

# Diseño y análisis de antenas UWB para dispositivos IoT

**Claudia Cardona Reverter**

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación  
Tecnologías de antenas

**Director: Dr. Jaume Anguera Pros y Dra. Aurora Andújar**

14 de junio de 2021



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)



## FICHA DEL TRABAJO FINAL

<b>Título del trabajo:</b>	<i>Diseño y análisis de antenas UWB en aplicaciones médicas</i>
<b>Nombre del autor:</b>	<i>Claudia Cardona Reverter</i>
<b>Nombre del consultor/a:</b>	<i>Dr. Jaume Anguera, Dra. Aurora Andújar</i>
<b>Nombre del PRA:</b>	<i>Dr. Germán Cobo Cobo</i>
<b>Fecha de entrega (mm/aaaa):</b>	06/2021
<b>Titulación:</b>	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
<b>Área del Trabajo Final:</b>	<i>Tecnologías de antenas</i>
<b>Idioma del trabajo:</b>	<i>Castellano</i>
<b>Palabras clave</b>	<i>Redes inalámbricas, antenas, UWB</i>

### Resumen del Trabajo:

La forma de comunicarse se ha ido transformando a lo largo de los siglos y con el desarrollo de las tecnologías de comunicación móvil que se ha experimentado en los últimos años, cada vez se requiere más velocidad de transmisión de datos y por consiguiente, más ancho de banda.

En este proyecto, se ha realizado una introducción a las redes inalámbricas y concretamente, a las redes inalámbricas de área corporal, que presentan grandes avances en el ámbito médico. Uno de los factores clave, es la tecnología que se usa en este tipo de redes, dado que los dispositivos deben ser de tamaños muy pequeños, eficientes energéticamente y capaces de operar en un entorno donde simultáneamente están operando otros servicios, requisitos que cumple la tecnología UWB. Uno de los elementos cruciales en todo este proceso, es la antena. El objetivo principal de este proyecto consistirá en diseñar, simular y analizar el comportamiento de dos tipos de antena en este rango de frecuencias.

**Abstract:**

The way of communicating has been transformed over the centuries and with the development of mobile communication technologies that has been experienced in recent years, more and more data transmission speed is required and consequently, a wider bandwidth is required.

In this project, an introduction has been made to wireless networks and specifically, to wireless body area networks, which present great advances in the medical field. One of the key factors is the technology used in this type of network, since the devices must be very small, energy efficient and capable of operating in an environment where other services are simultaneously operating, requirements that the UWB technology meets. One of the crucial elements in this whole process is the antenna. The main objective of this project will be to design, simulate and analyze the behavior of two types of antenna in this frequency range.

# Índice

Lista de figuras.....	iv
1. Introducción.....	1
1.1 Contexto y justificación del Trabajo.....	1
1.2 Objetivos del Trabajo.....	1
1.4 Enfoque y método seguido.....	2
1.4 Planificación del Trabajo.....	2
1.5 Breve resumen de productos obtenidos.....	3
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	3
2. Redes inalámbricas.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Clasificación de redes inalámbricas.....	5
2.3 Redes inalámbricas de área corporal (WBAN).....	6
2.3.1 Aplicaciones de las WBAN.....	8
3. Fundamentos teóricos.....	11
3.1 Teoría de antenas.....	11
3.1.1 Definición de parámetros de las antenas.....	11
3.1.1.1 Ancho de banda.....	11
3.1.1.2 Eficiencia de antena.....	11
3.1.1.3 Adaptación.....	12
3.2 Tecnología Ultra Wide Band.....	12
3.2.1 Introducción.....	12
3.2.2 Ventajas UWB.....	14
3.2.3 Desventajas UWB.....	14
4. Diseño y simulación de antenas UWB.....	15
4.1 Introducción.....	15
4.2 Software IE3D.....	15
4.3 Diseño.....	16
4.4 Simulaciones y resultados.....	20
5. Conclusiones y trabajo futuro.....	34
6. Glosario.....	35
7. Bibliografía.....	36

## Lista de figuras

Figura 1. Planificación del TFM.....	3
Figura 2. Esquema redes de área corporal inalámbrica [4].....	6
Figura 3. Tasas de transmisión en sensores [6].....	8
Figura 4. Comparativa ancho de banda.....	12
Figura 5. Comparación UWB con otras tecnologías.....	12
Figura 6. Diseño dipolo impreso sobre una capa de dieléctrico.....	15
Figura 7. Diseño dipolo en el software IE3D.....	16
Figura 8. Simulación del coeficiente S11 del dipolo aislado.....	17
Figura 9. Barrido de la longitud de los brazos del dipolo .....	17
Figura 10. Barrido de la longitud de los brazos del dipolo a escala.....	18
Figura 11. Diseño monopolo impreso sobre una capa de dieléctrico.....	19
Figura 12. Diseño monopolo con ground plane 20 mm x 20 mm.....	20
Figura 13. Simulación coeficiente S11 del monopolo con GP 20x20... ..	20
Figura 14. Diseño monopolo con ground plane 40x40 en IE3D... ..	21
Figura 15. Diseño monopolo con ground plane 60x60 en IE3D.....	21
Figura 16. Diseño monopolo con ground plane 80x80 en IE3D.....	21
Figura 17. Comparativa simulación coeficientes S11 monopolos.....	22
Figura 18. Comparativa simulación coeficientes S11 monopolos a escala.....	23
Figura 19. Comparativa simulación eficiencia de antena monopolos... ..	24
Figura 20. Diseño dipolo con ground plane 20x20 en IE3D.....	25
Figura 21. Simulación coeficiente S11 del dipolo con GP 20x20.....	25
Figura 22. Diseño dipolo con más ancho de brazo en IE3D.....	26
Figura 23. Comparativa S11 entre dipolo básico y dipolo con brazos más anchos.....	26
Figura 24. Diseño dipolo con ground plane de varios tamaños en IE3D... ..	27
Figura 25. Comparativa simulación coeficientes S11 dipolos.....	27
Figura 26. Comparativa simulación eficiencia de antena dipolos.....	28
Figura 27. Diseño dipolo con capa de dieléctrico en IE3D.....	29
Figura 28. Eficiencia de antena del dipolo con capa de dieléctrico.....	29
Figura 29. Diseño monopolo con capa de dieléctrico en IE3D.....	30
Figura 30. Eficiencia de antena del monopolo con capa de dieléctrico.....	30
Figura 31. Comparación ancho de banda monopolo 20x20 y 60x60 y dipolo 20x20 y 60x60.....	32
Figura 32. Comparación eficiencia monopolo 20x20 y 60x60 y dipolo 20x20 y 60x60.....	33

# 1. Introducción

## 1.1 Contexto y justificación del Trabajo

Si bien la comunicación siempre ha sido un requisito indispensable en la humanidad, el modo de comunicación se ha ido transformando a lo largo de los siglos. En el caso de las comunicaciones inalámbricas, tenemos que remontarnos al año 1973, cuando el primer sistema inalámbrico “total” cambió completamente el escenario de la conectividad. Desde ese momento, el desarrollo de las tecnologías de comunicación móvil ha sido uno de los principales puntos de investigación y mejora.

Con cada generación de tecnología de comunicación móvil, partiendo del 1G hasta el 5G que se encuentra actualmente en fase de desarrollo/prueba, hemos observado como cada vez se requiere más velocidad de transmisión de datos y por consiguiente, más ancho de banda. [1]

Para ello, se han estudiado las diferentes opciones de tipos de redes inalámbricas, y concretamente las redes inalámbricas de área corporal, así como las tecnologías y componentes asociados que permiten desarrollar aplicaciones en el ámbito médico.

Uno de los elementos más importantes para conseguirlo es la antena, y es ahí donde las antenas de banda ultra ancha juegan su papel clave ya que permite altas velocidades de transmisión y una gran capacidad del canal, además de consumir poca potencia, ser de bajo costo y tener un tamaño apropiado para incorporarlas al cuerpo humano.

## 1.2 Objetivos del Trabajo

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster (TFM) consiste en realizar un estudio de las antenas y la tecnología UWB y cómo pueden ser útiles en varios ámbitos de aplicación, concretamente en el médico mediante la comunicación a través de redes inalámbricas de área corporal.

Para ello, a continuación se definen los objetivos específicos que se han seguido:



- Estudio e investigación de las comunicaciones inalámbricas de corto alcance.
- Propuesta de posibles aplicaciones de las redes inalámbricas WBAN.
- Estudio e investigación de la tecnología de banda ultra ancha (Ultra Wide Band, UWB).
- Utilización de la herramienta de software IE3D.
- Diseño y simulación de dos tipos de antenas a frecuencia de 5GHz para estudiar su comportamiento y viabilidad.

### 1.3 Enfoque y método seguido

El enfoque para llevar a cabo este proyecto ha consistido en primer lugar en estudiar y analizar el estado actual tanto de las redes inalámbricas como de la tecnología UWB y la relación que existe entre ambas.

En segundo lugar, se han analizado los distintos ámbitos de aplicación existentes y las soluciones actuales, así como investigar en posibles áreas no explotadas.

Por último, a partir del entendimiento realizado anteriormente, se han diseñado y simulado dos tipos de antenas para analizar tanto su comportamiento como diferentes parámetros clave para concluir sobre su viabilidad.

### 1.4 Planificación del Trabajo

En la planificación, se han establecido varias fases acordes al alcance establecido y los temas a abordar para poder desarrollar este proyecto satisfactoriamente. Se adjunta a continuación los pasos seguidos y el diagrama del proyecto realizado:

- Inicio TFM
  - o Elección proyecto
  - o Comunicación al tutor
- Plan de trabajo
  - o Definición de objetivos e hitos
  - o Recopilación información
  - o Lectura de artículos científicos
  - o Instalación software IE3D

- Desarrollo del proyecto
  - o Familiarización con el software IE3D
  - o Definición y diseño de las antenas a simular
  - o Simulaciones
  - o Análisis de resultados
  
- Memoria TFM

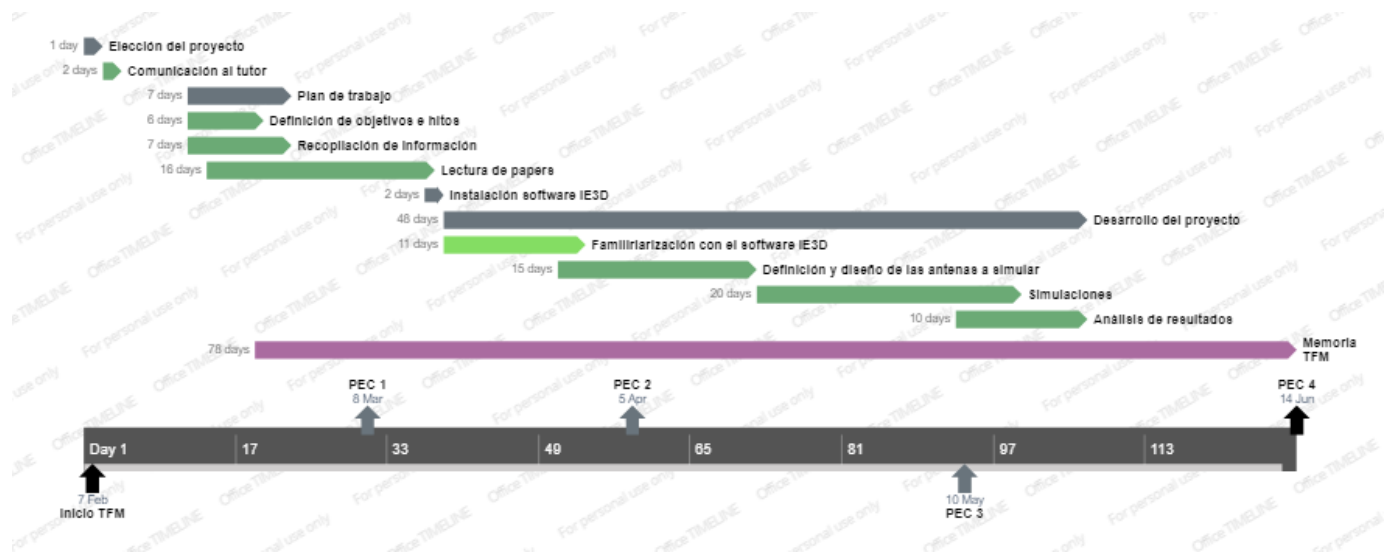


Figura 1. Planificación del TFM

### 1.5 Breve resumen de productos obtenidos

Debido al tipo de proyecto llevado a cabo y la metodología seguida, los productos obtenidos en este TFM se basarán en los diferentes resultados de las simulaciones, así como los análisis realizados y las conclusiones alcanzadas.

### 1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

Tras realizar la introducción al proyecto, en el Capítulo 2, se explica en qué consisten las diferentes redes inalámbricas existentes actualmente, para después centrarnos en las redes inalámbricas de área corporal. De estas últimas, se indican los elementos que la componen, los requerimientos que tienen asociados y se detallan algunos ejemplos de aplicaciones de este tipo de redes en el ámbito médico o de la salud-

En el Capítulo 3, primero se repasan algunos fundamentos teóricos de la teoría de antenas y de los parámetros clave a tener en cuenta. Seguidamente, se explica el funcionamiento y los factores más relevantes de la tecnología UWB, con sus respectivas ventajas y desventajas.

En el Capítulo 4, se describe todo el proceso de diseño y simulación que se ha realizado en este proyecto de las antenas monopolo y dipolo. Asimismo, se presentan y se explican los resultados obtenidos en ambos casos.

Por último, en el Capítulo 5, se explican las conclusiones a las que se ha llegado con la realización de este proyecto, así como posibles líneas de trabajo futuras.

## 2. Redes inalámbricas

### 2.1 Introducción

Una red inalámbrica se refiere a cualquier red no conectada por cables, en la que los dispositivos existentes intercambian la información a través de las ondas electromagnéticas.

La movilidad y flexibilidad que proporcionan, la facilidad de implementación, así como el bajo coste de mantenimiento que suponen, han hecho que en los últimos hayan crecido exponencialmente. [2]

### 2.2 Clasificación de las redes inalámbricas

En función del radio de cobertura de la señal y el ámbito de aplicación de las mismas, podemos distinguir varios tipos de redes inalámbricas:

- Red inalámbricas de área amplia (WWAN)

Las redes WWAN son las que permiten cubrir un área más amplia (del orden de miles de kilómetros) mediante sistemas de satélites y antenas repartidas geográficamente. Generalmente se utilizan para comunicaciones de satélites, Internet y telefonía móvil y suelen ser privadas y gestionadas por empresas proveedoras de servicios.

- Redes inalámbricas de área metropolitana (Wireless Metropolitan Area Networks- WMAN)

Las redes WMAN son redes que pueden cubrir un área geográfica de hasta unos 50 kilómetros. Este tipo de redes normalmente comunican varias redes LAN y son utilizadas en instituciones como campus universitarios, un conjunto de hospitales o empresas con varias sedes.

- Redes inalámbricas de área local (Wireless Local Area Networks- WLAN)

Las redes WLAN son redes que tienen un alcance de entre 50 y 150 metros. Son las más comunes y normalmente se utilizan en oficinas, aeropuertos y hogares.

- Redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Network WPAN)

Las WPAN son redes para interconectar dispositivos centrados en el espacio de trabajo de una persona individual, dado que solamente alcanzan unos 10 metros. Algunos ejemplos de ello serían impresoras, auriculares inalámbricos, etc.

- Redes de área corporal inalámbricas (Wireless Body Area Networks WBAN)

Las redes de área corporal inalámbrica o WBAN son un tipo de redes inalámbricas basadas en radiofrecuencia de dispositivos que son “wearable” o en su traducción literal, ponibles. Estos dispositivos (en su mayoría nodos, sensores corporales y actuadores) se pueden implantar dentro o fuera del cuerpo humano, por lo que principalmente se utilizan para aplicaciones médicas y de salud.

Este último tipo de redes es el más relevante para este proyecto, entraremos en más detalle a continuación.

### **2.3 Redes de área corporal inalámbricas (WBAN)**

Este tipo de redes están diseñadas de manera que hay un dispositivo (independiente al cuerpo humano) que coordina y se comunica con los sensores implantados simultáneamente o de manera independiente, así como con el punto de acceso que además transmite la información recopilada a una estación de monitorización remota. [3]

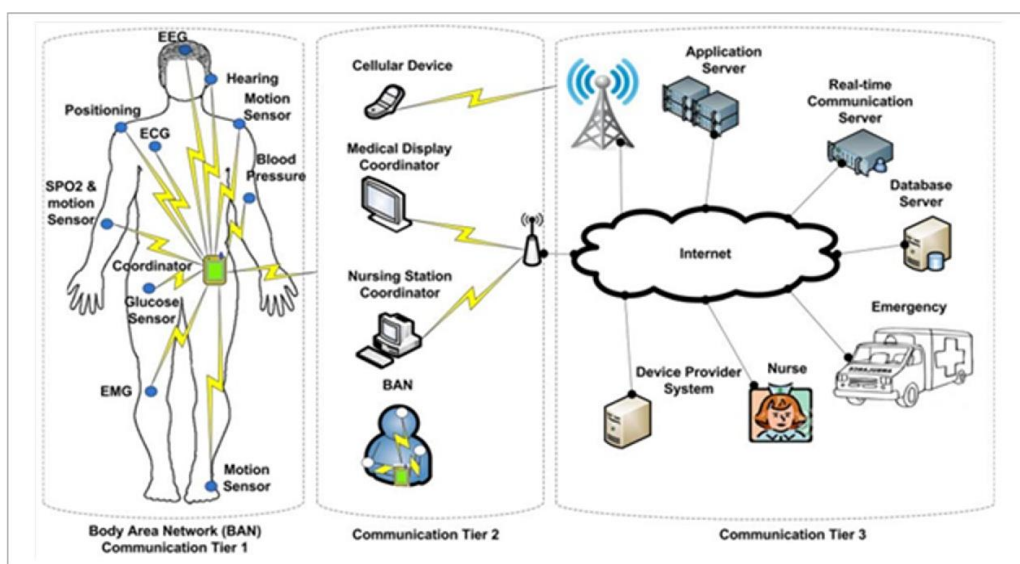


Figura 2. Esquema redes de área corporal inalámbrica [4]

Podemos diferenciar entre WBAN invasivas y no invasivas dependiendo de si los sensores están situados dentro o fuera del cuerpo humano:

- WBAN invasivas (Implantable WBAN): los sensores están ubicados bajo la piel o en el interior de los tejidos y se denominan comunicaciones intracorporales. Si bien aportan más ventajas que las WWBAN, pueden causar infecciones y en algunos casos limita la movilidad de los pacientes. Algunos ejemplos de estos sensores serían el electrocardiograma (ECG), el electroencefalograma (EEG), o sensores de temperatura, glucosa, etc.
- WBAN no invasivas (Wearable WBAN): los sensores están ubicados sobre la piel a lo largo del cuerpo humano de manera superficial. Algunos ejemplos de estos sensores serían los marcapasos, las cápsulas endoscópicas o estimuladores cerebrales.

Una red WBAN, tiene una serie de requerimientos que se listan a continuación [5]:

- El rango de comunicación de los nodos debe ser inferior a 3 metros.
- Debe admitir la topología en estrella de un salto o dos saltos.
- Los nodos tienen que poder eliminarse e insertarse en la red en menos de 3 segundos.
- Existe un máximo de 4 WBANs por cuerpo y un máximo de 64 nodos en cada una (un total de 256 nodos).
- Los nodos deben poder proporcionar una comunicación estable, incluso cuando exista movilidad.
- La latencia del sistema debe ser inferior a 125 ms para aplicaciones médicas y menos de 250 ms para aplicaciones no médicas. Su fluctuación debe ser inferior a 50 ms.
- Deben incorporar funciones de gestión de QoS para que sean autocorregibles y seguras y respalden los servicios prioritarios.
- La tasa de error de paquete (PER) debe ser inferior al 10%, asumiendo una carga útil de datos de 256 bytes, con una probabilidad de éxito del enlace del 95% en todos los canales y condiciones de movimiento.

- Todo el equipo debe poder transmitir a 0,1 mW (-10 dBm). La potencia máxima de transmisión radiada debe ser inferior a 1 mW (0 dBm).
- Deben poder funcionar en un entorno donde las redes de diferentes estándares operan entre sí, lo que hace interesante la aplicación de tecnología UWB.
- Los enlaces WBAN deben admitir tasas de transmisión en un rango de 10 Kb/s a 10 Mb/s.

En referencia a este último punto, se indican a continuación las diferentes tasas de transmisión orientativas para los diferentes sensores:

WBANS Applications	Signals	Data Range	Frequency (Hz)	Accuracy (bits)	Data Rate
Medical/Health	Glucose Concentration	0–20 mM	40	12	480 bps
	Blood Flow	1–300 ml/s	40	12	480 bps
	ECG	0.5–4 mV	500	12	6 Kbps
	Respiratory Rate	2–50 breaths/min	20	12	240 bps
	Pulse Rate	0–150 BPM	4	12	48 bps
	Blood Pressure	10–400 mm Hg	100	12	1.2 Kbps
	Blood pH	6.8–7.8 pH	4	12	48 bps
	Body Temperature	32–40 °C	0.2	12	2.4 bps
Non-Medical	High Quality Audio	-	-	-	1.4 Mbps
	Voice	-	-	-	100 kbps
	Video	-	-	-	1–2 Mbps
	GPS positions	-	1	32	96 bps
	Motion Sensor	-	100	16	4.8 Kbps

Figura 3. Tasas de transmisión en sensores [6]

### 2.3.1 Aplicaciones de las WBAN

Si bien existen muchos ámbitos de aplicación como el militar o el entretenimiento, el más aplicado y desarrollado es el médico por las grandes ventajas que ofrece. Existen variedad de aplicaciones, a continuación, se muestran algunos ejemplos de ello:

- Sistemas de alerta médica

Seguramente es una de las aplicaciones más comunes, y consiste alertar a los miembros de la familia o amigos de un paciente en caso de una emergencia. Por ejemplo, existen pulseras que detectan cambios bruscos de movimiento o caídas.

- Monitores cardíacos con informes

Los pacientes pueden usar dispositivos que controlan y registran su frecuencia cardíaca y que pueden determinar, por ejemplo, si tienen la presión arterial alta. De este modo, los equipos médicos tendrán acceso a informes de los datos del monitor cardíaco del paciente para realizar un seguimiento e incluso, los dispositivos pueden ser configurados para alertar a los médicos en caso de que los pacientes experimentan arritmias, palpitaciones o ataques cardíacos.

- Sistemas implantables de monitorización de glucosa

Los pacientes que padecen diabetes pueden tener dispositivos con sensores implantados debajo de la piel. Los sensores de los dispositivos enviarán información al teléfono móvil del paciente cuando sus niveles de glucosa bajen demasiado y también registrarán un histórico de datos. De esta manera, los pacientes podrán saber cuándo es más probable que estén en riesgo de tener niveles bajos de glucosa en el futuro. Otra de las opciones existentes, son lentes de contacto que leen los niveles de glucosa.

- Sensores ingeribles

Los pacientes pueden ingerir dispositivos con sensores que parecen píldoras. Una vez que se ingieren los sensores, transmiten información a la aplicación móvil del paciente que lo ayudará a seguir las dosis adecuadas de sus medicamentos en el momento adecuado. Algunos de estos sensores, se utilizan para diagnosticar con mayor precisión a los pacientes con cosas como el síndrome del intestino irritable y el cáncer de colon.

- Monitores de actividad durante el tratamiento del cáncer

Existen rastreadores de actividad que rastrean los movimientos de un paciente: niveles de fatiga, el apetito, etc. La obtención de estos datos se realiza tanto antes del tratamiento contra el cáncer, como durante el mismo y después, por lo que permite ajustarlo en caso de ser necesario o evaluar la respuesta del mismo en el paciente.



Entre los componentes para las redes WBAN, aparte de los propios dispositivos y los protocolos de comunicación, las antenas juegan un papel crucial, que deben cumplir tres características principales: tamaño pequeño, eficiencia energética y capacidad para operar en un entorno de múltiples antenas. Es en este punto donde introducimos las antenas UWB de las que hablaremos más adelante. Su tamaño es mucho menor en comparación a otras antenas, lo que hace que sea perfecta para su uso en dispositivos móviles portátiles [7] [8] [9] [10] [11].

## 3. Fundamentos teóricos

### 3.1 Teoría de antenas

Por definición, una antena es un dispositivo que se utiliza para radiar o recibir ondas electromagnéticas.

Existen muchos tipos de antenas, dependiendo del tipo de aplicación para la que estén diseñadas. En el caso de los sistemas de radiodifusión, por ejemplo, contamos con antenas omnidireccionales y en el caso de recepción de señales de televisión, con antenas Yagi-Uda. Si queremos una antena para enlaces de radio por microondas, generalmente se utilizaría una antena parabólica. [12]

#### 3.1.1 Definición de parámetros de las antenas

En este apartado se explican algunos de los parámetros básicos de las antenas para especificar su comportamiento y poder evaluar su efecto en el apartado 5. [13]

##### 3.1.1.1 Ancho de banda

El ancho de banda de una antena se refiere al rango de frecuencias en las que la antena puede funcionar correctamente. Se puede definir en forma de porcentaje como la relación entre el margen de frecuencias y la frecuencia central:

$$BW = 100 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_c}$$

Dónde  $f_H$  es la frecuencia máxima en la banda,  $f_L$  es la frecuencia mínima en la banda y  $f_c$  es la frecuencia central.

##### 3.1.1.2 Eficiencia de antena

La eficiencia de una antena es una relación entre la potencia entregada a la antena y la potencia radiada por la antena, por lo que permite tener en cuenta las posibles pérdidas de la misma. Se define a continuación:

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_e} = \frac{P_r}{P_r + P_\Omega}$$

Dónde  $P_r$  es la potencia radiada y  $P_e$  la potencia entregada, que se compone de la potencia radiada y de  $P_\Omega$  que es la potencia disipada debido a las pérdidas de la antena.

### 3.1.1.3 Adaptación

Una antena se encuentra adaptada cuando la potencia transmitida hacia el generador pasa a la antena y ésta se radia al espacio con el mínimo de pérdidas posibles. Para expresar el grado de adaptación entre la antena y la impedancia del propio circuito, disponemos de la relación de onda estacionaria (ROE):

$$ROE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Dónde  $\rho$  es el coeficiente de reflexión y se define cómo:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Donde  $Z_L$  es la impedancia de antena y  $Z_0$  la impedancia de referencia.

En el caso de adaptación perfecta, tendríamos un valor de ROE igual a 1. Cuando la ROE sea superior a 1 y exista desadaptación de impedancias, se produce una oposición mayor al paso de la corriente, que provoca un descenso del nivel de la señal.

## **3.2 Tecnología de antenas UWB**

### 3.2.1 Introducción

La tecnología Ultra Wide-Band (UWB) empezó a coger fuerza a partir de 1960 en el ámbito militar, tanto como radar como tecnología de comunicación, si bien su existencia se remonta a los inicios de la radio a principios de siglo XX.

Las comunicaciones de banda ultra ancha son fundamentalmente diferentes de todas las demás técnicas de comunicación porque emplean pulsos de RF muy estrechos y de baja potencia para comunicarse entre transmisores y receptores. El uso de pulsos de corta duración como bloques de construcción para las comunicaciones genera un ancho de banda muy amplio (espectro de frecuencias que van desde 3,1 a 10,6 GHz en aplicaciones sin licencia) y ofrece varias ventajas que detallaremos más adelante.

Asimismo, otra de las características respecto a los sistemas convencionales es que los sistemas UWB se implementan sin portadora, modulando los datos directamente sobre pulsos, mientras que el resto de los sistemas emplean portadoras de Radio Frecuencia (RF) para desplazar la señal, de banda base hasta la frecuencia a la cual el sistema va a trabajar [14].

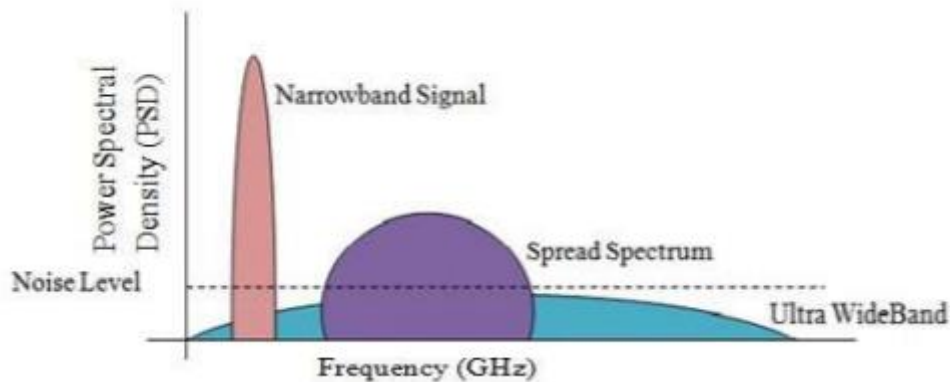


Figura 4. Comparativa ancho de banda [15]

Los sistemas UWB están diseñados para trabajar en bandas de frecuencia asignadas a otros servicios simultáneamente, por lo que deben interferir lo menos posible. Con el objetivo de evitar estas interferencias, el espectro generado debe respetar la máscara de emisión (limitación de potencia regulada). Debido a estas restricciones de potencia, la tecnología UWB es apropiada para su uso en aplicaciones de corto alcance y no es viable para el largo alcance [16].

Si comparamos con otras tecnologías, el Bluetooth y el Wi-Fi son los grandes competidores en las comunicaciones inalámbricas. En cuanto a la tasa de transmisión, la del Bluetooth es inferior a 1 Mbps, la del Wi-Fi es 3.65 Gbps, mientras que la de UWB son decenas de Gbps.

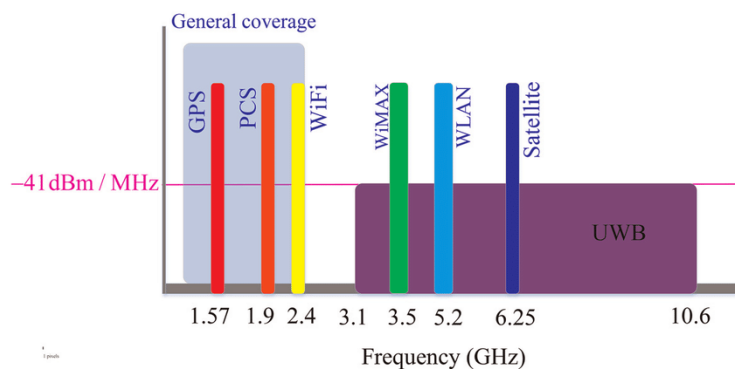


Figura 5. Comparación UWB con otras tecnologías [17]

### 3.2.2 Ventajas UWB

A modo resumen, podemos identificar las siguientes ventajas de los sistemas UWB [18]:

- Resistentes al desvanecimiento del canal.
- Posibilidad de altas velocidades de transmisión de datos.
- Buena localización y tiempo de resolución (debido a la corta duración del pulso).
- Propagación de señales sin portadora.
- Posibilidad de encubrir comunicaciones con baja probabilidad de interceptación, debido a la baja densidad espectral de potencia.
- Capacidad de acceso múltiple, debido al amplio ancho de banda de transmisión.
- Propagación a través de materiales sólidos, debido a la presencia de energía en diferentes frecuencias.
- Simplicidad de la implementación y bajo costo de los dispositivos.

### 3.2.3 Desventajas UWB

Asimismo, a parte de las grandes ventajas mencionadas, también encontramos algunas desventajas que se listan a continuación:

- Procesamiento de señales complejo, debido a la transmisión sin portadora.
- Coexistencia con otros sistemas que puede generar interferencias.
- Únicamente es viable para comunicaciones de corto alcance

## 4. Diseño y simulación de antenas UWB

### **4.1 Introducción**

En este capítulo, se detalla el proceso de diseño y simulación de varios tipos de antena a través del software IE3D de Mentor Graphics. A partir de los resultados obtenidos, se han podido analizar algunos parámetros clave de las antenas, entre ellos el ancho de banda, la eficiencia o la adaptación de la antena.

Con el objetivo de diseñar y simular antenas que operen en la banda de frecuencia de UWB (que va de 3.1 a 10.6 GHz), se ha considerado que la antena esté adaptada a la frecuencia de 5 GHz y que la eficiencia de antena sea elevada. Para ello, en el apartado 4.3 se ha realizado el diseño y se han definido los parámetros apropiados de las antenas a simular.

### **4.2 Software IE3D**

Tal y como se ha indicado en la introducción, para el diseño y simulación de las antenas de este proyecto, se ha utilizado el software IE3D de Mentor Graphics.

Se trata de un software de simulación electromagnética basado en el método de los momentos. Permite diseñar todo tipo de circuitos integrados y antenas: MICs, RFICs, antenas de parche, antenas de cable y otras antenas RF/inalámbricas. También permite calcular y trazar los parámetros S, VSWR, distribuciones de corriente, así como patrones de radiación de los diseños realizados.

Se ha escogido este software debido a la gran variedad de funcionalidades que dispone, además de la facilidad de diseño y precisión en los resultados de las simulaciones.

IE3D dispone de diferentes módulos, todos ellos utilizados en el proyecto, que se indican a continuación:

- Mgrid: módulo para el diseño.
- Modua: módulo para el análisis de la impedancia de entrada.
- PatternView: módulo para visualizar las eficiencias (de la antena, de radiación), la ganancia, directividad, etc.

### 4.3 Diseño

El objetivo principal ha sido el diseño de antenas de gran ancho de banda a altas frecuencias, para ello nos hemos centrado en el monopolo y el dipolo, dado que se tratan de dos tipos de antena simples y apropiados para la obtención de resultados. A continuación, se explica a grandes rasgos el funcionamiento y conceptos básicos de ambos tipos de antena:

#### 4.3.1 Dipolo

El dipolo consiste en dos elementos conductores rectilíneos de longitud total  $\lambda/2$  conectados entre ellos por un generador.

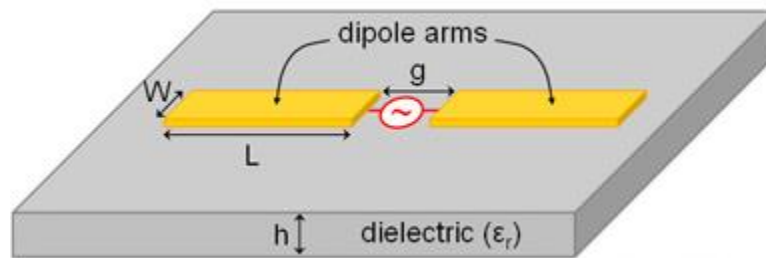


Figura 6. Diseño dipolo impreso sobre una capa de dieléctrico [19]

En primer lugar, para el diseño del dipolo de  $\lambda/2$ , necesitamos saber la longitud total de los brazos del dipolo que depende de la frecuencia de trabajo, en nuestro caso 5GHz. Se ha calculado la longitud de onda ( $\lambda$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde  $c =$  *velocidad de propagación en el vacío* ( $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ )

$f =$  *frecuencia de trabajo* (5 GHz)

A partir de la expresión anterior y sabiendo que la longitud total de los brazos del dipolo debe ser igual a  $\lambda/2$ , obtenemos lo siguiente:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = 30 \text{ mm}$$

No obstante, el dipolo no se diseñará en el vacío sino sobre un sustrato dieléctrico, con constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4.15$  y grosor de la lámina de 1.6 mm. Partiendo de la expresión anterior, para calcular la longitud total del brazo de la antena, debemos incluir el factor de la permitividad del sustrato tal y como se indica a continuación:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\epsilon_r}$$

Debido al poco grosor del dieléctrico utilizado en nuestro diseño, éste no afecta a la resonancia y el efecto del mismo es despreciable.

Por lo que según la expresión anterior, cada brazo del dipolo equivaldría a  $L/2 = 15 \text{ mm}$  teóricos.

Una vez conocida la longitud de los brazos de la antena, se escogen los valores iniciales para el resto de parámetros del dipolo que se indican a continuación:

$$L/2 = 15 \text{ mm}$$

$$W = 1.5 \text{ mm}$$

$$G = 0.5 \text{ mm}$$

Hemos procedido a dibujar el dipolo plano con los parámetros indicados anteriormente:

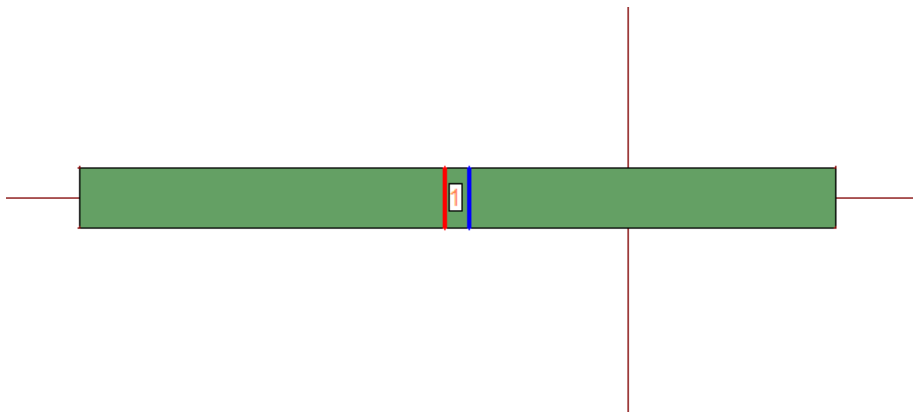


Figura 7. Diseño dipolo en el software IE3D

Como resultado de la simulación, hemos observado que la antena se encuentra adaptada a 4.5 GHz en vez de a 5GHz como se planteaba al principio:



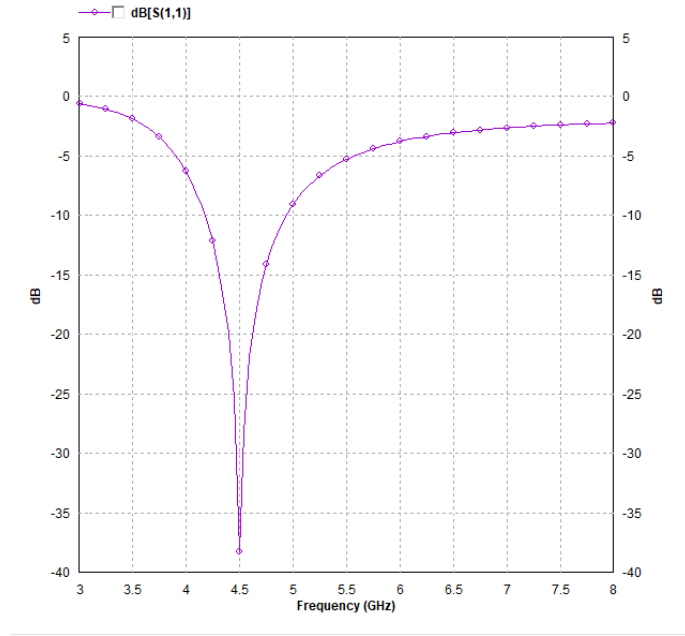


Figura 8. Simulación del coeficiente S11 del dipolo aislado

Para tratar de ajustar el valor de la frecuencia de trabajo deseada, se ha realizado un barrido ajustando la longitud de los brazos del dipolo, se muestra a continuación:

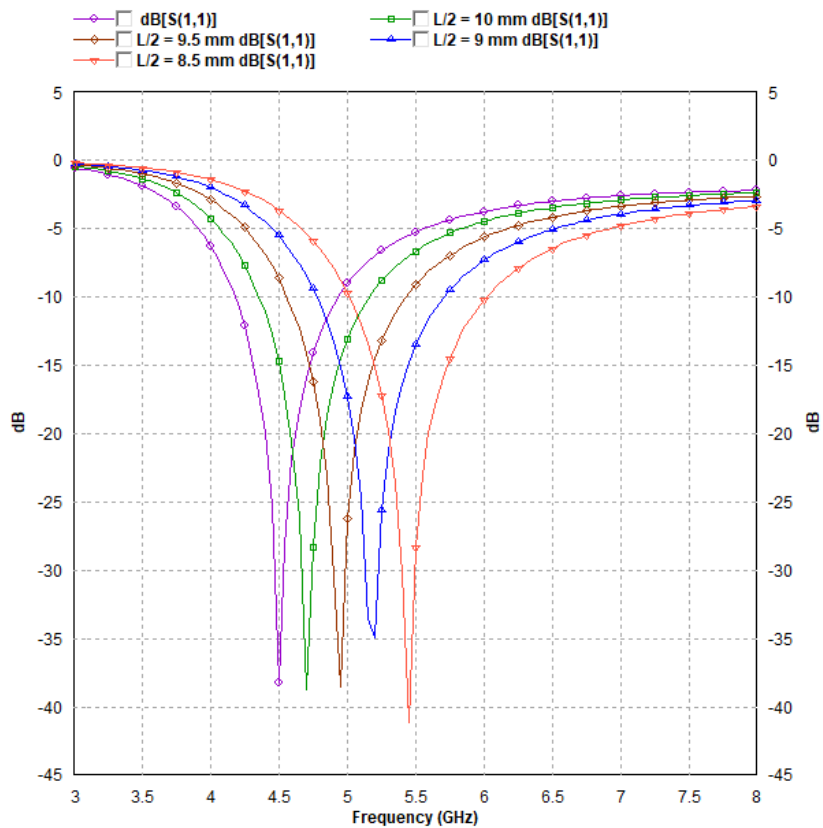


Figura 9. Barrido de la longitud de los brazos del dipolo

Ajustando la escala de los ejes X e Y, y cogiendo como referencia de frecuencia -6 dB, se ha considerado que la longitud del brazo del dipolo óptima y la que se utilizará para las posteriores simulaciones es  $L/2 = 9 \text{ mm}$ .

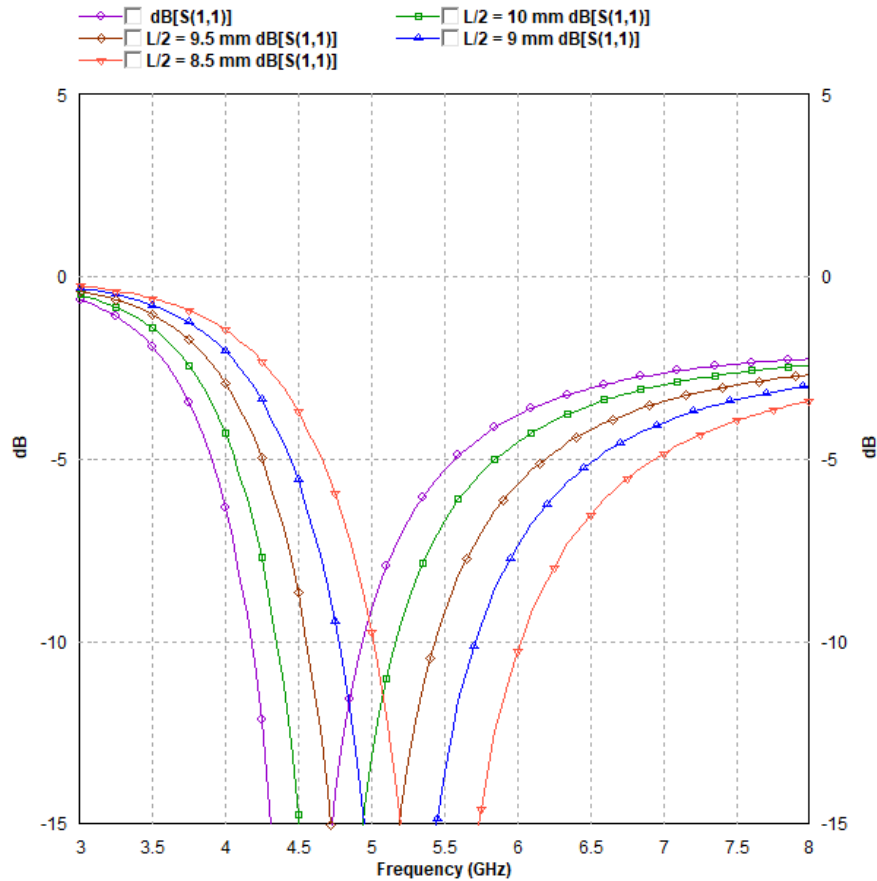


Figura 10. Barrido de la longitud de los brazos del dipolo a escala

Se ha comprobado que el resto de parámetros, como el ancho de banda, se mantienen prácticamente constantes con la variación de  $L/2$ .

#### 4.3.2 Monopolo

Se conoce al monopolo como un radiador físico sobre un plano de tierra, cuya presencia provoca la aparición de otro radiador virtual de la misma longitud a partir de la teoría de imágenes. El conjunto de ambos radiadores actúa como un dipolo equivalente al total de la longitud de los dos monopolos.

Las antenas monopolo impresas proporcionan un ancho de banda grande.

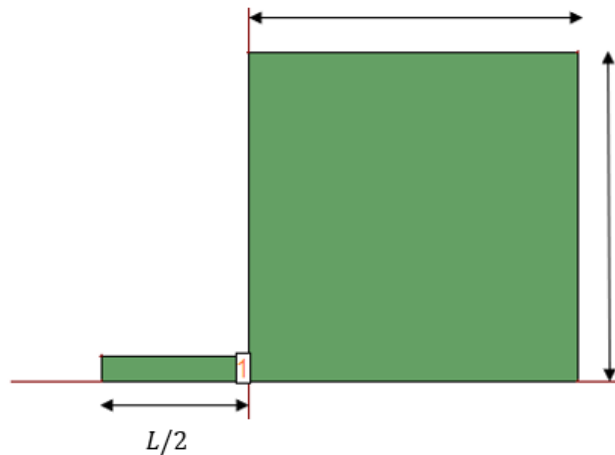


Figura 11. Diseño monopolo impreso sobre una capa de dieléctrico

#### **4.4 Simulaciones y resultados**

Una vez realizado el diseño de los parámetros de configuración, en este apartado se han realizado varias simulaciones tanto del monopolo como del dipolo con el objetivo de comparar su comportamiento en diferentes situaciones y analizar las características que presentan. Se listan a continuación los diferentes casos de uso que se han realizado:

- 4.4.1 Monopolo y efecto del tamaño del ground plane
- 4.4.2 Dipolo e independencia/efecto del ground plane
- 4.4.3 Mejora de la eficiencia de antena
- 4.4.4 Comparativa entre monopolo y dipolo

##### **4.4.1 Monopolo y efecto del tamaño del ground plane**

Idealmente, el rendimiento de una antena monopolo debería ser independiente del tamaño del plano de tierra. Sin embargo, en la práctica un plano de tierra con un tamaño finito podría comportarse como un elemento radiante y su distribución de corriente podría afectar el ancho de banda de impedancia, la ganancia y el patrón de radiación de la antena. Teóricamente, se puede mejorar el ancho de banda cuando la longitud del plano de tierra es de aproximadamente  $0.4 \lambda$ , es decir, en nuestro caso sería un plano de aproximadamente  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ . [20]

En este apartado, se ha diseñado y simulado un monopolo con un *ground plane* de diferentes dimensiones:  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ ,  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ,  $60 \times 60 \text{ mm}^2$  y  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ .

La geometría básica empleada, ha sido la siguiente:

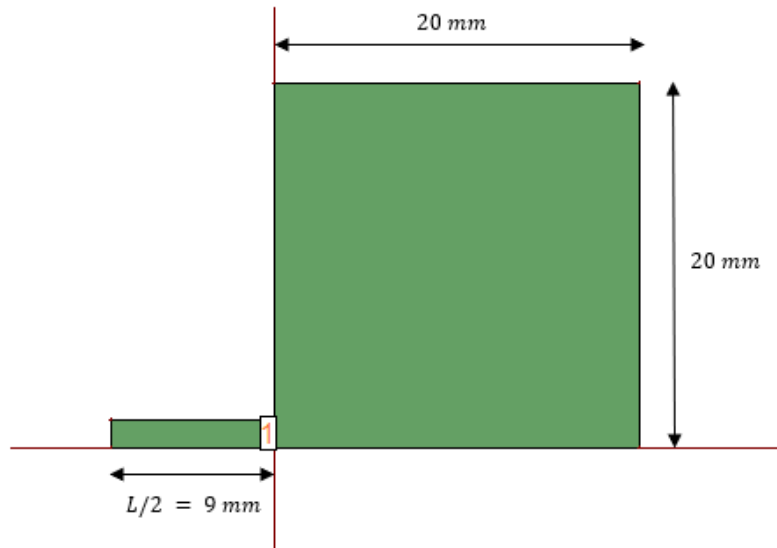


Figura 12. Diseño monopolo con ground plane 20 mm x 20 mm

En este primer caso, el de un monopolo de 9 mm con un ground plane de 20x20, se han obtenido los siguiente resultados de simulación:

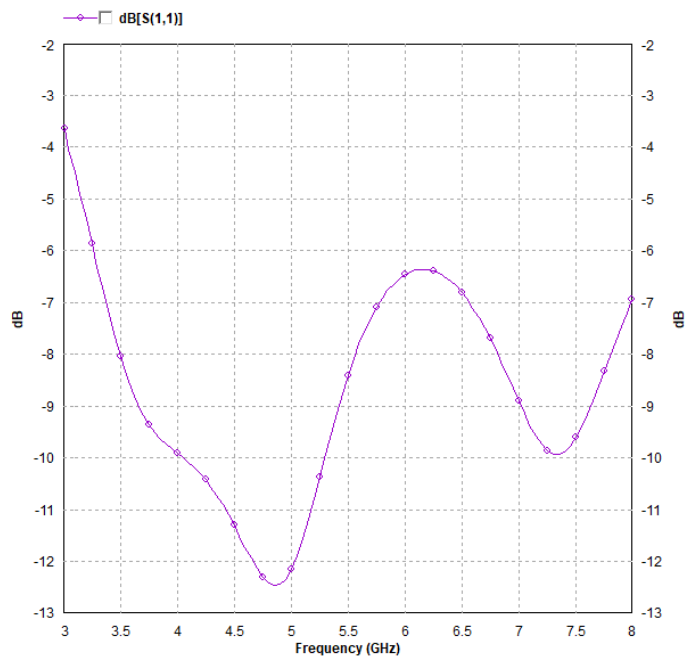


Figura 13. Simulación coeficiente S11 del monopolo con GP 20x20

Si nos fijamos a -6 dB, observamos que la antenna se encuentra adaptada a 5GHz y que obtenemos un ancho de banda bastante grande.

A continuación, se han generado los siguientes monopolos y se ha ido ajustando el tamaño del *ground plane*, siempre manteniendo que la longitud del brazo del monopolo sean 9 mm:

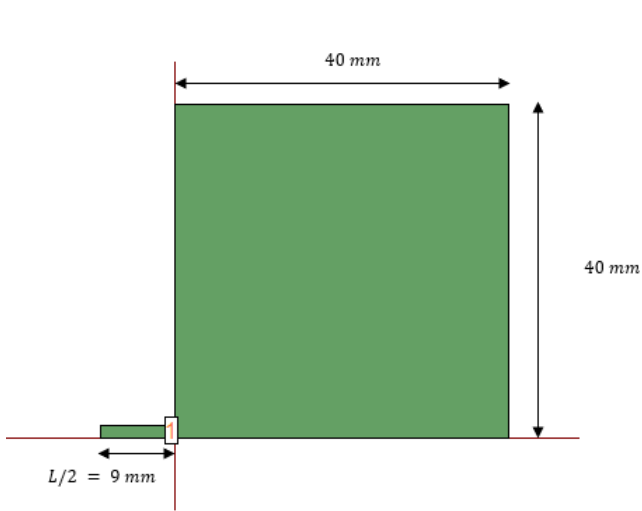


Figura 14. Diseño monopolo con ground plane 40x40 en IE3D

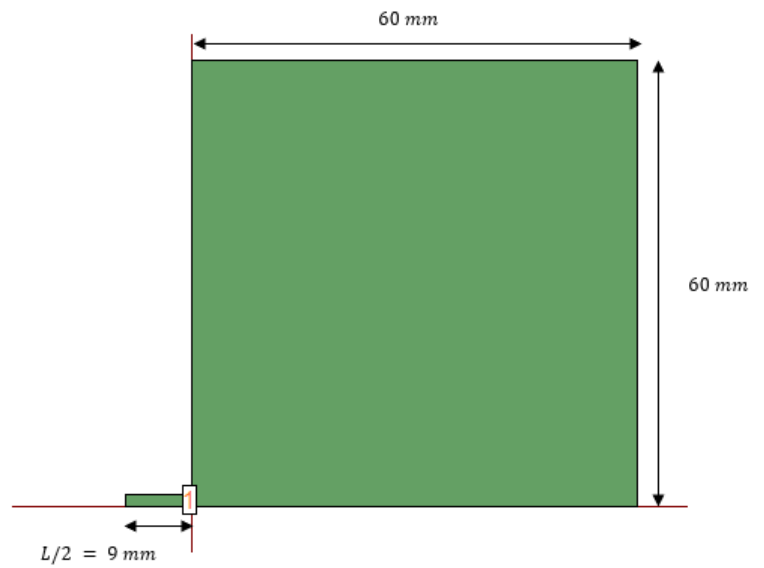


Figura 15. Diseño monopolo con ground plane 60x60 en IE3D

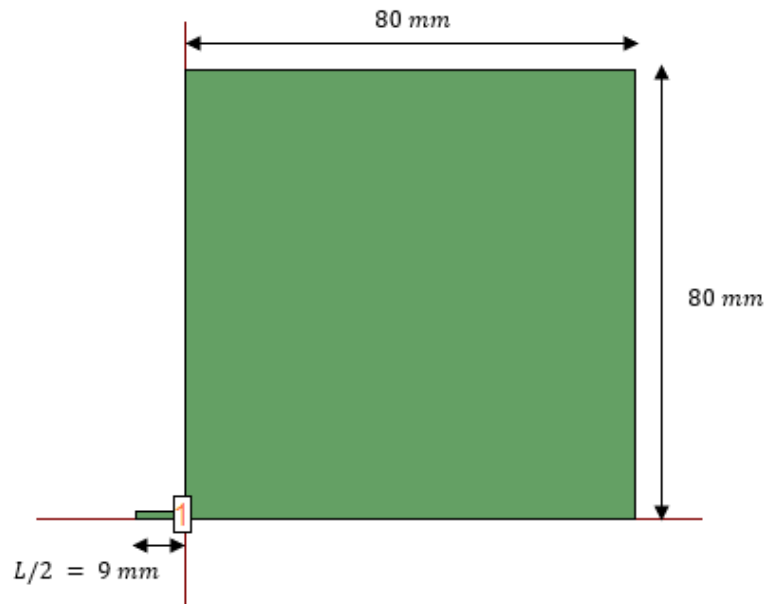


Figura 16. Diseño monopolo con ground plane 80x80 en IE3D

Se adjunta a continuación la comparativa de la adaptación y ancho de banda en los diferentes casos planteados:

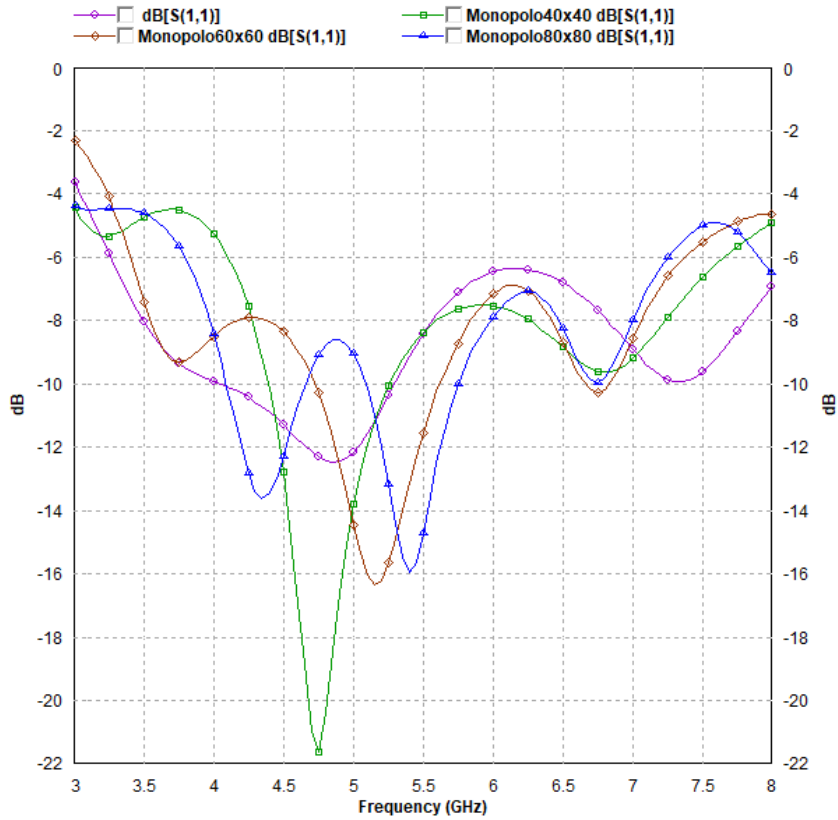


Figura 17. Comparativa simulación coeficientes S11 monopolos

Ajustamos la escala de la gráfica, donde podemos observar que el monopolo que nos proporciona un ancho de banda más grande a -6dB, es el primer caso realizado, con un ground plane de 20x20:

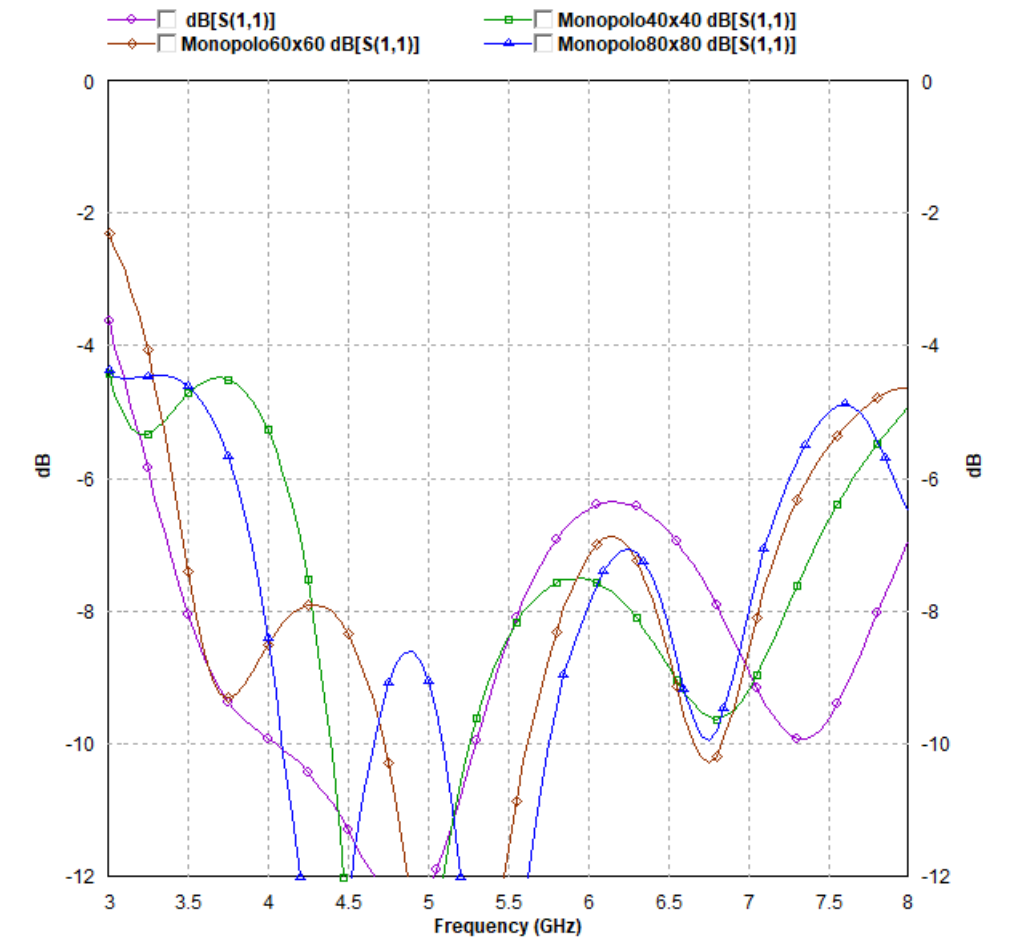


Figura 18. Comparativa simulación coeficientes S11 monopolos a escala

Si nos fijamos ahora en la eficiencia de antena, observamos que en el caso del monopolo con ground plane 20x20, tenemos una eficiencia aproximadamente constante y superior al 50% entre 3.5 y 4.5GHz. En los otros casos, observamos que aparecen una serie de picos de eficiencia coincidentes con los puntos en los que la antena se encuentra adaptada en frecuencia.

Asimismo, cabe destacar que en todos los casos la eficiencia cae en picado a partir de frecuencias superiores a 5GHz.

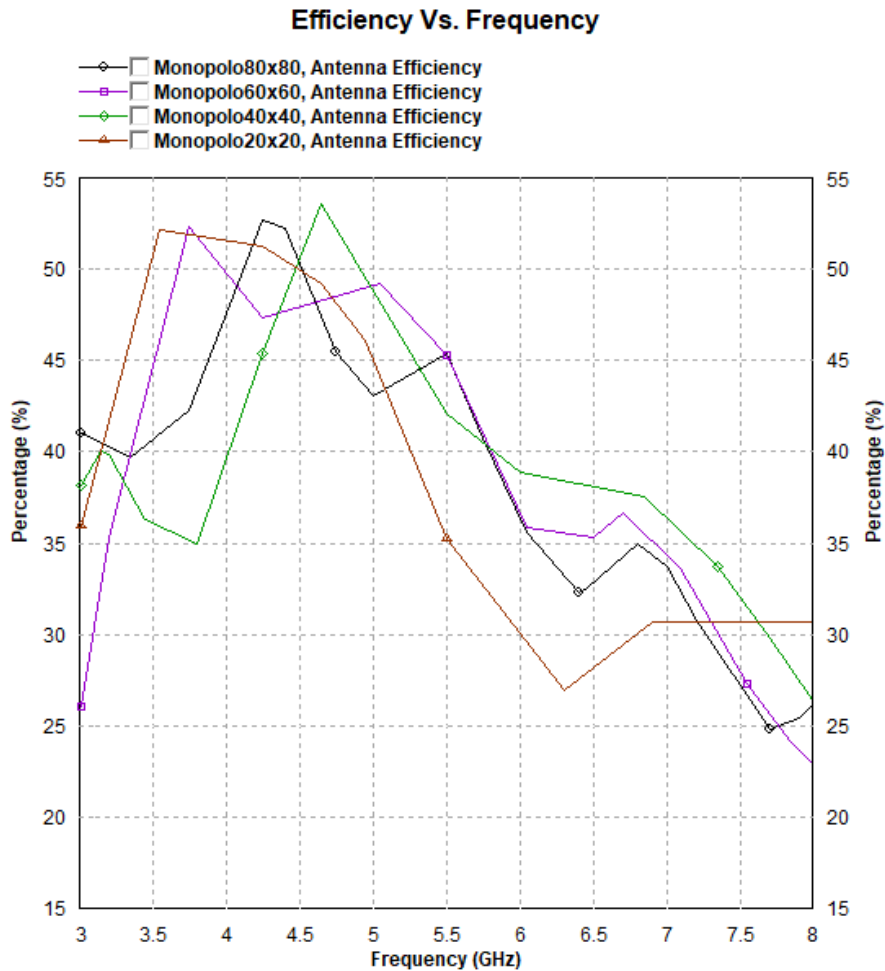


Figura 19. Comparativa simulación eficiencia de antena monopolos

Generalmente, en todos los casos planteados la eficiencia es baja. Más adelante, en el apartado 4.4.3, se presentará una alternativa de diseño para tratar de mejorar la eficiencia.

Hemos podido observar que el ground plane más óptimo es el de 20x20 mm, cercano a  $0.4 \lambda$ , dado que ofrece una eficiencia de antena más constante alrededor de 5 GHz y proporciona un ancho de banda mayor al resto (de 3.2 a 6 GHz).

#### 4.4.2 Dipolo e independencia/efecto del ground plane

En el apartado de diseño, se ha simulado un dipolo aislado. Para compararlo con el monopolo, introduciremos un ground plane finito a una distancia  $d = 9 \text{ mm}$  de las mismas características que en el caso anterior para estudiar su comportamiento y ver los efectos que produce.



En el primer caso realizado, se ha simulado un dipolo plano con un ground plane de 20x20 mm. Se adjunta a continuación la geometría:

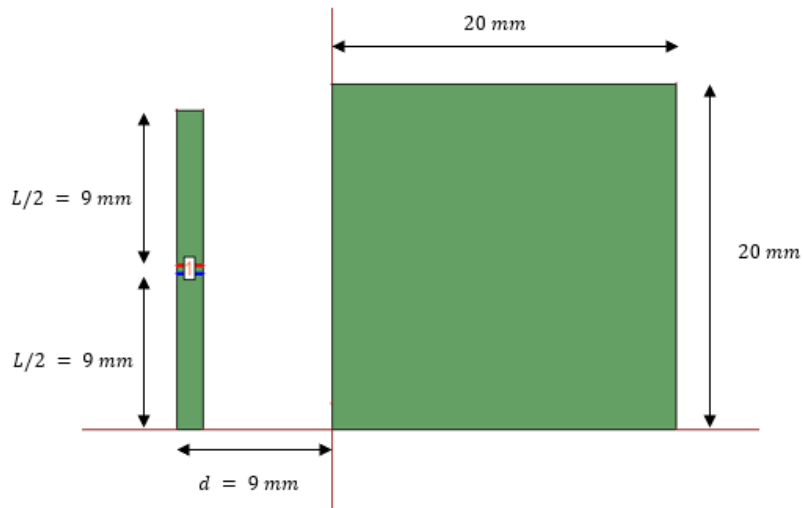


Figura 20. Diseño dipolo con ground plane 20x20 en IE3D

A partir de la simulación realizada, observamos que el dipolo se encuentra perfectamente adaptado a 5GHz:

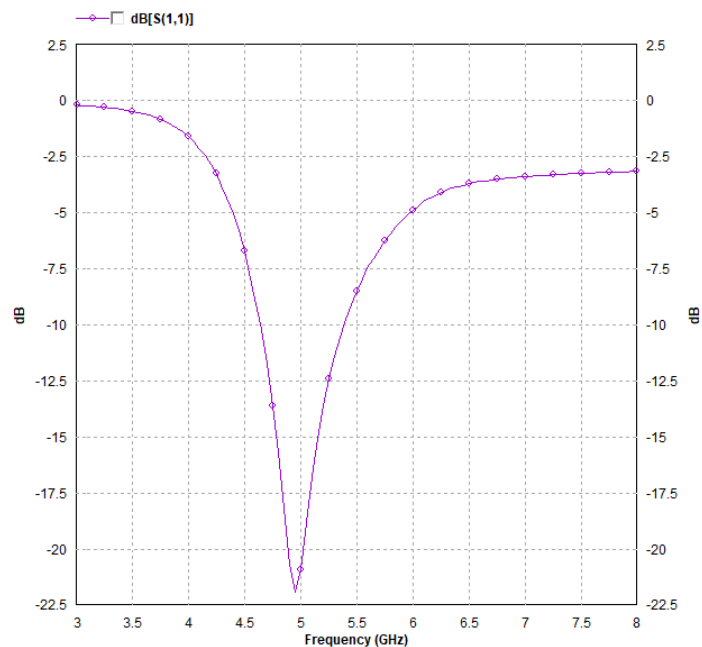


Figura 21. Simulación coeficiente S11 del dipolo con GP 20x20

A continuación, se ha aumentado la anchura de los brazos del dipolo ( $W = 3\text{ mm}$ ) en la dirección del ground plane para acercar ambos elementos:

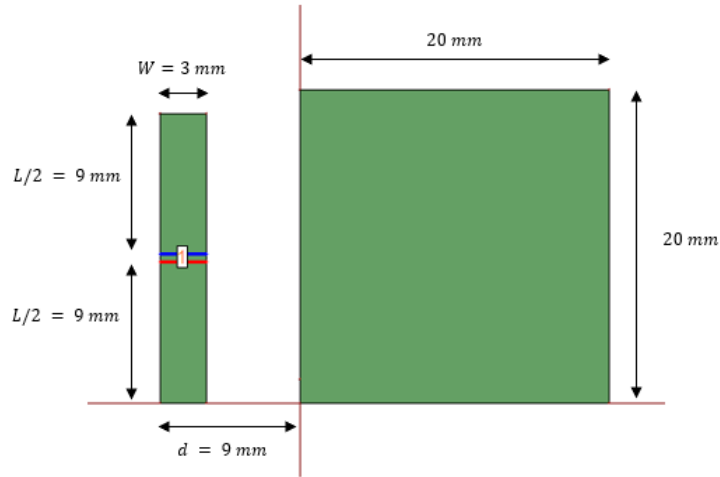


Figura 22. Diseño dipolo con más ancho de brazo en IE3D

Al comparar ambos parámetros de adaptación, si bien son muy similares, observamos que al aumentar el ancho del dipolo, se incrementa levemente el ancho de banda:

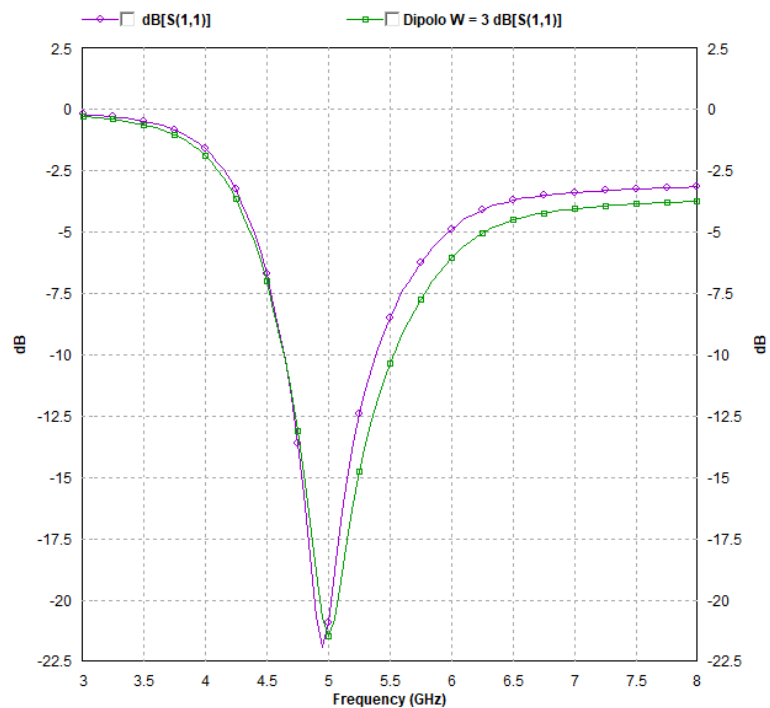


Figura 23. Comparativa S11 entre dipolo básico y dipolo con brazos más anchos

Manteniendo la configuración inicial del dipolo ( $W = 1.5 \text{ mm}$ ), se ha procedido a incrementar el tamaño del ground plane para observar su efecto. Los casos realizados son los mismos que en monopolo: ground plane de 20x20, 40x40, 60x60 y 80x80.

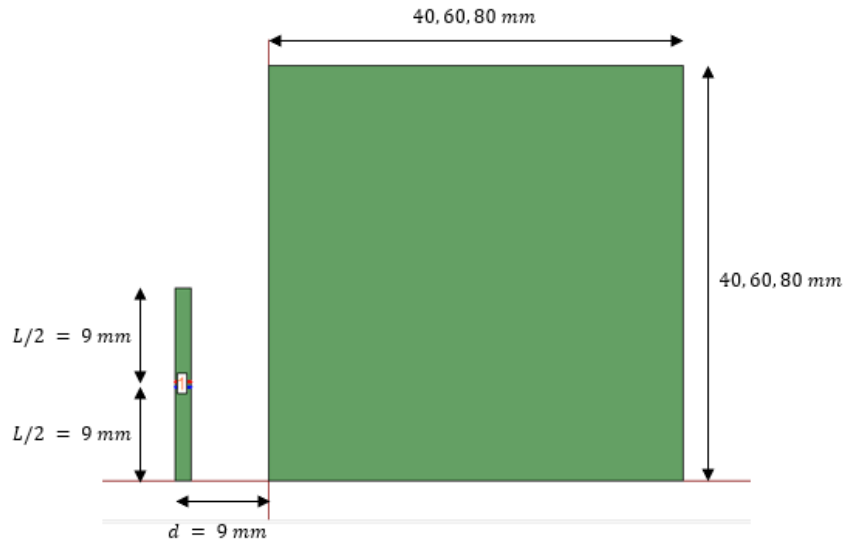


Figura 24. Diseño dipolo con ground plane de varios tamaños en IE3D

Si nos fijamos en los parámetros de adaptación y ancho de banda, observamos que la diferencia entre ellos es mínima, y por consiguiente podemos considerar que el ground plane tiene muy poco impacto en el dipolo:

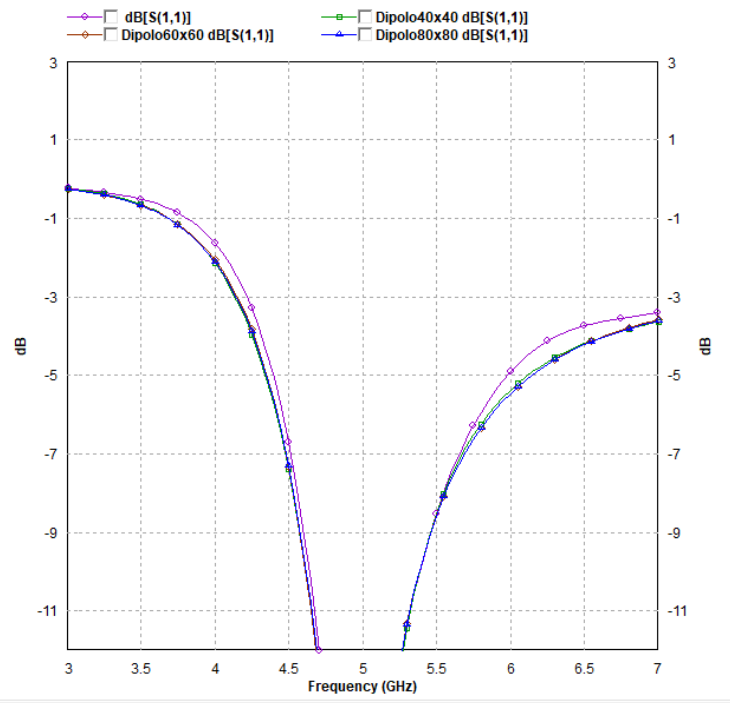


Figura 25. Comparativa simulación coeficientes S11 dipolos

Si ahora comparamos la eficiencia de antena en los cuatro casos, obtenemos lo siguiente:

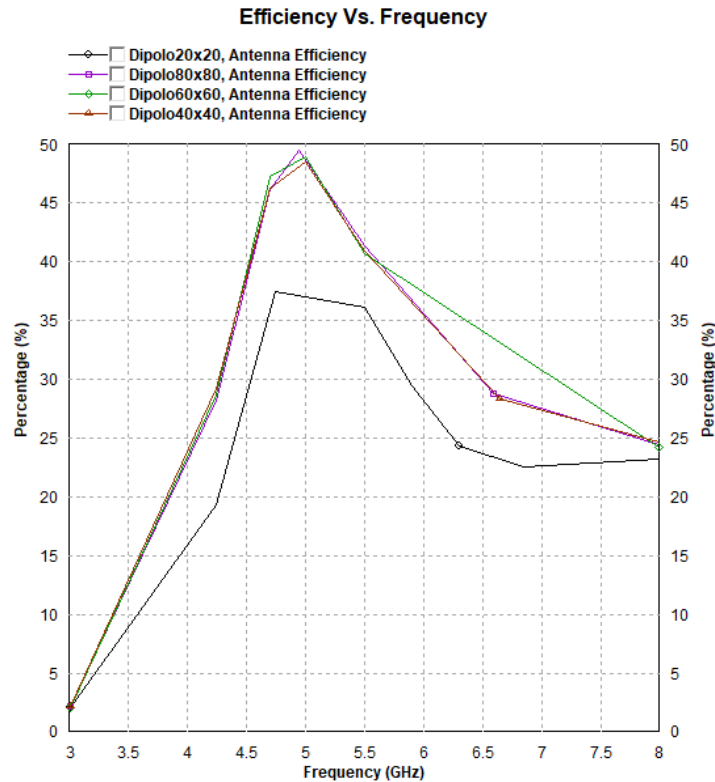


Figura 26. Comparativa simulación eficiencia de antena dipolos

Observamos que para el caso del dipolo, a diferencia del monopolo, los ground planes mayores a 20x20 son los que ofrecen más eficiencia (alrededor del 50%), sobre todo en la frecuencia a la que está adaptada la antena, 5 GHz. El dipolo con el ground plane 20x20 mm tiene una eficiencia más constante alrededor de 5GHz, pese a ser muy baja (36-37%).

#### 4.4.3 Mejora de la eficiencia de antena

Tal y como hemos podido comprobar en los apartados 4.4.1 y 4.4.2, si bien tanto el monopolo como el dipolo se encuentran adaptados a 5GHz y disponen de un buen ancho de banda a -6dB, la eficiencia en el mejor de los casos únicamente llega a valores de alrededor del 50%.

Para tratar de mejorar este parámetro, se ha estudiado la posibilidad de añadir una capa finita de dieléctrico en el diseño de las antenas.

En el caso del dipolo con un ground plane de 20x20, el diseño realizado es el siguiente, donde la línea de puntos representa la capa de dieléctrico:

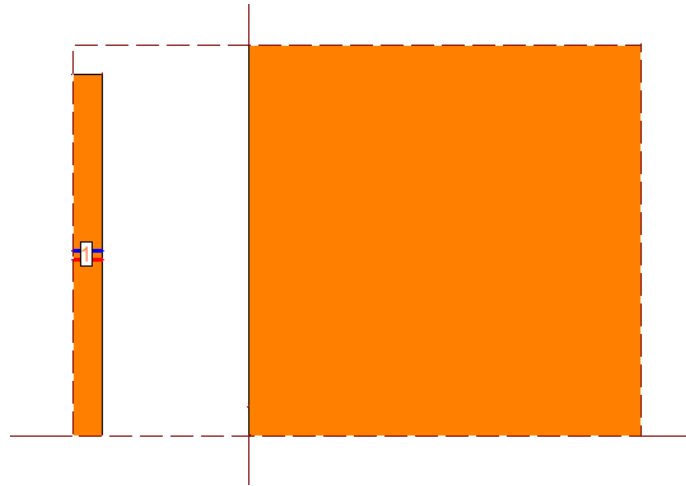


Figura 27. Diseño dipolo con capa de dieléctrico en IE3D

Si ahora nos fijamos otra vez en la eficiencia de la antena, y deshabilitamos la opción de extrapolación automática, observamos que alrededor de 5GHz obtenemos una eficiencia algo superior al 40%. Si bien sigue siendo una eficiencia baja, recordamos que en el apartado anterior la eficiencia obtenida era del 36-37%.

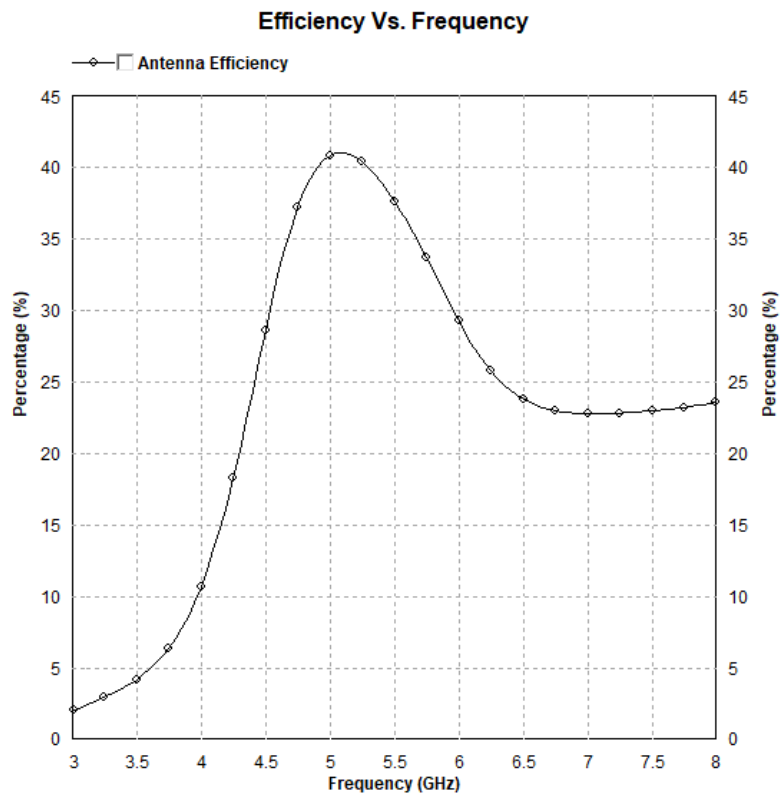


Figura 28. Eficiencia de antena del dipolo con capa de dieléctrico

A continuación, se ha introducido la misma capa de dieléctrico en el caso del monopolo:

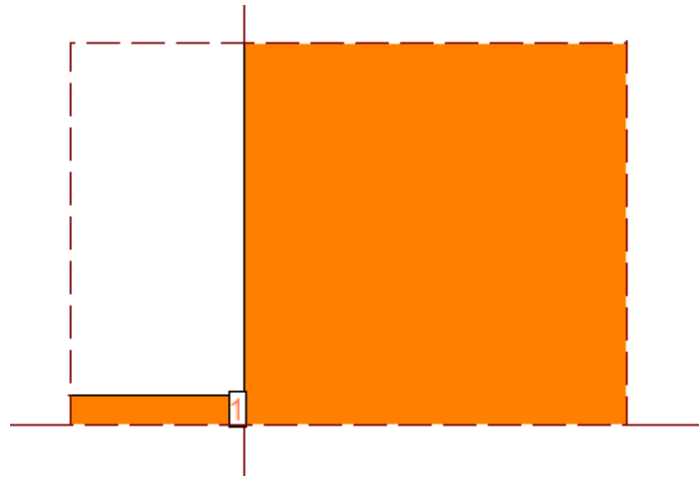


Figura 29. Diseño monopolo con capa de dieléctrico en IE3D

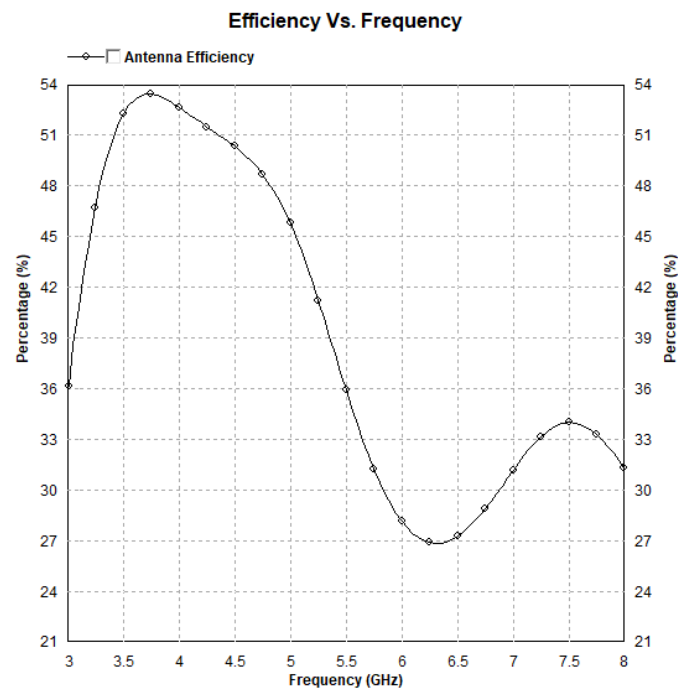


Figura 30. Eficiencia de antena del monopolo con capa de dieléctrico

Se ha replicado este mismo diseño con la capa de dieléctrico para los casos del dipolo con ground plane de 60x60 mm y el monopolo con ground plane de 60x60 mm, considerados como los casos más representativos para compararlos en el siguiente apartado.

#### 4.4.4 Comparación entre el monopolo y el dipolo

Como punto final, a partir de las mejoras en eficiencia introducidas en el apartado anterior, se han comparado los siguientes casos en términos de ancho de banda, eficiencia e independencia al ground plane:

- a.) Dipolo con capa de dieléctrico y ground plane de 20x20 mm
- b.) Monopolo con capa de dieléctrico y ground plane de 20x20 mm
- c.) Dipolo con capa de dieléctrico y ground plane de 60x20 mm
- d.) Monopolo con capa de dieléctrico y ground plane de 60x20 mm

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

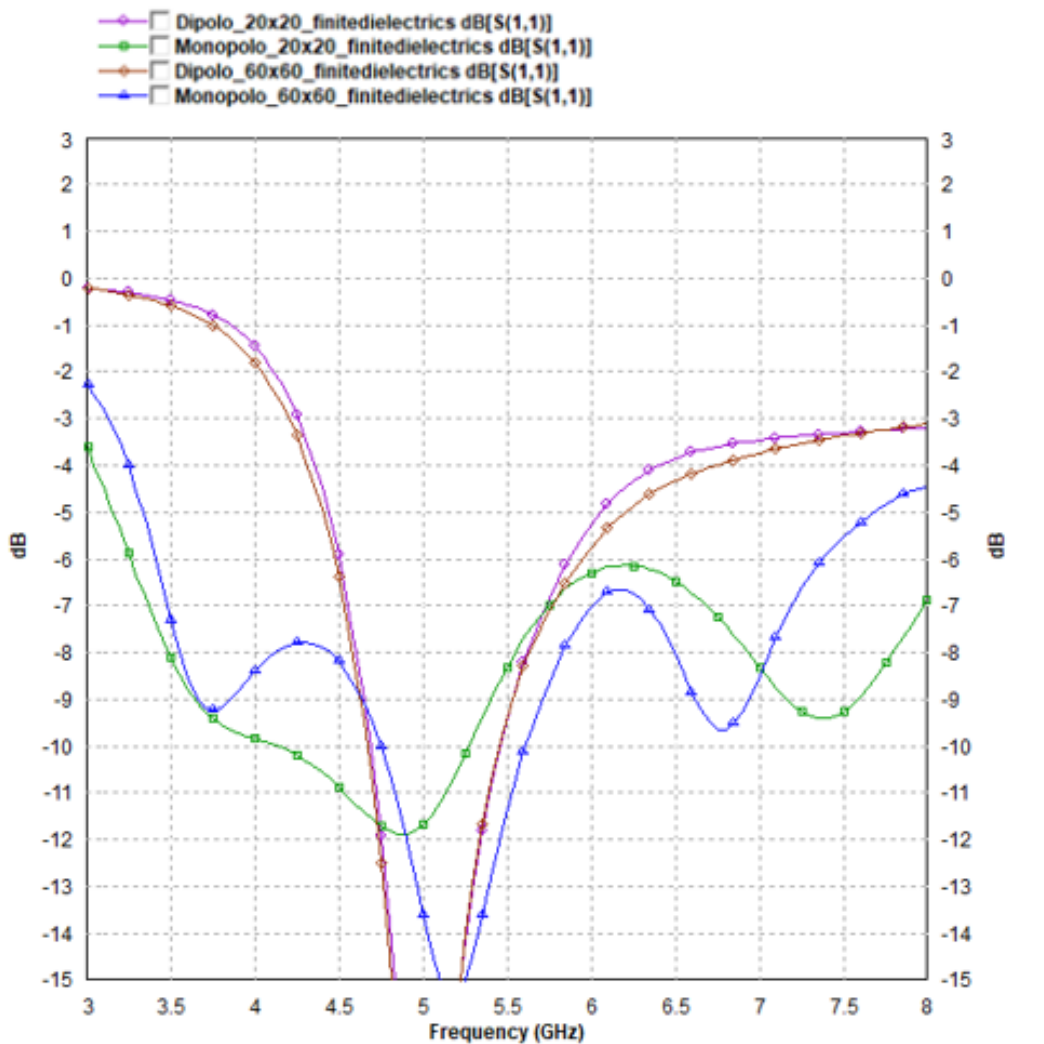


Figura 31. Comparación ancho de banda monopolo 20x20 y 60x60 y dipolo 20x20 y 60x60

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, el monopolo que ofrece más ancho de banda a -6dB es el que tiene un ground plane de 20x20 mm y en el caso del dipolo, no se presentan variaciones al modificar el ground plane.

Ahora bien, si comparamos entre monopolo y dipolo, observamos que cualquiera de los dos monopolos (con ground plane 20x20 o 60x60), ofrecen más ancho de banda que los dipolos.

A continuación mostramos la comparativa de la eficiencia de antena de estos cuatro casos:

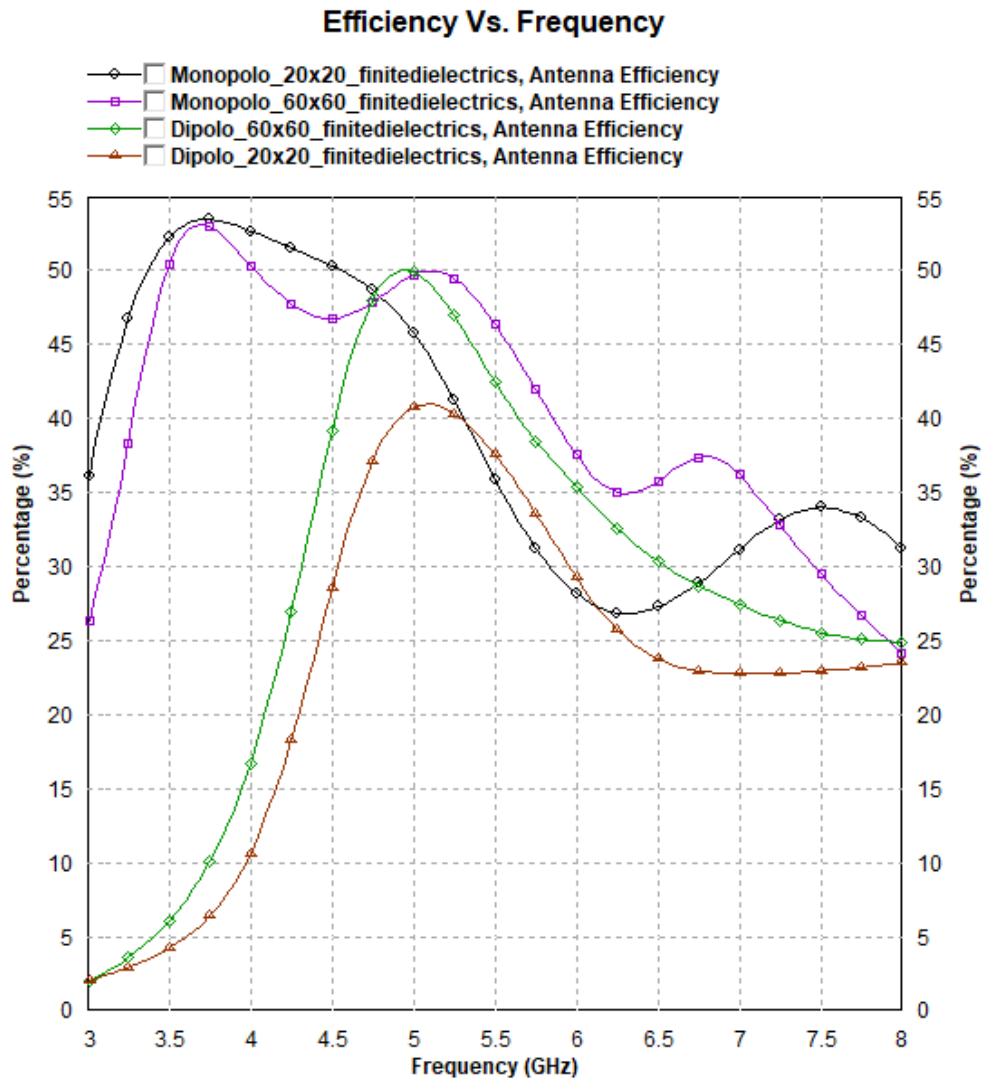


Figura 32. Comparación eficiencia monopolo 20x20 y 60x60 y dipolo 20x20 y 60x60

Observamos que los dos monopolos, ofrecen eficiencias de antena alrededor del 50% en todo el el rango de frecuencias de 3.5 GHz a 5 GHz. En el caso de los dipolos, si bien la eficiencia es buena en frecuencias cercanas a los 5 GHz (frecuencia a la que está adaptada la antena), para el resto de frecuencias obtenemos una eficiencia baja. Cabe destacar que, a diferencia del monopolo, entre los dos casos de dipolo el que ofrece mayor eficiencia (del 50%) es el que tiene un ground plane mayor (60x60mm), frente al 40% del dipolo con ground plane de 20x20mm.



## 5. Conclusiones

En este proyecto, se ha realizado una introducción a las redes inalámbricas y concretamente, a las redes inalámbricas de área corporal, que se implementan a través de dispositivos dentro o fuera del cuerpo humano y presentan grandes avances en el ámbito médico. Uno de los factores clave, es la tecnología que se usa en este tipo de redes, dado que los dispositivos deben ser de tamaños muy pequeños, eficientes energéticamente y capaces de operar en un entorno donde simultáneamente están operando otros servicios. Es aquí donde la tecnología UWB se vuelve importante, ya que está diseñada específicamente para poder trabajar en un amplio margen de frecuencias emplean pulsos de RF muy estrechos y de baja potencia para evitar interferencias. Uno de los elementos cruciales en todo este proceso, es la antena. El objetivo principal de este proyecto consistía en diseñar y estudiar el comportamiento de dos tipos de antena en este rango de frecuencias, para poder compararlos entre sí y evaluar si pudieran ser aptas para este tipo de aplicaciones. Tras la fase de diseño y todas las simulaciones realizadas, hemos observado que, en términos de ancho de banda, el del monopolo, ofreciendo cobertura de 3.2 GHz a 6 GHz cogiendo como referencia -6dB, es mayor al del dipolo, que cubriría de 4.5 GHz a 6 GHz.

En el caso del monopolo, hemos podido observar que el ground plane óptimo es el de 20x20 mm, cercano a  $0.4 \lambda$ , dado que ofrece una eficiencia de antena más constante alrededor de 5 GHz. En el resto de casos, se producen picos de eficiencia en la frecuencia de trabajo, pero baja para el resto de valores. Asimismo, el ground plane no introduce grandes variaciones en el ancho de banda del dipolo, pero sí en el monopolo tal y como se puede observar en la Figura 18 (siendo el GP de 20x20mm el que proporciona mayor ancho de banda). En cuanto a la comparación de eficiencia entre ambas antenas, se ha observado que el monopolo ofrece una eficiencia mayor a la del dipolo en las frecuencias de 3 GHz a 5GHz. También se ha podido comprobar, que añadir una capa finita de dieléctrico en el diseño de las antenas mejora levemente la eficiencia de las mismas. A modo resumen, podemos concluir que el monopolo ofrece un comportamiento más apropiado en términos de ancho de banda y eficiencia frente al dipolo en el rango de frecuencias de UWB y sería por tanto, una buena opción a la hora de implementar dispositivos con esta tecnología.

Como trabajo futuro, debido a la gran variedad de tipos de antenas existentes, se podrían diseñar y analizar algunas de ellas para tratar de encontrar un resultado óptimo. Asimismo, cabe destacar que todas las simulaciones han sido realizadas en el aire, por lo que otra posible vía de exploración sería estudiar el efecto que tiene el cuerpo humano (considerado como un medio con pérdidas) en función de los diferentes tejidos de aplicación.

## 6. Glosario

UWB – Ultra Wide Band

WWAN – Wide Wireless Area Network

WMAN - Wireless Metropolitan Area Network

WLAN – Wireless Local Area Network

WPAN – Wireless Personal Area Network

WBAN – Wireless Body Area Network

PER – Packet Error Rate

RF – Radio Frequency

BW – Band Width

GP – Ground Plan

## 7. Bibliografía

- [1] Anguera, Jaume & Andújar, Aurora & Huynh, Minh-Chau & Orlenius, Charlie & Picher, Cristina & Puente Baliarda, Carles. (2013). Advances in Antenna Technology for Wireless Handheld Devices. International Journal of Antennas and Propagation. 2013. 10.1155/2013/838364.
- [2] Matin, Mohammad. (2012). Introduction to Wireless Networks. 10.4018/978-1-4666-1797-1.ch001.
- [3] Rim Negra, Imen Jemili, Abdelfettah Belghith, Wireless Body Area Networks: Applications and Technologies, Procedia Computer Science, Volume 83, 2016, Pages 1274-1281,ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.266>.
- [4] <https://www.semanticscholar.org/paper/Cooperative-Routing-Protocols-in-Wireless-Body-Area-Jafari-EffatParvar/7aa44aac1977371be8f7274ca29e63bd50a530cb>
- [5] Zhen, B.; Patel, M.; Lee, S.; Won, E.; Astrin, A. TG6 Technical Requirements Document (TRD). Project IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Standard Association: Piscataway, NJ, USA, 2008.
- [6] Alam, Muhammad. (2014). Surveying Wearable Human Assistive Technology for Life and Safety Critical Applications: Standards, Challenges and Opportunities. Sensors. 14. 9153-9209. 10.3390/s140509153.
- [7] J. Anguera, A. Andujar, G. Mestre, J. Rahola and J. Juntunen, "Design of Multiband Antenna Systems for Wireless Devices Using Antenna Boosters [Application Notes]," in IEEE Microwave Magazine, vol. 20, no. 12, pp. 102-114, Dec. 2019, doi: 10.1109/MMM.2019.2941662.
- [8] Jaume Anguera, Aurora Andújar, José L. Leiva, Oriol Massó, Oriol, Joakim Tonnesen, Endre Rindalsholt, Rune Brandsegg, Roberto Gaddi, "Reconfigurable Multiband Operation for Wireless Devices Embedding Antenna Boosters" Electronics 10, no. 7: 808. 2021.
- [9] J. Anguera, I. Sanz, C. Puente, J. Mumbrú, "Wireless device including a multiband antenna system", US Pat. 9,130,267
- [10] Sungtek Kahng, E. C. Shin, Geonho Jang, Jaume Anguera, J. H. Ju, and Jaehoon Choi, "A UWB Antenna Combined with the CRLH Metamaterial UWB Bandpass Filter Having the Bandstop at the 5 GHz- Band WLAN". IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Charleston, South Carolina, USA, June 2009.
- [11] Warsha Balani, Tanweer Ali, Mrinal Sarvagya, Manohara Pai, Jaume Anguera, Aurora Andújar, "Design Techniques of Super wideband Antenna –

Existing and Future Prospective”, IEEE Access, vol. 7, pp. 141241-141257, 2019.

[12] [https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/020001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf)

[13] J. Anguera and A. Pérez, “Teoría de Antenas”, Ingeniería La Salle, 2008.

[14] W. Wiesbeck, G. Adamiuk and C. Sturm, "Basic Properties and Design Principles of UWB Antennas," in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, pp. 372-385, Feb. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2008.2008838.

[15] P.S. Sharma, Vijay, S. ., & Shukla, M. (2020). Ultra-Wideband Technology: Standards, Characteristics, Applications. Helix, 10(04), 59-65. Retrieved from <https://helixscientific.pub/index.php/home/article/view/161>.

[16] M. A. Khan, M. A. ul Haq and S. ur Rehman, "A practical miniature antenna design for future internet of things enabled smart devices," 2016 10th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSPCS.2016.7843339.]

[17] Wang, Li-Tian & Xiong, Yang & He, Ming. (2019). Review on UWB Bandpass Filters. 10.5772/intechopen.87204.

[18] M. Pausini, "Autocorrelation Receivers for Ultra Wideband Wireless Communications", pp 10-12, 2007

[19] <https://www.emtalk.com/mscalc.php>

[20] J. Anguera, C. Picher, A. Bujalance, and A. Andújar, “Ground Plane Booster Antenna Technology for Smartphones and Tablets”, Microwave and Optical Technology Letters, vol.58, no. 6, pp.1289-1294, June 2016.

