con un entorno de software sobre el que desconocía su metodología de funcionamiento, como lo es CST MWS, lo cual requirió una duración aproximada de 7 días. En este tiempo de duración se estima lo que se tardó en tener las bases suficientes para comenzar un diseño, ya que el aprendizaje a cerca del software ha sido continuo y hasta el final de este trabajo.

- Tarea 4: Modelado de la antena

En el modelado del diseño de antena escogido para el trabajo, una vez familiarizado con el entorno de trabajo, se requirió de una duración aproximada de 10 días.

- Tarea 5: Simulación y optimización de la antena

En este punto del proyecto, una vez modelada la antena en el software de simulación, la tarea de simulación del diseño de la antena con el correspondiente estudio paramétrico realizado ha abarcado gran parte del tiempo dedicado al diseño, y en consiguiente de este trabajo. Se ha estimado la duración de esta tarea en aproximadamente 35 días.

- Tarea 6: Estudio de otros diseños alternativos.

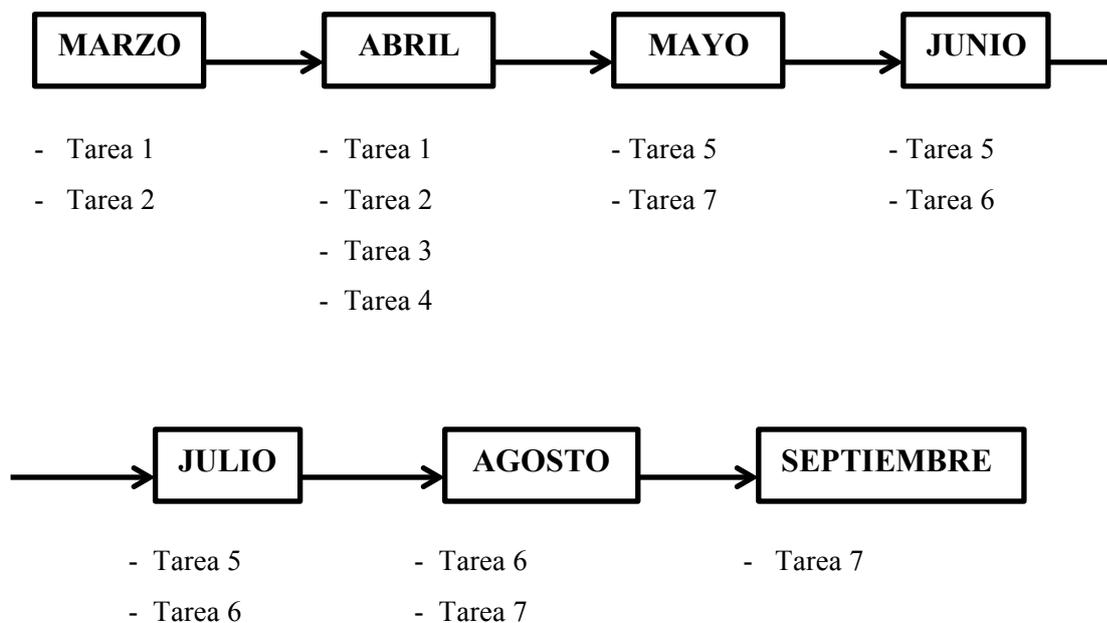
La tarea del estudio de otros diseños alternativos que pudieran trabajar bajo los mismos requerimientos ha abarcado una duración aproximada de 7 días.

- Tarea 7: Memoria de trabajo final de máster

La realización de la memoria una vez obtenido todos los resultados y realizado los estudios planteados ha abarcado una duración aproximada de 15 días.

- Diagrama temporal

Se ha realizado un diagrama temporal desglosando por meses el tiempo dedicado a cada tarea, tal y como se muestra a continuación:



Capítulo 2. Estudio del estado del arte

En este capítulo se estudia el estado actual de las aplicaciones corporales y de las diferentes tecnologías y estándares existentes de comunicación para este tipo de aplicaciones, con el fin de entender sus principales características, posibilidades, limitaciones y aplicaciones prácticas en el ámbito de las telecomunicaciones.

2.1 Tecnología para aplicaciones corporales

Las aplicaciones corporales, en el ámbito de las Telecomunicaciones y la Medicina, han supuesto un reto tecnológico que ha ido más allá de la mera adaptación de la tecnología existente para una mejora en la calidad de vida de los seres humanos. Como ya se ha mencionado en el capítulo de introducción, el progreso de cada uno de los dos ámbitos científicos casi siempre ha tenido como factor influyente la intervención del otro. Sin embargo, las aplicaciones corporales no se limitan únicamente a estos ámbitos, sino que en la actualidad se han propuesto aplicaciones en otros campos como en la seguridad personal, el militar o el deportivo [8].

Las tecnologías aplicables a las redes de área corporal son tecnologías relativamente jóvenes en el tiempo, pero que vienen a cubrir la necesidad en los sistemas de salud modernos de simplificar los mecanismos de intervención sanitaria o humanitaria, tanto en el propio hospital como remotamente. La monitorización de pacientes o de seres vivos permite simplificar la cadena de intervención y por tanto ganar en tiempo de respuesta, el factor más importante ante una necesidad de intervención. Además, se puede afirmar que son técnicas mínimamente invasivas ya que los dispositivos que se suelen utilizar pueden ser adheridos a la ropa, sobre el cuerpo humano o en el peor de los casos implantados bajo la piel, permitiendo establecer comunicaciones inalámbricas con otros dispositivos a su alrededor. Es por ello que, en la actualidad se puede afirmar que las redes de área corporal (Body Area Network , BAN) se han convertido en un área de investigación prometedora y en la que existen multitud de posibilidades conceptuales de desarrollo.

2.1.2 Clasificación de las redes de acceso inalámbricas

Resulta importante contextualizar el entorno de trabajo de este tipo de redes y cómo se clasifican dentro del conjunto de redes de acceso inalámbricas ya estandarizadas a nivel físico, es decir, por tamaño geográfico:

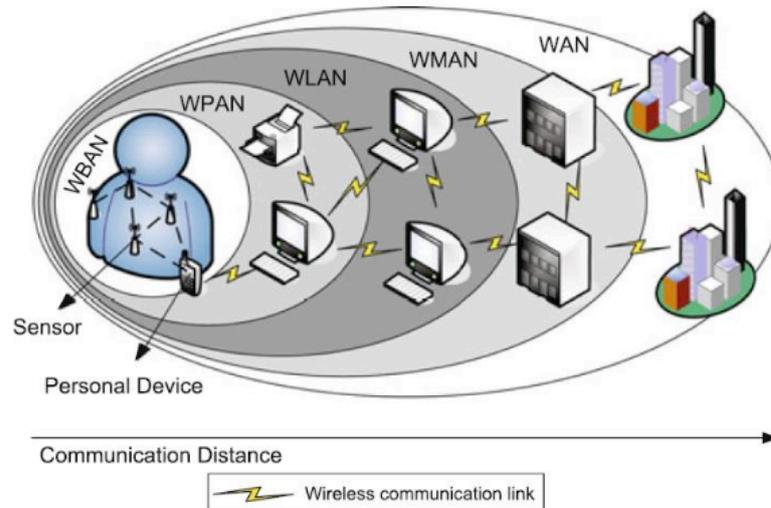


Figura 6. Clasificación de las redes de acceso inalámbricas por tamaño geográfico [Fuente: VILLEGAS MÉNDEZ, F. (2017)]

- Redes WAN (Wide Area Network) : Red de terminales que abarca regiones, países o incluso continentes.
- Redes WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) : Redes que conectan varios edificios o ciudades.
- Redes WLAN (Wireless Local Area Network): Red que conecta terminales en un área relativamente pequeña, como pueden ser habitaciones o edificios. Las principales tecnologías son Ethernet y WiFi.
- Redes WPAN (Wireless Personal Area Network): Red que conecta dispositivos personales, como pueden ser móviles, tablets y coches. Abarca distancias desde unos decenas de metros hasta cientos de metros. Las principales tecnologías son Bluetooth, ZigBee y USB.

2.1.3 Redes de área corporal inalámbricas (WBAN)

De una manera más formal, se ha definido una red de área corporal (Body Area Network , BAN) como una red diseñada para la comunicación de distintos dispositivos de baja potencia en el cuerpo humano, los cuales pueden estar adheridos o propiamente implantados en el mismo. El continuo desarrollo de la microelectrónica, a través de dispositivos electrónicos cada vez más compactos, sumado al auge de las comunicaciones inalámbricas en las últimas décadas han propiciado un nuevo enfoque de las redes BAN: las redes inalámbricas de área corporal (Wireless Body Area Network, WBAN). Este tipo de redes se pueden definir como una colección de nodos de baja potencia, miniaturizados, capaces de establecer un enlace inalámbrico monitorizando las funciones del cuerpo humano y su entorno [10]. Las aplicaciones que tienen este tipo de tecnología son muy variadas: monitorización remota de la salud y de la condición física, deportes y actividades militares, dotar de seguridad en el intercambio de información personal, entre otras muchas más.

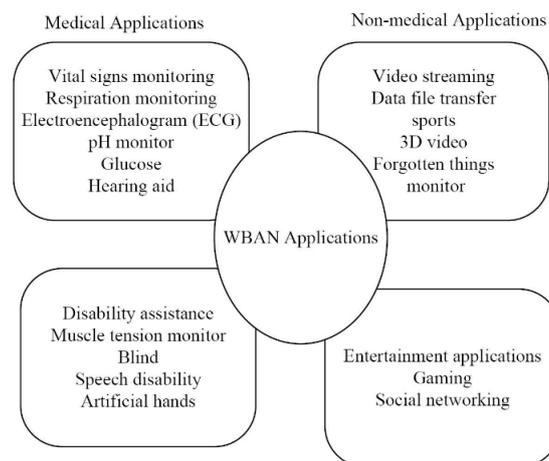


Figura 7. Aplicaciones de las WBAN [Fuente: KWAK, K.S, ULLAH, S., ULLAH, N. (2011)]

Una red WBAN genérica está compuesta por sensores inalámbricos que pueden estar conectados entre sí, y que a su vez transmiten la información a un dispositivo personal, todo ello sobre distancias no superiores a los 2 metros, y donde éste a su vez actúa de nodo pasarela para permitir la conexión con otras redes para la gestión, administración y almacenamiento de datos. Este nodo pasarela recibe el nombre de Servidor Personal (Personal Server, PS) , Pasarela Corporal (Body Gateway, B/GW) o Unidad de Control Corporal (Body Control Unit, BCU).

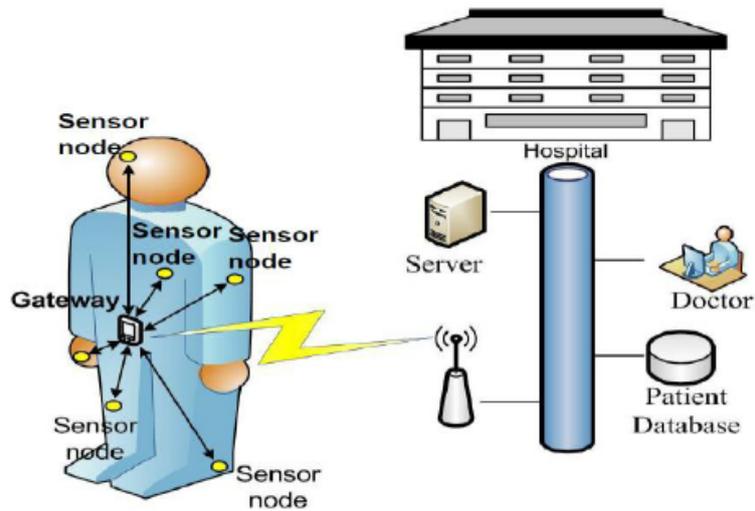


Figura 8 . Arquitectura de una red inalámbrica de área corporal en un sistema sanitario [JAMTHE A., AGRAWAL, D. (2013)].

Las redes WBAN, cuyo objetivo inicial era la orientación médica, y que se engloban dentro de las Redes de Área Personal (WPAN), solucionan gran parte de los problemas existentes en las WPAN, como son los requisitos de baja potencia, velocidad de datos e interferencia que el grupo de trabajo del estándar IEEE 802.15.6 a su vez limita en la comunicación de dispositivos [10]. Es este estándar, a través de su grupo de trabajo IEEE 802.15.6 el encargado de establecer las especificaciones para este tipo de redes y sobre el cual se presentarán sus principales características en el apartado 2.1.5. Así pues, cada tipo de red tiene asociada su propia tecnología, definida por el IEEE.

2.1.4 Arquitectura de comunicación de las WBAN

Es conveniente tener en cuenta en este tipo de comunicación los distintos niveles de comunicación existentes en este tipo de redes, con el fin de conocer cómo se estructura y clasifica el tráfico de comunicación entre dispositivos en la red. La arquitectura de comunicación para las redes de área corporal inalámbrica se clasifican en tres niveles de comunicación:

- Nivel 1: Comunicación Intra-WBAN

La comunicación Intra-WBAN viene a referirse al tipo de comunicaciones entre dispositivos adheridos o implantados en el cuerpo humano, y otros que se pudieran encontrar sobre un alcance de no más de 2 metros de distancia. La comunicación entre dispositivos se puede realizar entre los propios sensores o entre los sensores y el dispositivo de control corporal (BCU).

- Nivel 2: Comunicación Inter-WBAN

La comunicación Inter-WBAN viene a referirse al tipo de comunicación entre el dispositivo de control corporal y otros puntos de acceso (Access Points , AP) disponibles en la infraestructura de red. Esta misma red permite el establecimiento de comunicación con otras redes de mayor rango que permitan dotar de conexión a Internet. La comunicación entre dispositivos se puede realizar entre el dispositivo de control corporal (BCU) y otros puntos de acceso en la red (AP).

Este nivel de comunicación soporta tecnologías de comunicación como WiFi, Bluetooth o Zigbee, entre otras, y pertenece al rango de redes de área personal inalámbricas (WPAN) que como se ha comentado anteriormente engloban las redes de área corporal inalámbricas (WBAN), pero que se escapan del objeto de análisis de este trabajo.

- Nivel 3: Comunicación Beyond-WBAN

La comunicación “Beyond-WBAN”, o en su traducción al castellano, “más allá de las WBAN”, definen un nivel de comunicación que abarca áreas metropolitanas. Este nivel de comunicación permite la conexión de los anteriores niveles de comunicación (1 y 2) al nivel 3, y éste a su vez sirve de pasarela para la conexión a posibles redes celulares de telefonía o de Internet presentes en la infraestructura de red.

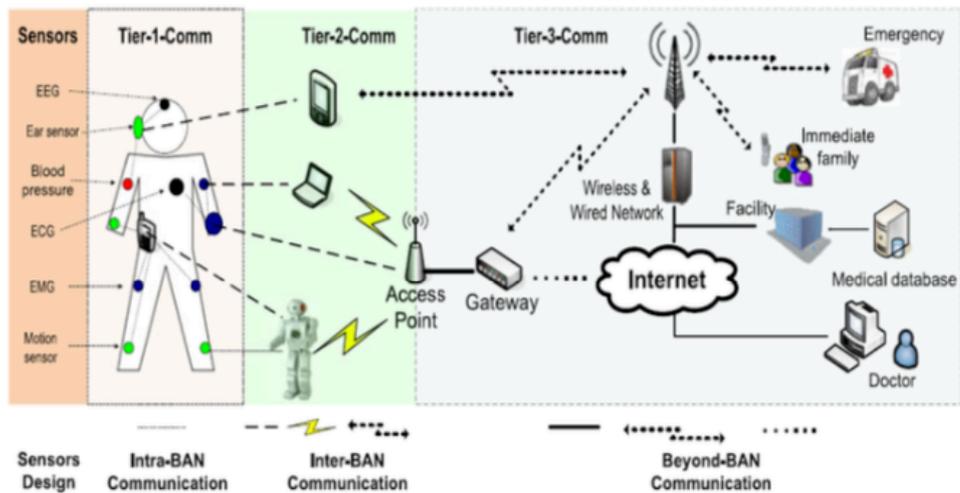


Figura 9. Arquitectura de comunicación por niveles de las redes de área corporal inalámbricas. [Fuente: MIRALLES GÓMEZ, E. (2017)]

2.1.5 Revisión del estándar IEEE 802.15.6

Este apartado tiene como objetivo describir las principales características del estándar IEEE 802.15.6, que como ya se ha mencionado anteriormente, estandariza las redes de área corporal inalámbricas (WBAN). En el año 2007, IEEE 802 definió un grupo de trabajo, en concreto el grupo de trabajo 6 (Team Group 6, TG6), que se dedicó a sentar las bases de lo que acabaría siendo la estandarización de tecnología para las WBAN. El estándar 802.15.6 fue aprobado en febrero del año 2012 y publicado a finales de ese mismo año [12]. En el mismo se define una nueva capa de control de acceso al medio (Medium Access Control , MAC) a nivel de capa de enlace, que soporta diversos tipos de capas a nivel físico. La selección de bandas de frecuencia de trabajo, que corresponden a un nivel de capa física de comunicación, fue uno de los grandes problemas que se plantearon en el inicio debido principalmente a la estandarización en bandas de frecuencia tan diversas existente en los países mundiales. En la figura 10 se muestran las bandas de frecuencia de trabajo disponibles en distintos países a nivel mundial.

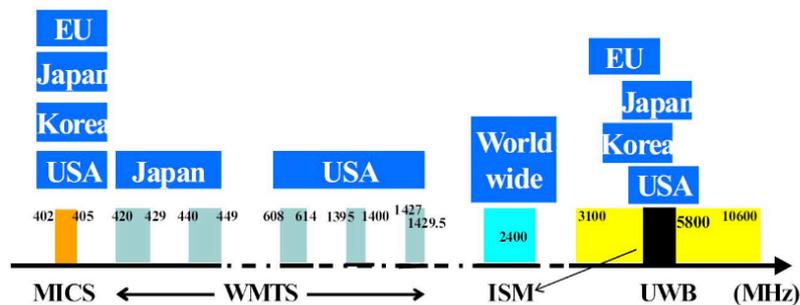


Figura 10 . Bandas de frecuencia de trabajo para WBAN [Fuente: KWAK, K.S, ULLAH, S., ULLAH, N. (2011)]

A nivel mundial, la banda ISM (Industrial Science and Medical) de 2.4 GHz se encuentra disponible para aplicaciones de tasas binarias altas, como se requieren en las WBAN. Sin embargo, su principal problema es la interferencia en frecuencia con otras tecnologías como Bluetooth (IEEE 802.15.1) , Zigbee (IEEE 802.15.4) o WiFi (IEEE 802.11). Es por ello que una de las bandas de frecuencias de trabajo objetivo se plantea en la banda por encima de los 3.1 GHz hasta los 10.6 GHz, capaces de soportar aplicaciones con requerimientos de tasas binarias altas, exceptuando de este rango la banda ISM de 5.4 GHz de libre espectro que produciría igualmente interferencias con otras tecnologías.

- Características principales

A nivel de capa física, se definen tres tipos de capas que se diferencian básicamente, entre otros parámetros, en el rango de frecuencias donde se opera. Por lo tanto, el uso de una capa u otro dependerá de los requerimientos de diseño que se planteen en cada aplicación.

1. Capa física de banda estrecha (Narrow Band , NB PHY):

La capa física NB opera hasta en 7 bandas de frecuencia diferentes, las bandas de operación son: 402-405 MHz, 420-450 MHz, 863-870 MHz, 902-928 MHz, 950-958 MHz, 2360-2400 MHz y 2400-2483.5 MHz. Se dispone de un total de 230 canales físicos para esta capa física.

2. Capa física de banda ultra ancha (Ultra Wide Band , UWB PHY):

La capa física UWB opera en dos tipos de banda de frecuencia diferentes: banda alta y banda baja. Cada banda es dividida en canales, donde cada canal presenta un ancho de banda de 499.2 MHz. La banda baja, correspondiente al rango aproximado desde 3.25 GHz hasta 4.75 GHz está dividida en 3 canales (1-3). El canal 2 es un canal de uso obligatorio cuya frecuencia central es 3.99 GHz. La banda alta, correspondiente al rango aproximado desde 6.6 GHz hasta 10.25 GHz está dividida en 8 canales (4-11). El canal 7 es un canal de uso obligatorio cuya frecuencia central es 7.98 GHz. El resto de canales se considera de uso opcional. Un dispositivo UWB debe ser capaz de soportar al menos uno de los canales obligatorios [10].

3. Capa física de comunicaciones del cuerpo humano (Human Body Communications , HBC PHY):

La capa física HBC opera en dos tipos de bandas centradas a la frecuencia de 16 MHz y de 27 MHz con un ancho de banda de 4 MHz en cada banda. A diferencia de las otras dos capas físicas, la capa física HBC establece una forma de comunicación a través de los tejidos humanos, como el músculo, piel o hueso, estableciendo un canal de comunicaciones a través de los mismos. Por lo tanto, esta capa física basa su principio de comunicación en tecnología de comunicación a través de campo eléctrico (Electric Field Communications , EFC).

Un ejemplo de este tipo de comunicación sería a través de dos electrodos adheridos a la piel, el campo eléctrico generado por el transmisor crea una distribución de carga en la superficie del cuerpo, la cual genera campo eléctrico cerca del mismo. Los receptores en el alcance del campo generado detectan este voltaje generado entre los electrodos adheridos y reciben la señal de datos del transmisor[13].

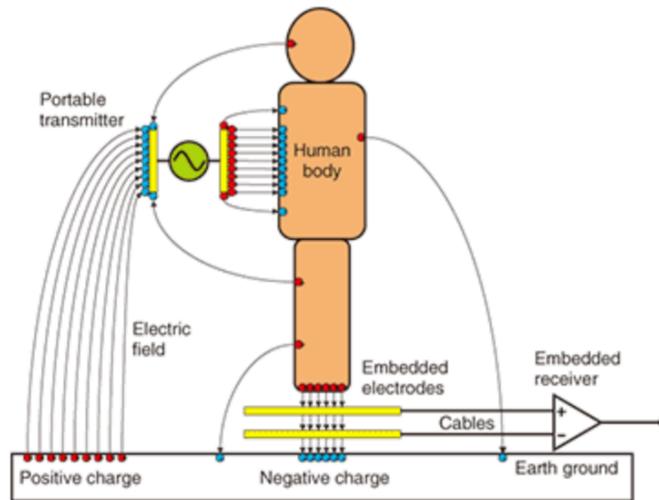


Figura 11. Modelo de comunicación de campo eléctrico (EFC) en sistemas de comunicación de campo cercano [Fuente: SASAKI, A., KAWANO, R., ISHIHARA, T., SHINAGAWA, M. (2010).].

El estándar soporta los tres tipos de capas operacionalmente, dos de ellas son obligatorias (UWB PHY y HBC PHY) y la otra opcional (NB PHY). Los esquemas de modulación y estructura de tramas físicas en cada capa, así como el estudio a nivel de la capa de control de acceso al medio (MAC) no son objeto de consideración y por tanto de aplicación en este trabajo.

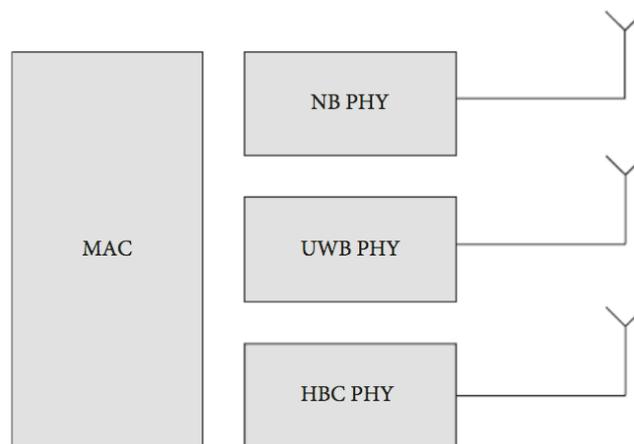


Figura 12. Estructura de las capas físicas y de enlace en el estándar IEEE 802.11.6 [Fuente: ULLAH, S., MOHAISEN, M., ALNUEM, M.A. (2013)]

En relación con la seguridad en la comunicación, el estándar define tres niveles de seguridad:

- Nivel 1. Comunicación no segura: En este caso los datos son transmitidos en tramas sin mecanismos de autenticación de datos, confidencialidad e integridad.

- Nivel 2. Sólo autenticación: En este caso los datos son transmitidos en tramas con autenticación, pero sin encriptación en los datos.

- Nivel 3. Autenticación y encriptación: En este caso los datos son transmitidos en tramas con autenticación y encriptación de los datos.

2.2 Tecnología Ultra Wide Band (UWB)

En este apartado se realizará una introducción sobre la tecnología Ultra Wide Band, dando un punto de vista global sobre la tecnología y enfatizando en las principales características que presenta, así como una breve revisión histórica de la tecnología.

2.2.1 Revisión histórica de la tecnología

Antes de 1900, las tecnologías inalámbricas empezaron comportándose como tecnologías UWB, donde se generaban señales en el transmisor de gran ancho de banda pero donde el receptor no podía obtener ninguna ventaja de la ganancia obtenida en el ensanchado de espectro. Entre 1900 y 1940, las tecnologías inalámbricas pasaron a ser sintonizables, es decir, apareció el procesamiento analógico a través de filtros, resonadores, y se puede decir que se separaron los servicios por longitud de onda, comenzó la era de la tecnología inalámbrica a través de modulaciones de amplitud y de frecuencia. Fue entre 1970 y la década de los 90 cuando se empezaron a aplicar técnicas digitales a la tecnología UWB, permitiendo la obtención viable de ganancia de ensanchado en el ancho de banda [14]. En febrero del año 2002, la Federal Communications Commission (FCC), agencia estatal independiente de los EEUU bajo responsabilidad directa del Congreso, emitió el primer “Report and Order for UWB Technology” donde autorizaba el desarrollo comercial de la tecnología UWB para usos limitados. Por ahora, los dispositivos para comunicaciones UWB están restringidos a operar en las bandas de frecuencia entre 3.1 y 10.6 GHz. Este fue, sin duda, el primer gran paso que la tecnología UWB recorrió para desarrollar su potencial. En la actualidad, existen grupos de trabajo, como el IEEE 802.15.3a/4a trabajando en la futura estandarización de la tecnología.

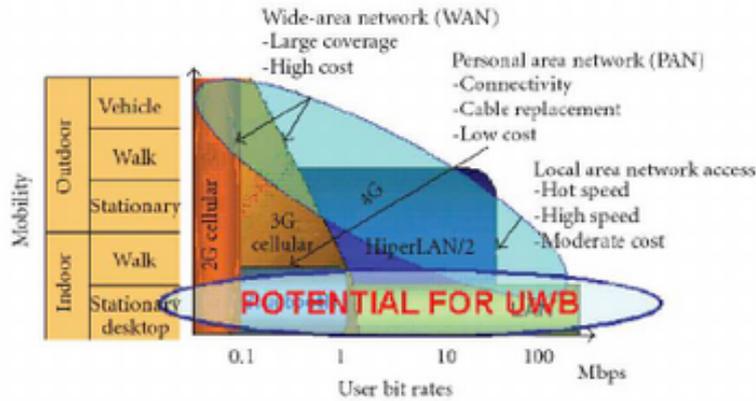
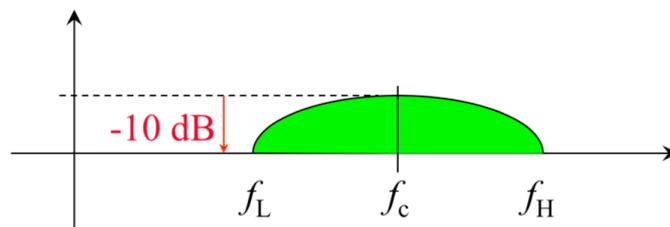


Figura 13. Estimación de alcance de los futuros sistemas de comunicaciones UWB [Fuente: GARCÍA PARDO C., MORENO CANO, M.V., MOLINA GARCÍA PARDO, J.M, RODRÍGUEZ, J.V, PASCUAL GARCÍA J., JUAN LLÁCER, L. (2015)]

2.2.2 Características principales

La tecnología UWB forma parte del área de las redes de área personal inalámbricas (Wireless Personal Area Network , WPAN), que incluyen redes inalámbricas de corto alcance que abarcan un rango de algunas decenas de metros, y hace uso de un gran ancho de banda bajo la transmisión de pulsos cortos con una energía relativamente pequeña. De una manera más formal, según la definición adoptada por la FCC (Federal Communications Commission): “ *un dispositivo UWB es cualquier dispositivo donde la señal emitida tiene un ancho de banda fraccional mayor del 20 % u ocupa al menos 500 MHz de espectro para frecuencias de operación cercanas a los 3.1 GHz.*”[7]



$$\frac{f_H - f_L}{f_c} > 0.2 \quad \text{and} \quad f_H - f_L > 500\text{MHz}$$

Figura 14. Definición gráfica de los requisitos adoptados por la FCC para la tecnología UWB [Fuente: MECKLENBRÄUKER, C. (2013)]

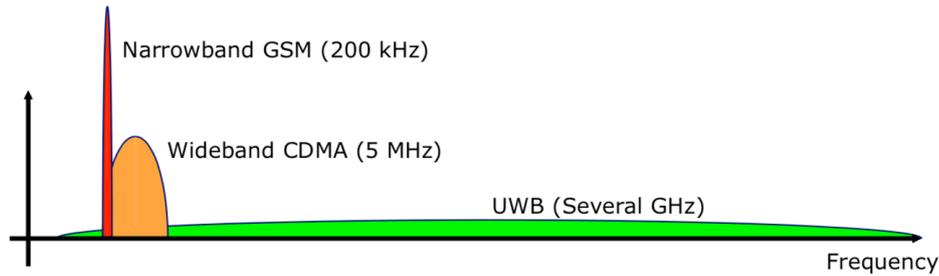


Figura 15. Comparación del ancho de banda en frecuencia de los pulsos de diferentes tecnologías de comunicación.
[Fuente: MECKLENBRÄUKER, C. (2013).]

La señal UWB tiene forma de espectro ensanchado a lo largo del eje de frecuencias, véase la figura 15, donde la energía de radiofrecuencia es ensanchada sobre el espectro. Dichas señales pueden ser diseñadas de manera que puedan parecer ruido aleatorio imperceptible para sistemas de radio convencionales.

Desde un punto de vista teórico, se pretende hacer un breve estudio de la formulación del límite de Shannon, el cual establece sobre un ancho de banda determinado, la capacidad máxima de datos transmitibles por segundo en un canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) de comunicaciones, el cuál es comúnmente conocido en el ámbito tecnológico, para una transmisión correcta y sin errores, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 C &= B * \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{AWGN}^2} \right) \\
 &= B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \\
 &= B * \log_2 (1 + SNR)
 \end{aligned}$$

donde: C= Capacidad (bps), B = Ancho de Banda (Hz), σ_x^2 : Varianza de la señal, σ_{AWGN}^2 : Varianza del ruido, S: Nivel de potencia de señal, N_0 = Nivel de potencia de ruido
SNR: Relación señal-ruido [14].

En este caso, como ya se ha comentado anteriormente, se hace un uso de un gran ancho de banda, el cuál tiende a infinito en términos matemáticos. Buscando dicho límite sobre la anterior formulación se encuentra la capacidad máxima teórica de transmisión, la cual queda patente a través de la siguiente expresión:

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{1}{\ln 2} \frac{S}{N_o}$$

Debido al alto ancho de banda requerido, la eficiencia en potencia es un objetivo primario en el diseño, tanto para el transmisor como para el receptor. Por ello, la transmisión debe ser optimizada para conseguir la potencia máxima permitida, aplicando técnicas de predistorsión, tanto analógicas como digitales, y un diseño de antena con ganancia lo más constante posible y en la dirección de máxima radiación [14]. Además, dicho requerimiento puede producir interferencias en frecuencia con otros sistemas de comunicación ya existentes, por ello existen grupos de trabajo definidos y regulados que trabajan en la futura estandarización de las características requeridas en la tecnología, como son los grupos de trabajo IEEE 802.15.3a / 4a.

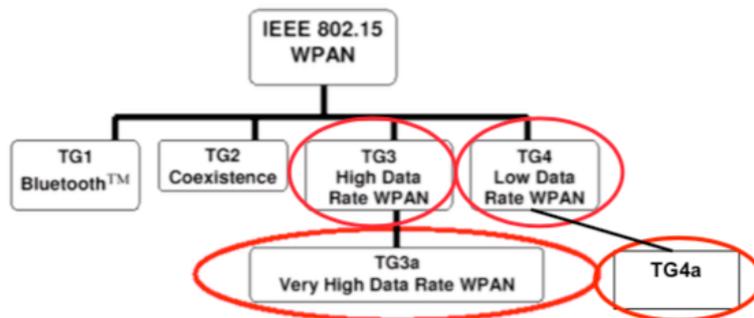


Figura 16. Esquema sobre los grupos de trabajo existentes en el estándar [Fuente: MECKLENBRÄUKER, C. (2013).

Entre las principales ventajas que presenta esta tecnología se encuentra su bajo consumo, su bajo coste y su gran capacidad de transmisión debido al gran ancho de banda disponible, lo que permite un potencial uso en aplicaciones de streaming de vídeo, hecho que se aprovecha en este trabajo para recoger los datos multimedia obtenidos de la cápsula endoscópica. Además, presenta grandes prestaciones en aplicaciones de baja movilidad por lo que se presenta como tecnología potencialmente en auge en aplicaciones de entornos indoor.

Entre otras muchas de las modernas aplicaciones de la tecnología UWB se encuentran los sistemas de transporte inteligente (ITS): donde se pretende mejorar la seguridad del tráfico evitando colisiones, llamadas automáticas a vehículos de emergencia, asistencia en el cambio de carril, en el cambio brusco de velocidad por variación en los semáforos y demás elementos, entre otras utilidades [16].

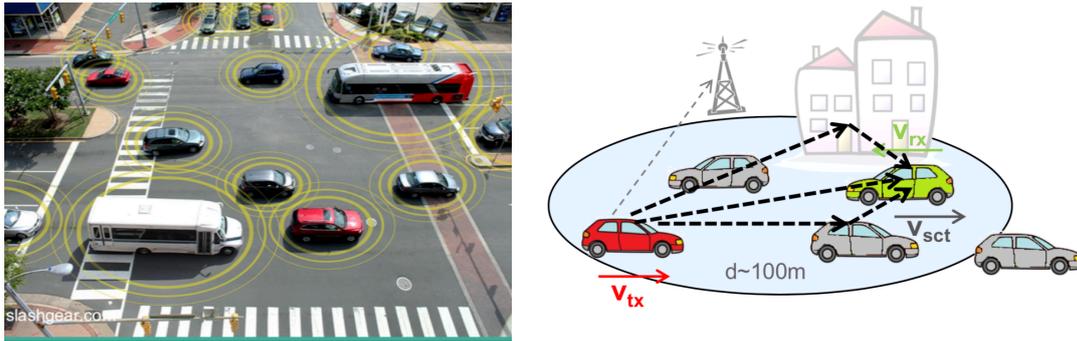


Figura 17 . Escenarios de comunicación para sistemas de transporte inteligente (ITS) [Fuente: MECKLENBRÄUKER, C. , ZEMEN, T. (2013)]

Capítulo 3. Metodología de diseño de la antena

En este capítulo se desarrolla la metodología realizada para abordar el diseño de la antena, se describe inicialmente la propuesta de diseño planteada en este trabajo fundamentando teóricamente los principales conceptos tenidos en cuenta en el diseño, se continúa describiendo la estructura y la red de alimentación diseñada para la antena. Seguidamente, se analizan los resultados obtenidos así como las principales mejoras planteadas en el desarrollo del diseño.

3.1 Propuesta de diseño de la antena

Se propone el diseño de una antena que trabaje con polarización circular sobre tecnología planar, debido principalmente a la idoneidad de esta polarización en los entornos modernos de comunicaciones inalámbricas, permitiendo la reducción de efectos multicamino y otorgando flexibilidad respecto a los ángulos de orientación entre el dispositivo transmisor y el receptor. Las principales técnicas de generación de polarización circular son a través de un elemento radiante y un correcto diseño de la red de alimentación, conceptos que son abordados en los siguientes apartados. En lo que respecta a la estructura de los elementos radiantes, véase la figura 25, existe en la literatura actual diversidad de tipos de estructuras que pueden cumplir requerimientos de ancho de banda y de polarización circular sobre un perfil plano, como son las estructuras de tipo espiral, tipo anillo o tipo parche [17]. En este caso se ha optado por un diseño de un elemento radiante tipo parche con forma de doble dipolo cruzado, o también conocido en el ámbito de las telecomunicaciones como dipolo cruzado en pajarita (“bow-tie” en su traducción al inglés). Los principales motivos de la elección han sido su baja complejidad de diseño, y su correcta respuesta en frecuencia para aplicaciones de banda ancha como la propuesta en el trabajo. En cuanto a los elementos que forman la antena, además de los elementos radiantes, existen variedad de substratos para el diseño de antenas en tecnología planar, constantes dieléctricas más bajas *a priori* proporcionan mejor ancho de banda y eficiencia, pero estas constantes dieléctricas se corresponden con una altura de substrato más alta [18], buscando por tanto un tipo de substrato que se adapte a los requerimientos propios del diseño.

Otro de los requerimientos que se plantean en el diseño, y por ende, en la práctica, es el de tener un diagrama de radiación unidireccional, ya que el *modus operandi* de la antena va a ser el de estar en comunicación con la cápsula endoscópica situada en el interior del cuerpo humano. Es por ello que, para evitar radiación fuera del rango de actuación y ganar por tanto en eficiencia de radiación se plantea un diseño de antena con un diagrama radiación unidireccional. El método escogido para ello es el de utilizar un plano reflector, o plano de masa, en este caso situado a una distancia $d = \lambda/4$, véase el apartado 3.2.2, siendo la frecuencia central 4 GHz. Para este diseño se propone un margen de frecuencias de trabajo inicial entre 3 y 5 GHz, margen más que suficiente para cumplir con los objetivos planteados.

En resumen, los requerimientos planteados en el diseño son los siguientes:

Parámetro	Requerimiento
Diagrama de radiación	Unidireccional
Polarización	Circular
Ancho de banda	Mínimo 500 MHz (Ancho de banda UWB)
Frecuencia central	4 GHz
Tecnología de impresión	Planar (2D)

Tabla 1. Requerimientos de diseño propuestos para la antena.

3.2 Principales fundamentos teóricos del diseño

En este apartado se desarrollan los principales fundamentos teóricos en los que se ha basado este diseño para llegar a cabo los requerimientos planteados en la propuesta. Los conceptos teóricos que se presentan forman parte del estudio de parámetros de antenas y son llevados a la práctica para desarrollar este diseño.

3.2.1 Ondas con polarización circular

Desde un punto de vista teórico, el campo electromagnético es una magnitud vectorial que además de variar con el espacio, varía con el tiempo. Por lo tanto, se puede afirmar que la polarización de una onda describe la variación temporal del campo eléctrico sobre una dirección dada [19]. Generalmente, para tener una onda con polarización circular se excitan dos modos ortogonales con similar amplitud ($E_x = E_y$, siendo E_x y E_y las amplitudes máximas de la componentes X e Y respectivamente), pero con un desfase de 90° , es decir, la diferencia de fase entre ambas componentes es:

$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \pm \left(\frac{1}{2} + 2n \right) \pi, n = 0, 1, 2 \dots$$

- Cuando $\Delta\varphi = -\pi/2$, la polarización es circular a derechas o dextrógira.
- Cuando $\Delta\varphi = +\pi/2$, la polarización es circular a izquierdas o levógira.

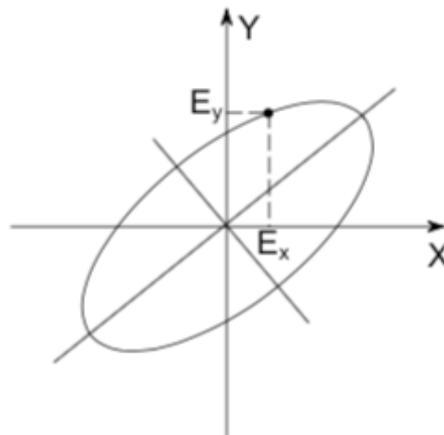


Figura 18. Proyección del vector de campo eléctrico en el plano XY, también denominada elipse de polarización
[Fuente: . FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009)

Se define la relación axial de una onda como la relación entre los ejes mayor y menor de la elipse de polarización, véase la figura 18, concepto que sirve para comprobar la veracidad de la polarización. La expresión matemática de la relación axial es, por tanto:

$$RA = \left| \frac{E_{eje\ mayor}}{E_{eje\ menor}} \right|$$

Dicha relación toma valores comprendidos entre 1 e infinito, es decir, si la relación axial es igual a la unidad, la amplitud de los ejes mayor y menor de campo eléctrico son iguales y la onda está polarizada circularmente, con cualquier otra relación de amplitud la onda estará polarizada elípticamente.

Es práctica común expresar la relación axial en dB como:

$$RA_{dB} = 20 \log_{10}(RA)$$

3.2.2 Diagrama de radiación unidireccional

El diagrama de radiación de una antena es el parámetro más característico de la misma, y se puede definir como la función que proporciona la magnitud del campo para cada dirección del espacio [19]. El diagrama se obtiene tomando la magnitud de campo y normalizándola respecto al máximo del mismo, es decir:

$$d_N(\theta, \Phi) = \left| \frac{\vec{E}}{E_{max}} \right|$$

Es práctica común expresar el diagrama de radiación en dB como:

$$Diagrama (dB) = 20 \log_{10}(d_N(\theta, \Phi))$$

Desde un punto de vista teórico, y haciendo uso de la teoría de las imágenes para los casos de antenas en hilo, como dipolos paralelos a un plano de masa, caso práctico que va a ser el objeto de diseño de este proyecto, se puede afirmar que el efecto de las corrientes y cargas inducidas en planos de masa se puede analizar sustituyendo el plano de masa por las cargas y corrientes equivalentes. Así pues, la imagen de una carga positiva frente al plano de masa es una carga negativa situada simétricamente opuesta [20]. Una corriente elemental es sustituible por dos cargas en los extremos, como se puede observar en la figura 19.

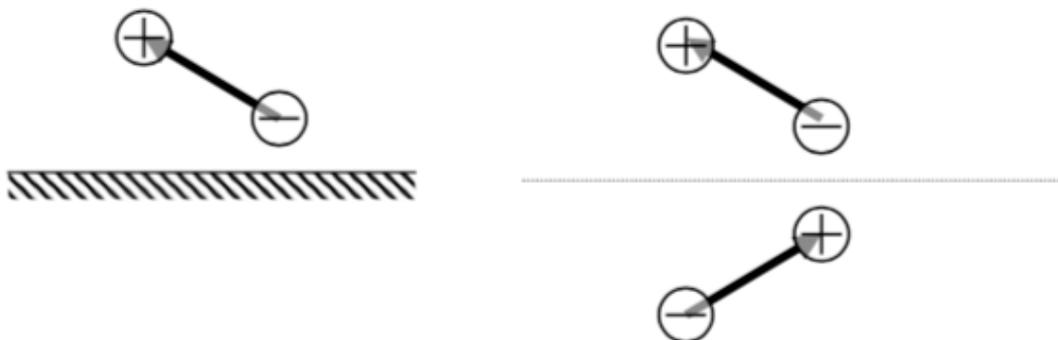


Figura 19. Representación de una corriente elemental frente a un plano de masa y su correspondiente corriente elemental imagen [Fuente: FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009)].

Analizando concretamente el caso de un plano de masa en paralelo sobre los dipolos, véase la figura 20, y teniendo en cuenta, como se ha comentado anteriormente, que la imagen del dipolo tendrá corrientes en sentido contrario, la proximidad de una antena a un cuerpo conductor puede modificar su impedancia debido a las reflexiones de campo producido por ella misma [20]. Para tener en cuenta todos estos efectos, se definen dos conceptos como son la impedancia mutua y el de autoimpedancia de la antena.

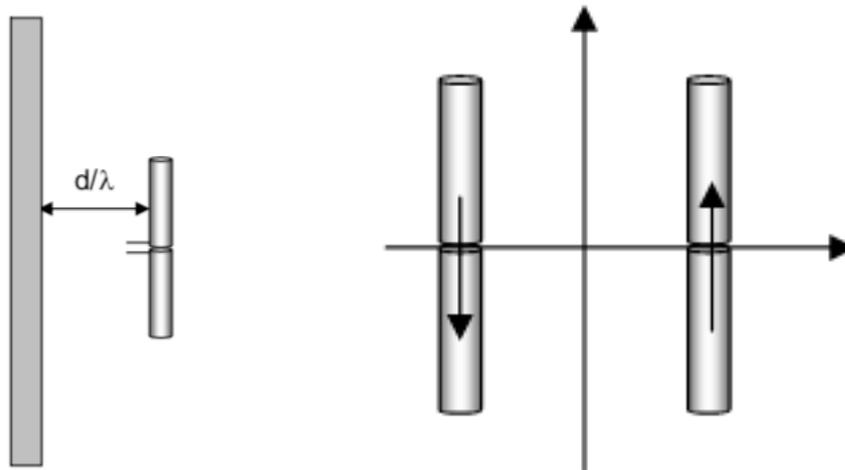


Figura 20. Representación de un dipolo paralelo a un plano de masa y su correspondiente dipolo imagen. [Fuente: FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009)].

De la anterior reflexión, se puede deducir que la distancia de separación entre el dipolo y su dipolo imagen, es decir, 2 veces la distancia de separación (d), tendrá un efecto en la impedancia de entrada de cada puerto, así como en el campo próximo creado por una antena sobre la otra, dado que las antenas están muy próximas. Suponiendo el caso de la figura 18, donde tenemos un dipolo paralelo al plano de masa, si se analizan las ecuaciones de relación de tensiones y corrientes de cada puerto se puede encontrar que:

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

El parámetro Z_{11} , se llama autoimpedancia, y representa la impedancia de entrada cuando la antena se encuentra aislada, es decir $I_2 = 0$, siendo por tanto:

$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1}$$

El parámetro Z_{21} se llama impedancia mutua, y representa la tensión en circuito abierto en la antena 1 cuando la antena 2 se alimenta con corriente I_2 , es decir, $I_1 = 0$, y es definida como:

$$Z_{12} = \frac{V_1}{I_2}$$

Particularizando en este caso, donde $I_2 = -I_1$, se puede encontrar que:

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} - Z_{21}$$

Como ya se ha comentado, la impedancia de entrada del dipolo depende de la separación entre dipolo y dipolo imagen. Por lo tanto:

$$Z_{in} = (Z_{11} - Z_{21}(2d))$$

La influencia del plano de masa sobre los dipolos, es decir el parámetro Z_{21} , depende de la distancia del plano de masa y define el acoplo mutuo entre dipolos paralelos a un plano de masa. El efecto mutuo en función de la separación de dos dipolos comunes en paralelo se muestra en la figura 21, donde se puede observar la influencia mutua en función de la separación. Igualmente, se pueden observar las diferencias existentes con el caso de dos dipolos colineales entre sí, como se muestra en la figura 22, donde la influencia mutua es mínima debido principalmente al nulo de radiación del dipolo en sus extremos.

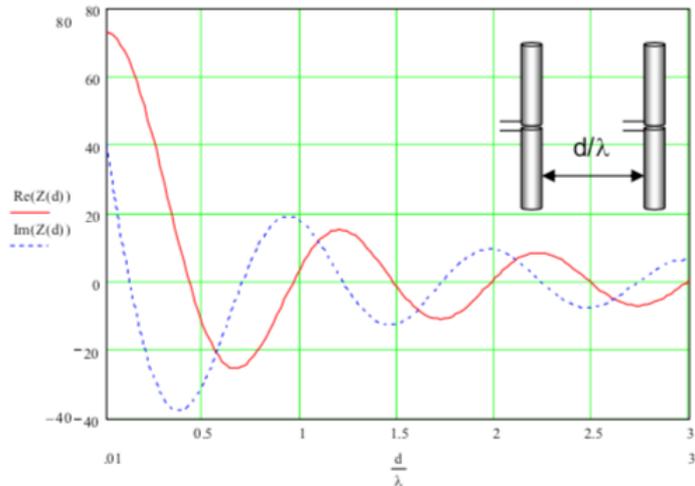


Figura 21. Influencia mutua entre dos dipolos paralelos entre sí en función de la separación entre los mismos.[Fuente: FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009)]

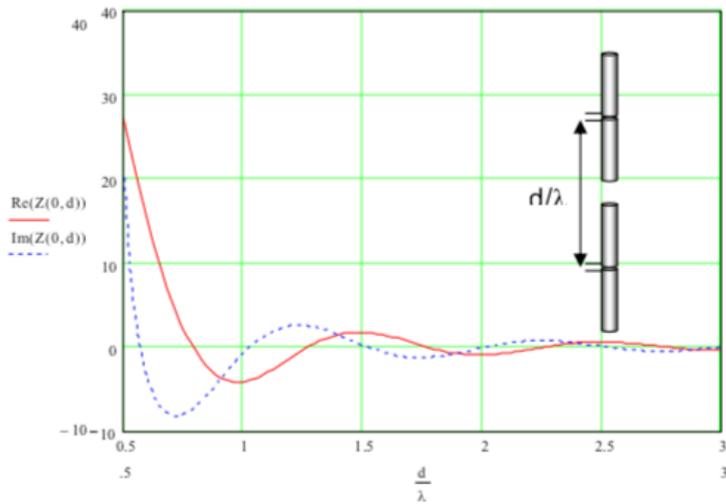


Figura 22. Influencia mutua entre dos dipolos colineales entre sí en función de la separación entre los mismos [Fuente: FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009)].

En nuestro caso de diseño, para encontrar la separación óptima entre dipolos se analiza el problema como una agrupación de dos dipolos, alimentados con amplitud opuesta y misma fase. Ambos radiadores producen ondas esféricas que se suman en interferencia constructiva o destructiva en determinadas direcciones. Por definición, una onda esférica es aquella que se propaga a la misma velocidad en todas direcciones. Su principal característica es que sus frentes de ondas son esferas concéntricas, cuyo centro coincide normalmente con la posición de la fuente de la perturbación en todas las direcciones [21].

Por lo tanto, se define la amplitud total de la onda progresiva como:

$$\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} - \frac{e^{-jkR_2}}{R_2}$$

En una situación de campo lejano, donde $R \gg \lambda$, suponiendo que el primer radiador se sitúa en el origen de coordenadas, la diferencia de camino recorrido por ambas ondas será:

$$R_1 - R_2 = d \cos \theta$$

La amplitud total de la señal se podrá reescribir como el producto de una onda esférica y un factor de interferencia, es decir:

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - e^{jkd \cos \theta}) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - e^{jkd (R_1 - R_2)})$$

De esta expresión se puede deducir que:

1. Si la separación entre ambos radiadores es nula, no se producirá ningún desfase entre ambos y la señal será radiada isotrópicamente, como se puede observar en el diagrama de radiación de la figura 23.

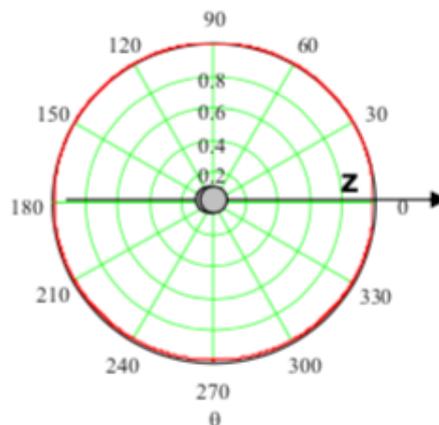


Figura 23. Diagrama de radiación en coordenadas polares [Fuente: FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009)]

2. Si la separación entre ambos radiadores es $\lambda/2$, se producen máximos de radiación en el eje de agrupación, produciéndose interferencia destructiva en el ángulo en que ambas señales están en oposición de fase, lo que sucede para la dirección que forma un ángulo de 180° con el eje de agrupación.

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (-1)) = 2 * \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}, \text{ en la dirección } \theta = 0.$$

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (0)) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}, \text{ en la dirección } \theta = 90^\circ$$

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (1)) = 0, \text{ en la dirección } \theta = 180^\circ.$$

3. Si la separación entre ambos radiadores es λ , se producirá un máximo en la dirección perpendicular a sus posiciones, obteniendo un nulo en la dirección de agrupación, ya que las señales se suman en oposición de fase, es decir:

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (1)) = 0, \text{ en la dirección } \theta = 0.$$

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (0)) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}, \text{ en la dirección } \theta = 90^\circ$$

4. Si la separación entre ambos radiadores es $\lambda/4$, las ondas de cada radiador se suman en dirección positiva del eje de agrupación en oposición de fase, y en dirección negativa del eje de agrupación en fase.

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (j)) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} - j \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}, \text{ en la dirección } \theta = 0.$$

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (0)) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}, \text{ en la dirección } \theta = 90^\circ$$

$$\frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (1 - (-j)) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} + j \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}, \text{ en la dirección } \theta = 180^\circ.$$

Se puede concluir que: para distancias de separación cercanas o iguales a $\lambda/2$, el diagrama de radiación se comportará como unidireccional sobre el eje de agrupación, conclusión teórica que aplicamos al diseño de la antena para conseguir un diagrama de radiación unidireccional.

3.3 Estructura de la antena

La configuración propuesta para la antena de polarización circular con un diagrama de radiación unidireccional se muestra en la figura 24. Los elementos que la componen son los siguientes:

- Substrato Rogers 4003C con forma rectangular, de tamaño 71x71 mm con una altura $h = 0.813$ mm, permitividad relativa (ϵ_r) de 3.55 y con una tangente de pérdidas ($\tan \delta$) de 0.0021 para la frecuencia de 4 GHz.
- 4 parches de igual volumen situados sobre el substrato con rotación progresiva de 90° .
- Plano reflector situado a una distancia $d \approx \lambda_{eff}/4 = 10$ mm.
- 4 pines cilíndricos de diámetro 1.25 mm y longitud $L_{pin} = d$.
- 4 puertos de alimentación de 50Ω cada uno con rotación progresiva de 90° , situados entre el substrato y el plano reflector a nivel de software para poder modelar los puertos correctamente, véase la figura 26.

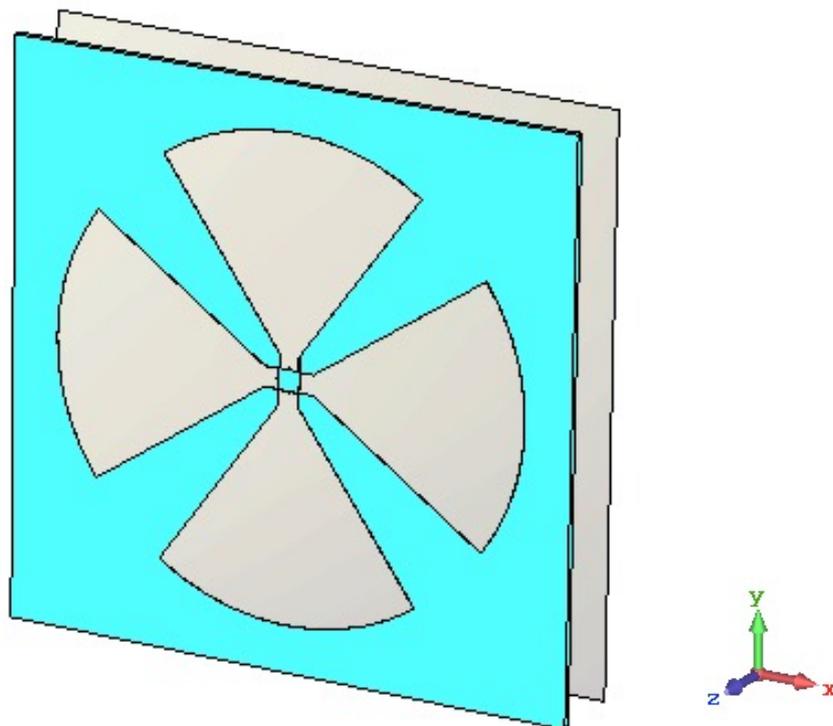


Figura 24. Geometría de la antena desde una vista en perspectiva

Los parámetros de diseño de la antena han sido los siguientes:

Parámetro	Valor
Longitud del brazo (L_{arm})	28.4 mm
Ángulo de apertura (θ_f)	66°
Tamaño de la tira de alimentación (W)	2.5 x 2.5 mm
Separación entre los parches (S)	0.075 mm
Grosor del metal (T)	0.075 mm ($\lambda_0/1000$)
Impedancia de entrada (Z_{in})	50 Ω

Tabla 2 . Parámetros de diseño establecidos tras realizar las simulaciones de optimización de parámetros.

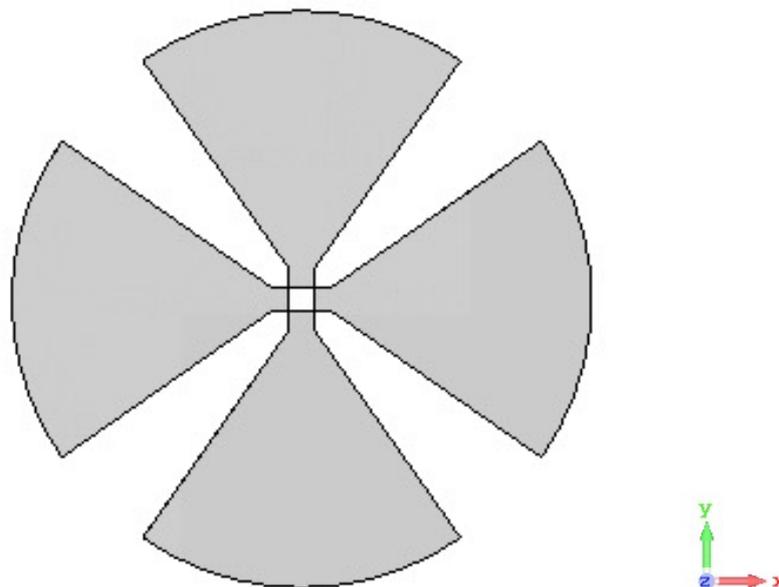


Figura 25. Geometría de los cuatro elementos radiantes de la antena desde una vista frontal

3.4 Red de alimentación de la antena

Se ha podido comprobar que el factor más determinante a la hora de obtener una correcta respuesta en ancho de banda y aislamiento de la polarización circular es el diseño de una correcta red de alimentación. Un método eficiente para generar polarización circular es el método de técnica de rotación progresiva [17], el cual se ha implementado en este trabajo. Se ha optado por un diseño de la red de alimentación con 4 puertos, que excitan a través de 4 pines cilíndricos, los 4 parches situados sobre el substrato con una rotación progresiva de fase de 90° respectivamente, los cuales presentan una separación (S) en dirección X e Y. Esta distancia de separación es estudiada en el apartado 3.3.1. Por lo tanto, este tipo de excitación produce una diferencia de fase de 90° entre los campos de los 4 parches y genera por consiguiente la polarización circular en la antena. En la práctica, se precisa del uso de un híbrido de 90° que se situará por detrás del plano reflector para poder alimentar a través de los 4 pines cada elemento radiante con su fase correspondiente, en esta reflexión se profundizará a continuación.

La configuración de los puertos es la siguiente:

	Amplitud	Fase
Puerto 1 (P1)	1 V	0°
Puerto 2 (P2)	1 V	90°
Puerto 3 (P3)	1 V	180°
Puerto 4 (P4)	1 V	270°

Tabla 3. Configuración de los puertos de alimentación de la antena

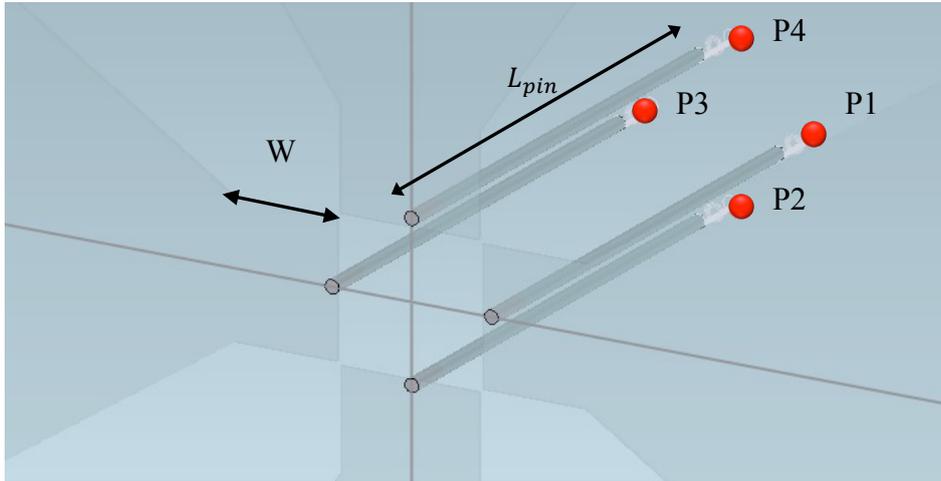


Figura 26. Geometría de los pines y puertos a nivel de software desde una vista en perspectiva

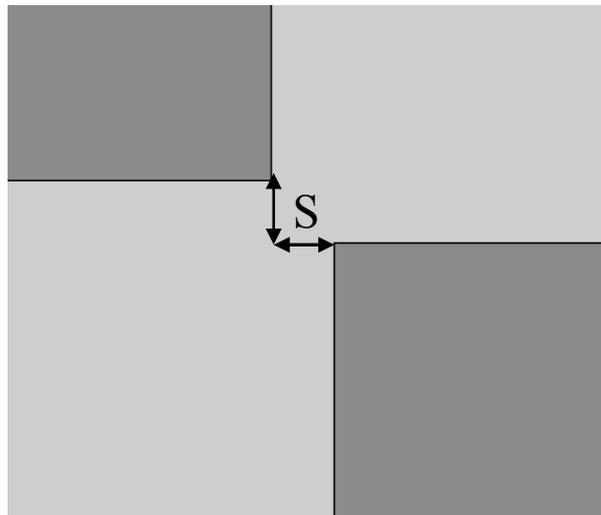
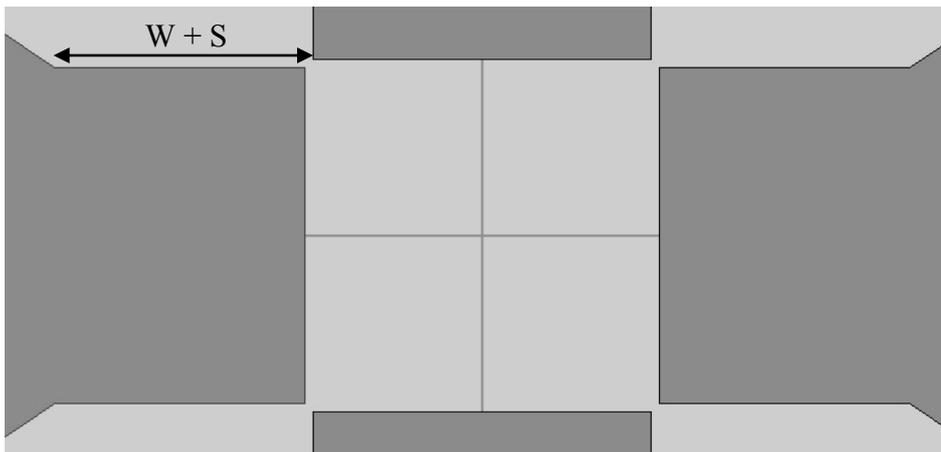


Figura 27. Geometría de las tiras de alimentación a nivel de software desde una vista frontal.

- Uso de dispositivo acoplador híbrido de 90°

Llegados a este punto conviene enfatizar en la viabilidad del diseño planteado llevado a la práctica: la inclusión de 4 puertos de excitación con distinta fase es posible en el modelado del diseño, CST MWS permite configurar puertos discretos con distinta amplitud y fase, como se muestra en la figura 28, pero en la práctica no es posible realizar esta configuración ya que se precisa del uso de un acoplador híbrido de 90° que a través de su señal de salida excite los puertos con misma amplitud pero con un desfase de señal de 90° respectivamente a cada puerto. Este razonamiento nos lleva a implementar el uso de un híbrido de 90° con 1 puerto de entrada y 4 de salida, de manera que se exciten cada uno de los elementos radiantes con una rotación progresiva de 90°, y permitan en la práctica la obtención viable de la polarización circular. El dispositivo se sitúa por detrás del plano reflector de manera que sus salidas correspondientes irán conectados a los pines que excitarán cada uno de los 4 elementos radiantes de la antena.

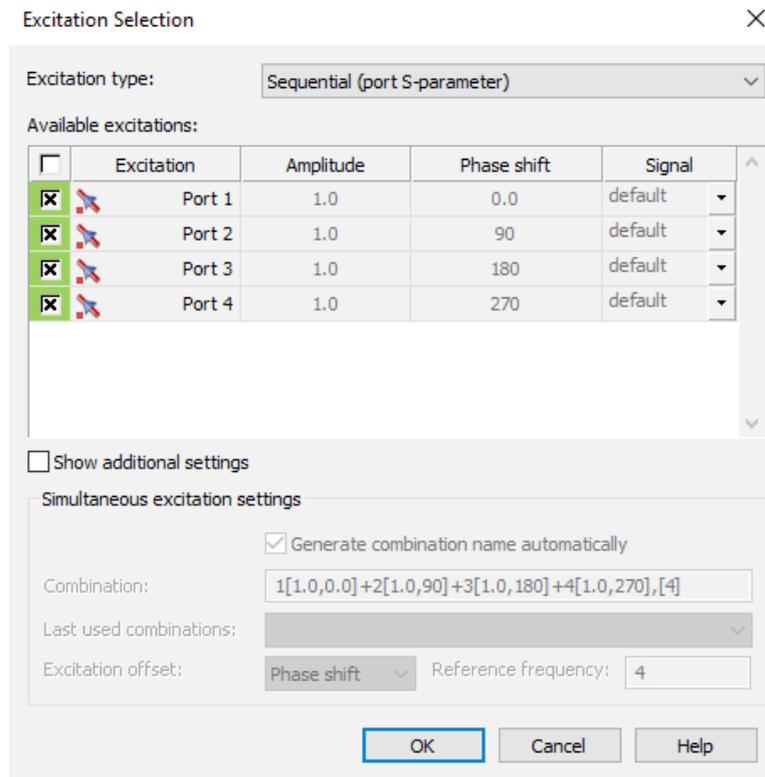


Figura 28. Configuración de la excitación secuencial en CST MWS 2018

Se propone el uso de un dispositivo de la familia RN2 Technologies, en concreto el modelo RQF2500Q06 mostrado en la figura 29. Está manufacturado sobre un montaje de superficie, donde se dispone de 1 pin de entrada y 4 de salida, y está diseñado para frecuencias de operación cercanas a los 2.6 GHz. Revisando distintas familias de componentes, no se ha encontrado un dispositivo que trabaje sobre frecuencias de operación de la tecnología UWB, por lo tanto convendría diseñarlo específicamente para nuestra banda de trabajo cercana a los 4 GHz.

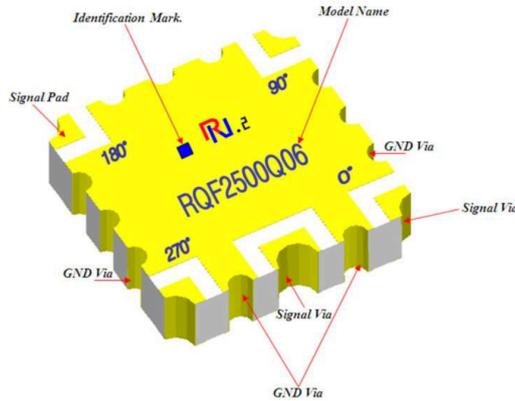


Figura 29. Prototipo real del modelo RQF2500Q06 [Fuente : RN2 Technologies]

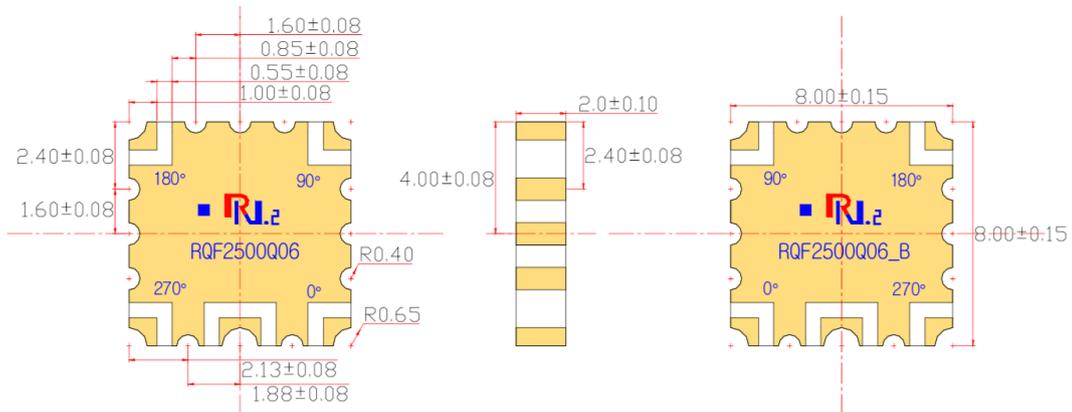


Figura 30. Dimensiones físicas del dispositivo propuesto [Fuente: RN2 Technologies].

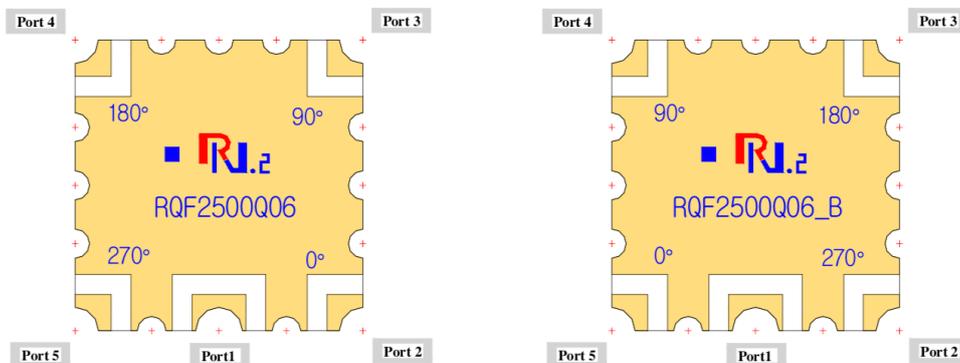


Figura 31. Posibles configuraciones de los puertos del dispositivo [Fuente: RN2 Technologies].

Las especificaciones eléctricas y las posibles configuraciones de los puertos son las siguientes:

Frecuencia de trabajo	Aislamiento	Pérdidas de inserción	VSWR	Balace de fase	Temperatura de operación
2.4 ~2.6 GHz	15 dB	0.5 dB	1.45	$90^\circ \pm 8^\circ$	-55 a 125°C

Tabla 4. Especificaciones eléctricas del acoplador híbrido de 90° [Fuente: RN2 Technologies].

Configuración	Puerto 1	Puerto 2	Puerto 3	Puerto 4	Puerto 5
Caso 1	Entrada	-6 dB \angle 0°	-6 dB \angle -90°	-6 dB \angle -180°	-6 dB \angle -270°
Caso 2	Entrada	-6 dB \angle -270°	-6 dB \angle -180°	-6 dB \angle -90°	6 dB \angle 0°

Tabla 5. Configuraciones de los puertos del dispositivo [Fuente: RN2 Technologies]

3.5 Resultados

En este apartado se describen los resultados obtenidos tras el análisis del diseño y la posterior optimización de los parámetros de la antena. Se analizan los resultados obtenidos en términos de diagrama de radiación en campo lejano, ancho de banda de adaptación, relación axial en función de la frecuencia, impedancia de antena y acoplamiento mutuo entre puertos.

3.5.1 Ancho de banda de adaptación

- Consideraciones

Para conocer el ancho de banda de resonancia se analizan los parámetros S en reflexión, combinando los resultados obtenidos excitando los cuatro puertos secuencialmente. Los criterios establecidos son comúnmente conocidos en entornos de comunicaciones móviles: ancho de banda a -6 dB y a -10 dB de reflexión.

- Resultados

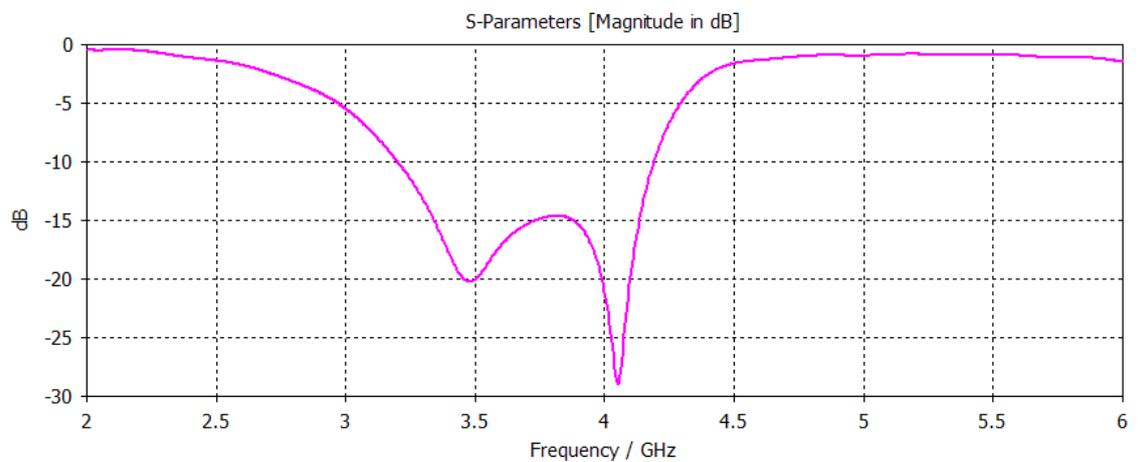


Figura 32. Factor de reflexión a la entrada de la antena

Parámetro	Valor
BW _{-6 dB}	1.25 GHz [3.02 GHz , 4.27 GHz]
BW _{-10 dB}	1 GHz [3.2 GHz , 4.2 GHz]

Tabla 6. Valores obtenidos en términos de ancho de banda de adaptación

3.5.2 Diagrama de radiación en campo lejano

- Consideraciones

Se estudia el diagrama de radiación en campo lejano en coordenadas polares y esféricas, a las frecuencias establecidas en el margen de adaptación obtenido, es decir, de 3.2 GHz a 4.2 GHz.

- Resultados

- Frecuencia: 3.2 GHz

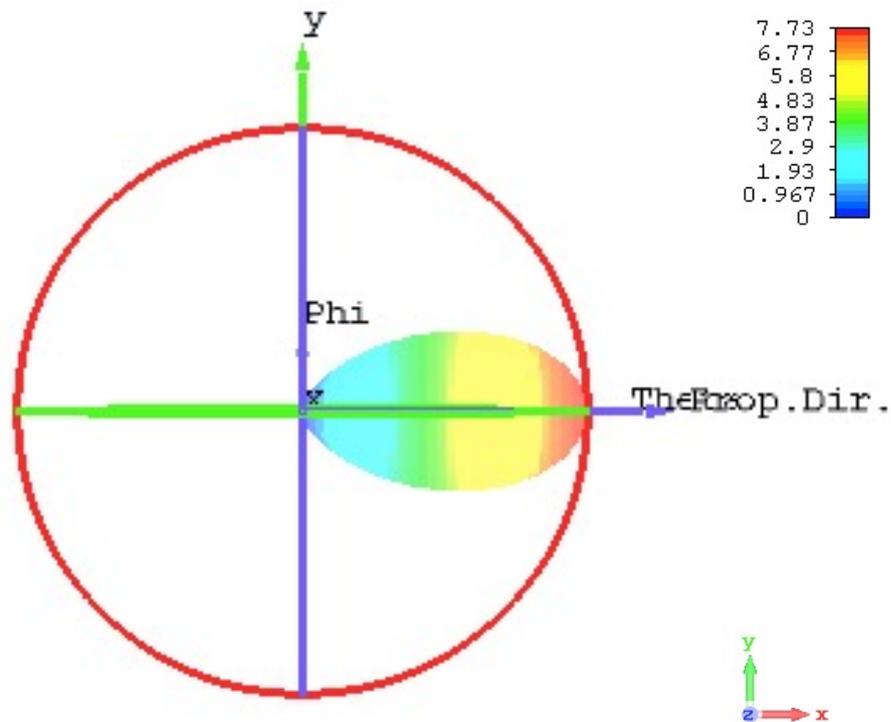


Figura 33. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas a la frecuencia de 3.2 GHz.

Farfield Directivity Abs (Phi=0)

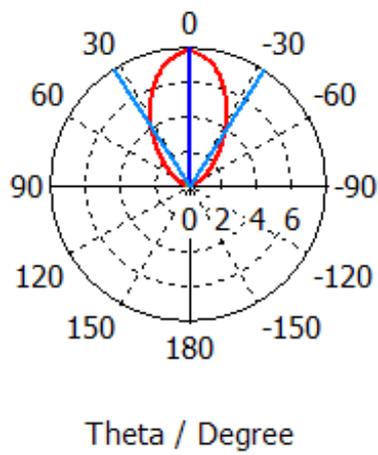


Figura 34. Diagrama de radiación en coordenadas polares a la frecuencia de 3.2 GHz.

Ancho de banda angular a -3 dB	66°
Dirección del lóbulo principal	0°

Tabla 7. Valores obtenidos en términos de ancho de banda angular a -3 dB y dirección del lóbulo principal a 3.2 GHz.

- Frecuencia: 3.8 GHz

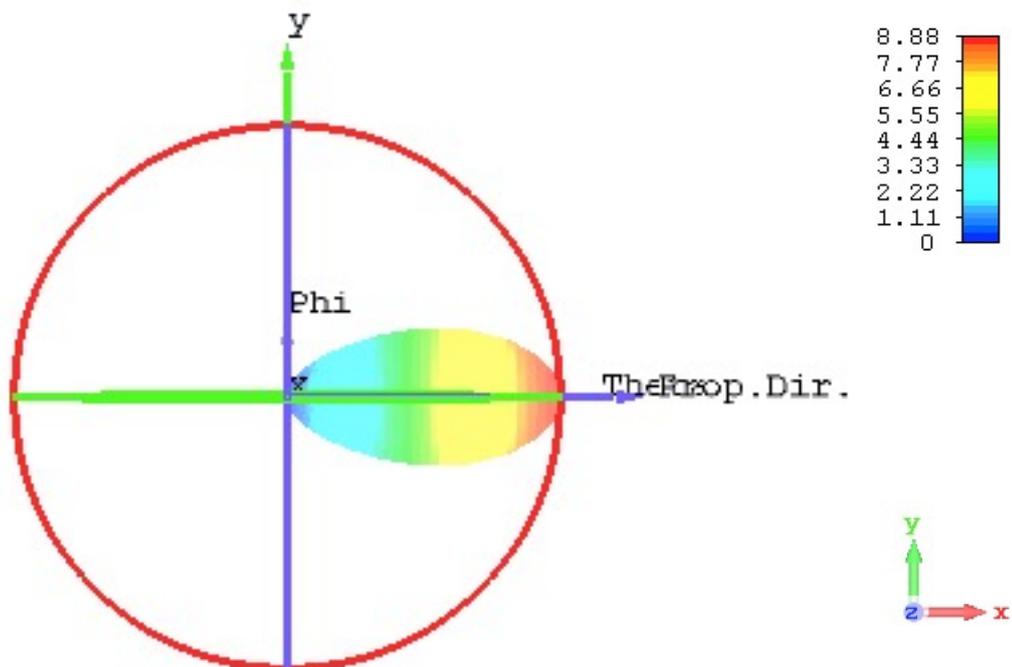


Figura 35. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas a la frecuencia de 3.8 GHz.

Farfield Directivity Abs (Phi=0)

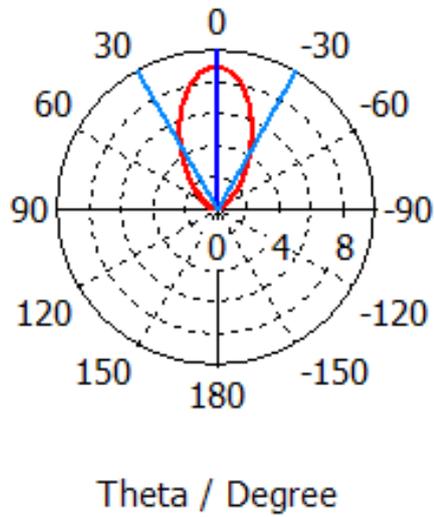


Figura 36. Diagrama de radiación en coordenadas polares a la frecuencia de 3.8 GHz.

Ancho de banda angular a -3 dB	58.7°
Dirección del lóbulo principal	0°

Tabla 8. Valores obtenidos en términos de ancho de banda angular a -3 dB y dirección del lóbulo principal a 3.8 GHz.

- Frecuencia: 4.2 GHz

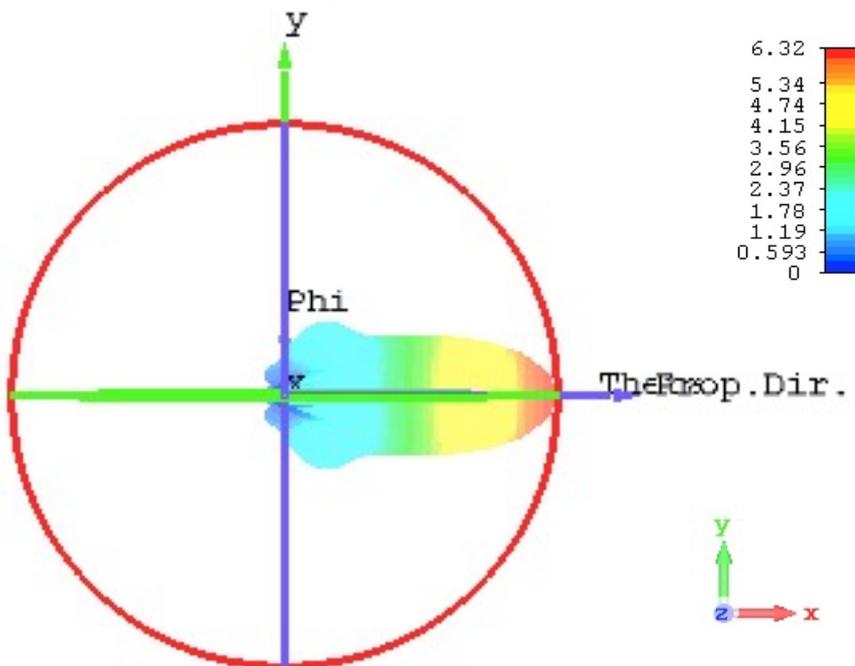
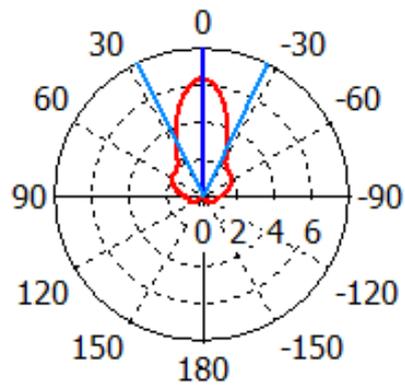


Figura 37. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas a la frecuencia de 4.2 GHz.

Farfield Directivity Abs (Phi=0)



Theta / Degree

Figura 38. Diagrama de radiación en coordenadas polares a la frecuencia de 3.8 GHz.

Ancho de banda angular a -3 dB	51.5°
Dirección del lóbulo principal	0°

Tabla 9. Valores obtenidos en términos de ancho de banda angular a -3 dB y dirección del lóbulo principal a 4.2 GHz.

3.5.3 Relación axial en función de la frecuencia

- Consideraciones

En el apartado 3.2.1 se ha definido la relación axial como la relación de amplitudes de las componentes de campo eléctrico en direcciones X e Y, o dicho de otro modo, la relación entre el eje mayor y eje menor de la elipse de polarización definida por ambos ejes. Es conveniente por tanto estudiar este parámetro de simulación ya que otorga información a cerca del aislamiento de la polarización circular en el rango de frecuencias de trabajo.

En la práctica, resulta complicado mantener la polarización en todas las direcciones de radiación de la antena, conocidas a través del ancho de banda angular a -3 dB, por lo tanto es conveniente realizar un breve estudio a cerca de los requerimientos exigidos para poder considerar a un sistema como un sistema circularmente polarizado. Para calcular el acoplo de polarización de los sistemas linealmente polarizados, como es en este caso la cápsula endoscópica situada en el interior del cuerpo humano, con los sistemas polarizados circularmente, como es el caso de la antena diseñada, se asume un aislamiento adicional de 3 dB [22], asumiendo que la relación axial de una onda con polarización circular debe ser 0 dB. Por tanto, para que se considere que un sistema trabaja con polarización circular la relación axial deberá estar por debajo de los 3 dB, y como se ha comentado este hecho en la práctica es muy difícil de conseguir en todas las direcciones de radiación, por lo tanto se asume un margen de frecuencias en el que la antena no se comportará como un sistema circularmente polarizado, sino elíptico, pero que en la práctica no producirá grandes efectos en el sistema. La figura 39 muestra las máximas y mínimas pérdidas por desadaptación en polarización en función de la relación axial.

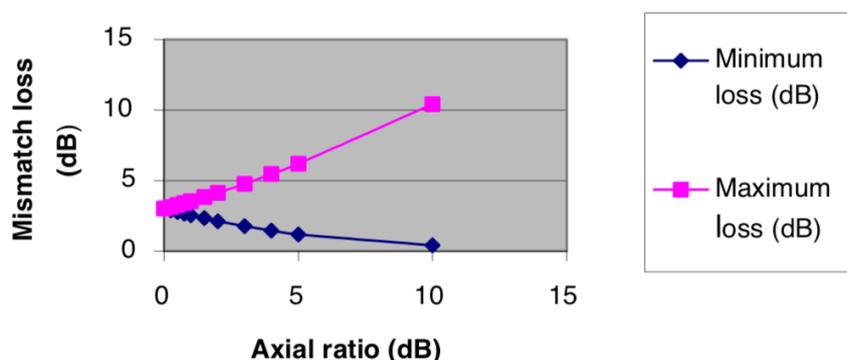


Figura 39. Margen de pérdidas por desadaptación de polarización en función de la relación axial. [Fuente: ETSI Technical Report 102 031-1 V1.1.1 (2002)]

- Resultados

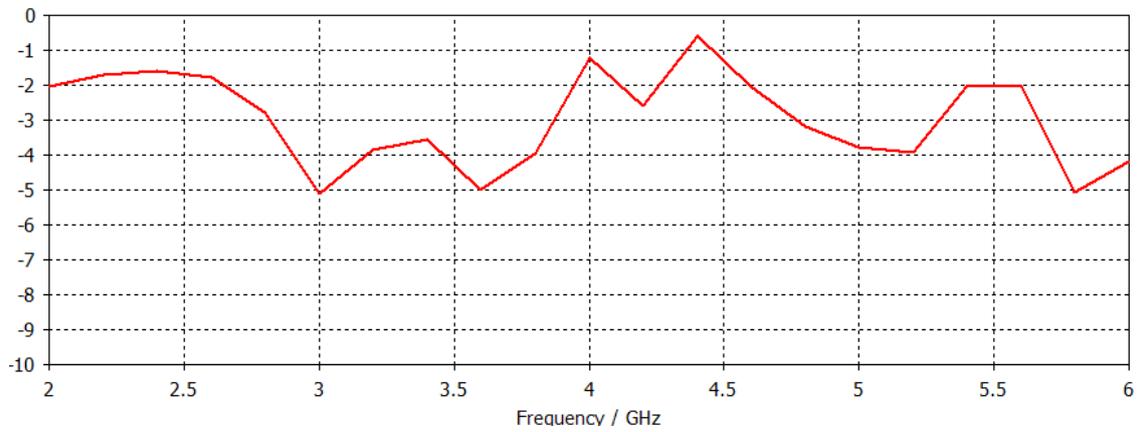


Figura 40. Relación axial en frecuencia sobre la dirección de propagación ($\theta = 0^\circ$).

Margen de frecuencias en resonancia por debajo de -3 dB	337 MHz [3.87 GHz , 4.27 GHz]
Valor máximo*	-5 dB
Valor mínimo*	-0.60 dB
Rango máximo de pérdidas por desadaptación	6 dB
Rango mínimo de pérdidas por desadaptación	3 dB.

Tabla 10. Valores obtenidos en términos de relación axial en frecuencia.

3.5.4 Impedancia de la antena

- Consideraciones

A través de la variación de la impedancia de la antena en función de la frecuencia se puede conocer en qué valores frecuenciales la parte reactiva de la impedancia de antena se anula, punto donde teóricamente la antena se encuentra en resonancia [21].

- Resultados

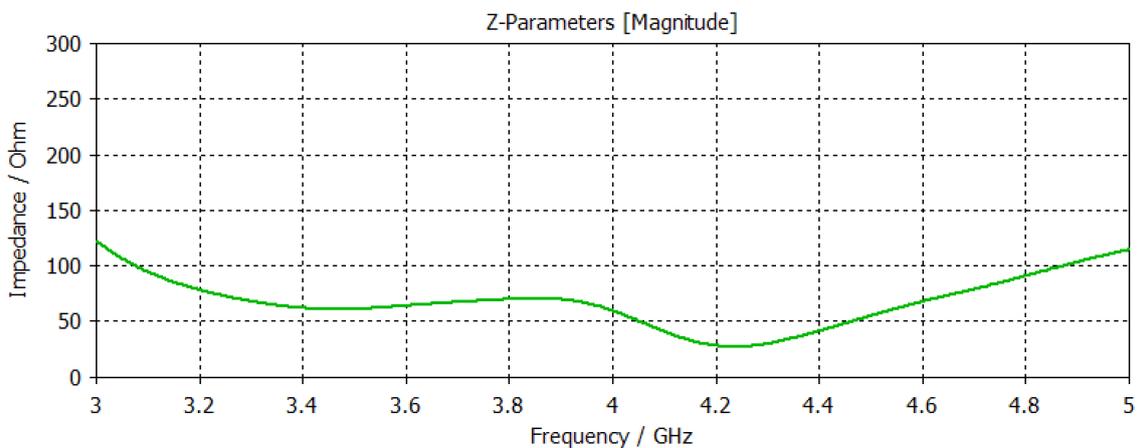


Figura 41. Parte real de la impedancia de antena en función de la frecuencia

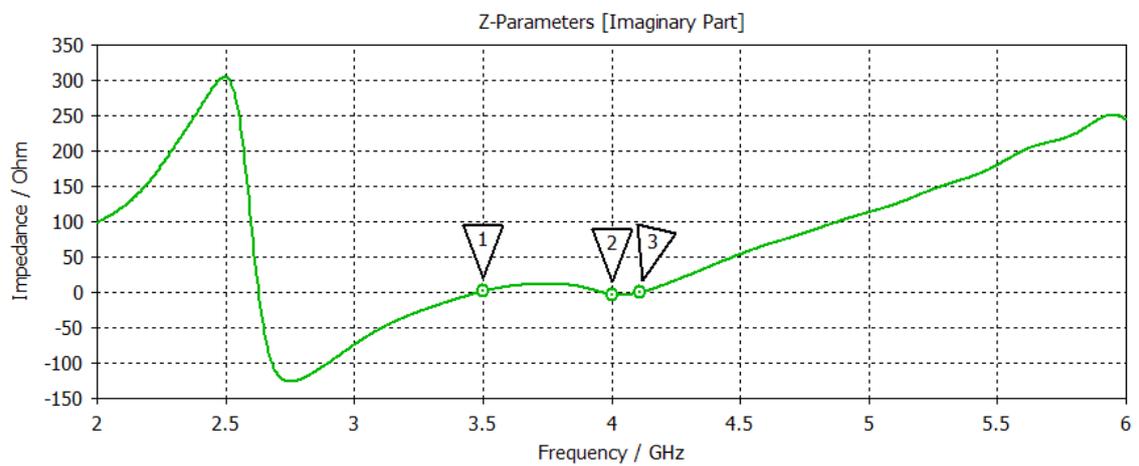


Figura 42. Parte reactiva de la impedancia de entrada en función de la frecuencia

Marcador 1	3.5 GHz
Marcador 2	4 GHz
Marcador 3	4.15 GHz

Tabla 11. Valores obtenidos en cada uno de los 3 marcadores .

3.5.5 Acoplamiento mutuo entre los puertos

- Consideraciones

En el apartado 3.2.2 se analiza el acoplamiento mutuo entre puertos a través de los términos de autoimpedancia e impedancia mutua, descubriendo la dependencia de este acoplamiento con la distancia de separación entre dipolo y dipolo imagen.

En la práctica, se analiza el acoplamiento mutuo entre puertos a través de los parámetros S de transmisión. En concreto, se analizan únicamente los parámetros S21 y S31 ya que por la simetría en la estructura de la antena, guardan equivalencia con el acoplamiento mutuo existente entre los distintos puertos.

- Resultados

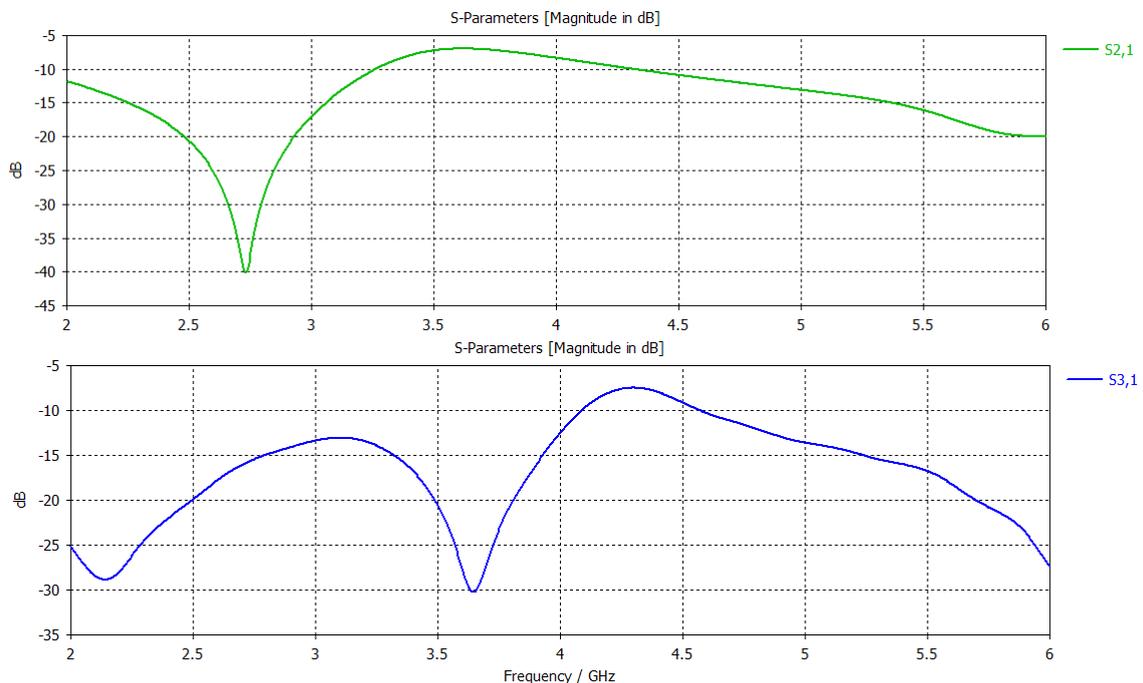


Figura 43 . Factores de transmisión en los puertos 2 y 3.

Se puede observar que los valores obtenidos son ligeramente altos, teniendo en cuenta el límite establecido normalmente en el ámbito investigador de -20 dB. Dichos valores son debidos principalmente a la estructura compacta de la antena y de sus 4 puertos, pero se puede afirmar que a nivel práctico no tendrá influencia en el correcto funcionamiento de la antena.

3.6 Estudio paramétrico

En este apartado se realiza un estudio de modificación de parámetros, se analiza principalmente una estructura de sustrato con geometría circular y los resultados obtenidos tras las simulaciones electromagnéticas. A continuación, se realiza un breve estudio paramétrico de la separación (S) entre los parches y su influencia en el correcto funcionamiento de la antena.

3.6.1 Modificación de la geometría del sustrato

- Consideraciones

La estructura de antena propuesta se muestra en la figura 44, donde el único parámetro que se ha modificado es la geometría del sustrato y, por ende, la del plano reflector, pasando de un perfil rectangular a un perfil circular. El resto de parámetros escogidos en el diseño son los mismos que los planteados en el capítulo 3. Por tanto, las modificaciones realizadas han sido:

Diámetro del sustrato	75 mm
Diámetro del plano de masa	75 mm

Tabla 12. Valores escogidos para el sustrato y el plano de masa.

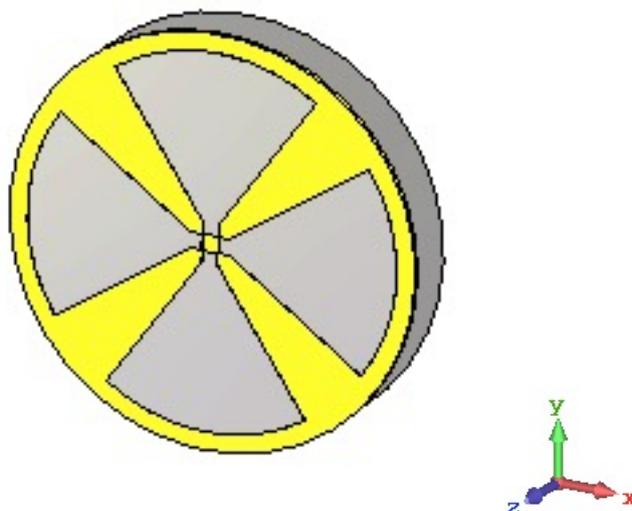


Figura 44. Geometría de la antena desde una vista en perspectiva

- Resultados

- Ancho de banda de adaptación tomando los mismos criterios de calidad:

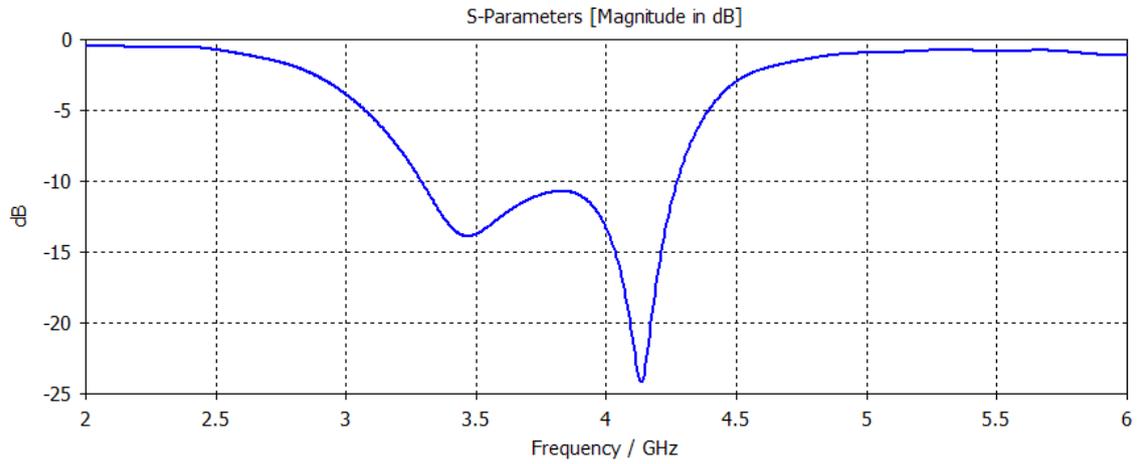


Figura 45. Factor de reflexión a la entrada de la antena modificada.

Parámetro	Valor
$BW_{-6\text{ dB}}$	1.25 GHz [3.12 GHz , 4.37 GHz]
$BW_{-10\text{ dB}}$	1 GHz [3.28 GHz , 4.28 GHz]

Tabla 13. Valores obtenidos en términos de ancho de banda de adaptación para la antena con perfil circular

- Diagrama de radiación de la antena a 4 GHz en coordenadas polares y esféricas:

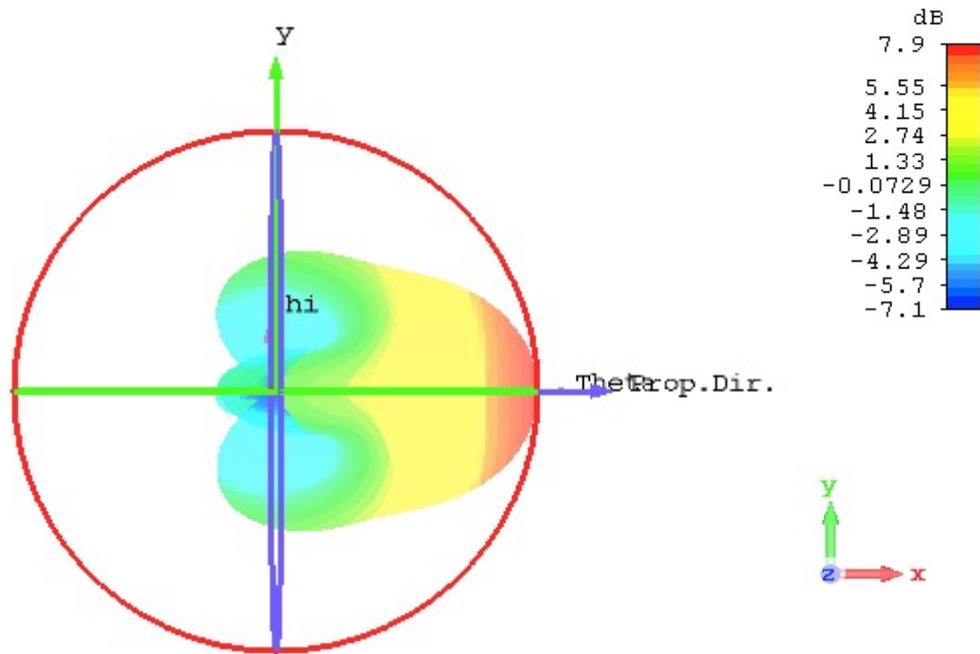


Figura 46. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas a la frecuencia de 4 GHz.

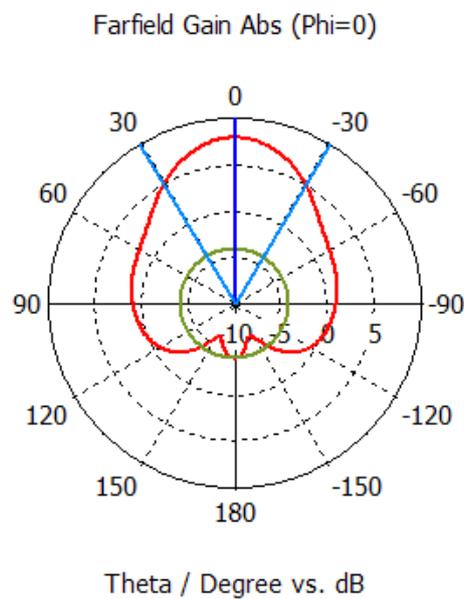


Figura 47. Diagrama de radiación en coordenadas polares a la frecuencia de 4 GHz.

Ancho de banda angular a -3 dB	61.7°
Dirección del lóbulo principal	0°

Tabla 14. Valores obtenidos en términos de ancho de banda angular a -3 dB y dirección del lóbulo principal a 4 GHz.

- Relación axial en frecuencia tomando los mismos criterios de calidad:

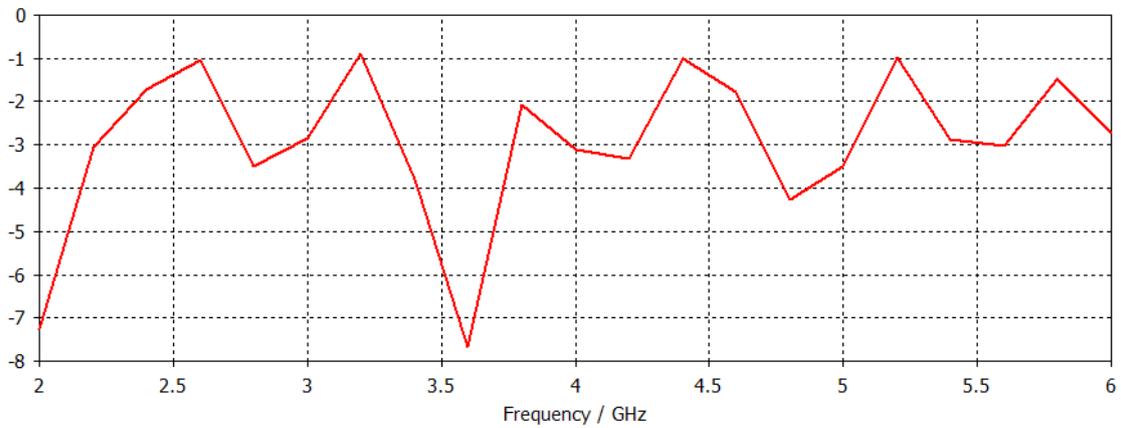


Figura 48. Relación axial en frecuencia sobre la dirección de propagación ($\theta = 0^\circ$).

Margen de frecuencias en resonancia por debajo de -3 dB	220.40 MHz
	[3.12 GHz , 3.34 GHz]
	211.31 MHz
	[3.77 GHz , 3.98 GHz]
Valor máximo*	130.71 MHz
	[4.24 GHz , 4.37 GHz]
Valor máximo*	-7.67 dB
Valor mínimo*	-0.88 dB
Valor máximo de pérdidas por desadaptación	8.5 dB
Valor mínimo de pérdidas por desadaptación	3 dB.

Tabla 15. Valores obtenidos en términos de relación axial en frecuencia.

3.6.2 Modificación de la separación entre parches

- Consideraciones

Para finalizar este capítulo, se ha realizado un estudio paramétrico sobre el efecto de modificación de la separación entre parches (S) sobre el correcto funcionamiento de la antena, parámetro definido en el apartado 3.4. Se ha podido contrastar que para distancias de separación (S) de 0.125 mm o cercanas, se produce total desadaptación de la antena, perdiendo la frecuencia de referencia y el ancho de banda de resonancia. Con distancias de separación aún mayores se pierde la banda de frecuencia de resonancia de referencia, produciendo igualmente desadaptación en el diseño de la antena. Esta reflexión produce en un principio una disyuntiva con la viabilidad práctica del diseño, ya que se podría pensar que valores de distancia de separación tan bajos podrían no ser realizables por una fresadora con tal precisión. No es el caso, ya que la maquinaria tecnológica actual permite precisiones tales como el valor escogido en el diseño ($S = 0.075$ mm), incluso menores, llegando a precisiones de 0.015 mm, véase la figura 49 y 50, donde se expone el modelo F80 de la marca Aslak [23], máquina fresadora de características técnicas similar a la que se tiene en los edificios de investigación de la Universitat Politècnica de València.



Figura 49. Prototipo real del modelo F80 de fresadora de la marca Aslak (Fuente: ASLAK)

Modelo	F 80
Código	3501080
Potencia del motor	12,9 CV / 9,5 kW / 400 V
Motor de transmisión	2,2 kW
Par motor del eje principal	14 Nm
Potencia bomba de refrigeración	650 W
Tipo cono morse del husillo	BT 30
Ø máx. trabajo de fresado frontal	65 mm
Ø máx. de la fresa final punta	30 mm
Precisión de repetición	± 0,015 mm
Precisión de posicionamiento	± 0,015 mm
Nº de herramientas del tambor	10
Tiempo de cambio de herramienta	7 seg.
Recorrido eje X	400 mm
Recorrido eje Y	225 mm
Recorrido eje Z	375 mm
Velocidad de avance eje X - Y - Z	10.000 mm/min.
Nº de revoluciones del husillo	50 - 8.000 r.p.m.
Distancia del husillo a la mesa	75 - 475 mm
Tamaño mesa transversal (l x an)	800 x 260 mm
Tamaño ranura en T / distancia	16 mm / 50 mm
Carga máx. de la mesa	150 kg
Dimensiones (l x an x al)	1.925 x 1.655 x 2.070 mm
Capacidad líquido refrigerante	160 l
Peso neto	1.900 kg

Figura 50. Características físicas y técnicas del modelo F80 de fresadora de la marca ASLAK [Fuente: ASLAK]

- Resultados

- Distancia de separación (S): 0.075 mm.

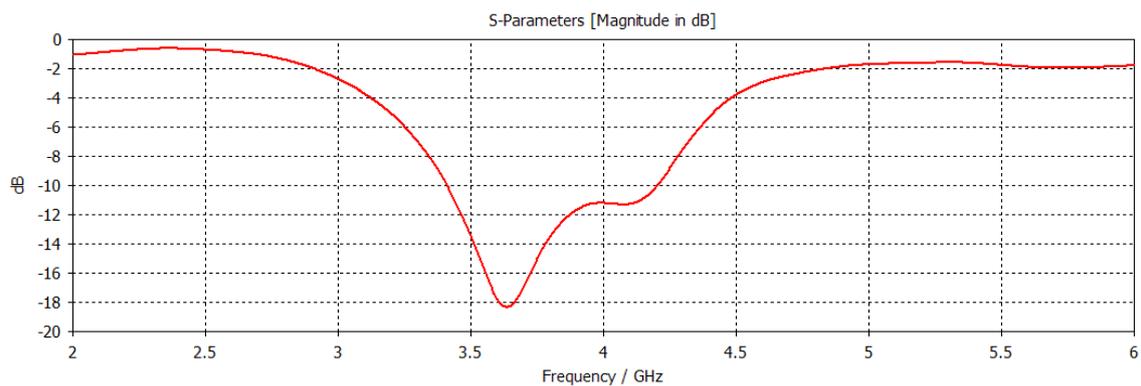


Figura 51. Factor de reflexión a la entrada de la antena con una separación (S) de 0.075 mm.

- Distancia de separación (S): 0.125 mm.

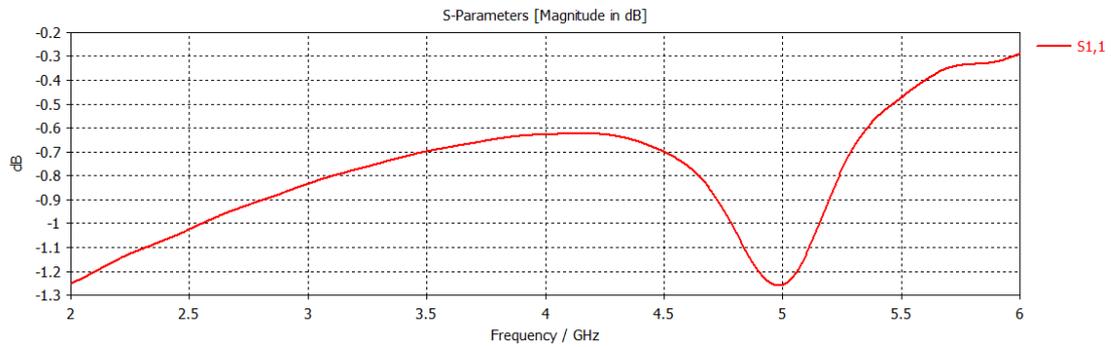


Figura 52. Factor de reflexión a la entrada de la antena con una separación (S) de 0.125 mm.

- Distancia de separación (S): 0.25 mm.

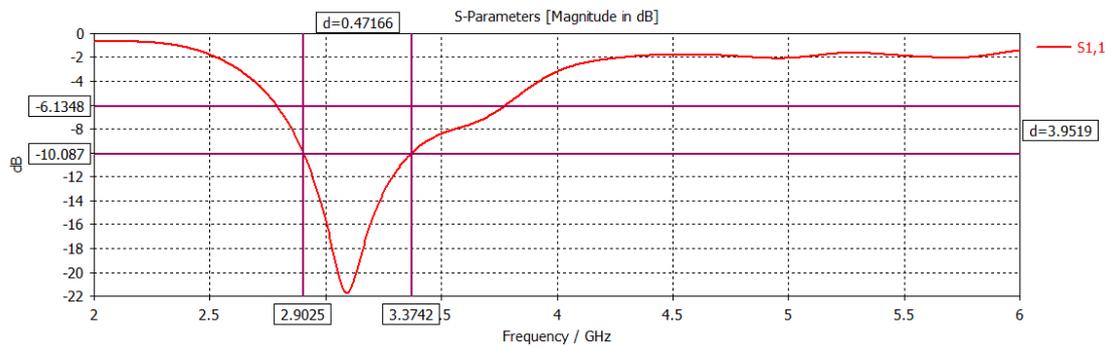


Figura 53. Factor de reflexión a la entrada de la antena con una separación (S) de 0.25 mm.

Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

- Conclusiones

El desarrollo del diseño y optimización de parámetros de la antena, y su posterior implementación en el ámbito de las aplicaciones corporales, me han permitido establecer una serie de directrices concretas a la hora de abordar cualquier diseño futuro de estas características en la práctica. En mi opinión, el estudio previo de las tecnologías aplicables al diseño resulta el factor fundamental para poder desarrollar una idea conceptual e implementarla en la realidad. Tanto es así, que existen diversidad de posibles diseños e ideas conceptuales que funcionan correctamente en la simulación de parámetros de la antena a nivel de software, pero se tiene que tener siempre presente que se debe partir de la premisa de tener un diseño que sea implementable en la práctica y que, en última medida, permita tener un correcto análisis y optimización de parámetros de la antena.

Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. En este diseño de antena se ha requerido de un gran ancho de banda para poder soportar la comunicación con el dispositivo interno en el cuerpo humano. La tecnología UWB permite cubrir estas necesidades de ancho de banda, y se presenta como una de las firmes candidatas para solucionar los problemas existentes en la saturación del espectro electromagnético. Sus pulsos con energía relativamente pequeña sobre un gran ancho de banda de transmisión permiten diseñar estos sistemas de manera que puedan parecer ruido imperceptible para sistemas de radio convencionales, obteniendo ganancia viable de ancho de banda a través de tratamientos digitales de las señales. En la actualidad, existen diversos grupos de trabajo trabajando en la futura estandarización de la tecnología, como lo son el IEEE 802.15.3a / 4a.

2. El alto ritmo de desarrollo de las aplicaciones en torno a las redes de área corporal (BAN) han propiciado que ya se haya regulado este tipo de comunicación a través del estándar 802.15.6, que presenta las principales directrices que deben establecerse en una comunicación inalámbrica de área corporal, estableciendo una arquitectura de comunicación por niveles que diferencia claramente los rangos de actuación de cada dispositivo. El continuo desarrollo de la microelectrónica, a través dispositivos electrónicos más compactos, sumado al auge en la actualidad de las comunicaciones inalámbricas en torno a aplicaciones en redes de área corporal, la convierten en un área de investigación prometedora y en la que existen multitud de posibilidades conceptuales de desarrollo.

3. Tras finalizar el diseño y la optimización de los parámetros de la antena, e interpretando los resultados obtenidos, se puede afirmar que la antena diseñada se comporta como un dispositivo UWB, ya que tiene un ancho de banda mayor de 500 MHz, y además cumple el requerimiento en el estándar 802.15.6 a nivel de capa física de comunicación UWB, en el que un dispositivo UWB debe contener al menos uno de los canales definidos como obligatorios en este estándar, en este caso se contiene el canal 2, cuya frecuencia central es de 3.99 GHz. Además, presenta un diagrama de radiación unidireccional con un ancho de banda angular a -3dB de 51.5° en el caso más restrictivo. Este margen angular es más que suficiente para poder recibir datos del dispositivo interno en el cuerpo humano sea cual sea su orientación en el cuerpo humano, principal motivo práctico del comportamiento de la antena con polarización circular. En términos de polarización, se puede afirmar que la antena se comportará puramente con polarización circular en la dirección de máxima radiación dentro de un margen restringido de comunicación, 337 MHz en el mejor de los casos, ya que en la práctica resulta muy complicado mantener el comportamiento circular en todas las direcciones del espacio. Aún así, el hecho de que no sea puramente circular, sino elíptica, y con los resultados obtenidos en la relación axial en función de la frecuencia, siempre menor que 5 dB, permiten afirmar que el sistema no tendrá prácticamente pérdidas por desadaptación de polarización en la realidad, como se ha estudiado en el apartado 3.5.3, y que una polarización elíptica dentro de unos márgenes no muy directivos, permiten obtener anchos de banda angular a -3 dB suficientes para establecer una comunicación bidireccional entre un dispositivo situado en la parte superficial del cuerpo y otro situado internamente, sea cual sea la orientación del dispositivo interno en el cuerpo humano.

- Propuesta de trabajo futuro

Definido el diseño planteado como un diseño base, existen multitud de posibilidades de mejora de prestaciones del diseño, como la probatura de otro tipo de estructuras de elementos radiantes. En este trabajo se ha planteado una estructura tipo parche, a través de dos dipolos cruzados en pajarita, pero como se ha comentado en el apartado 3.1, en la literatura actual existe diversidad de tipos de estructuras que pueden cumplir requerimientos de ancho de banda y de polarización circular sobre un perfil plano, como son las estructuras de tipo espiral, tipo anillo o tipo parche. Se propone el estudio de los otros dos tipos de estructuras, bajo la misma estructura general de funcionamiento de la antena escogida en este trabajo y su comparación con la estructura empleada en este trabajo.

En este caso se propone una línea de trabajo futura en torno al estudio de estructuras tipo espiral, se ha diseñado en una fase inicial, manteniendo la misma estructura de funcionamiento que la antena diseñada en este trabajo, un tipo de antena en espiral llamada antena sinuosa, cuya primera propuesta de diseño fue realizada por Duhamel Raymon en los años 80, y cuyo principio de funcionamiento básicamente comprende una región radialmente inferior donde la antena emite longitudes de onda más cortas, y una región radialmente mayor donde emite longitudes de onda más largas, dicho de otra manera, el radio externo fija la frecuencia de corte baja y el radio interno fija la frecuencia de corte alta. La estructura de la antena se muestra en la figura 54.

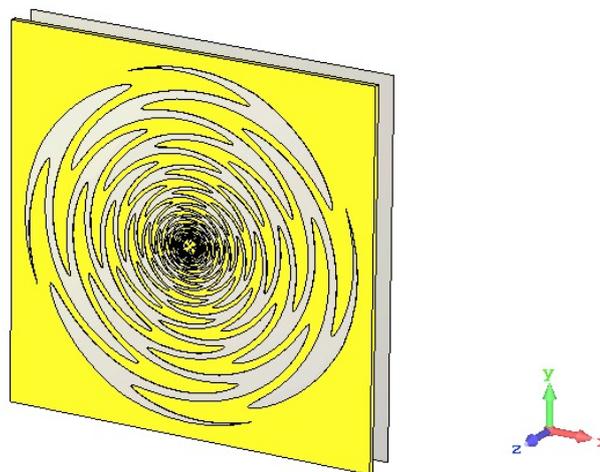


Figura 54. Estructura de la antena sinuosa.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación, donde se puede observar que no se han conseguido valores de ancho de banda de adaptación por debajo de -6 dB, criterio de calidad escogido, con una impedancia de entrada de 50 Ω , por lo que cabe como línea de trabajo futura seguir incidiendo en la optimización de parámetros del diseño para conseguir un ancho de banda de adaptación razonable.

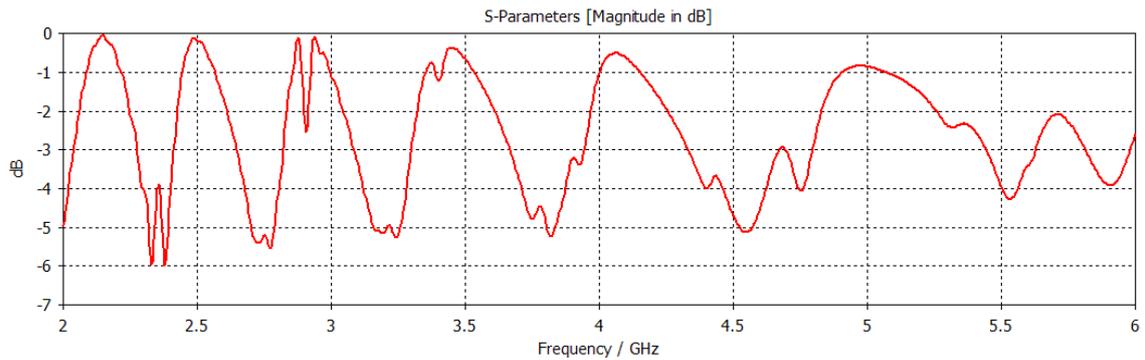


Figura 55. Factor de reflexión a la entrada de la antena modificada.

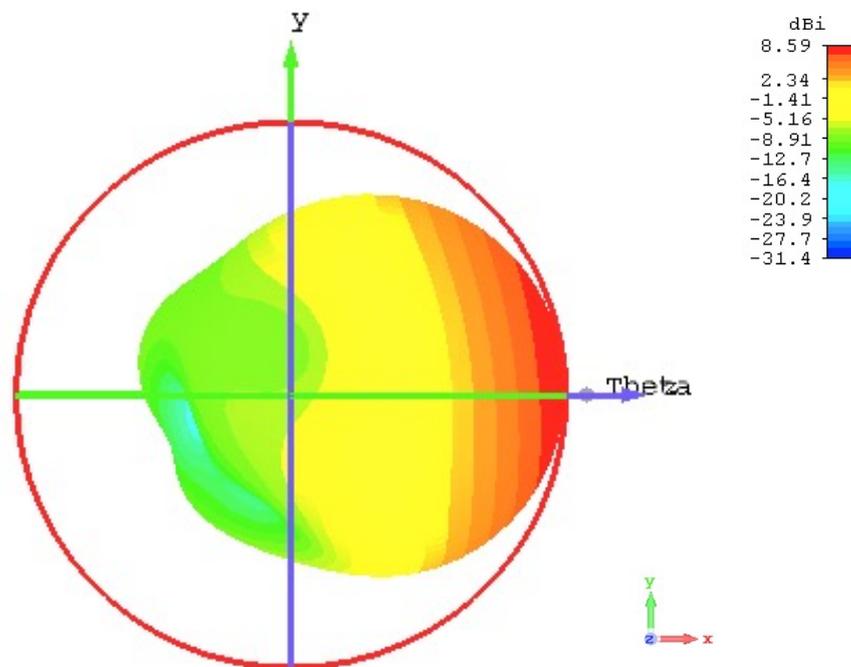


Figura 56. Diagrama de radiación en coordenadas esféricas a la frecuencia de 4 GHz.

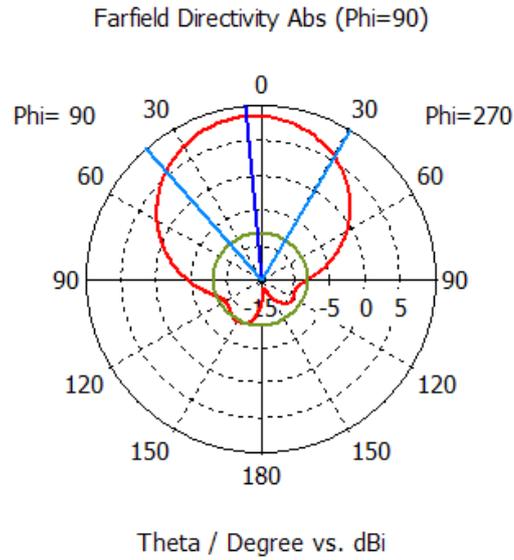


Figura 57. Diagrama de radiación en coordenadas polares a la frecuencia de 4 GHz.

Ancho de banda angular a -3 dB	71.9°
Dirección del lóbulo principal	5°

Tabla 16. Valores obtenidos en términos de ancho de banda angular a -3 dB y dirección del lóbulo principal a 4 GHz.

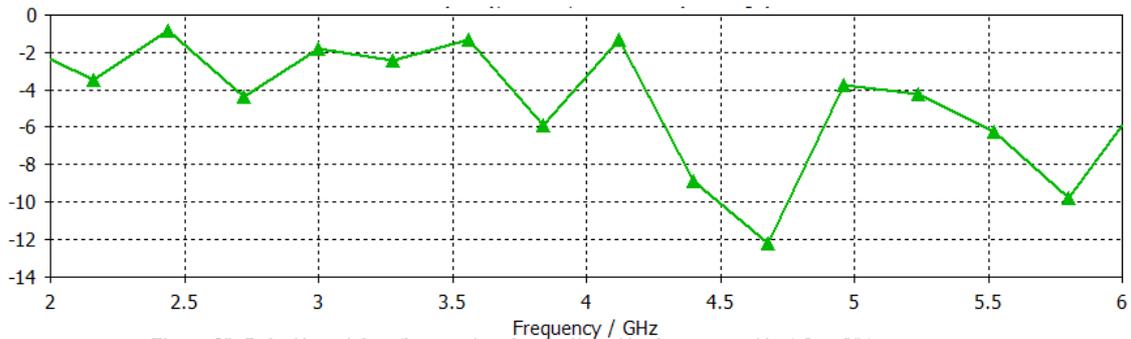


Figura 58. Relación axial en frecuencia sobre la dirección de propagación ($\theta = 0^\circ$).

Por otro lado, incidiendo en la estructura de tipo parche empleada en este trabajo, se pueden probar otros tipos de geometrías de los elementos radiantes, no con forma de pajarita, sino con forma de margarita, por su comparación con las distribuciones de lígulas[24], o con forma de pajarita pero con borde recto, en vez de redondeado, comprobando su respuesta utilizando tanto una geometría de sustrato de perfil circular como de perfil rectangular.

Para finalizar, respecto a la red de alimentación propuesta, se pueden plantear diversos tipos distintos de alimentación, por ejemplo alimentar a través de una ranura que acople directamente la alimentación a los elementos radiantes, o a través de una tira microstrip. Además, cabe la posibilidad de desarrollar un híbrido microstrip con líneas de transmisión de manera que se consiga el desfase requerido en el diseño y se ahorre el uso del dispositivo acoplador híbrido de 90° .

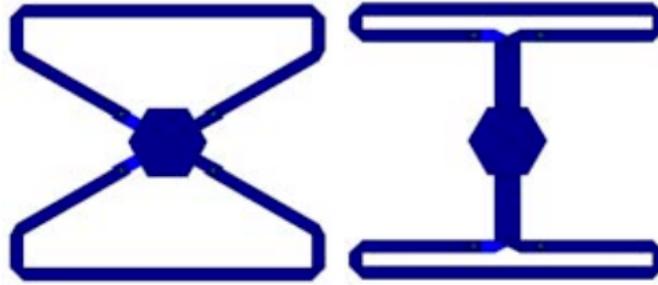


Figura 59. Dos ejemplos de antenas margarita con dos lóbulos [Fuente: CARAVANTES, J., LLABRÉS, J., MEDIAVILLA, A., TAZÓN, A., VASSAL'LO, J. (2011)]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones de 4 de noviembre de 2008 denominada “La telemedicina en beneficio de los pacientes, los sistemas sanitarios y la sociedad” [COM/2008/0689 final].
- [2] ZUNDEL, K.M., “Telemedicine: history, applications, and impact on librarianship”, en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2010000100017 . Última consulta: Junio de 2018.
- [3] Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones de 19 de mayo de 2010 denominada “Una Agenda Digital para Europa” [COM/2010/0245 final].
- [4] OCDE, “ *Gross domestic spending on R&D*”, en <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm#indicator-chart> . Última consulta: Junio de 2018.
- [5] INE, “Estadística sobre actividades I+D”, en http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254735576669 . Última consulta: Junio de 2018
- [6] RODRÍGUEZ PUY, A., “Científicas en cifras 2015. Estadísticas e indicadores de la (des)igualdad de género en la formación y profesión científica”, publicado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad en: http://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/Informe_Cientificas_en_Cifras_2015_con_Anexo.pdf . Última consulta: Julio de 2018
- [7] FEDERAL COMMUNICATIONS COMISION, “*FCC AUTHORIZATION OF ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY*” en https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/2002/nret0203.html Última consulta: Junio de 2018
- [8] KWAK, K.S, ULLAH, S., ULLAH, N. (2011). “An overview of IEEE 802.15.6 Standard”, publicado en <https://arxiv.org/pdf/1102.4106.pdf> Última Consulta: Julio de 2018.
- [9] JAMTHE A., AGRAWAL, D. (2013). “Approaches for Energy Harvesting and Power Management in Wireless Healthcare Sensor Networks”.
- [10] VILLEGAS MÉNDEZ, J.F. (2017). “Comunicaciones WBAN-IBC: Enfoques, perspectivas y aplicaciones”.
- [11] MIRALLES GÓMEZ, E. (2017). “Estudio, diseño y optimización de antenas UWB on body para comunicaciones intracorporales”.

- [12] ULLAH, S., MOHAISEN, M., ALNUEM, M.A. (2013). "A review of IEEE 802.15.6 MAC, PHY, and Security Specifications".
- [13] SASAKI, A., KAWANO, R., ISHIHARA, T., SHINAGAWA, M. (2010). "Modeling of Human-body Near-field Communication and Evaluation of Communication Quality".
- [14] MECKLENBRÄUKER, C. (2013). "Ultra Wide Band Radio. Introduction".
- [15] GARCÍA PARDO C., MORENO CANO, M.V., MOLINA GARCÍA PARDO, J.M, RODRÍGUEZ, J.V, PASCUAL GARCÍA J., JUAN LLÁCER, L. (2015). "Sistemas de comunicaciones UWB".
- [16] MECKLENBRÄUKER, C., ZEMEN, T. (2013) "Wireless Vehicular Communications".
- [17] ZHANG, J., SHEN, Z. (2018) "Dual-Band Shared-Aperture UHF/UWB RFID Reader Antenna of Circular Polarization".
- [18] EL BOUCHTI, M. (2016). "Diseño y medición de una antena wearable".
- [19] FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009) "Parámetros fundamentales de las antenas".
- [20] FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009) "Antenas de hilo".
- [21] FERRANDO, M., VALERO, A., ESTEBAN, H. (2009) "Fundamentos de radiación".
- [22] ETSI Technical Report 102 031-1 V1.1.1 (2002). "Use of circular polarization in multipoint systems" en https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102000_102099/10203101/01.01.01_60/tr_10203101v010101p.pdf . Última consulta: Agosto de 2018"
- [23] ASLAK, "Modelo F80 de Fresadoras" en <http://www.aslak.es/es/catalogo/fresadora/i:3927/> . Última visita: Septiembre de 2018.
- [24] CARAVANTES, J., LLABRÉS, J., MEDIAVILLA, A., TAZÓN, A., VASSAL'LO, J. (2011) "ANTENA MARGARITA" en <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3169/Antena%20margarita.pdf?sequence=1> , Última visita: Septiembre de 2018.
- [25] RN2 TECHNOLOGIES, "RQF2500Q06 Datasheet" en [http://rn2.co.kr/?c=user&mcd=kr_sub02_09&ln=usRev_B\).pdf](http://rn2.co.kr/?c=user&mcd=kr_sub02_09&ln=usRev_B).pdf) . Última visita: Septiembre de 2018.