

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN EM 5G

Estudiante

De Luis, Ruiz, Lidia

Directores

Guerra, Pereda, David

Fernández, Andrés, Marta

Departamento

Telecomunicaciones

Curso académico

2019-2020

Bilbao, 14 de septiembre de 2020

ÍNDICE

Resumen	3
Laburpena	3
Abstract.....	4
Lista de tablas	5
Lista de ilustraciones	8
Lista de gráficas.....	10
Acrónimos	11
1. Introducción.....	12
2. Objetivos.....	13
3. Beneficios	15
3.1. Beneficios científico-técnicos.....	15
3.2. Beneficios sociales.....	15
3.3. Beneficios económicos	16
4. Contexto	17
4.1. Introducción y conceptos básicos de la tecnología 5G	17
4.2. Exposición electromagnética	18
4.3. Campo lejano y cercano.....	21
4.3.1. Ventajas y desventajas de medir en campo lejano o cercano	21
5. Estado del arte	23
5.1. Diseños de partida para las antenas	23
5.2. Análisis de los estudios realizados en este tema.....	24
6. Descripción del trabajo.....	30
6.1. Diseño y verificación de las antenas.....	30
6.1.1. Diseño de las antenas.....	30
6.1.2. Verificación de las antenas.....	35
6.2. Planificación de simulaciones de exposición EM.....	39
6.2.1. Simulaciones en espacio libre.....	39

6.2.2.	Simulaciones con un modelo de cuerpo humano	42
6.2.3.	Simulaciones con textiles	46
6.2.4.	Red formada por dos antenas	47
6.3.	Resultados de las simulaciones	48
6.3.1.	Simulaciones en espacio libre.....	48
6.3.2.	Simulaciones con el cuerpo	53
6.3.3.	Simulaciones con textiles	66
6.3.4.	Red formada por dos antenas	69
6.4.	Conclusiones de los resultados obtenidos	79
7.	Planificación	82
7.1.	Equipo de trabajo	82
7.2.	Definición de paquetes de trabajo.....	82
7.3.	Hitos.....	85
7.4.	Diagrama de Gantt	86
8.	Presupuesto.....	87
8.1.	Recursos humanos	87
8.2.	Amortizaciones	87
8.3.	Gastos del trabajo.....	87
8.4.	Resumen económico	88
9.	Análisis previo de riesgos.....	89
9.1.	Perdida de datos (A)	89
9.2.	Escasez de recursos (B)	89
9.3.	Retraso en la entrega de plazos (C)	90
9.4.	Baja de los trabajadores (D).....	90
9.5.	Matriz probabilidad-impacto	90
9.6.	Impacto de Covid-19 en el TFM.....	91
10.	Conclusiones.....	92
11.	Bibliografía.....	94

Resumen

Se espera que las redes y servicios 5G se conviertan en el futuro de las telecomunicaciones al aumentar las velocidades de conexión, minimizar los tiempos de espera y aumentar exponencialmente la cantidad de dispositivos conectados.

En la actualidad, la atención de la sociedad a las radiaciones electromagnéticas y sus efectos en la salud ha aumentado enormemente, por lo que es necesario comprender y brindar información sobre el impacto de las nuevas redes y tecnologías en este campo.

El propósito de este proyecto es analizar el nivel de exposición electromagnética expuesto por las antenas típicas de los sistemas 5G en las bandas de frecuencia de 800 MHz y 60 GHz, pudiendo verificar si se cumple con la normativa de exposición electromagnética y garantizar así que no haya efectos perjudiciales para la salud. Además, en el caso de antenas colocadas muy cerca o incluso en contacto con las personas se analizará el efecto que pueden tener los usuarios sobre el funcionamiento de dichas antenas. Esto es especialmente de interés en la banda de 60 GHz, ya que se trata de una banda de frecuencias mucho más alta que las que se han utilizado hasta ahora en este tipo de enlaces de comunicación.

Para verificar que no se sobrepase este nivel de referencia se tomarán valores en diferentes escenarios de simulación y se compararán los resultados entre distintas bandas de frecuencia para sacar conclusiones y mostrar los resultados con el fin de informar de que se trata de una tecnología segura.

Laburpena

5G sare eta zerbitzuak telekomunikazioen etorkizuna bihurtzea espero da, konexio abiadurak handituz, itxarote-denborak murriztuz eta konektatutako gailuen kopurua esponentzialki handituz.

Gaur egun, gizartearen arreta erradiazio elektromagnetikoekiko eta hauek osasunean duten eraginekiko ikaragarri handitu da. Ondorioz, sare eta teknologia berriek arlo honetan duten eraginari buruzko informazioa ematea eta ulertzea beharrezkoa da.

Proiektu honen xedea 5G sistemetako ohiko antenek 8000 MHz eta 60 GHz-eko maiztasun bandetan jasaten diren esposizio elektromagnetikoaren maila aztertzea da, esposizio elektromagnetikoaren arauak betetzen diren ala ez egiaztatu ahal izateko eta, modu honetan, osasunerako eragin kaltegarririk ez dagoela bermatzeko. Gainera, pertsonetatik oso gertu edo

hauekin elkar ukitzen diren antenen kasuan, erabiltzaileek aipatutako antenen funtzionamenduan izan dezaketen eragina aztertuko da. Hau bereziki 60 GHz-eko bandan interesgarria da, maiztasun banda hau orain arte komunikazio lotura hauetan erabili direnak baino askoz handiagoa delako.

Erreferentzia maila hori gaitzen ez dela egiaztatzeko, simulazio eszenatoki desberdinetan balioak neurtuko dira eta emaitzak maiztasun banda desberdinen artean alderatuko dira, ondorioak ateratzeko eta lortutako emaitzak erakusteko teknologia segurua dela jakinarazteko helburuz.

Abstract

5G networks and services are expected to become the future of telecommunications by increasing connection speeds, minimizing wait times, and exponentially increasing the number of connected devices.

At present, society's attention to electromagnetic radiation and its effects health impacts has increased enormously, so it is necessary to understand and provide information on the impact of new networks and technologies in this field.

The purpose of this project is to analyze the level of electromagnetic exposure exposed by antennas typical of 5G systems in the 800 MHz and 60 GHz frequency bands, being able to check if the electromagnetic exposure regulations are met and thus ensure that there are no adverse health impacts. Furthermore, in the case of antennas placed very close or even in contact with people, the impact that users can have on the operation of such antennas will be analyzed. This is especially of interest in the 60 GHz band, as it is a much higher frequency band than those that have been used so far in this type of communication links.

To verify that this reference level is not exceeded, values will be taken in different simulation scenarios and the results will be compared between different frequency bands to draw conclusions and show the results in order to report that it is a safe technology.

Lista de tablas

Tabla 1: Restricciones básicas para exposiciones a campos electromagnéticos para frecuencias de 100 kHz hasta 300 GHz.....	20
Tabla 2: Niveles de referencia para exposiciones a campos electromagnéticos para frecuencias de 100 kHz hasta 300 GHz.....	20
Tabla 3: Valores de pico de PD, IPD y SAR y valor medio de IPD medidos y obtenidos en simulaciones a 1 cm del “phantom” a 60 GHz [14].	27
Tabla 4: Comparación de resultados SAR de otros trabajos de investigación [15].	28
Tabla 5: Valores iniciales de los parámetros de la antena de parche en la banda de 800 MHz	31
Tabla 6: Valores iniciales de los parámetros de la antena de parche en la banda de 60 GHz	32
Tabla 7: Valores optimizados de los parámetros de la antena de parche en la banda de 800 MHz	34
Tabla 8: Valores optimizados de los parámetros de la antena de parche en la banda de 60 GHz.....	35
Tabla 9: Especificaciones de la antena diseñada en la banda de 800 MHz.....	37
Tabla 10: Especificaciones de la antena diseñada en la banda de 60GHz	39
Tabla 11: Posición de las sondas en cada eje y tipo de campo (800 MHz).....	40
Tabla 12: Posición de las sondas en cada eje y tipo de campo (60 GHz)	41
Tabla 13: Propiedades de la tres primeras capas del cuerpo humano en 800 MHz	43
Tabla 14: Propiedades de la piel a 60 GHz	43
Tabla 15: Tabla resumen de las distancias sondas-antena y cuerpo-antena.....	46
Tabla 16: Grosos del textil utilizados para cada frecuencia.....	47
Tabla 17: Características de los textiles diseñados en CST.....	47
Tabla 18: Valores máximos del campo eléctrico y magnético en espacio libre (800 MHz)	49
Tabla 19: Resultados obtenido con las sondas colocadas a diferentes distancias de la antena (800 MHz)	49
Tabla 20: Valores máximos del campo eléctrico y magnético en espacio libre (60GHz)....	50
Tabla 21: Resultados obtenido con las sondas colocadas a diferentes distancias de la antena (60 GHz).....	51
Tabla 22: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas de la antena en espacio libre (800MHz)	57
Tabla 23: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas cuando la antena está en contacto directo con el cuerpo (800MHz).....	57

Tabla 24: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas de la antena en espacio libre (60 GHz).....	58
Tabla 25: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas cuando la antena está en contacto directo con el cuerpo (60 GHz)	59
Tabla 26: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas con el cuerpo a 5 mm de la antena (60 GHz).....	59
Tabla 27: Comparativa entre los valores de referencia y los calculados de la densidad de potencia, S (800 MHz)	60
Tabla 28: Comparativa entre los valores de referencia y los calculados de la densidad de potencia, S (60 GHz)	60
Tabla 29: Potencia absorbida y tasa SAR variando la distancia entre la antena y el cuerpo (800 MHz)	62
Tabla 30: Campo eléctrico medido con sondas variando la distancia entre la antena y el cuerpo (800 MHz)	63
Tabla 31: Potencia absorbida y tasa SAR variando la distancia entre la antena y el cuerpo (60 GHz)	63
Tabla 32: Campo eléctrico medido con sondas variando la distancia entre la antena y el cuerpo (60 GHz).....	64
Tabla 33: Potencia absorbida por el cuerpo y tasa SAR promediada en 10 g para diferentes materiales (800 MHz).....	66
Tabla 34: Potencia absorbida por el cuerpo para diferentes materiales y grosores (800 MHz)	66
Tabla 35: Tasa SAR promediada en 10 g para diferentes materiales y grosores (800 MHz)	66
Tabla 36: Potencia absorbida por el cuerpo para diferentes grosores utilizando un textil de algodón (60 GHz).....	67
Tabla 37: Tasa SAR promediada en 10 g para diferentes grosores utilizando un textil de algodón (60 GHz).....	67
Tabla 38: Valores de la tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida según el nº de antenas y tipo de campo (800MHz).....	69
Tabla 39: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo cercano (800 MHz)	70
Tabla 40: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo cercano (800 MHz)	70
Tabla 41: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo lejano (800 MHz).....	71

Tabla 42: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo lejano (800 MHz)	71
Tabla 43: Valores de la tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida según el nº de antenas y tipo de campo (60 GHz)	72
Tabla 44: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo cercano (60 GHz).....	72
Tabla 45: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo cercano (60 GHz)	73
Tabla 46: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo lejano (60 GHz).....	73
Tabla 47: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo lejano (60 GHz).....	74
Tabla 48: Variación del parámetro S11 al añadir el cuerpo en función de la frecuencia.....	79
Tabla 50: Equipo de trabajo.....	82
Tabla 51: P.T.1: Gestión y supervisión del proyecto	82
Tabla 52: P.T.2: Estudios previos.....	83
Tabla 53: P.T.3: Diseño y optimización de las antenas.....	83
Tabla 54: P.T.4: Simulaciones.....	84
Tabla 55: Análisis y evaluación de los resultados	84
Tabla 56: P.T.6: Documentación	84
Tabla 57: Hitos	85
Tabla 58: Costes recursos humanos.....	87
Tabla 59: Costes amortizaciones	87
Tabla 60: Costes en el apartado de gastos	88
Tabla 61: Resumen presupuesto final.....	88

Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Estructura frontal de la antena mmWave propuesta (mm) [13]	25
Ilustración 2: Representación esquemática y dimensiones del array (2x2) de antenas de parche a 60 GHz [14].....	25
Ilustración 3: Configuración de la técnica de dosimetría multifísica [14].	26
Ilustración 4: Prototipo de una antena de ranura cónica lineal corrugada [15].	27
Ilustración 5: Antena de meandro.....	29
Ilustración 6: Parámetros de la antena de parche a calcular según la banda de frecuencias en la que vaya a operar	31
Ilustración 7: Parámetro S11 del diseño inicial en la banda de 800 MHz.....	32
Ilustración 8: Parámetro S11 del diseño inicial en la banda de 60 GHz	33
Ilustración 9: Efectos de la modificación de los parámetros en el parámetro S11 (800 MHz)	34
Ilustración 10: Efectos de la modificación de los parámetros en el parámetro S11 (60 GHz)	35
Ilustración 11: Parámetro S11 optimizado y ancho de banda en la banda de 800 MHz	36
Ilustración 12: Diagrama polar del valor absoluto de la directividad para $\varphi = 0^\circ$ (800 MHz)	37
Ilustración 13: Directividad del haz de radiación en 3D (800 MHz)	37
Ilustración 14: Parámetro S11 optimizado y ancho de banda en la banda de 60 GHz.....	38
Ilustración 15: Diagrama polar del valor absoluto de la directividad para $\varphi = 0^\circ$ (60 GHz)	38
Ilustración 16: Directividad del haz de radiación en 3D (60 GHz)	39
Ilustración 17: Colocación de las sondas alrededor de la antena a 800 MHz	41
Ilustración 18: Colocación de las sondas alrededor de la antena a 60 GHz	42
Ilustración 19: Antena de parche sobre el cuerpo plano diseñado para 800 MHz	43
Ilustración 20: Antena de parche sobre el cuerpo plano diseñado para 60 GHz	44
Ilustración 21: Sondas colocadas a diferentes alturas de la antena	45
Ilustración 22: Colocación del textil entre la piel y la antena	46
Ilustración 23: Red formada por dos antenas	48
Ilustración 24: Parámetro S11 al añadir el cuerpo en 800MHz.....	53
Ilustración 25: Parámetro S11 al añadir el cuerpo en 60 GHz	54
Ilustración 26: Tasa SAR promediada en 10 g en el cuerpo diseñado para 800 MHz	54
Ilustración 27: Tasa SAR promediada en 10 g diseñado para 60 GHz	55
Ilustración 28: Diagrama de radiación de la antena de 800 MHz con la antena pegada al cuerpo	56

Ilustración 29: Diagrama de radiación de la antena de 60 GHz con la antena pegada al cuerpo	58
Ilustración 30: Diagrama de Gantt	86
Ilustración 31: Matriz probabilidad-impacto	91

Lista de gráficas

Gráfico 1: Campo eléctrico en espacio libre (800 MHz).....	52
Gráfico 2: Campo eléctrico en espacio libre (60 GHz)	52
Gráfico 3: Campo eléctrico a diferentes alturas (800 MHz)	61
Gráfico 4: Campo eléctrico a diferentes alturas (60 GHz)	61
Gráfico 5: Tasa SAR promediada en 10 g en función de la distancia antena-cuerpo (800 MHz)	64
Gráfico 6: Tasa SAR promediada en 10 g en función de la distancia antena-cuerpo (60 GHz)	64
Gráfico 7: Potencia absorbida en función de la distancia antena-cuerpo (800 MHz)	65
Gráfico 8: Potencia absorbida en función de la distancia antena-cuerpo (60 GHz).....	65
Gráfico 9: Tasa SAR promediada en 10 g en función del material y el grosor del textil (800 MHz).....	67
Gráfico 10: Tasa SAR promediada en 10 g cuerpo para el algodón en función del grosor del textil (60 GHz).....	68
Gráfico 11: Potencia absorbida por el cuerpo en función del material y el grosor del textil (800 MHz)	68
Gráfico 12: Potencia absorbida por el cuerpo para el algodón en función del grosor del textil (60 GHz).....	69
Gráfico 13: Comparativa tasa SAR promediada en 10 g según el nº de antenas y la distancia entre ellas (800 MHz).....	74
Gráfico 14: Comparativa potencia absorbida por el cuerpo según el nº de antenas y la distancia entre ellas (800 MHz).....	75
Gráfico 15: Comparativa tasa SAR promediada en 10 g según el nº de antenas y la distancia entre ellas (60 GHz).....	75
Gráfico 16: Comparativa potencia absorbida por el cuerpo según el nº de antenas y la distancia entre ellas (60 GHz)	76
Gráfico 17: Campo eléctrico en espacio libre en cada posición para cada antena (800 MHz)	77
Gráfico 18: Campo eléctrico con la antena en contacto con el cuerpo en cada posición para cada antena (800 MHz).....	77
Gráfico 19: Campo eléctrico en espacio libre en cada posición para cada antena (60 GHz).....	78
Gráfico 20: Campo eléctrico con la antena en contacto con el cuerpo en cada posición para cada antena (60 GHz)	78

Acrónimos

CEM	Campos electromagnéticos
EM	Electromagnética
FCC	Federal Communications Commissions
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IoT	Internet of Things
IPD	Incident Power Density
IR	Infrarred
mmWave	Banda milimétrica
RF	Radiofrecuencia
SAR	Specific Absorption Rate
SW	Software
TFM	Trabajo de Fin de Máster
5G	Quinta Generación

1. Introducción

Este Trabajo Fin de Máster se centra en el análisis de la exposición a campos electromagnéticos debidos a dispositivos funcionando en bandas de frecuencia de la tecnología 5G. Hoy en día vivimos en una sociedad de la información en constante evolución, por ese motivo es muy importante garantizar, en la medida de lo posible, que el avance de las comunicaciones no causa efectos nocivos en la salud humana, además de dar información a la población a fin de evitar preocupaciones innecesarias. Teniendo en cuenta las investigaciones existentes sobre las emisiones electromagnéticas (EM) y el posible impacto sobre la salud, se estudiará si existe un indicio de que este tipo de radiaciones puedan superar los niveles umbrales de exposición electromagnética que marcan el límite de potenciales efectos sobre la salud humana.

La exposición humana a campos de radiofrecuencia (RF) es un tema de actualidad en nuestra sociedad debido al uso masivo actual de este tipo de comunicaciones. Se han definido varios estándares y regulaciones para proteger a las personas contra estas emisiones (ICNIRP 2020), que contienen valores límite para la exposición humana a campos electromagnéticos (CEM). Por ello, es importante conocer bien los niveles de exposición de la red que se está usando y comprobar si los valores límite son superados o no para poder emplear dicha red con seguridad.

Por todo esto, es necesaria por una parte la propuesta de una metodología adecuada para determinar los valores de exposición EM y, por otra parte, su posterior análisis, con el fin de reflejar los niveles de radiación electromagnética que existen en cada situación y para cada tipo de red de la forma más fiel posible. En el caso de la tecnología 5G, además del desconocimiento general, se percibe también mucha falta de información sobre la exposición EM. Por tanto, todo ello justifica el estudio que se ha realizado.

Para ello, en primer lugar, se han diseñado dos antenas típicas de los sistemas 5G en las bandas de frecuencia de 800 MHz y 60 GHz. A continuación, se han validado y optimizado los diseños realizados y se han elegido modelos de cuerpo humano con los que se realizarán simulaciones posteriormente. Por último, se han definido los escenarios de simulación, se han realizado las simulaciones y una vez obtenidos los resultados se ha realizado un análisis, una evaluación y una comparativa de los resultados.

2. Objetivos

Después de años de desarrollo, la tecnología 5G ha empezado a desplegarse en algunas partes del mundo y se estima que en un futuro cercano pueda formar parte del día a día en casi cualquier parte de España y Europa. Esta tecnología comprende un conjunto de estándares que van mucho más allá de una mera evolución de la tecnología 4G. Así, 5G ofrece servicios de enorme ancho de banda en las bandas por encima de 20 GHz, adecuados para contenido multimedia, y también ofrece servicios de gran fiabilidad y muy baja latencia en la banda de 700-800 MHz, adecuados para el despliegue del paradigma Industria 4.0 en base a instalaciones multisensorizadas y multiconectadas.

Por otra parte, el gran crecimiento de las comunicaciones inalámbricas ha incrementado la preocupación acerca de la exposición humana a los campos electromagnéticos debido a los posibles efectos sobre la salud. Los escenarios de aplicación de 5G suponen un nuevo reto para cuantificar las magnitudes que se emplean para comparar con los límites de exposición de las normativas. Por un lado, las bandas de frecuencias empleadas no tienen precedente en las comunicaciones móviles y, por otro, los dispositivos emisores de las instalaciones de Industria 4.0 se encontrarán en muchos casos muy próximos a las personas afectadas, en la denominada región de campo cercano.

De acuerdo con esto, el objetivo principal de este TFM es analizar el efecto de antenas típicas de los sistemas 5G en las bandas de frecuencia de 800 MHz y 60 GHz. Se trata de obtener los valores de exposición a los que estarían sometidas las personas tanto en la región de campo lejano como en la región de campo cercano. Para ello, se debe modelizar el comportamiento que tienen en el cuerpo humano la interacción entre las ondas electromagnéticas, al objeto de cuantificar qué parte de la potencia radiada por la antena absorbe el cuerpo. Una vez desarrollada la metodología adecuada y obtenidos los valores de exposición se podrán comparar los resultados obtenidos con los límites de la normativa.

Por tanto, los pasos llevados a cabo en este trabajo han sido los siguientes:

- Diseño y optimización de antenas para estas dos frecuencias en base a diseños obtenidos del estado del arte de la tecnología.
- Análisis de los diagramas de radiación para evaluar la ganancia y directividad obtenida.
- Análisis del campo eléctrico y magnético en campo lejano y cercano.

- Estudio del efecto que tienen estas antenas en el cuerpo: qué potencia absorbe el cuerpo comparándolo con la normativa.
- Estudio del efecto opuesto: atenuación por obstaculización de los trayectos de propagación, debida a la presencia de personas en el entorno.

3. Beneficios

Este proyecto dará lugar a beneficios que justifican la utilidad de su realización. Estos beneficios se darán en tres áreas diferentes: científica-técnica, social y económica.

3.1. Beneficios científico-técnicos

Gracias al estudio realizado en este trabajo sobre la exposición electromagnética (EM) en 5G los principales beneficios científico-técnicos serán los aportes realizados sobre el tema de la investigación.

Por una parte, la metodología usada para calcular los valores de exposición a los que estarían sometidas las personas en los diferentes escenarios de aplicación 5G planteados, permite analizar esta misma tecnología en otras situaciones con las antenas utilizadas o usar estos mismos escenarios mediante el uso de otras antenas. De esta manera, permitirá el análisis de esta tecnología utilizando diferentes cambios de parámetros, permitiendo una investigación más profunda o extensión a otras áreas.

Por otra parte, las antenas, cuerpos y textiles diseñados para las bandas de 800 MHz y 60GHz, también podrían ser usados para analizar otros parámetros o ser utilizados para otros objetivos diferentes a los de este proyecto.

Por último, gracias a la campaña de simulaciones y a su posterior análisis se podrá estudiar el comportamiento de las antenas en ambas bandas y analizar sus características y los niveles de exposición obtenidos.

3.2. Beneficios sociales

Los beneficios sociales son de gran importancia, ya que existe mucho desconocimiento en cuanto a la tecnología 5G y los efectos que conlleva su utilización.

Debido a esto, es muy importante que los usuarios tengan la información necesaria sobre la exposición electromagnética (EM) que puede generar esta tecnología, puesto que puede causar efectos en su salud. Gracias a ello, estos usuarios podrán emplear esta tecnología con mayor seguridad y confianza.

Por ello, los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser usados para la difusión de informes divulgativos para disminuir las preocupaciones de la población sobre los riesgos en la salud que suponen las radiaciones EM.

3.3. Beneficios económicos

Teniendo en cuenta el desconocimiento de la sociedad sobre la red 5G, si los usuarios de esta tecnología conocen y comprueban la exposición EM que puede generar esta tecnología de manera fiable, se evitarán alarmas injustificadas derivadas del desconocimiento y la falta de información.

De esta forma, podrán considerar que la tecnología 5G es buena, fiable y no es perjudicial para la salud. Por ello, estarán más dispuestos a utilizar esta tecnología favoreciendo su expansión. Esto implica que se puedan realizar más estudios para su desarrollo y mejorar y obtener nuevas versiones con una exposición EM cada vez más controlada.

4. Contexto

En este apartado, se ofrece una breve introducción y algunos conceptos básicos sobre la tecnología 5G. Por otra parte, se describe los conceptos de campo lejano y campo cercano y las ventajas y desventajas que pueden llevar a la necesidad de realizar las medidas en estas regiones. Por último, se analizan las metodologías que se deben tener en cuenta a la hora de analizar los datos en lo que a exposición electromagnética se refiere.

4.1. Introducción y conceptos básicos de la tecnología 5G

5G se refiere a la quinta generación de redes móviles, que mejora sensiblemente las prestaciones (ancho de banda, latencia, capacidad de dispositivos conectados) de acceso a Internet en movilidad respecto a las generaciones anteriores [1].

Las redes y servicios 5G no son sólo una nueva generación de la tecnología móvil, sino que van a permitir el desarrollo de nuevos servicios que beneficiarán a la economía y a la sociedad en su conjunto.

Las redes 5G tendrán tres casos de uso principales

- Servicios de muy alta velocidad. La banda ancha móvil será de muy alta velocidad y capacidad que permitirá navegar hasta a 10 Gbps.
- Servicios que necesiten una comunicación ultra fiable y de baja latencia, en torno a 5 milisegundos (ms) frente a 20-30 ms propios de las redes 4G. Este periodo es casi imperceptible para los humanos y por ello la conexión será prácticamente en tiempo real.
- Comunicaciones masivas, se podrán conectar más dispositivos a la vez. Por ello se incrementará la capacidad para gestionar conexiones simultáneas.

Las bandas de frecuencias para ser utilizadas en el lanzamiento del 5G en la Unión Europea son las siguientes [2] :

- La banda 3,6GHz (3,4-3,8 GHz): ofrece una buena combinación entre los beneficios de la cobertura y la capacidad, permitiendo llegar a una velocidad de hasta 3 Gbps.

Esta banda se encontraba libre y ya ha sido asignada a los operadores de telecomunicaciones mediante licitación a lo largo de 2018.

- Banda de 700 MHz (694-790 MHz): pensada para dar una cobertura amplia en entornos urbanos, suburbanos y rurales y permite alcanzar una velocidad de bajada de 100 Mbps. Muchos países europeos han pospuesto las subastas de licencias de redes 5G que debían celebrarse esta primavera hasta que termine la pandemia del Covid-19, al tiempo que varios operadores están ralentizando las inversiones en redes 5G que habían iniciado y se concentran en dar un mayor y mejor servicio de banda ancha. España debía realizar la subasta de las licencias de redes 5G para la banda de frecuencias de 700 MHz esta primavera y completar el proceso de adjudicación el 30 de junio. Se había empezado a liberar la banda de 700 MHz, ocupada por señales de televisión, para que fuera utilizada por los servicios 5G, pero la migración definitiva de señales televisivas a otros canales se ha pospuesto hasta que la situación causada por la pandemia mejore y, por el momento, no hay fecha fijada para la celebración de la subasta [3].
- Banda de 26 GHz (24,35-27,5 GHz): pensada para puntos de acceso cercanos y que, gracias al uso de las ondas milimétricas en altas frecuencias (mmWave), permitirá alcanzar las elevadas velocidades y las bajas latencias previstas para el 5G y ayudará al despliegue de servicios como la comunicación por vídeo de alta definición o la realidad virtual y aumentada. Actualmente se usa para predicciones meteorológicas y para algunas comunicaciones vía satélite. Las condiciones técnicas para su uso deberán definirse antes de finales de 2020, con el fin de poder realizar una futura licitación.

4.2. Exposición electromagnética

La preocupación por los efectos que estas pueden provocar a la salud de los humanos expuestos a los campos electromagnéticos (CEM) ha aumentado debido al gran uso y evolución de las comunicaciones inalámbricas.

Los CEM incluyen todo, desde los rayos cósmicos a través de la luz visible hasta los campos eléctricos y magnéticos asociados con la electricidad [4].

Los efectos de los CEM pueden ser de dos tipos directos e indirectos. Por una parte, los efectos directos son el resultado de la interacción directa de los campos con el cuerpo. En

cambio, los efectos indirectos ocurren mediante la interacción con un objeto a un potencial eléctrico diferente del cuerpo.

Para poder evitar estos efectos se han establecido unas recomendaciones para asegurar una protección de la exposición a CEM variables en el tiempo [5]. Esas recomendaciones pueden ser de dos clases:

- Restricciones básicas: restricciones basadas directamente en los efectos en la salud, las cuales limitan la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo. Los parámetros utilizados para determinar estas restricciones son la densidad de corriente (J), la tasa de absorción específica de energía (SAR, Specific Absorption Rate), y la densidad de potencia (S). La densidad de potencia en aire, fuera del cuerpo, es la única que puede ser rápidamente medida en individuos expuestos.
- Niveles de referencia: mediante estos niveles se evalúa de forma práctica las exposiciones y se determina si se pueden superar las restricciones básicas o no. Algunos niveles de referencia son derivados de restricciones básicas relevantes y otros están basados en percepciones y efectos indirectos adversos por la exposición a los CEM. Las cantidades derivadas son la intensidad de campo eléctrico (E), la intensidad de campo magnético (H), la densidad de flujo magnético (B), la densidad de potencia (S) y las corrientes que fluyen a través de las extremidades (IL).

Las cantidades que están dirigidas a la percepción y otros efectos indirectos son las corrientes de contacto y la absorción de energía específica. Si no se exceden los niveles de referencia se asegura que se respetan las restricciones básicas. Si los valores medidos o calculados exceden los niveles de referencia, no necesariamente son excedidas las restricciones básicas. Sin embargo, siempre que un nivel de referencia sea excedido, es necesario evaluar el cumplimiento de la restricción básica relevante y determinar si son necesarias medidas de protección adicionales.

En las Tablas 1 y 2 se pueden observar una serie de restricciones básicas y niveles de referencia para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos [6].

Características de la exposición	Rango de frecuencias	SAR promedio en todo el cuerpo (Wkg^{-1})	SAR localizado cabeza y tronco (Wkg^{-1})	SAR localizado extremidades (Wkg^{-1})	S_{ab} local (Wm^{-2})
Exposición ocupacional	100 kHz – 6 GHz	0.4	10	20	--
	>6 GHz – 300 GHz	0.4	--	--	100
Al público en general	100 kHz – 6 GHz	0.08	2	4	--
	>6 GHz – 300 GHz	0.08	--	--	20

Tabla 1: Restricciones básicas para exposiciones a campos electromagnéticos para frecuencias de 100 kHz hasta 300 GHz

Características de la exposición	Rango de frecuencias	Intensidad del campo E incidente (Vm^{-1})	Intensidad del campo H incidente (Am^{-1})	Densidad de potencia incidente (Wm^{-2})
Exposición ocupacional	0.1 - 30 MHz	$1504/f_M^{0.7}$	$10.8/f_M$	--
	>30 - 400 MHz	139	0.36	50
	>400 - 2000 MHz	$10.58/f_M^{0.43}$	$0.0274/f_M^{0.43}$	$0.29/f_M^{0.86}$
	>2 - 6 GHz	--	--	200
	>6 - 300 GHz	--	--	$275/f_G^{0.177}$
	300 GHz	--	--	100
Al público en general	0.1 - 30 MHz	$671/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	--
	>30 - 400 MHz	62	0.163	10
	>400 - 2000 MHz	$4.72/f_M^{0.43}$	$0.0123/f_M^{0.43}$	$0.058/f_M^{0.86}$
	>2 - 6 GHz	--	--	40
	>6 - 300 GHz	--	--	$55/f_G^{0.177}$
	300 GHz	--	--	20

Tabla 2: Niveles de referencia para exposiciones a campos electromagnéticos para frecuencias de 100 kHz hasta 300 GHz

* f_M es la frecuencia en MHz y f_G la frecuencia en GHz

4.3. Campo lejano y cercano

En la emisión electromagnética de una antena se utiliza frecuentemente el concepto de campo cercano y campo lejano. En las inmediaciones de una antena, existe una distancia a partir de la cual la distribución angular del campo es esencialmente independiente de la distancia de la fuente. En esta región el modelo de onda plana es una buena aproximación de la propagación del campo electromagnético. Las características de onda plana [7], son:

- Los frentes de onda tienen una geometría plana.
- Los vectores E y H y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.
- La fase de los campos E y H son las mismas, y el cociente de las amplitudes E/H es constante a través del espacio. En espacio libre, la relación $E/H = 377$ ohmios que es la impedancia característica del espacio libre.

A la hora de indicar a qué distancia de la antena se considera campo cercano y a cuál campo lejano se tiene que tener en cuenta la dimensión de la antena es electromagnéticamente corta o no. Para antenas electromagnéticamente cortas, es decir, para antenas más cortas que la mitad de la longitud de onda de la radiación que emiten, campo cercano es la región dentro de un radio de $r \ll \lambda$, donde λ es la longitud de onda, mientras que el campo lejano es la región para la que $r \gg 2\lambda$ (a efectos prácticos se considera una distancia umbral de 3λ). La zona de transición es la región entre $r = \lambda$ y $r = 2\lambda$. En cambio, para antena electromagnéticamente largas, es decir, para antenas físicamente más grandes que un medio de longitud de onda de la radiación que emiten, los campos cercanos y lejanos se definen en términos dependerán de D, la dimensión total máxima de la antena. La región del campo lejano está a una distancia mayor que $\frac{2*D^2}{\lambda}$ [8].

Por otra parte, en la región de campo cercano, la estructura del campo electromagnético puede ser altamente no homogénea y habrá variaciones substanciales de la impedancia de onda plana de 377 ohmios, es decir podría haber campos eléctricos puros en algunas regiones y campos magnéticos puros en otras.

4.3.1. Ventajas y desventajas de medir en campo lejano o cercano

En campo lejano una onda portadora a alta frecuencia, como la banda de ondas milimétricas, sufre grandes pérdidas, causando problemas con un rango dinámico pequeño. Un método

para resolver este problema es realizar las mediciones en campo cercano. Mediante este método la pérdida de onda electromagnética es pequeña, ya que, las mediciones se realizan cerca de la antena. Sin embargo, la exposición en el campo cercano es más difícil de medir porque se deben medir separadamente el campo eléctrico y el campo magnético y porque los patrones de los campos son mucho más complicados.

Por otra parte, el patrón de campo en el campo cercano, el campo medido tiende a ser impredecible y sensible a cambios de ubicación y pequeños componentes que rodean la antena, como, por ejemplo, fuertes efectos inductivos y capacitivos de las corrientes y cargas en la antena que causan los componentes electromagnéticos que no se comportan como la radiación de campo lejano. En cambio, al medir en la región de campo lejano, el campo medido es más estable y predecible y menos sensible a los efectos causados por los componentes que rodean la antena.

5. Estado del arte

En este apartado, tras explicar el diseño que se ha usado como base para diseñar las antenas en la banda de 800 MHz y 60 GHz, se describirán algunos de los trabajos que se han realizado con anterioridad en el tema del TFM.

5.1. Diseños de partida para las antenas

Teniendo en cuenta la metodología seguida para calcular el valor de los parámetros de diseño de la antena, se han adaptado estos valores para que las antenas diseñadas trabajen en las frecuencias de interés, que en este caso son 800 MHz y 60 GHz.

Las antenas diseñadas han sido antenas de parche. En las frecuencias de microondas las antenas de parche se han identificado como una de las mejores soluciones fuera del cuerpo, sin estar en contacto directo [9]. Los parámetros de diseño de una antena de parche son los siguientes:

Los valores principales que ha habido que adaptar a la frecuencia han sido los siguiente:

- Anchura de la antena:

$$W = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}$$

- Permittividad de referencia (ϵ_{ref}):

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)$$

- Longitud de la antena:

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{ref}}}$$

Donde ϵ_r será la permitividad relativa que dependerá del sustrato utilizado, f a frecuencia en la que se quiere que la antena opere, y h la altura o espesor del sustrato.

Las antenas de parche son estructuras simples y de bajo costo, y su radiación lateral, fuera de la dirección de máxima ganancia directiva, permite mejorar el balance energético de la

comunicación radio y reducir la radiación hacia la dirección del cuerpo, cuando la antena se emplea en “on-body networks” para aplicaciones del tipo a exponer en este TFM, se instala sobre el cuerpo y esta transmite datos desde el cuerpo a una estación base.

Además, en la banda de frecuencia de 60 GHz, se debe prestar especial atención a la densidad de potencia absorbida en el cuerpo ya que la absorción de potencia es solo superficial (la profundidad de penetración en los tejidos se limita a unas pocas décimas de milímetro [10]).

Por lo tanto, este tipo de antenas será muy útil para comprender mejor las interacciones entre una antena y el cuerpo humano.

5.2. Análisis de los estudios realizados en este tema

Después de haber realizado una búsqueda bibliográfica sobre el tema que se va exponer en este trabajo, se han encontrado algunos proyectos sobre antenas “wearable” para la banda de 60 GHz, pero la mayoría han tenido objetivos diferentes al de este trabajo.

En 2012 se creó una antena “wearable” textil “endfire” para comunicaciones corporales a 60 GHz [11], “endfire” quiere decir que la dirección de la radiación máxima debe ser paralela a la superficie del cuerpo. Esta fue la primera antena textil para comunicaciones inalámbricas en el cuerpo en ondas milimétricas, es flexible y compacta y muy apropiada para comunicaciones de alta velocidad de datos en el cuerpo.

En 2018 se diseñó una antena microstrip para sistemas de comunicación de próxima generación (5G) [12], el objetivo era diseñar una antena para la transmisión de audio y video. Para ello, se evaluaron tres diseños de antenas para ver cual se adecuaba más a las características necesarias en la próxima generación.

Por otra parte, este mismo año se diseñó una antena “wearable” (Ilustración 1) compacta y flexible de onda milimétrica (mmWave) para aplicaciones IoT (Internet of Things) [13]. Debido a su estructura simple, la geometría flexible, la facilidad de fabricación y el buen rendimiento se reconoció como una opción adecuada para aplicaciones de IoT centradas en el cuerpo.

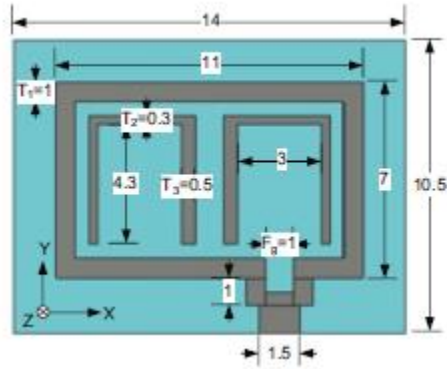


Ilustración 1: Estructura frontal de la antena mmWave propuesta (mm) [13]

A continuación, se describirán los trabajos que tienen objetivos similares a este TFM, ya que serán de ayuda para realizar comparaciones después de obtener los resultados.

Por una parte, en 2012 se llevó a cabo un proyecto basado en un array 2x2 de antenas de parche de microstrip de 60 GHz [14].

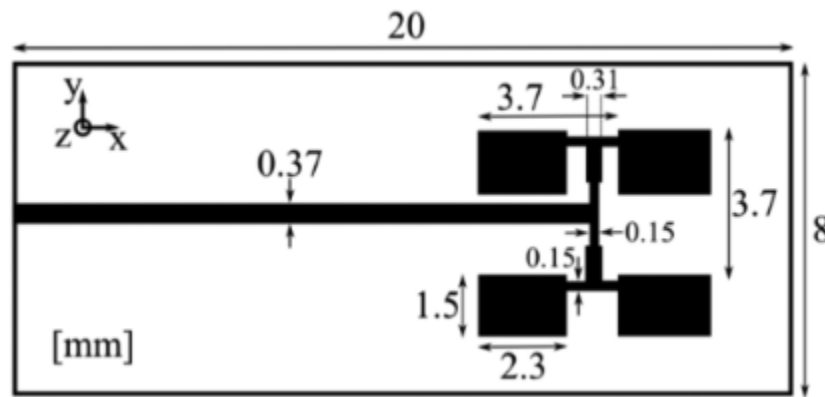


Ilustración 2: Representación esquemática y dimensiones del array (2x2) de antenas de parche a 60 GHz [14].

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Primero, se representó el array en dos casos: espacio libre y en presencia de un modelo de piel artificial equivalente a la piel en términos de coeficiente de reflexión, patrón de radiación y eficiencia de la antena.
- En segundo lugar, se implementó una técnica de dosimetría multifísica que se implementó específicamente para este estudio para determinar la tasa de SAR y la densidad de potencia incidente (IPD, Incident Power Density). La técnica de dosimetría multifísica se realiza a partir de la dinámica de calentamiento medida utilizando una cámara infrarroja (IR, Infrared) de alta resolución en lo que se conoce como un “phantom”, el cual es utilizado para simular las propiedades del cuerpo

humano. Mediante la Ilustración 3 se podrá entender mejor esta técnica. Primero, se genera una señal de onda continua a 60 GHz mediante un oscilador. Después se amplifica la señal y se transmite a la antena a través de un conjunto de guías de onda rectangulares. Por último, usa una cámara IR para registrar su patrón de calentamiento y su dinámica en la superficie del phantom.

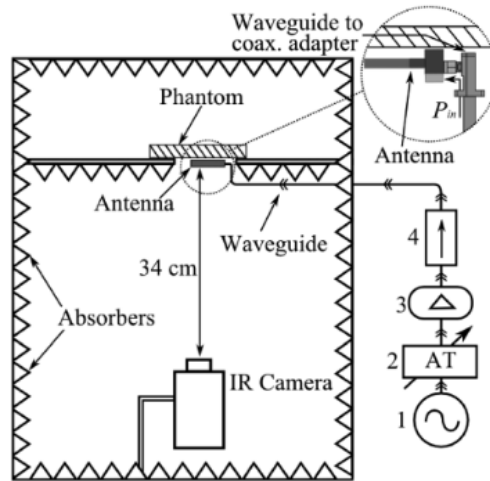


Ilustración 3: Configuración de la técnica de dosimetría multifísica [14].

Los resultados demostraron que para el escenario considerado el impacto del cuerpo sobre las características de la antena es casi insignificante, e incluso las potencias radiadas relativamente altas (hasta 550 mW) resultaron en niveles de exposición que están por debajo de los límites internacionales de exposición.

También se demostró que, aunque la distancia entre la antena y el cuerpo sea pequeña, la adaptación de impedancias y la ganancia de la antena casi no se ven afectadas por la presencia del cuerpo.

Además, se verificó que, para la antena considerada, el nivel de exposición del cuerpo estaba por debajo de los límites de exposición establecidos por el International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Además, los valores medidos (measured) y obtenidos (computed) en simulaciones eran muy parecidos tal y como se muestra en la Tabla 3. Los valores de IPD y SAR se han obtenido mediante el software (SW) de simulación CST Microwave Studio.

	Computed	Measured
PD_{peak} (mW/cm ²)	4.3	4.4±0.3
IPD_{peak} (mW/cm ²)	7.0	6.9±0.4
SAR_{peak} (W/kg)	165.6	159.5±9.0
$IPD_{averaged}$ (mW/cm ²)	3.8	3.8±0.4

Tabla 3: Valores de pico de PD, IPD y SAR y valor medio de IPD medidos y obtenidos en simulaciones a 1 cm del "phantom" a 60 GHz [14].

Por otra parte, en 2017 Purva Shrivastava y T. Rama Rao [15] llevaron a cabo un estudio con el objetivo analizar la tasa de absorción específica (SAR) de una antena de ranura cónica lineal que funciona a 60 GHz utilizando una guía de onda integrada de sustrato.



Ilustración 4: Prototipo de una antena de ranura cónica lineal corrugada [15].

En este estudio se adjunta una tabla (Tabla 4), con las comparaciones de los resultados SAR en diferentes frecuencias, los cuales pueden ser útiles para compararlos con los resultados obtenidos en este trabajo.

Frequency (GHz)	Antenna	Method	Anatomical Site	SAR	Power	Distance
2.4	PIFA	FDTD	Torso	0.399 mW/Kg	100 mW	34 cm
			Head	0.057 mW/kg		
915 MHz and 2.4 GHz	Microstrip	FEM	Living tissue model	> 10 W/kg	100 W	5 cm
2.4 GHz	Monopole and PIFA	FDTD	Head	3.56 W/kg (PIFA)	100 mW	7 mm
				3.86 W/kg (monopole)		5.32 mm
			Ear	0.49 W/kg (PIFA)	39.87 mm	
60 GHz	Patch array	FDTD	Body	165.6 W/kg	322 mW	5.6 mm
60 GHz	WR-15 open-ended rectangular waveguide	FDTD	Hand	2.97 kW/kg	500 mW	15 mm

Tabla 4: Comparación de resultados SAR de otros trabajos de investigación [15].

A partir de los resultados de este estudio, se encuentra que a 60 GHz la profundidad de la piel hace que las corrientes cerca de la superficie del cuerpo creen puntos calientes. Sin embargo, a 60 GHz, la importancia de los puntos calientes alrededor de la fuente se reduce debido a la atenuación de los campos en los tejidos. Los valores de SAR obtenido en este caso son mucho más bajos que los límites establecidos por la normativa que son de 2 W/kg (según el ICNIRP) y 1.6 W/kg (en EEUU según Federal Communications Commissions (FCC) [16]) para exposición parcial del cuerpo (cabeza) y 4 W/kg para exposición a manos, muñecas, pies y tobillos.

En cuanto a la banda de 800 MHz no se ha encontrado ningún documento al respecto que tuviera el mismo objetivo que este TFM, por lo que no habrá resultados con los que poder comparar los obtenidos aquí. A pesar de no obtener documentos con el mismo objetivo se han encontrado algunas antenas “wearable” diseñadas para trabajar en esta banda.

Por una parte, en 2016, Mario Orefice y sus compañeros realizaron un estudio sobre antenas portátiles eléctricamente pequeñas para aplicaciones de servicios de emergencia y seguridad en la banda baja de UHF, alrededor de 860 MHz [17].

En 2020 Ilaria Marasco y sus compañeros han diseñado una antena de meandro [18], una serie de conductores plegados que consiguen una reducción de tamaño en comparación con una antena monopolo lineal, en la Ilustración 5 se puede ver la forma de este tipo de antenas. Esta antena de ultra alta frecuencia innovadora es flexible y biocompatible y se ha realizado mediante una impresora 3D de múltiples materiales.

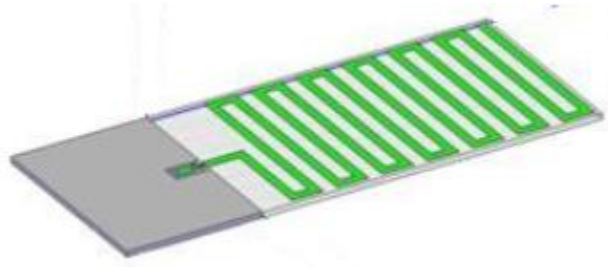


Ilustración 5: Antena de meandro

Este mismo año, Carlos Camacho Gómez y sus compañeros han diseñado una antena de parche textil de banda múltiple de microstrip para servicios LTE y 5G [19]. Este diseño combina varias características clave para proporcionar el rendimiento operativo deseado a diferentes frecuencias, incluidas las bandas LTE y 5G, concretamente a 800, 2440 y 3500 MHz.

6. Descripción del trabajo

En este apartado se va a explicar la metodología utilizada para alcanzar los objetivos descritos en los apartados anteriores.

En primer lugar, se explica el diseño de las antenas de 800 MHz y de 60 GHz. Partiendo de los diseños teóricos iniciales, se muestra cómo se ha llegado a los diseños finales de las antenas mediante la optimización de las mismas para que trabajen en la frecuencia adecuada y cumplan las características necesarias. A continuación, en el subapartado 6.2, se explica en detalle los tipos de simulaciones que se han planteado para dar respuesta a los objetivos de este TFM. Concretamente, se han simulado cuatro escenarios, los tres primeros considerando una sola antena transmisora: propagación en espacio libre, incidencia sobre un cuerpo humano, incidencia sobre un cuerpo con la presencia de diferentes textiles de distintos grosores entre la piel y las antenas; y un cuarto escenario en el que se evalúa la exposición EM debida a una red formada por dos antenas, simulando un sistema elemental de comunicaciones. Por último, se ofrecen y analizan los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se ha llegado.

Para realizar el diseño de las antenas y las simulaciones se ha utilizado el software de simulación y análisis de campo electromagnético CST Studio Suite 2020.

6.1. Diseño y verificación de las antenas

6.1.1. Diseño de las antenas

El diseño de las antenas en las bandas de 800 MHz y 60GHz se ha realizado partiendo del modelo realizado por Shamsur Rahman Akash [20] de una antena de parche en la frecuencia de 2.45 GHz.

En primer lugar, se han diseñado las antenas de base. El punto de partida de este diseño es el cálculo de los valores de los parámetros según la frecuencia en la que se quiere que la antena trabaje. Dichos parámetros se pueden ver representados en la Ilustración 6.

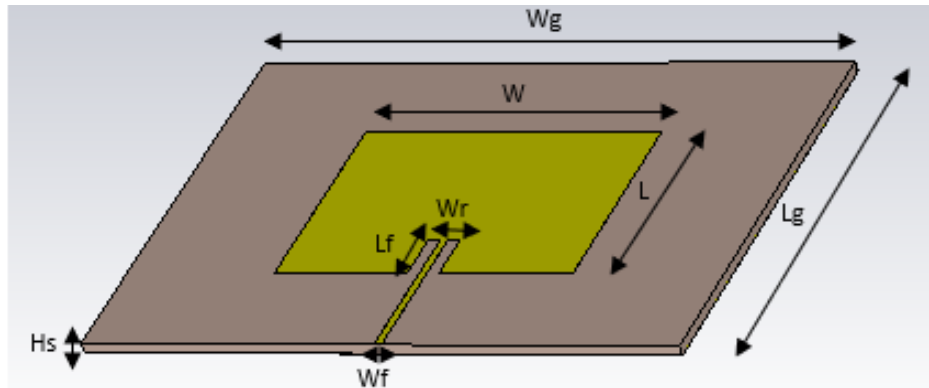


Ilustración 6: Parámetros de la antena de parche a calcular según la banda de frecuencias en la que vaya a operar

800MHz

Para realizar el diseño inicial de la antena en la banda de 800 MHz, ha habido que elegir el tipo de sustrato con el que se quiere trabajar. El tipo de sustrato implica definir varios parámetros, a saber, el espesor del sustrato, H_s , y el valor de la permitividad relativa la permitividad relativa, ϵ_r del mismo. En este caso, se ha elegido el material Rogers RO3003 con una ϵ_r igual a 3. La permitividad relativa también conocida como constante dieléctrica, tiene un valor de entre 2 y 12. En este caso, se ha elegido este tipo de material puesto que tiene una constante dieléctrica baja y esto garantiza un mejor funcionamiento debido a que aumenta la eficiencia de la antena [21]. El espesor, H_s , del que se ha partido ha sido de 2 mm, la modificación de este parámetro tendrá efecto en el ancho de banda de la antena.

Una vez conocido el espesor del sustrato y su constante dieléctrica se han calculado las dimensiones de la antena mediante las fórmulas mencionadas en el estado del arte. Como se puede ver en la Ilustración 6 a la antena de parche original se le han añadido unas ranuras las cuales se han diseñado teniendo en cuenta el modelo de Shamsur Rahman Akash. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para los parámetros de la antena base:

L(mm)	W(mm)	L_g(mm)	W_g(mm)	L_f(mm)	W_f(mm)	W_r(mm)	H_s(mm)	H_t(mm)
107.98	132.58	2·L	2·W	6	5	1	2	0.042

Tabla 5: Valores iniciales de los parámetros de la antena de parche en la banda de 800 MHz

Para analizar la frecuencia de operación de la antena y el ancho de banda se ha realizado la simulación de la antena y se ha representado el parámetro S11.

Mediante el parámetro S11 se puede valorar si el diseño de la antena es bueno o no. El parámetro S11 hace referencia a la cantidad de potencia que es reflejada, el diseño de la antena será mejor cuando este valor sea más pequeño.

Al analizar el parámetro S11 se ha visto que no era el esperado (Ilustración 7), ya que, el valor de la amplitud del parámetro S11 es muy alto, debería de ser menor de -10 dB para garantizar que la potencia reflejada en los puertos es mínima y por tanto la antena funciona correctamente a la frecuencia deseada. Además, tal y como se aprecia en la figura, el mínimo de S11 no está centrado exactamente en 800 MHz. Por ello se ha tenido que realizar una optimización de la antena de parche diseñada.

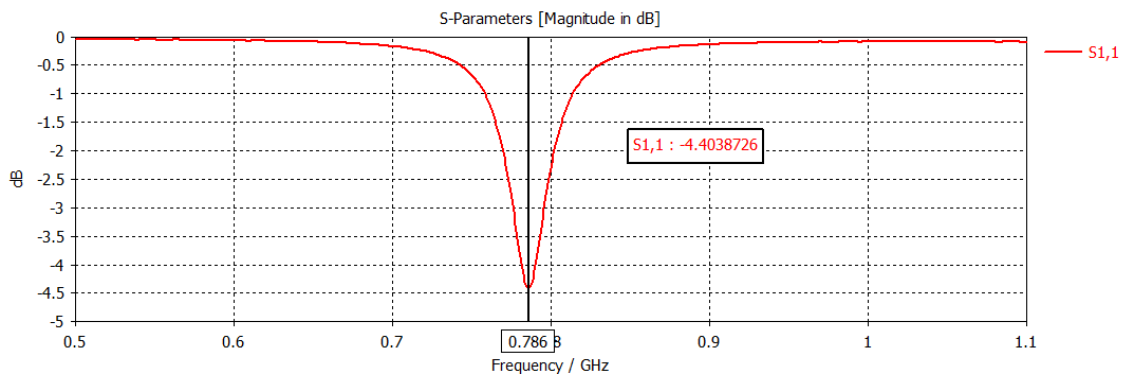


Ilustración 7: Parámetro S11 del diseño inicial en la banda de 800 MHz

60 GHz

A la hora de realizar el diseño inicial de la antena en la banda de 60 GHz, se ha usado el mismo material de substrato que en la banda de 800 MHz, es decir, Rogers RO3003 con una ϵ_r igual a 3. En este caso, como la frecuencia utilizada es mucho más alta las dimensiones de la antena han sido más pequeñas. Por ello, el espesor del substrato de la que se ha partido ha sido de 0.15 mm. En este caso, se ha seguido el mismo procedimiento que en la de 800 MHz y se han añadido las ranuras a la antena de parche. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para los parámetros de la antena base:

L(mm)	W(mm)	L _g (mm)	W _g (mm)	L _f (mm)	W _f (mm)	W _r (mm)	H _s (mm)	H _t (mm)
1.1976	1.7677	2·L	2·W	0.6	0.4	0.4	0.15	0.04

Tabla 6: Valores iniciales de los parámetros de la antena de parche en la banda de 60 GHz

Al analizar el parámetro S11 se ha visto que no era el esperado (Ilustración 8), ya que, el valor de la amplitud del parámetro S11 es muy alto, ya que debería de ser menor de -10 dB

y además el mínimo no está centrado exactamente en 60 GHz. Por ello se ha tenido que realizar una optimización de la antena de parche diseñada.

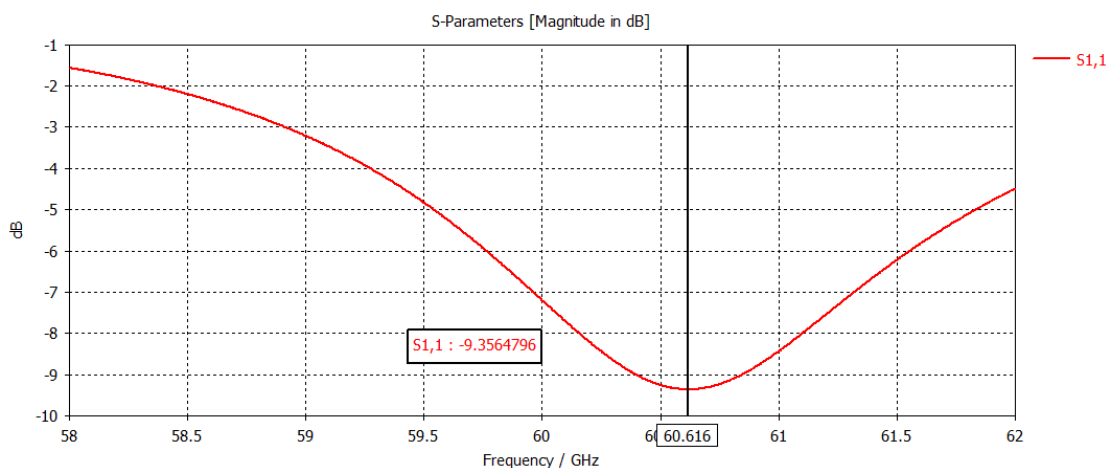


Ilustración 8: Parámetro S₁₁ del diseño inicial en la banda de 60 GHz

Optimización de las antenas

El objetivo de esta tarea es optimizar la frecuencia en la que se desea que opere la antena y el ancho de banda en torno a esa frecuencia. Por lo tanto, se ha optimizado la frecuencia de operación en cada caso. El objetivo de este proceso es que la antena esté adaptada a la frecuencia deseada, es decir que el parámetro S₁₁ sea menor que -10 dB.

Por otra parte, se ha optimizado el ancho de banda entorno a la frecuencia en la que se quiere que la antena opere para que sea suficientemente grande para ofrecer el servicio.

El ancho de banda va a condicionar la capacidad, la velocidad de descarga y la posibilidad de ofrecer servicio a un número mayor o menor de usuarios. En 5G en la banda de 800 MHz el ancho de banda puede ser de unos 10 MHz ya que la frecuencia es muy pequeña [22]. En cambio, a 60 GHz el ancho de banda puede llegar a ser hasta de 700 u 800 MHz.

800 MHz

Para optimizar la antena de la banda de 800 MHz se han ido modificando los valores iniciales. En la Ilustración 9 se puede ver por colores el cambio que sufre el parámetro S₁₁ al cambiar cada valor. La curva inicial, es decir, la que se quiere optimizar sería la de color rojo. Los pasos seguidos para la optimización han sido los siguientes:

- Aumento de la anchura del sustrato, H_s , con ello se ha conseguido que el mínimo del parámetro S11 disminuya (curva de color verde).
- Aumento de la largura de la línea de alimentación, L_f . Gracias a esto el mínimo del parámetro S11 ha disminuido y se ha desplazado hacia la derecha en frecuencia (curva azul).
- Aumento de la anchura de las ranuras, W_r . Este aumento ha disminuido el mínimo del parámetro S11 y disminución del ancho de banda, lo cual está bien ya que el ancho de banda era demasiado grande (curva naranja).
- Disminución de largura de la antena de parche, L . El mínimo del parámetro S11 se ha desplazado hacia la derecha, acercándose más a la frecuencia donde se quiere que la antena opere (curva rosa).
- Disminución de la anchura de la antena de parche, W , y aumento de la anchura de línea de alimentación, W_f . Mediante la modificación de estos parámetros, se ha conseguido que la antena opere en la frecuencia adecuada con un mínimo del parámetro S11 menor que -10 dB y un ancho de banda adecuado (curvas marrón y negra).

El valor del parámetro S11 final, es decir, el que se ha obtenido después de la optimización es el de color negro con un valor mínimo de -24.57 dB.

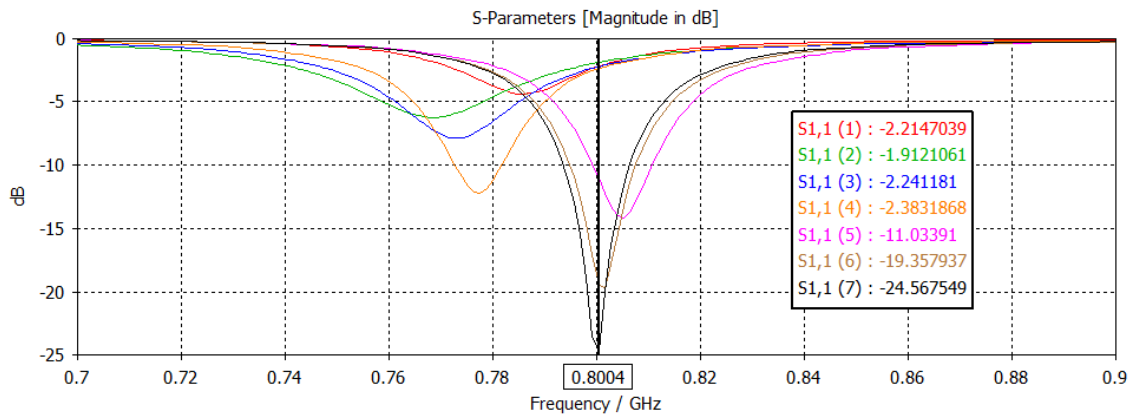


Ilustración 9: Efectos de la modificación de los parámetros en el parámetro S11 (800 MHz)

Los valores finales de los parámetros de la antena de 800 MHz después de la optimización:

L(mm)	W(mm)	L_g(mm)	W_g(mm)	L_f(mm)	W_f(mm)	W_r(mm)	H_s(mm)	H_t(mm)
103.92	148.28	2·L	2·W	24	3.8	6	5	0.042

Tabla 7: Valores optimizados de los parámetros de la antena de parche en la banda de 800 MHz

60 GHz

Para optimizar la antena de la banda de 60 GHz se han ido modificando los valores iniciales como en el caso de la de 800 MHz. En este caso hacía falta disminuir el ancho de banda y el mínimo del parámetro S11 de la curva inicial (curva roja). El resultado obtenido se puede ver en Ilustración 10 y en este caso el valor óptimo del parámetro S11 es el de la curva rosa con un mínimo de -21.79 dB.

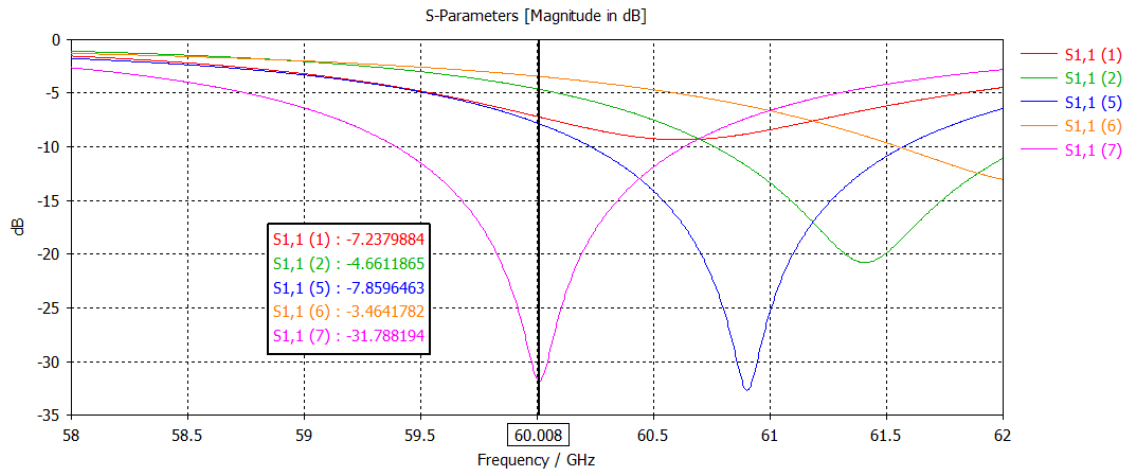


Ilustración 10: Efectos de la modificación de los parámetros en el parámetro S11 (60 GHz)

Los valores finales de los parámetros de la antena de 60 GHz después de la optimización:

L(mm)	W(mm)	L _g (mm)	W _g (mm)	L _f (mm)	W _f (mm)	W _r (mm)	H _s (mm)	H _t (mm)
1.385	1.6177	2·L	2·W	0.3697	0.1	0.3197	0.1	0.04

Tabla 8: Valores optimizados de los parámetros de la antena de parche en la banda de 60 GHz

Comparando los valores obtenidos con el diseño explicado en el estado del arte de un array 2x2 de antenas de parche de microstrip de 60 GHz [14]. En ese caso, cada antena de parche que operaba a 60 GHz tenía las siguientes medidas. $L = 1.5$ mm y $W = 2.3$ mm. En comparación con esas antenas los parámetros obtenidos para la antena diseñada han sido un poco más pequeños.

6.1.2. Verificación de las antenas

En este apartado, se ha comprobado que las antenas diseñadas cumplen las características mencionadas en el apartado 6.1.1 en la parte de optimización de las antenas.

Para ello, se han simulado las antenas en espacio libre con el fin de analizar el parámetro S11 y el diagrama de radiación.

Gracias al parámetro S11 se ve cual es la frecuencia en la que trabaja cada antena y cuál es su ancho de banda. El ancho de banda se ha calculado a partir del rango de frecuencias que poseen niveles iguales o menores de -10 dB.

En el diagrama de radiación se analiza la directividad del haz de radiación y la eficiencia de las antenas. Mediante la evaluación de estos parámetros y del parámetro S11 se puede determinar la efectividad del diseño.

800 MHz

En la banda de 800 MHz, como se puede observar en la Ilustración 11, la adaptación de la antena es muy buena en la frecuencia deseada con un valor de -24.57 dB. El ancho de banda es de 12.69 MHz que, aunque es bastante pequeño sirve para enviar pequeñas cantidades de datos.

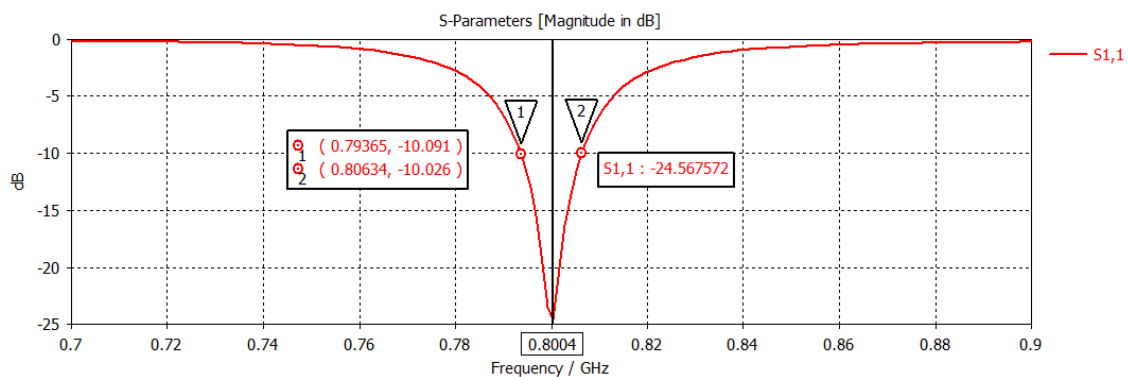


Ilustración 11: Parámetro S11 optimizado y ancho de banda en la banda de 800 MHz.

Seguidamente, se muestra el diagrama de radiación obtenido para la antena donde se puede analizar la directividad del haz de radiación y la eficiencia de las antenas.

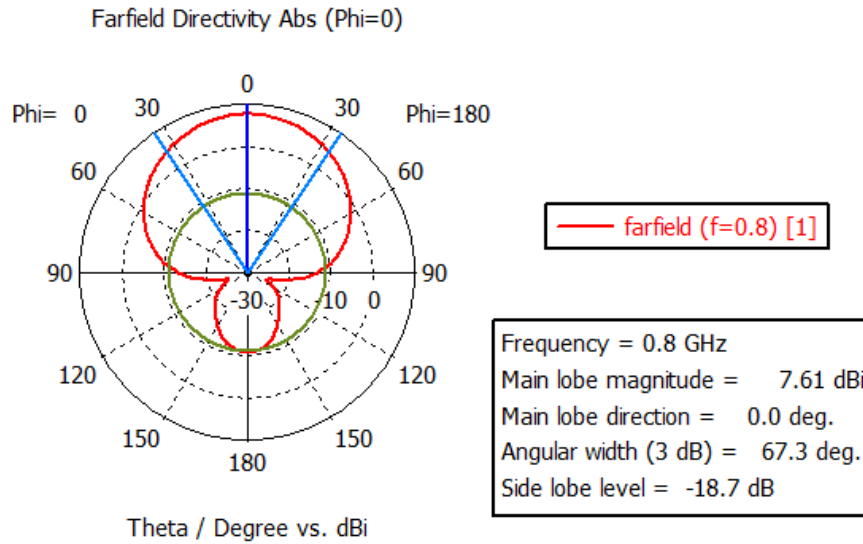


Ilustración 12: Diagrama polar del valor absoluto de la directividad para $\varphi = 0^\circ$ (800 MHz)

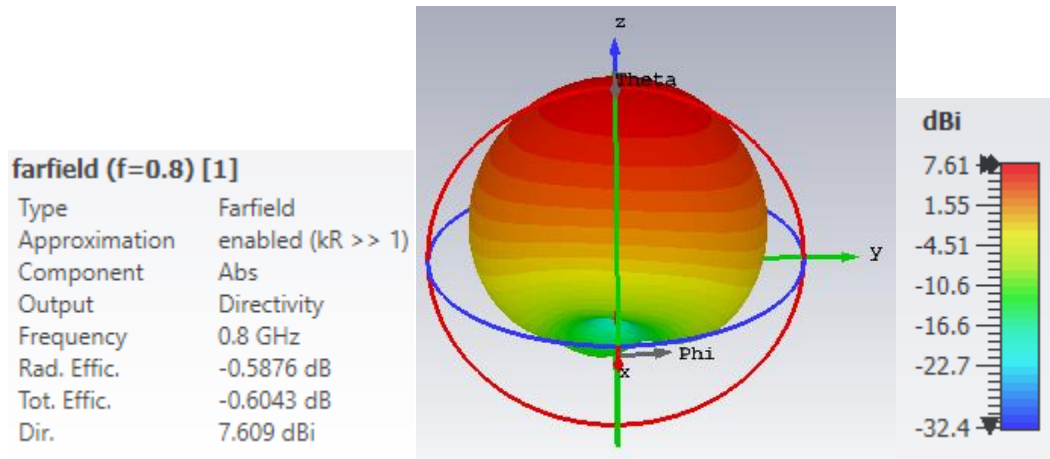


Ilustración 13: Directividad del haz de radiación en 3D (800 MHz)

La directividad es de 7.61 dB y el ancho de haz a 3 dB de 67.3° . Por otra parte, la ganancia se reduce a 7 dB debido a que la eficiencia es de -0.6 dB.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos las especificaciones para antena de parche de 800 MHz diseñada serían las siguientes:

Adaptación (S11) (dB)	Ancho de banda (MHz)	Directividad (dBi)	$\Delta\Theta_{3dB}$ ($^\circ$)	Eficiencia (dB)
-24.57	12.69	7.609	67.3	-0.6

Tabla 9: Especificaciones de la antena diseñada en la banda de 800 MHz

60 GHz

En este caso también se puede ver en la Ilustración 14 que la adaptación de la antena es muy buena en la frecuencia deseada con un valor de -31.69 dB del parámetro S11. El ancho de banda es de 1.24 GHz. En este caso se puede ver que el ancho de banda es mucho mayor que en el caso de la antena de 800 MHz. Pero esto es adecuado, ya que como he mencionado antes en 5G en la banda de 800 MHz el ancho de banda ronda los 10 MHz y en la de 60 GHz puede llegar a ser hasta de 700 u 800 MHz.

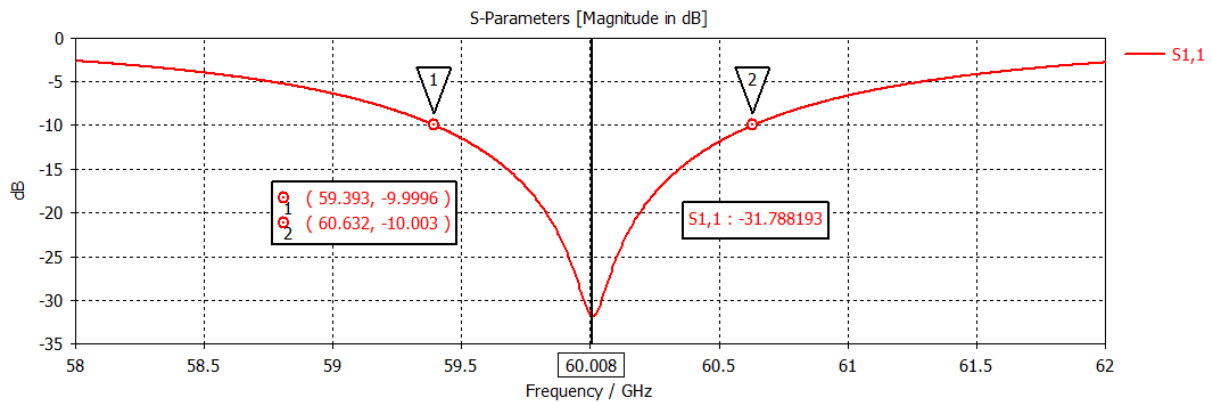


Ilustración 14: Parámetro S11 optimizado y ancho de banda en la banda de 60 GHz

En las Ilustraciones 15 y 16 se muestra el diagrama de radiación obtenido para la antena de 60 GHz donde se puede analizar la directividad del haz de radiación y la eficiencia de las antenas.

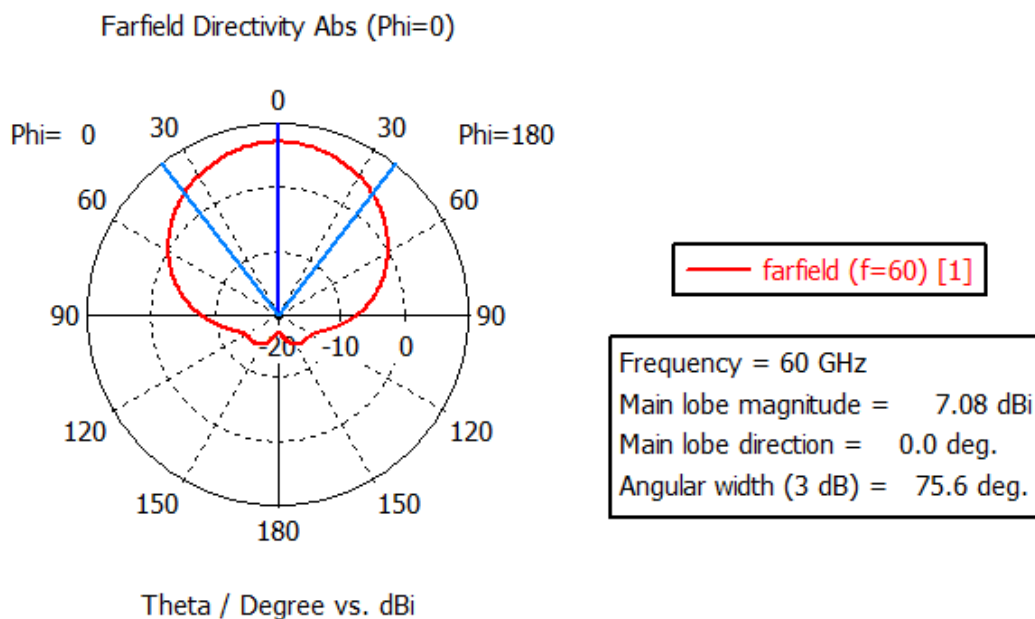


Ilustración 15: Diagrama polar del valor absoluto de la directividad para $\phi = 0^\circ$ (60 GHz)

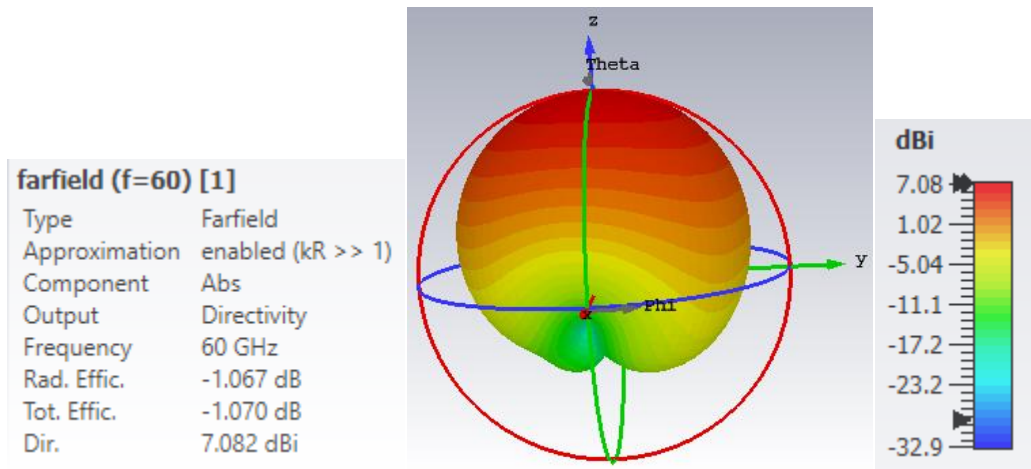


Ilustración 16: Directividad del haz de radiación en 3D (60 GHz)

La directividad es de 7.08 dB y el ancho de haz a 3 dB de 75.6° . Por otra parte, la ganancia se reduce a 5.93 dB debido a que la eficiencia es de -1.07 dB.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos las especificaciones para antena de parche de 60 GHz diseñada serían las siguientes:

Adaptación (S11) (dB)	Ancho de banda (GHz)	Directividad (dBi)	$\Delta\theta_{3dB}$ ($^\circ$)	Eficiencia (dB)
-31.79	1.24	7.08	75.6	-1.07

Tabla 10: Especificaciones de la antena diseñada en la banda de 60GHz

6.2. Planificación de simulaciones de exposición EM

En este apartado se procede a explicar el proceso seguido para caracterizar los cuatro escenarios en los que se van a realizar las simulaciones y a detallar los tipos de resultados obtenidos.

6.2.1. Simulaciones en espacio libre

Se han realizado simulaciones en espacio libre con el fin de analizar los campos eléctricos (campo E) y campos magnéticos (campo H) cuando no existe ningún objeto o cuerpo cerca de las antenas.

El objetivo es doble: determinar el límite entre el campo cercano y campo lejano y conocer los niveles de campo eléctrico (campo E) y campo magnético (campo H). El procedimiento seguido en el SW CST consiste en el uso de sondas que permiten medir los campos E y H de

manera independiente. Dichas sondas se han colocado en campo lejano y en campo cercano, alrededor de las antenas a diferentes distancias.

Al colocar una sonda de campo lejano en campo cercano el programa da un aviso. Gracias a ello, probando a diferentes distancias y comprobando que se cumple la fórmula de la impedancia intrínseca ($E/H = 377 \Omega$) se ha podido hallar cual es el punto exacto que marca ese límite.

En el caso de 800 MHz la distancia que ha determinado la zona en campo lejano ha sido de 107 mm y para la antena de 60 GHz esa distancia ha sido de 29 mm.

800MHz

En el caso de la antena de 800 MHz se han colocado las sondas para medir el campo eléctrico y magnético en las siguientes posiciones (las posiciones en eje x,y,z están indicadas en mm): (0,0,10), (0,100,10), (100,0,10), (-100,0,10), (100,100,10), (-100,100,10), (0,200,10), (100,200,10) y (-100,200,10).

En la siguiente tabla se indican las distancias al centro para los ejes x, y, z junto a la distancia total que hay desde el punto central y el tipo de campo. La distancia total se ha medido tomando como punto central la posición (0,0,10) para no colocar las sondas en contacto con la antena, asique está posición se considerará que está a 0 mm del punto central.

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Distancia total (mm)	Tipo de campo
0	0	10	0	Cercano
0	100	10	100	Cercano
100	0	10	100	Cercano
-100	0	10	100	Cercano
100	100	10	141.42	Lejano
-100	100	10	141.42	Lejano
0	200	10	200	Lejano
100	200	10	233.6	Lejano
-100	200	10	233.6	Lejano

Tabla 11: Posición de las sondas en cada eje y tipo de campo (800 MHz)

En la Ilustración 17 se muestra cómo se han colocado las sondas de campo eléctrico y magnético en la antena diseñada para trabajar a 800 MHz.

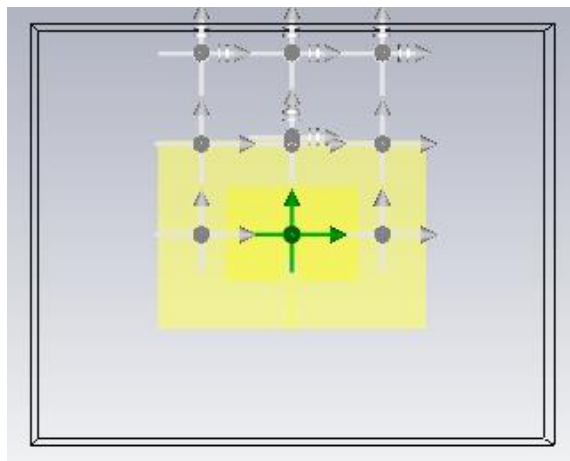


Ilustración 17: Colocación de las sondas alrededor de la antena a 800 MHz

60 GHz

Para la antena de 60 GHz al ser una antena de dimensiones bastante más pequeñas que la de 800 MHz, las posiciones elegidas para la colocación de las sondas han sido a distancias más pequeñas también. En este caso, las sondas para medir el campo eléctrico y magnético en las siguientes posiciones (las posiciones en eje x, y, z están indicadas en mm): $(0,0,0.4)$, $(0,20,0.4)$, $(20,0,0.4)$, $(-20,0,0.4)$, $(20,20,0.4)$, $(-20,20,0.4)$, $(0,40,0.4)$, $(20,40,0.4)$ y $(-20, 40,0.4)$.

En la siguiente tabla se indican las distancias al centro para los ejes x, y, z junto a la distancia total que hay desde el punto central y el tipo de campo. La distancia total se ha medido tomando como punto central la posición $(0,0,0.4)$ para no colocar las sondas en contacto con la antena, asique está posición se considerará que está a 0 mm del punto central.

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Distancia total (mm)	Tipo de campo
0	0	0.4	0	Cercano
0	20	0.4	20	Cercano
20	0	0.4	20	Cercano
-20	0	0.4	20	Cercano
20	20	0.4	28.28	Cercano
-20	20	0.4	28.28	Cercano
0	40	0.4	40	Lejano
20	40	0.4	44.72	Lejano
-20	40	0.4	44.72	Lejano

Tabla 12: Posición de las sondas en cada eje y tipo de campo (60 GHz)

En la Ilustración 18 se muestra cómo se han colocado las sondas de campo eléctrico y magnético en la antena diseñada para trabajar a 60 GHz.

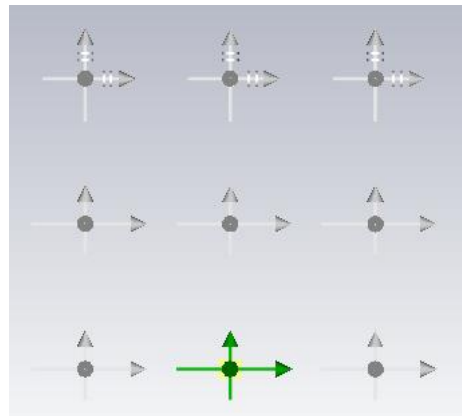


Ilustración 18: Colocación de las sondas alrededor de la antena a 60 GHz

6.2.2. Simulaciones con un modelo de cuerpo humano

En esta segunda parte, se ha colocado la antena sobre un modelo de cuerpo humano para analizar, por una parte, el efecto de la antena sobre el cuerpo humano y, por otra parte, la influencia que tiene el cuerpo sobre el funcionamiento de la antena.

Para analizar el efecto que tienen cada una de las antenas sobre un cuerpo cercano a ellas, se ha medido la tasa SAR y la potencia total absorbida por el cuerpo. La tasa SAR se ha medido en un volumen de 10 g de tejido. Estas medidas han sido realizadas colocando la antena pegada al cuerpo y situando el cuerpo a diferentes distancias de la antena.

Con objeto de estudiar el efecto contrario, es decir, la influencia que tiene el cuerpo humano en el funcionamiento de la antena, se ha analizado de nuevo el parámetro S11, los diagramas de radiación y el campo E medido por las sondas en las posiciones mencionadas anteriormente, y se han comparado estos resultados con los obtenidos en espacio libre.

800MHz

A diferencia de lo que ocurre a 60 GHz, en estas frecuencias debido a la penetración que tienen las ondas electromagnéticas, lo más común es que se absorba potencia, además de en la piel, en otros tejidos biológicos situados a mayor profundidad. Por ello, se ha creado un modelo de cuerpo plano teniendo en cuenta las tres primeras capas y sus consiguientes características [23]:

	Permitividad relativa	Conductividad (S/m)	Densidad (kg/m³)	Anchura (mm)
Piel	4.20e+1	8.34e-1	1110	1.3
Grasa	1.14e+1	1.02e-1	900	50
Músculo	5.53e+1	9.10e-1	1080	12

Tabla 13: Propiedades de la tres primeras capas del cuerpo humano en 800 MHz

Estas capas junto a sus características, se le han atribuido al cuerpo diseñado como se muestra en la siguiente ilustración:

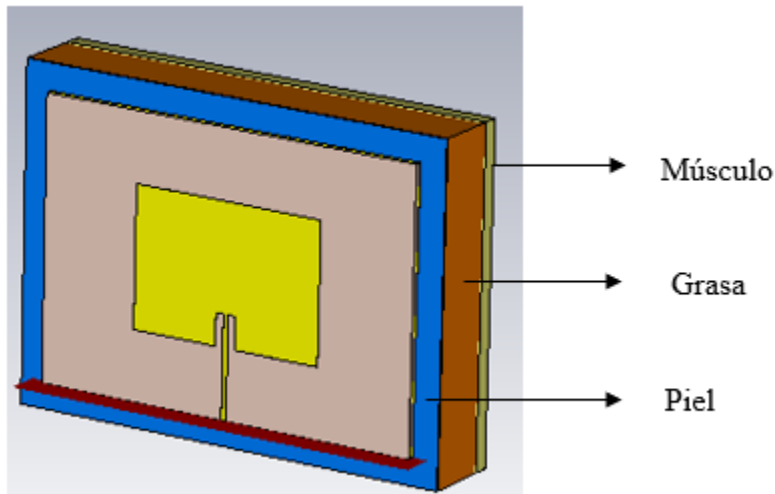


Ilustración 19: Antena de parche sobre el cuerpo plano diseñado para 800 MHz

60 GHz

Como se ha mencionado anteriormente, a 60 GHz la potencia se absorberá solo en la piel, sin pasar a otros tejidos biológicos situados a mayor profundidad. Para 60 GHz las propiedades de la piel son las siguientes:

	Permitividad	Conductividad (S/m)	Densidad (kg/m³)
Piel	7.98e+0	3.64e+1	1110

Tabla 14: Propiedades de la piel a 60 GHz

Estas características de la piel se le han atribuido al cuerpo diseñado como se muestra en la siguiente ilustración:

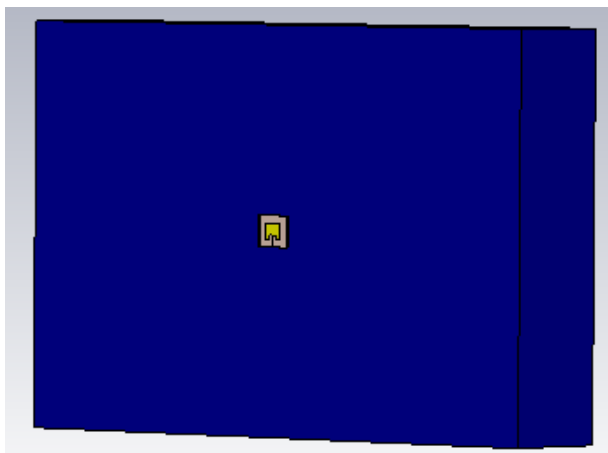


Ilustración 20: Antena de parche sobre el cuerpo plano diseñado para 60 GHz

6.2.2.1. Verificación del parámetro S11 al añadir el cuerpo

Al añadir el cuerpo a la antena puede que la frecuencia en la que opere la antena se modifique. Por ello, se ha vuelto a medir el parámetro S11 para poder analizar el efecto que ha tenido la adición de cuerpo en él.

6.2.2.2. Medición del campo eléctrico colocando las sondas a diferentes alturas

Se ha medido el campo eléctrico en las posiciones x e y en las que las sondas estaban previamente colocadas, pero colocándolas a diferentes alturas de la antena. Esta medida se ha realizado mientras la antena estaba en contacto con el cuerpo y, en el caso de la antena de 60 GHz, también mientras la antena estaba a 5 mm del cuerpo, ya que ese caso coincide con su longitud de onda. De esta manera, se ha podido analizar el cambio que se produce en el valor del campo eléctrico cuando la sonda se coloca a una altura otra respecto de la antena.

Las distintas alturas elegidas para colocar las sondas han sido, por una parte, 10 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm y 200 mm en el caso de la antena de 800 MHz como se puede ver en la Ilustración 21:

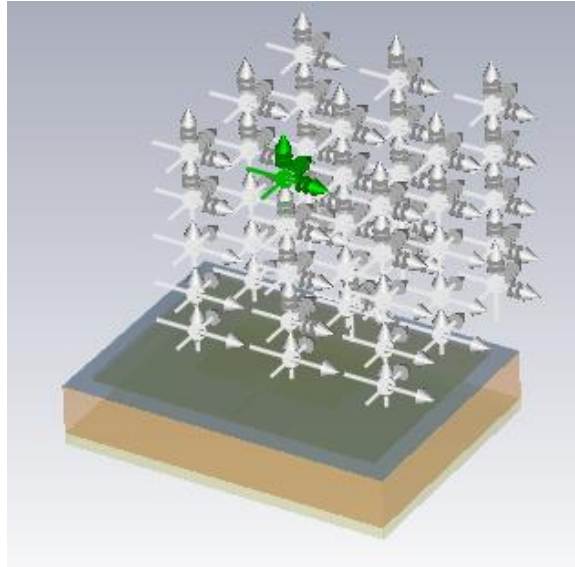


Ilustración 21: Sondas colocadas a diferentes alturas de la antena

Por otra parte, en la antena de 60 GHz se han colocado más cerca porque su alcance es más pequeño. Concretamente, se han colocado a 0.4 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm y 40 mm de la antena.

6.2.2.3. Simulaciones de la antena a diferentes distancias del cuerpo

A continuación, se ha calculado la tasa SAR, la potencia absorbida por el cuerpo y el campo eléctrico colocando el cuerpo a diferentes distancias de la antena para comprobar lo que esto afectaba.

La tasa SAR en el cuerpo ha sido calculada para una potencia de entrada de 500 mW y para 10 g de tejido.

A la hora de calcular el campo eléctrico se han dejado las sondas colocadas en las mismas posiciones que en las simulaciones realizadas en espacio libre, sin variar las distancias entre la antena y las sondas. Lo único que ha variado es la distancia entre el cuerpo y la antena.

Las distancias a las que se ha colocado el cuerpo de la antena en la banda de 800 MHz y 60 GHz han sido las siguientes: 0 mm, 2 mm, 5 mm, 7 mm y 10 mm.

A continuación, se muestra una tabla resumen que recoge las distancia entre las sondas y la antena, y la distancia entre el cuerpo y la antena para cada frecuencia:

D sondas-antena 800 MHz (mm)	0	100	141.42	200	223.61
D cuerpo-antena 800 MHz (mm)	0	10	20	30	140
D sondas-antena 60 GHz (mm)	0	20	28.28	40	44.72
D cuerpo-antena 60 GHz (mm)	0	2	5	7	10

Tabla 15: Tabla resumen de las distancias sondas-antena y cuerpo-antena

6.2.3. Simulaciones con textiles

Dado que cuando se utilizan estas antenas en aplicaciones ‘wearables’ lo normal es que no estén en contacto directo con el cuerpo, sino que exista otro material, normalmente un textil, entre la piel y la antena, en este tercer escenario se va a colocar un textil entre el modelo de cuerpo y la antena. El diseño completo se puede ver en la Ilustración 22, en la que el textil aparece dibujado en color verde. Los resultados de estas simulaciones permitirán comprobar el efecto que este tiene dicho material en el valor de la tasa SAR. Para ello se han elegido cuatro materiales: algodón poliéster, plástico y nylon.

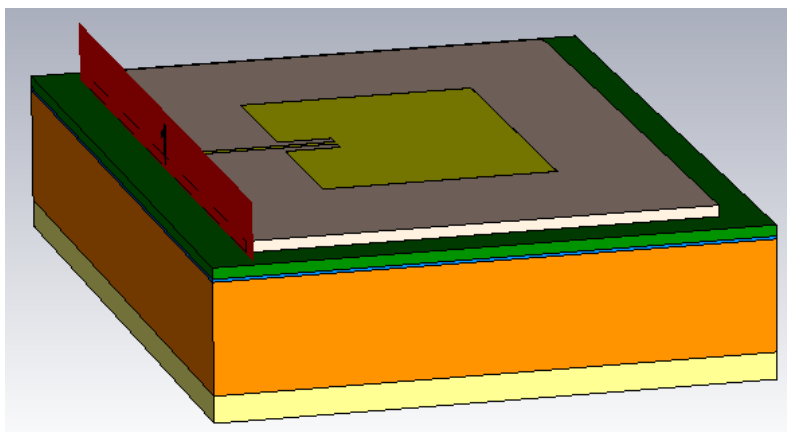


Ilustración 22: Colocación del textil entre la piel y la antena

Las medidas se realizarán con los cuatro materiales para el caso de la antena en la banda de 8000 MHz y para el algodón en la de 60 GHz. También se variará el grosor de los materiales para ver cómo influye este parámetro.

Los grosores elegidos para cada frecuencia han sido los siguientes:

Grosor textil 800 MHz (mm)	0	50	100	150	200
Grosor textil 60 GHz (mm)	0.5	1	2	5	10

Tabla 16: Grosos del textil utilizados para cada frecuencia

En la banda de 800 MHz los grosos utilizados han sido más grandes, ya que, al ser una antena más grande y tener la longitud de onda más grande era necesario que este grosor fuera mayor para obtener resultados y ver cambios.

En la siguiente tabla se pueden ver las características de cada material, utilizadas para crear los tejidos mediante el CST [24]:

Textil	Grosor	Permitividad relativa	Densidad (kg/cm³)
Algodón	45 μm	2	450
Poliéster	55 μm	3.3	400
Plástico	25 μm	3	935
Nylon	10 μm	3.5	1150

Tabla 17: Características de los textiles diseñados en CST

6.2.4. Red formada por dos antenas

El último escenario se ha diseñado colocando dos antenas de parche a diferentes distancias (en un caso para simular un caso de campo cercano y en otro para campo lejano). Este escenario representa una red elemental de comunicaciones industriales, donde, para campo cercano se tendría por ejemplo un lector de código de barras y se ha tenido en cuenta la distancia que hay entre la parte de arriba del lector, donde estaría colocada la antena hasta el cuerpo. Por otra parte, en campo lejano las antenas se colocarán a la distancia en la que las antenas se encuentren más cerca, pero en esta región.

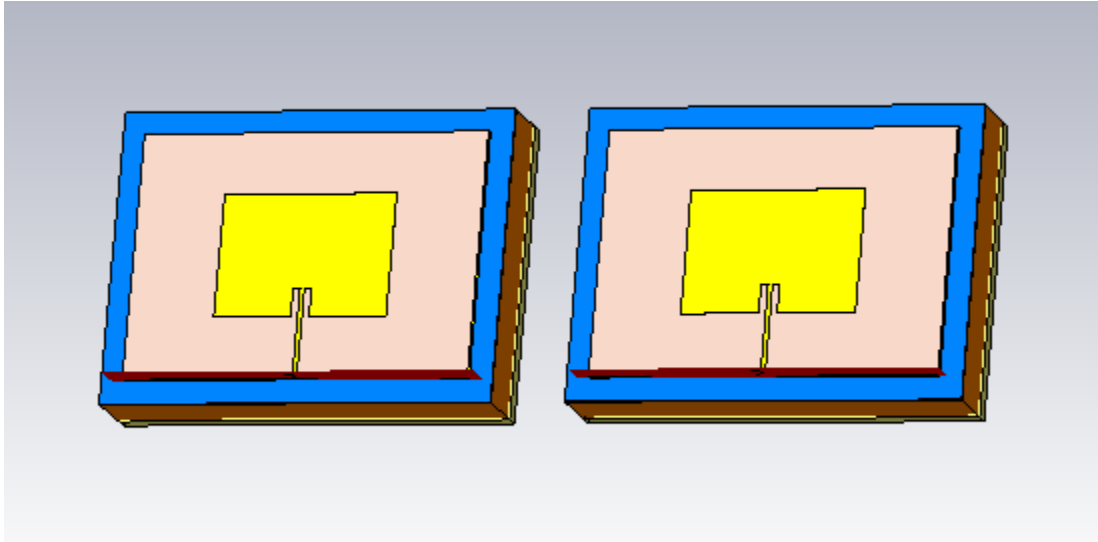


Ilustración 23: Red formada por dos antenas

Por una parte, se ha calculado el campo eléctrico obtenido para cada una de las dos antenas de la red mediante las sondas que estaban colocadas en la primera antena para comprobar si la segunda ante tiene algún efecto en el campo E. Para la antena de 800MHz las antenas se han colocado con una separación de 20 mm para campo cercano y de 110 mm para campo lejano y para la de 60 GHz se han colocado a 2mm para campo cercano y a 30 mm para campo lejano.

Por otra parte, también se ha calculado la tasa SAR, la potencia absorbida por el cuerpo y el campo eléctrico, pero en este caso con la antena pegada al cuerpo. Las separaciones usadas han sido las mismas, pero en este caso esa distancia en vez de ser la que hay entre antena y antena, es la que hay entre cuerpo y cuerpo.

6.3. Resultados de las simulaciones

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en los cuatro escenarios.

6.3.1. Simulaciones en espacio libre

Las antenas se han simulado en espacio libre con el fin de analizar los valores del campo eléctrico y magnético mediante las sondas colocadas en las posiciones anteriormente mencionadas (ver subapartado 6.2.1).

800 MHz

A la hora de simular las antenas y obtener los valores del campo eléctrico y magnético para cada sonda, se ha cogido el máximo valor en cada caso. En la banda de 800 MHz, los valores máximos obtenidos del campo E y H han sido los siguientes:

Posición de la sonda con respecto al centro de la antena (0,0,0) (mm)	Campo E (dB(V/m))	Campo H (dB(A/m))
(0,0,10)	25.63	-10.15
(0,100,10)	42.4	-19.24
(-100,0,10)	29.25	-2.75
(100,0,10)	29.25	-2.75
(-100,100,10)	28.24	-23.28
(100,100,10)	28.24	-23.28
(0,200,10)	26.03	-25.49
(-100,200,10)	25.14	-26.38
(100,200,10)	25.14	-26.38

Tabla 18: Valores máximos del campo eléctrico y magnético en espacio libre (800 MHz)

Posteriormente, se han cogido los valores obtenidos en ciertas posiciones para comprobar que se cumple que, en campo lejano, el cociente de las amplitudes E/H es constante a través del espacio.

Posición de la sonda con respecto al centro de la antena (0,0,0) (mm)	(0,0,10)	(0,100,10)	(0,107,10)	(0,200,10)
E (dB(V/m))	25.63	42.35	31.51	26.03
H(dB(A/m))	-10.15	-19.21	-20.01	-25.49
Impedancia (Ω)	61.52	1196.74	376.7	376.7

Tabla 19: Resultados obtenido con las sondas colocadas a diferentes distancias de la antena (800 MHz)

Para calcular el valor de la impedancia se debe hacer la división del campo E entre el campo H con los valores en lineal y comprobar que se obtiene como resultado 377Ω . Por ejemplo, en el caso de la última columna teniendo en cuenta que los campos E y H están en dB. Primero habría que pasarlos a lineal de esta manera:

- Campo E = $10^{26.03/20} = 20.02$ V/m
- Campo H = $10^{-25.44/20} = 5.31 \cdot 10^{-2}$ A/m

Y después se haría la división entre los dos campos:

- Impedancia = $E/H = \frac{20.02}{5.31 \cdot 10^{-2}} = 376.7 \Omega$

Como se puede comprobar se cumple, ya que se obtiene la relación $E/H = 377 \Omega$ que es la impedancia característica del espacio libre.

En el caso de la antena de 800 MHz, a partir de la posición (0,107,10) se considera campo lejano, es decir, a una distancia de 107.47 mm.

La distancia teórica a la que se tiene campo lejano, como se ha mencionado anteriormente, se calcula mediante 3λ o $(2 \cdot D^2) / \lambda$. Teóricamente, utilizando la segunda fórmula esta distancia es de 174.86 mm, mayor que en el caso práctico, siendo D la dimensión total máxima de la antena.

60 GHz

En este caso también, a la hora de simular las antenas y obtener los valores del campo eléctrico y magnético para cada sonda, se ha cogido el máximo valor en cada caso. En la banda de 60 GHz, los valores máximos obtenidos del campo E y H han sido los siguientes:

Posición de la sonda con respecto al centro de la antena (0,0,0) (mm)	Campo E (dB(V/m))	Campo H (dB(A/m))
(0,0,0.4)	72.77	28.03
(0,20,0.4)	43.67	-7.49
(-20,0,0.4)	43.37	-7.93
(20,0,0.4)	43.37	-7.93
(-20,20, 0.4)	45.11	-5.81
(20,20,0.4)	45.11	-5.81
(0,40,0.4)	41.91	-9.61
(-20,40,0.4)	40.48	-11.04
(20,40,0.4)	40.48	-11.04

Tabla 20: Valores máximos del campo eléctrico y magnético en espacio libre (60GHz)

Después, se han cogido los valores obtenidos en ciertas posiciones para comprobar que se cumple que en campo lejano el cociente de las amplitudes E/H es constante a través del espacio.

Posición de la sonda con respecto al centro de la antena (0,0,0) (mm)	(0,0,0.4)	(0,20,0.4)	(0,40,0.4)	(20,40,0.4)
E (dB(V/m))	72.77	43.67	41.91	40.48
H(dB(A/m))	28.03	-7.49	-9.61	-11.04
Impedancia (Ω)	172.58	361.4	376.7	376.7

Tabla 21: Resultados obtenido con las sondas colocadas a diferentes distancias de la antena (60 GHz)

Para calcular el valor de la impedancia se debe hacer la división del campo E entre el campo H con los valores en lineal y comprobar que se obtiene como resultado 377 Ω . Por ejemplo, en el caso de la última columna teniendo en cuenta que los campos E y H están en dB. Primero habría que pasarlos a lineal de esta manera:

- Campo E = $10^{40.48/20} = 105.68$ V/m
- Campo H = $10^{-11.04/20} = 28.05 \cdot 10^{-2}$ A/m

Y después se haría la división entre los dos campos:

- Impedancia = $E/H = \frac{124.59}{28.05 \cdot 10^{-2}} = 376.7 \Omega$

En este caso también, se puede comprobar se cumple, ya que se obtiene la relación E/H = 377 ohmios que es la impedancia característica del espacio libre.

Para la antena de 60 GHz se considera campo lejano partir de la posición (0,29,0.4), es decir, a una distancia de 29 mm.

La distancia teórica a la que se tiene campo se calcula mediante 3λ o con $(2 \cdot D^2) / \lambda$. Teóricamente, utilizando la primera fórmula esta distancia es de 15 mm, un poco más pequeña que la calculada en el caso práctico.

Análisis de los resultados

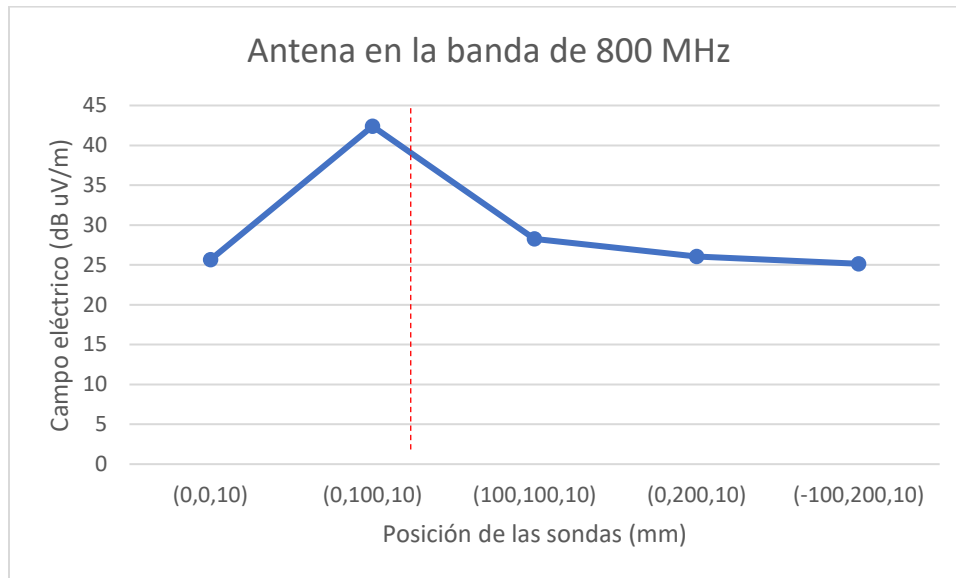


Gráfico 1: Campo eléctrico en espacio libre (800 MHz)

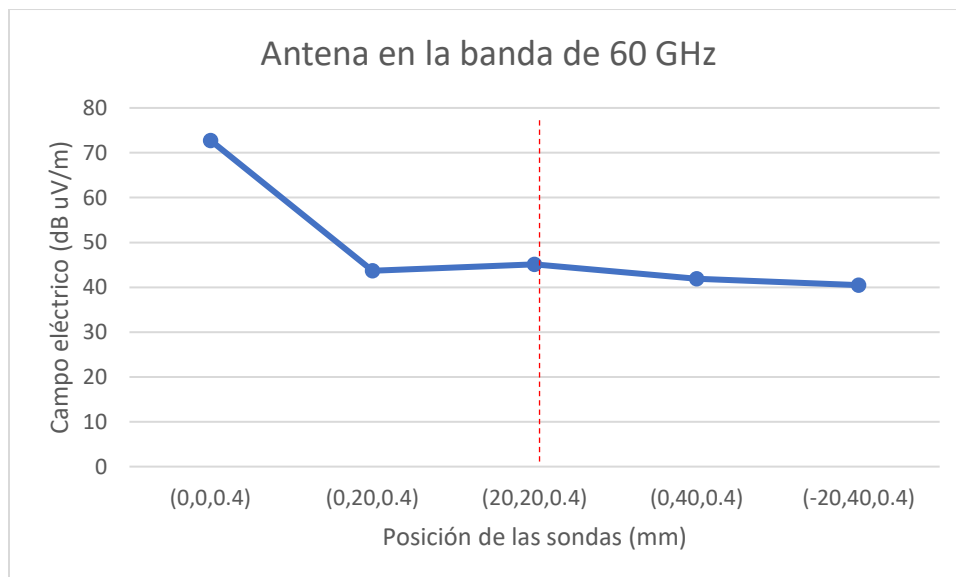


Gráfico 2: Campo eléctrico en espacio libre (60 GHz)

La línea discontinúa roja indica el límite entre campo cercano y campo lejano. Como se puede observar tanto en el caso de la antena de 800 MHz como en la de 60 GHz, en campo lejano mientras la sonda está más alejada de la antena, el campo eléctrico obtenido por la sonda es menor. En cambio, en campo cercano no está clara esta disminución del valor en todas las posiciones ya que, como se ha mencionado anteriormente en campo cercano, la estructura

del campo electromagnético no es homogénea y por ello los valores obtenidos en cada posición no tienen por qué seguir una tendencia clara.

6.3.2. Simulaciones con el cuerpo

6.3.2.1. Verificación del parámetro S11 al añadir el cuerpo

800 MHz

Mediante la comparación del valor obtenido para el parámetro S11 en la Ilustración 11, es decir, antes de añadir el cuerpo (valor mínimo en 0.8004 GHz) y después de añadirlo en la Ilustración 24 (valor mínimo de S11 en 0.8028 GHz), se puede ver que el cuerpo apenas ha afectado a la frecuencia en la que va a operar la antena porque el cambio es muy pequeño.

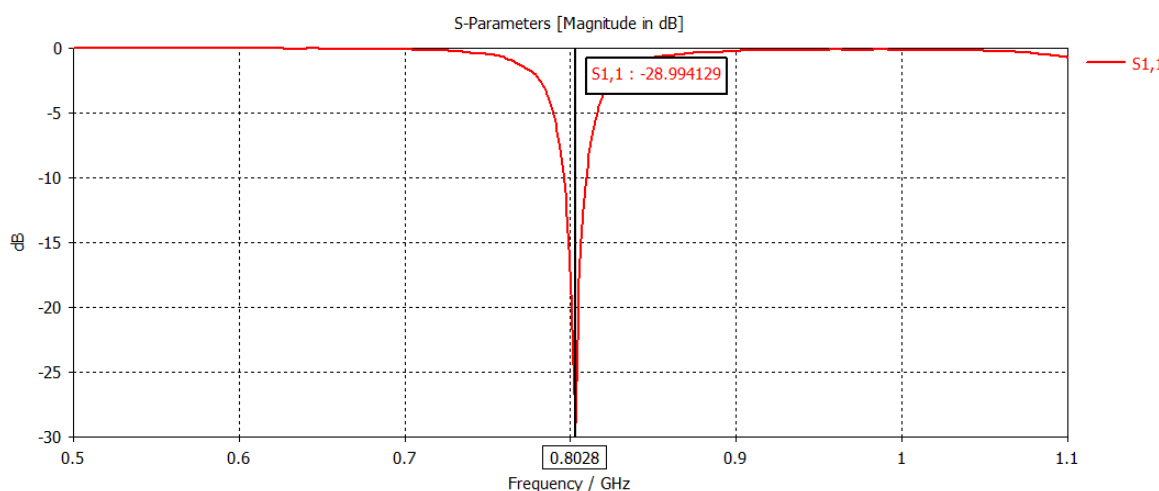


Ilustración 24: Parámetro S11 al añadir el cuerpo en 800MHz.

60 GHz

Al igual que para la antena diseñada para trabajar a 800 MHz, en este caso también se ha vuelto a medir el parámetro S11 después de añadir el cuerpo a la antena para comprobar si la frecuencia de trabajo ha cambiado.

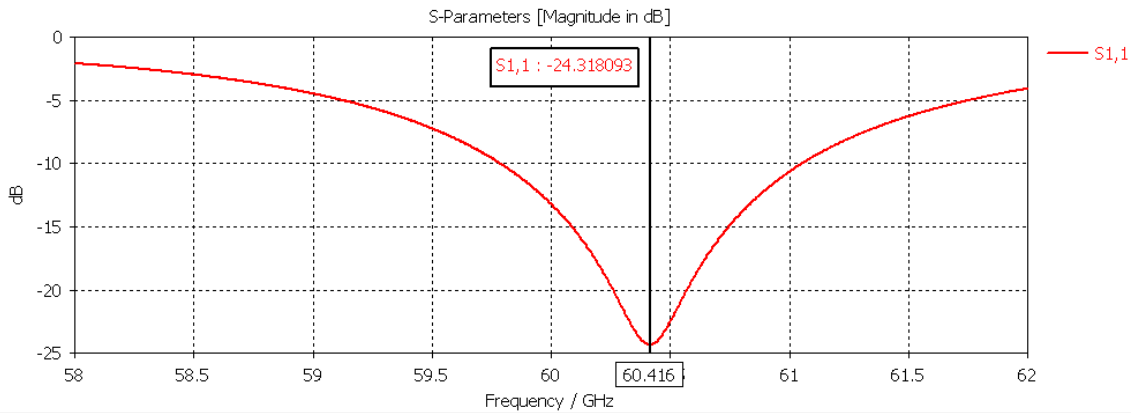


Ilustración 25: Parámetro S11 al añadir el cuerpo en 60 GHz

En este caso al comparar el valor obtenido para el parámetro S11 en la Ilustración 14, es decir, antes de añadir el cuerpo (60.008 GHz) y después de añadirlo en la Ilustración 25 (60.416 GHz), se puede apreciar que el mínimo del parámetro S11 ha sufrido un ligero cambio al añadir el cuerpo y se ha trasladado casi medio GHz. Aun así, la antena seguirá funcionando también a la frecuencia de 60.008 GHz, ya que tal y como se muestra en la Ilustración 25 la amplitud del parámetro S11 sigue estando por debajo de los - 10 dB a esa frecuencia.

6.3.2.2. Tasa SAR

La tasa SAR en el cuerpo ha sido calculada para una potencia emitida de 500 mW, y promediada sobre 10 g de tejido, tal y como recoge la normativa [ICNIRP o BOE].

800 MHz

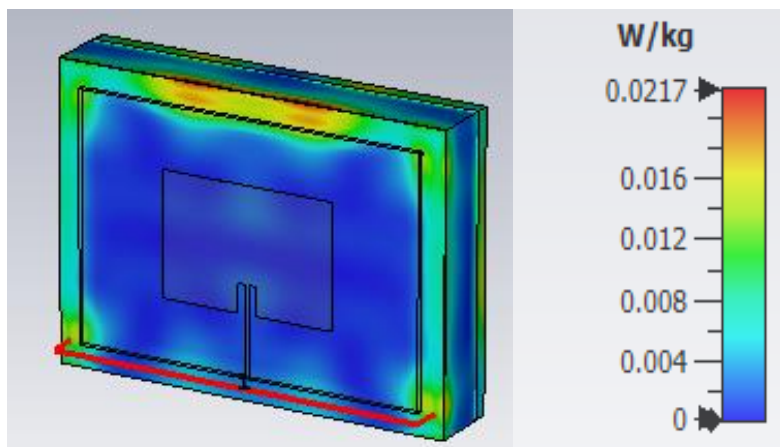


Ilustración 26: Tasa SAR promediada en 10 g en el cuerpo diseñado para 800 MHz

La tasa SAR promediada en 10 g obtenida ha sido de $2.19 \cdot 10^{-2}$ W/kg y la potencia absorbida total por el cuerpo $1.62 \cdot 10^{-2}$ W.

60 GHz

En este caso vez de calcularla en 60 GHz, se va a calcular en 60.416 GHz, ya que es la frecuencia óptima de operación de la antena si se coloca sobre el cuerpo.

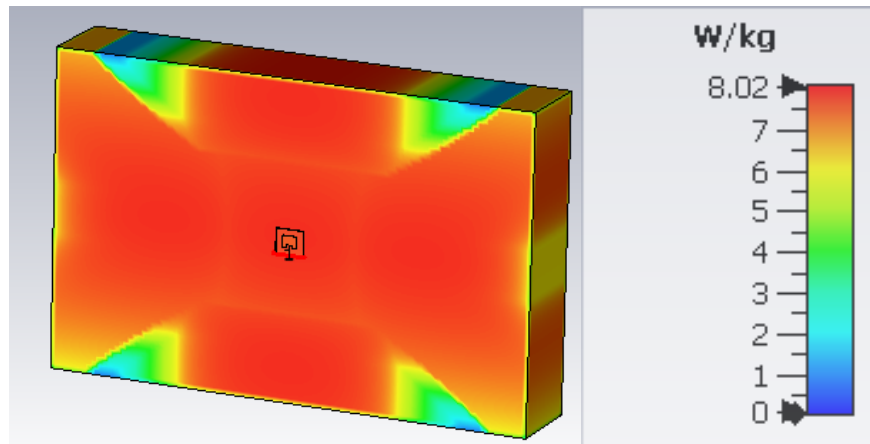


Ilustración 27: Tasa SAR promediada en 10 g diseñado para 60 GHz

En la banda de 60 GHz la tasa SAR promediada en 10 g obtenida ha sido mucho más grande que en la de 800 MHz exactamente de 8.03 W/kg y la potencia absorbida por el cuerpo $8.09 \cdot 10^{-2}$ W.

Se ha comparado el valor de tasa SAR calculado con los niveles de exposición establecidos por el ICNIRP para verificar que el nivel de exposición del cuerpo estaba por debajo de los límites de exposición establecidos.

El valor de la tasa SAR calculado con el programa CST son valores de SAR localizados. Por ello, para realizar la comparación con los calores establecidos por el ICNIRP, se han transformado estos valores de SAR a todo el cuerpo. Para eso se ha dividido la potencia absorbida obtenida entre lo que pesaría el cuerpo y esto se ha realizado para dos modelos de cuerpo diferentes uno de 50 kg y otro de 70 kg. La potencia absorbida obtenida será la misma para el cuerpo entero para la antena de 60 GHz, puesto que, la longitud de onda es muy pequeña y podemos asumir que únicamente va a absorberse potencia en los tejidos simulados.

$$\text{Potencia absorbida}/50 \text{ kg} = 8.09 \cdot 10^{-2} \text{ W}/50 \text{ kg} = 1.61 \cdot 10^{-3} \text{ W/kg}$$

$$\text{Potencia absorbida}/70 \text{ kg} = 8.09 \cdot 10^{-2} \text{ W}/70 \text{ kg} = 1.16 \cdot 10^{-3} \text{ W/kg}$$

Como conclusión, comparando los valores obtenidos con los de la Tabla 1, Restricciones básicas para exposiciones a campos electromagnéticos, se verifica que mediante el uso de antena diseñada para 60 GHz no se supera el límite establecido, 0.08 W/Kg, por el ICNIRP.

6.3.2.3. *Medición del campo eléctrico colocando las sondas a diferentes alturas*

En las Tablas 23 y 25 se puede observar que al colocar las sondas a diferentes alturas no se obtiene la misma tendencia en todos los casos porque hay casos en que al aumentar la distancia entre la antena y la sonda el valor del campo eléctrico aumenta y en otros casos disminuye.

Por otra parte, también se puede ver que, por ejemplo, en la Tabla 22, en las posiciones $(-100,0,z)$ y $(100,0,z)$ se obtienen los mismos resultados. Esto verifica la simetría del diagrama de radiación de la antena en el eje x .

800 MHz

En la siguiente ilustración se puede ver el diagrama de radiación de la antena de 800 MHz cuando la antena está colocada en el cuerpo. Este diagrama resulta de ayuda para entender qué ocurre con el campo E en campo lejano.

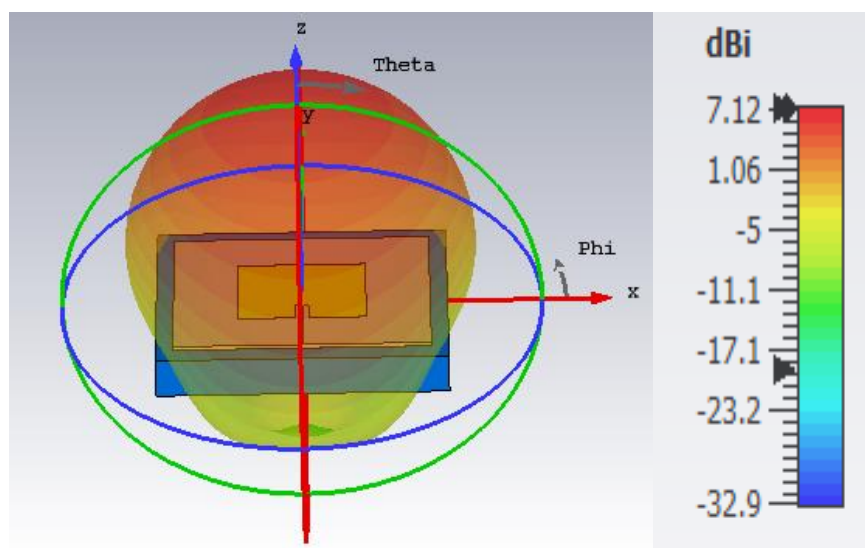


Ilustración 28: Diagrama de radiación de la antena de 800 MHz con la antena pegada al cuerpo

A continuación, en las Tablas 22 y 23 se muestran los valores obtenidos del campo eléctrico colocando las sondas a diferentes alturas en espacio libre y en contacto directo con el cuerpo.

Campo E(dB V/m)					
z (mm)	10 mm	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm
Posición sonda (mm)					
(0,0,z)	25.63	49.72	41.67	38.83	36.18
(0,100,z)	42.4	38.54	35.78	35.13	33.95
(-100,0,z)	29.25	34.19	34.97	33.7	33.06
(100,0,z)	29.25	34.19	34.97	33.7	33.06
(-100,100,z)	28.24	30.62	32.43	32.99	32.75
(100,100,z)	28.24	30.62	32.43	32.99	32.75
(0,200,z)	26.03	27.62	28.98	29.64	29.75
(-100,200,z)	25.14	26.41	27.59	28.29	28.54
(100,200,z)	25.14	26.41	27.59	28.29	28.54

Tabla 22: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas de la antena en espacio libre (800MHz)

Campo E(dB V/m)					
z (mm)	10 mm	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm
Posición Sonda (mm)					
(0,0,z)	24.81	49.2	42.16	38.32	35.66
(0,100,z)	42.68	39.12	35.78	35	33.73
(-100,0,z)	28.65	33.99	34.79	33.65	32.82
(100,0,z)	28.65	33.99	34.79	33.65	32.87
(-100,100,z)	35.45	33.55	33.02	31.8	31.49
(100,100,z)	35.45	33.55	33.02	31.8	31.49
(0,200,z)	26.44	27.9	29.14	29.7	29.73
(-100,200,z)	24.22	25.77	27.23	28.08	28.38
(100,200,z)	24.22	25.77	27.23	28.08	28.38

Tabla 23: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas cuando la antena está en contacto directo con el cuerpo (800MHz)

60 GHz

En la Ilustración 29 se puede ver el diagrama de radiación de la antena de 60 GHz cuando la antena está colocada en el cuerpo. Este diagrama resulta de ayuda para entender qué ocurre con el campo E en campo lejano.

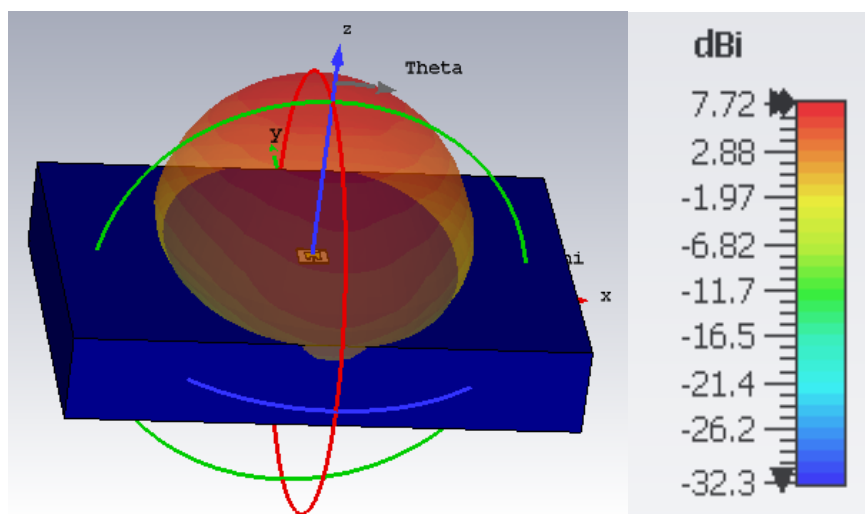


Ilustración 29: Diagrama de radiación de la antena de 60 GHz con la antena pegada al cuerpo

En las Tablas 24, 25 y 26 se muestran los valores obtenidos del campo eléctrico para 60 GHz colocando las sondas a diferentes alturas en espacio libre, cuando la antena está en contacto directo con el cuerpo y cuando ésta se encuentra a 5 mm del cuerpo, puesto que esta distancia, coincide con la longitud de onda.

Campo E (dB V/m)					
z (mm) \ Posición sonda (mm)	0.4 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
(0,0,z)	72.77	60.65	54.24	51.44	49.08
(0,20,z)	45.11	48.91	53.17	50.97	48.85
(-20,0,z)	43.37	45.6	46.36	46.85	46.24
(20,0,z)	43.67	45.6	46.36	46.85	46.24
(-20,20,z)	43.37	44.5	46.8	46.94	46.25
(20,20,z)	45.11	44.5	46.8	46.94	46.25
(0,40,z)	41.91	43.03	44.52	45.02	44.8
(-20,40,z)	40.48	41.47	42.75	43.36	43.39
(20,40,z)	40.48	41.47	42.75	43.36	43.39

Tabla 24: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas de la antena en espacio libre (60 GHz)

Campo E (dB V/m)					
z (mm)	0.4 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
Posición Sonda (mm)					
(0,0,z)	72.42	59.21	53.54	50.15	47.72
(0,20,z)	37.61	50.08	50.6	48.51	47.5
(-20,0,z)	27.75	45.22	47.06	46.78	45.76
(20,0,z)	27.65	45.22	47.1	46.78	45.76
(-20,20,z)	27.66	44.11	46.12	46.13	45.21
(20,20,z)	27.66	44.11	46.12	46.13	45.21
(0,40,z)	40.57	42.57	43.98	44.16	44.54
(-20,40,z)	37.97	39.99	42.2	42.68	43.13
(20,40,z)	37.98	37.89	42.2	42.68	43.12

Tabla 25: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas cuando la antena está en contacto directo con el cuerpo (60 GHz)

Campo E (dB V/m) Cuerpo a 5 mm					
z (mm)	0.4 mm	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm
Posición Sonda (mm)					
(0,0,z)	72.57	60.38	53.16	50.07	47.8
(0,20,z)	43.86	48.39	48.36	47.69	46.79
(-20,0,z)	42.73	46.38	47.74	46.92	45.7
(20,0,z)	42.73	46.38	47.72	46.92	45.7
(-20,20,z)	44.78	44.58	46.47	45.02	44.51
(20,20,z)	44.78	44.58	46.47	45.02	44.51
(0,40,z)	40.26	41.82	43.62	42.45	42.1
(-20,40,z)	44.13	40.79	41.6	42.62	41.41
(20,40,z)	40.13	40.79	41.6	42.62	41.41

Tabla 26: Valor del campo eléctrico en varias posiciones y a diferentes alturas con el cuerpo a 5 mm de la antena (60 GHz)

Análisis de los resultados

- Comparación de los resultados de campo eléctrico obtenidos con los niveles de referencia de exposición

Para realizar la comparación entre los resultados de campo E mostrados en las anteriores tablas con los de referencia se debe transformar esos valores en densidad de potencia, S, mediante la fórmula $S=E^2/(120\pi)$. Para ello, se deben pasar los valores de campos E de las tablas anteriores a lineal y realizar la división. Solo se cogerán los valores obtenidos en campo lejano ya que son los más fiables.

Posición Sonda (mm)	S simulaciones (W/m ²)	S Referencia (W/m ²)
(-100,100,z)	9.3	0.058/f _M ^{0.86} = 1.85·10 ⁻⁴
(100,100,z)	9.3	
(0,200,z)	1.16	
(-100,200,z)	0.7	
(100,200,z)	0.7	

Tabla 27: Comparativa entre los valores de referencia y los calculados de la densidad de potencia, S (800 MHz)

Posición Sonda (mm)	S simulaciones (W/m ²)	S Referencia (W/m ²)
(0,40,10)	30.24	55/f _G ^{0.177}
(-20,40,10)	16.62	=
(20,40,10)	16.66	26.64

Tabla 28: Comparativa entre los valores de referencia y los calculados de la densidad de potencia, S (60 GHz)

Como se muestra en la Tabla 27 en la banda de 800 MHz los valores calculados para el parámetro S es bastante mayor que el valor de referencia. En cambio, los valores calculados para la banda de 60 GHz se parecen más a el de referencia.

- Valor del campo eléctrico obtenido por las sondas en varias posiciones a diferentes alturas

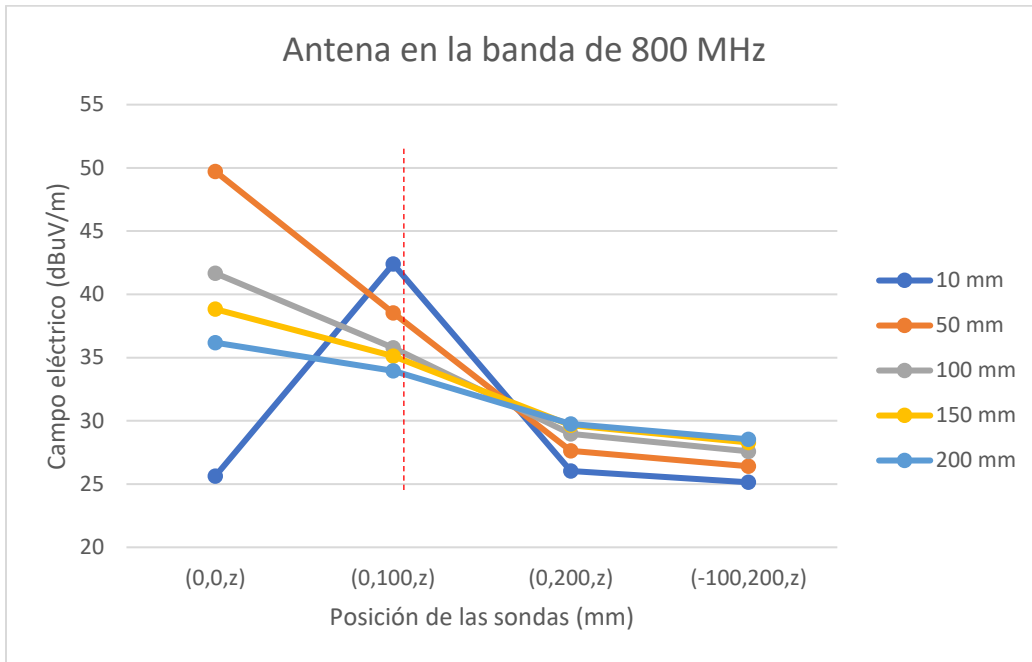


Gráfico 3: Campo eléctrico a diferentes alturas (800 MHz)

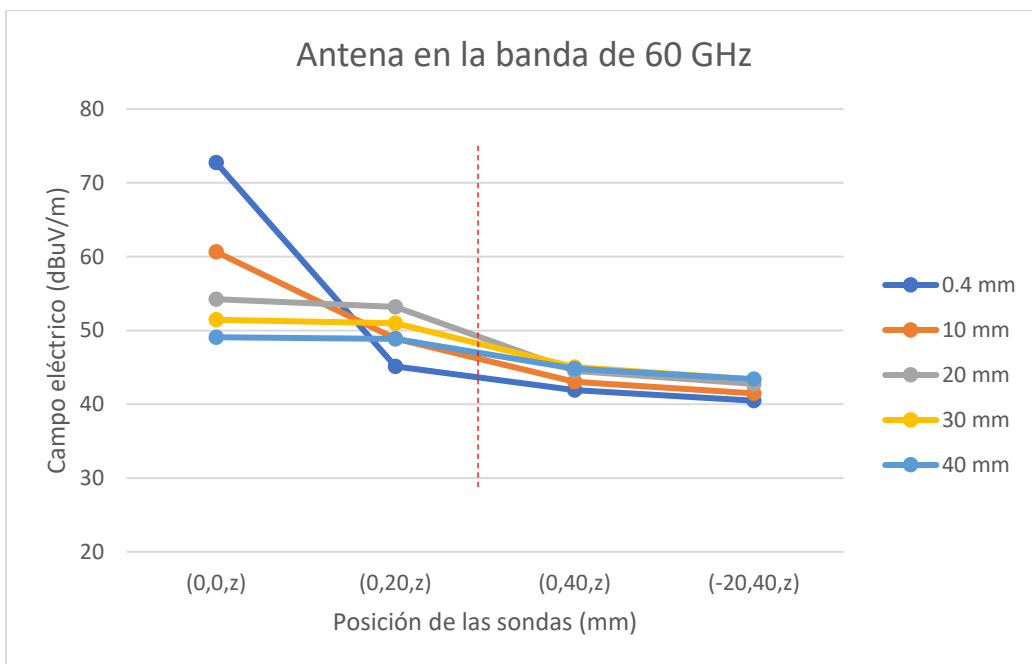


Gráfico 4: Campo eléctrico a diferentes alturas (60 GHz)

La línea discontinua roja indica el límite entre campo lejano y campo cercano. En este caso, al contrario que en el caso anterior, al analizar el valor del campo eléctrico en campo lejano se puede observar cómo al aumentar la altura a la que se colocan las sondas sobre la antena el valor del campo eléctrico aumenta. Esto ocurre porque la antena está irradiando en esta dirección, es decir, en el eje z.

6.3.2.4. Simulaciones de la antena a diferentes distancias del cuerpo

En las Tablas 29 y 31 se exponen los valores obtenidos para la tasa de SAR y la potencia absorbida por el cuerpo. Sobre todo, al analizar los datos obtenidos en la antena de 60 GHz (Tabla 31) se verifica que cuanto más grande sea el valor de la distancia entre el cuerpo y la antena, menor es el valor de la tasa SAR y de la potencia absorbida por el cuerpo.

En cuanto a los valores obtenidos para el campo eléctrico al colocar el cuerpo a distintas distancias (Tablas 30 y 32), no se ve tan claro cuál es la tendencia, pero se puede decir que en la mayoría de los casos el valor del campo eléctrico aumenta cuando la distancia entre el cuerpo y la antena es mayor.

800 MHz

Distancia de la antena al cuerpo (mm)	Potencia absorbida (W)	Tasa SAR total (W/kg)	Punto máximo SAR (W/kg)	Máximo SAR (10g) (W/kg)
0	$1.62 \cdot 10^{-2}$	$3.28 \cdot 10^{-3}$	$0.16 \cdot 10^{-2}$	$2.19 \cdot 10^{-2}$
10	$1.78 \cdot 10^{-2}$	$3.65 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-2}$	$1.58 \cdot 10^{-2}$
20	$1.57 \cdot 10^{-2}$	$3.17 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-2}$
30	$1.28 \cdot 10^{-2}$	$2.58 \cdot 10^{-3}$	$2.92 \cdot 10^{-2}$	$8.65 \cdot 10^{-3}$
40	$1.03 \cdot 10^{-2}$	$2.08 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$7.56 \cdot 10^{-3}$

Tabla 29: Potencia absorbida y tasa SAR variando la distancia entre la antena y el cuerpo (800 MHz)

Campo E (dB V/m)					
d(mm) Posición (mm)	0mm	2mm	5mm	7 mm	10mm
(0,0,10)	24.83	24.96	24.98	25.04	25.05
(0,100,10)	42.67	43.03	43.12	42.94	42.83
(-100,0,10)	28.66	28.79	28.9	28.8	28.77
(100,0,10)	28.66	28.79	28.9	28.8	28.77
(-100,100,10)	35.42	35.81	36.27	36.35	36.64
(100,100,10)	35.42	35.81	36.27	36.35	36.64
(0,200,10)	26.38	27.77	27.72	27.45	27.39
(-100,200,10)	24.16	25.63	25.63	25.46	25.46
(100,200,10)	24.16	25.63	25.63	25.46	25.46

Tabla 30: Campo eléctrico medido con sondas variando la distancia entre la antena y el cuerpo (800 MHz)

60 GHz

Distancia de la antena al cuerpo (mm)	Potencia absorbida (W)	Tasa SAR total (W/kg)	Punto máximo SAR (W/kg)	Máximo SAR (10g) (W/kg)
0	$8.09 \cdot 10^{-2}$	3.65	72045.7	8.03
2	$2.92 \cdot 10^{-2}$	1.35	605.82	2.8
5	$1.63 \cdot 10^{-2}$	0.83	131.89	1.68
7	$1.43 \cdot 10^{-2}$	0.64	72.16	1.27
10	$1.01 \cdot 10^{-2}$	0.46	36.22	0.87

Tabla 31: Potencia absorbida y tasa SAR variando la distancia entre la antena y el cuerpo (60 GHz)

Campo E (dB V/m)					
d(mm) Posición (mm)	0mm	2mm	5mm	7mm	10mm
(0,0,0.4)	72.42	72.56	72.56	72.57	72.57
(0,20,0.4)	37.61	42.16	42.07	45.38	44.35
(-20,0,0.4)	27.75	41.52	44.15	42.42	43.45
(20,0,0.4)	27.65	41.52	44.15	42.42	43.45
(-20,20,0.4)	27.66	41.87	46.84	44	45.85
(20,20,0.4)	27.66	41.87	46.84	44	45.85
(0,40,0.4)	40.57	39.55	41.25	41.47	41.25

(-20,40,0.4)	37.97	39.05	41.06	40.11	40.29
(20,40,0.4)	37.98	39.05	41.06	40.11	40.29

Tabla 32: Campo eléctrico medido con sondas variando la distancia entre la antena y el cuerpo (60 GHz)

Análisis de los resultados

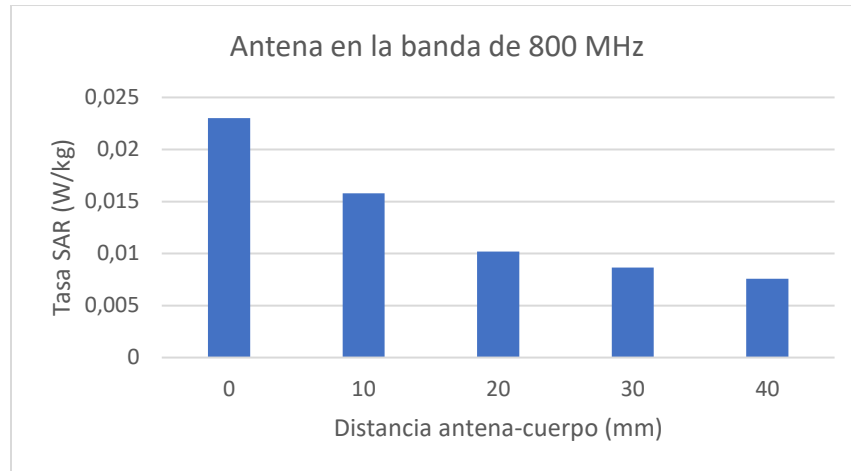


Gráfico 5: Tasa SAR promediada en 10 g en función de la distancia antena-cuerpo (800 MHz)

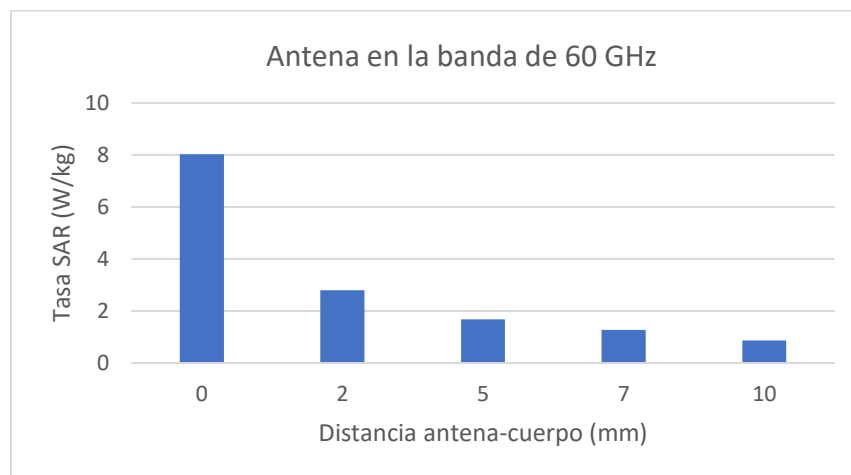


Gráfico 6: Tasa SAR promediada en 10 g en función de la distancia antena-cuerpo (60 GHz)

La tasa SAR en el cuerpo ha sido calculada para una potencia de entrada de 500 mW y para 10 g de tejido. Como se puede analizar en las gráficas, mientras la distancia entre la antena y el cuerpo aumenta la tasa SAR, es decir, la energía de la radiación electromagnética que absorben el cuerpo humano y sus tejidos, disminuye. Por otra parte, también se puede observar que la tasa SAR promediada en 10 g es mucho mayor usando la antena que opera en 60 GHz que la que trabaja en 800 MHz.

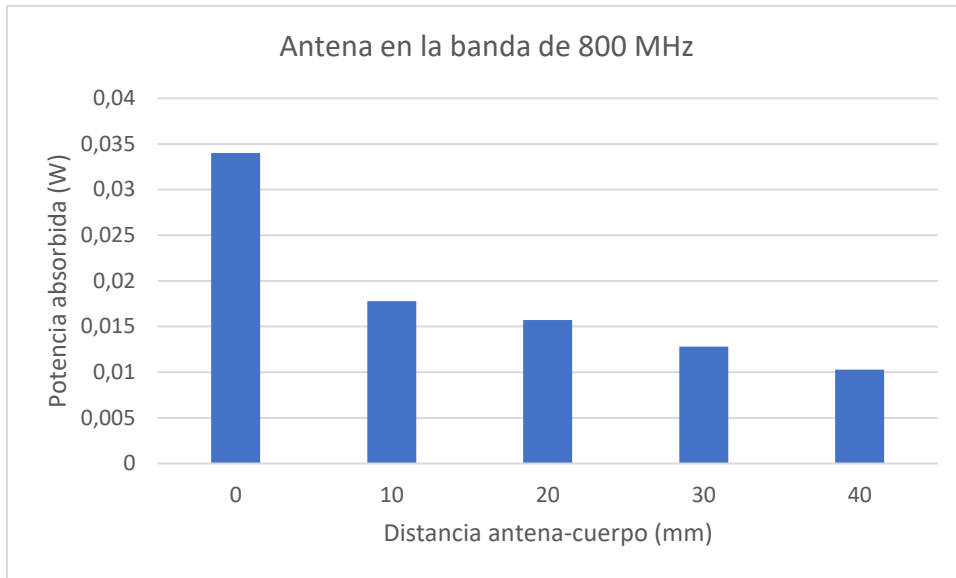


Gráfico 7: Potencia absorbida en función de la distancia antena-cuerpo (800 MHz)

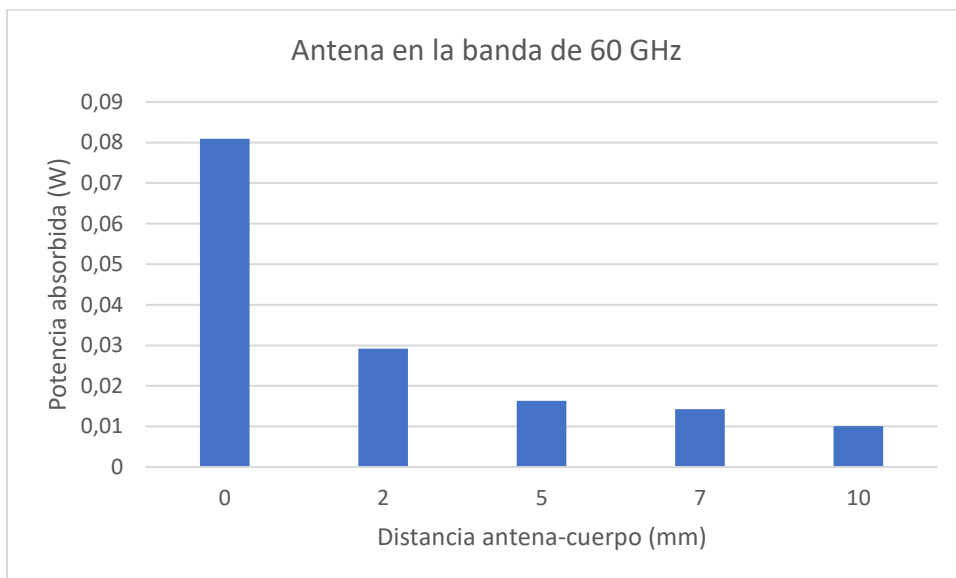


Gráfico 8: Potencia absorbida en función de la distancia antena-cuerpo (60 GHz)

Como se puede comprobar en las gráficas, la potencia absorbida por el cuerpo disminuye al separar la antena del cuerpo y como en el caso de la tasa SAR al utilizar la antena de 60 GHz la potencia absorbida es mayor que al usar la que trabaja en la banda de 800 MHz.

6.3.3. Simulaciones con textiles

800 MHz

La tasa SAR promediada en 10 g sin poner un tejido entre medias a 800 MHz, como se ha indicado anteriormente ha sido de $2.19 \cdot 10^{-2}$ W/kg y la potencia absorbida $1.62 \cdot 10^{-2}$ W. Estos valores se utilizarán para realizar comparaciones con los valores obtenidos al poner diferentes tejidos y variar los grosores de estos últimos.

Textil	Grosor (μm)	Potencia absorbida (W)	SAR (W/kg)
Algodón	45	$1.62 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
Poliéster	55	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.02 \cdot 10^{-2}$
Plástico	25	$1.61 \cdot 10^{-2}$	$2.02 \cdot 10^{-2}$
Nylon	10	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.02 \cdot 10^{-2}$

Tabla 33: Potencia absorbida por el cuerpo y tasa SAR promediada en 10 g para diferentes materiales (800 MHz)

Potencia absorbida (W)				
Material \ Grosor	Algodón	Poliéster	Plástico	Nylon
500 μm	$1.62 \cdot 10^{-2}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$
50 mm	$1.13 \cdot 10^{-2}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
100 mm	$7.04 \cdot 10^{-2}$	$7.49 \cdot 10^{-3}$	$7.15 \cdot 10^{-3}$	$7.87 \cdot 10^{-3}$
150 mm	$6.59 \cdot 10^{-3}$	$7.41 \cdot 10^{-3}$	$6.52 \cdot 10^{-3}$	$8.33 \cdot 10^{-3}$
200 mm	$5 \cdot 10^{-3}$	$6.33 \cdot 10^{-3}$	$6.67 \cdot 10^{-3}$	$6.16 \cdot 10^{-3}$

Tabla 34: Potencia absorbida por el cuerpo para diferentes materiales y grosores (800 MHz)

SAR (W/kg)				
Material \ Grosor	Algodón	Poliéster	Plástico	Nylon
500 μm	$1.9 \cdot 10^{-2}$	$2.02 \cdot 10^{-2}$	$1.99 \cdot 10^{-2}$	$1.98 \cdot 10^{-2}$
50 mm	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$1.21 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
100 mm	$1.11 \cdot 10^{-2}$	$6.92 \cdot 10^{-3}$	$6.21 \cdot 10^{-3}$	$7.33 \cdot 10^{-3}$
150 mm	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$6.49 \cdot 10^{-3}$	$5.63 \cdot 10^{-3}$	$6.87 \cdot 10^{-3}$
200 mm	$5.48 \cdot 10^{-3}$	$4.21 \cdot 10^{-3}$	$4.88 \cdot 10^{-3}$	$3.72 \cdot 10^{-3}$

Tabla 35: Tasa SAR promediada en 10 g para diferentes materiales y grosores (800 MHz)

60 GHz

En este caso, la tasa SAR promediada en 10 g sin poner un tejido entre medias a 60 GHz ha sido de 8.03 W/kg y la potencia absorbida $8.09 \cdot 10^{-2}$ W. Estos valores se utilizarán para realizar comparaciones con los valores obtenidos al poner el algodón entre la antena y el cuerpo y variar los grosores.

Potencia absorbida (W)	
Grosor \ Material	Algodón
500 μm	$8.07 \cdot 10^{-2}$
1 mm	$7.6 \cdot 10^{-2}$
2 mm	$7.9 \cdot 10^{-2}$
5 mm	$6.98 \cdot 10^{-2}$
10 mm	$6.33 \cdot 10^{-2}$

Tabla 36: Potencia absorbida por el cuerpo para diferentes grosores utilizando un textil de algodón (60 GHz)

Grosor \ Material	Algodón
500 μm	7.99
1 mm	7.36
2 mm	7.6
5 mm	6.66
10 mm	4.84

Tabla 37: Tasa SAR promediada en 10 g para diferentes grosores utilizando un textil de algodón (60 GHz)

Análisis de los resultados

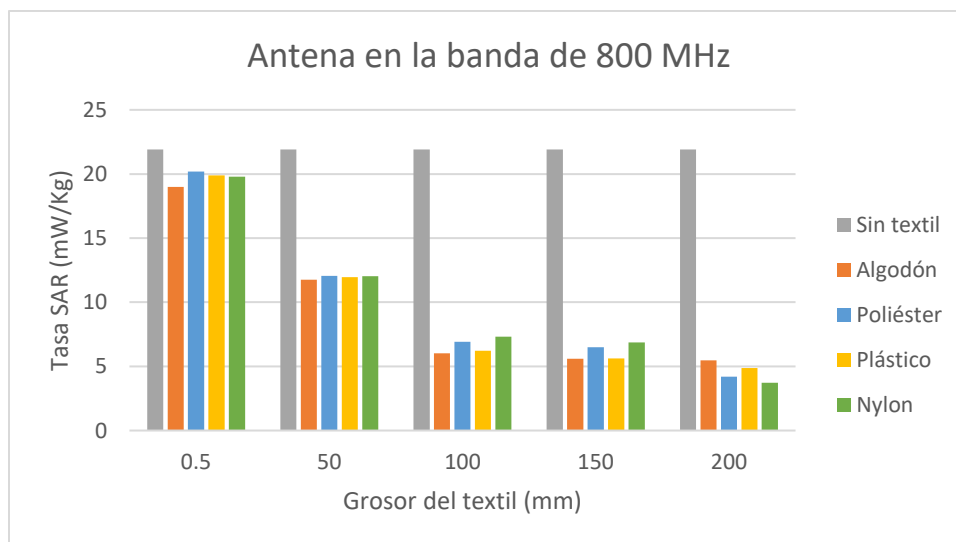


Gráfico 9: Tasa SAR promediada en 10 g en función del material y el grosor del textil (800 MHz)

En la banda de 800 MHz como se muestra en el Gráfico 9 al añadir el textil entre el cuerpo y la antena la tasa SAR promediada en 10 g disminuye. Además, al aumentar el grosor del textil la tasa SAR promediada en 10 g también disminuye claramente.

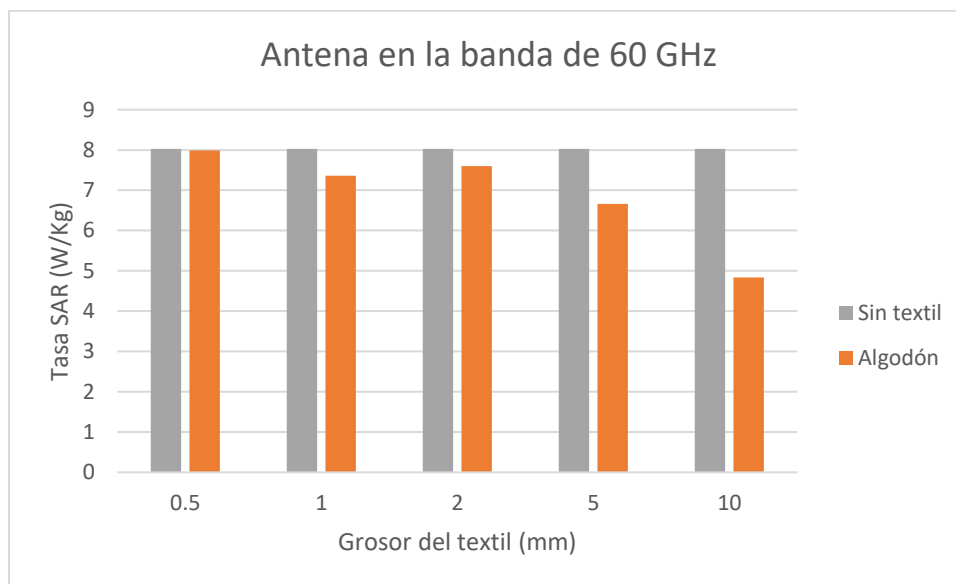


Gráfico 10: Tasa SAR promediada en 10 g cuerpo para el algodón en función del grosor del textil (60 GHz)

En la banda de 60 GHz también se puede ver como al añadir el textil entre el cuerpo y la antena la tasa SAR promediada en 10 g disminuya.

Por otra parte, con la antena de 60 GHz al igual que con la de 800 MHz, se puede decir, que generalmente la tasa SAR en el cuerpo disminuye al aumentar el grosor del textil que se implementa entre la piel y la antena.

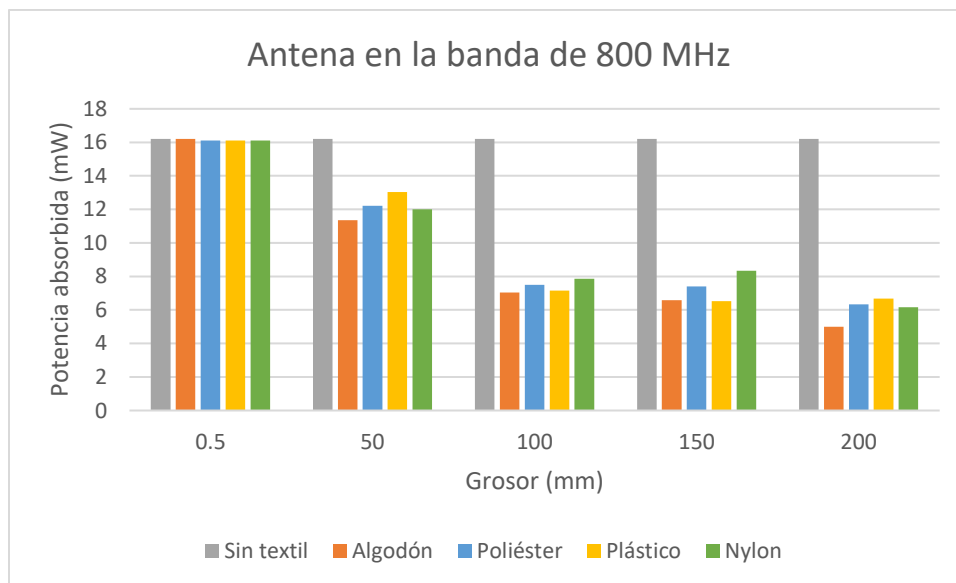


Gráfico 11: Potencia absorbida por el cuerpo en función del material y el grosor del textil (800 MHz)

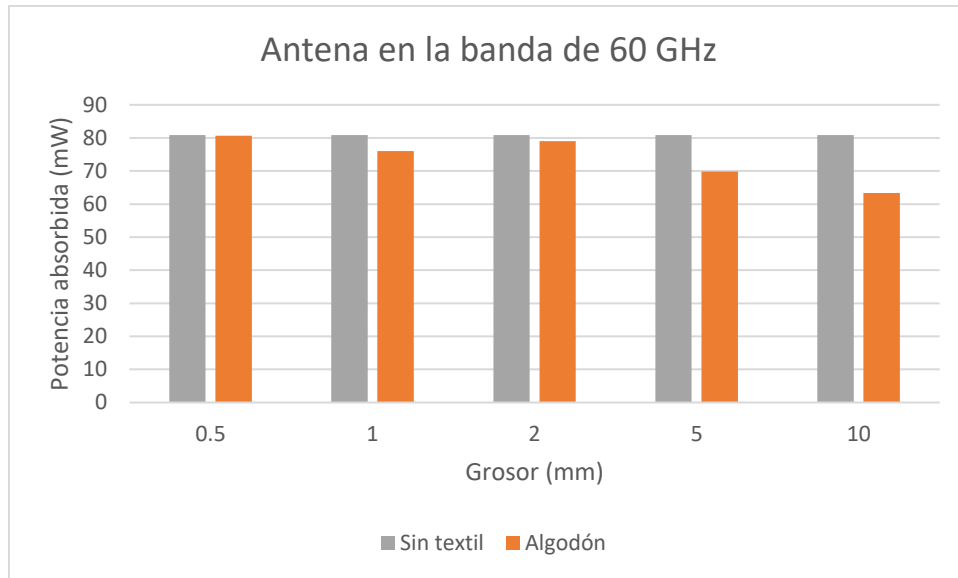


Gráfico 12: Potencia absorbida por el cuerpo para el algodón en función del grosor del textil (60 GHz)

Para el valor del parámetro de la potencia absorbida en el cuerpo ocurre la misma tendencia que en la tasa SAR. La potencia absorbida disminuye al aumentar el grosor del textil. En la banda de 800 MHz se puede apreciar que el algodón es el material que más consigue disminuir la potencia absorbida por el cuerpo.

6.3.4. Red formada por dos antenas

800 MHz

Nº antenas	Tipo de campo	SAR (W/kg)	Potencia absorbida (W)
Una antena	--	$2.19 \cdot 10^{-2}$	$1.62 \cdot 10^{-2}$
Dos antenas	Cercano	$1.89 \cdot 10^{-2}$	$1.72 \cdot 10^{-2}$
Dos antenas	Lejano	$1.88 \cdot 10^{-2}$	$1.81 \cdot 10^{-2}$

Tabla 38: Valores de la tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida según el nº de antenas y tipo de campo (800MHz)

- Campo cercano

Espacio libre

Campo E (dB V/m)				
Nº antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena nº 1)	2 antenas (antena nº 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,10)	25.63	25.16	9.21	26.44
(0,100,10)	42.4	43.1	29.36	44.72
(-100,0,10)	29.25	29.35	6.45	29.95
(100,0,10)	29.25	29.45	11.58	30.49
(-100,100,10)	28.24	37.38	26.42	39.54
(100,100,10)	28.24	36.09	30.95	39.91
(0,200,10)	25.14	23.9	23.48	29.71
(-100,200,10)	25.14	18.77	19.35	25.08
(100,200,10)	26.03	25.94	25.06	31.53

Tabla 39: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo cercano (800 MHz)

Con cuerpo

Campo E (dB V/m)				
Nº antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena nº 1)	2 antenas (antena nº 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,10)	24.81	24.98	3.09	25.65
(0,100,10)	42.68	42.62	19.20	43.19
(-100,0,10)	28.65	28.65	4.66	29.18
(100,0,10)	28.65	28.77	6.03	29.38
(-100,100,10)	35.45	35.49	14.51	36.23
(100,100,10)	35.45	35.81	22.29	37.47
(0,200,10)	26.44	22.62	21.99	28.33
(-100,200,10)	24.22	19.31	17.47	24.46
(100,200,10)	24.22	26.63	26.23	32.45

Tabla 40: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo cercano (800 MHz)

- Campo lejano

Espacio libre

Campo E (dB V/m)				
N° antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena n° 1)	2 antenas (antena n° 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,10)	25.63	25.47	3.78	26.16
(0,100,10)	42.4	42.4	21.98	43.19
(-100,0,10)	29.25	29.26	1.17	29.6
(100,0,10)	29.25	29.25	1.34	29.59
(-100,100,10)	28.24	36.79	19.83	37.94
(100,100,10)	28.24	37.31	23.41	38.91
(0,200,10)	25.14	21.53	21.82	27.7
(-100,200,10)	25.14	18.2	17.34	23.8
(100,200,10)	26.03	24.98	24.84	30.93

Tabla 41: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo lejano (800 MHz)

Con cuerpo

Campo E (dB V/m)				
N° antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena n° 1)	2 antenas (antena n° 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,10)	24.81	25.06	-0.86	25.49
(0,100,10)	42.68	42.7	16.13	43.1
(-100,0,10)	28.65	28.71	1.2	29.07
(100,0,10)	28.65	28.64	1.91	29.03
(-100,100,10)	35.45	35.5	12.15	36.07
(100,100,10)	35.45	35.49	18.85	36.68
(0,200,10)	26.44	17.87	16.43	23.2
(-100,200,10)	24.22	21.1	20.53	26.84
(100,200,10)	24.22	24.8	24.75	30.79

Tabla 42: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo lejano (800 MHz)

60 GHz

Nº antenas	Tipo de campo	SAR (W/kg)	Potencia absorbida (W)
Una antena	--	8.03	$8.09 \cdot 10^{-2}$
Dos antenas	Cercano	7.98	$8.09 \cdot 10^{-2}$
Dos antenas	Lejano	8.03	$8.1 \cdot 10^{-2}$

Tabla 43: Valores de la tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida según el nº de antenas y tipo de campo (60 GHz)

- Campo cercano

Espacio libre

Campo E (dB V/m)				
Nº antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena nº 1)	2 antenas (antena nº 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,0.4)	72.77	72.6	46.44	73.02
(0,20,0.4)	43.67	44.29	43.35	49.85
(-20,0,0.4)	43.37	44.49	39.58	48.4
(20,0,0.4)	43.37	41.09	45.8	49.78
(-20,20,0.4)	45.11	43.94	44	49.99
(20,20,0.4)	45.11	44.72	43.96	50.37
(0,40,0.4)	41.91	41.99	41.99	48.01
(-20,40,0.4)	40.48	40.18	40.41	46.32
(20,40,0.4)	40.48	40.41	40.18	46.32

Tabla 44: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo cercano (60 GHz)

Con cuerpo

Campo E (dB V/m)				
Nº antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena nº 1)	2 antenas (antena nº 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,0.4)	72.42	72.42	-1.77	72.42
(0,20,0.4)	37.61	37.61	5.84	37.83
(-20,0,0.4)	27.75	27.75	-11.8	27.84
(20,0,0.4)	27.65	27.72	14.81	29.49
(-20,20,0.4)	27.66	27.66	-6.47	27.83

(20,20,0.4)	27.66	27.7	18.09	30.18
(0,40,0.4)	40.57	35.72	35.72	41.74
(-20,40,0.4)	37.97	30.28	30.32	36.32
(20,40,0.4)	37.98	40.01	40.02	46.04

Tabla 45: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo cercano (60 GHz)

- Campo lejano

Espacio libre

Campo E (dB V/m)				
Nº antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena nº 1)	2 antenas (antena nº 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,0.4)	72.77	72.63	27.91	72.68
(0,20,0.4)	43.67	44.15	42.78	49.51
(-20,0,0.4)	43.37	43.17	33.52	45.64
(20,0,0.4)	43.37	43.51	45.32	50.48
(-20,20,0.4)	45.11	45.05	40.61	49.13
(20,20,0.4)	45.11	44.88	44.61	50.77
(0,40,0.4)	41.91	41.63	41.65	47.66
(-20,40,0.4)	40.48	39.35	39.32	45.36
(20,40,0.4)	40.48	41.38	41.31	47.37

Tabla 46: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red espacio libre en campo lejano (60 GHz)

Con cuerpo

Campo E (dB V/m)				
Nº antenas Posición (mm)	1 antena	2 antenas (antena nº 1)	2 antenas (antena nº 2)	Conjunto de las dos antenas
(0,0,0.4)	72.42	72.42	-10.25	72.42
(0,20,0.4)	37.61	37.64	-0.23	37.75
(-20,0,0.4)	27.75	27.76	-17.6	27.8
(20,0,0.4)	27.65	27.83	7.2	28.6

(-20,20,0.4)	27.66	27.68	-14.03	27.75
(20,20,0.4)	27.66	27.63	14.24	29.31
(0,40,0.4)	40.57	31.86	31.87	37.88
(-20,40,0.4)	37.97	26.87	26.83	32.87
(20,40,0.4)	37.98	37.33	37.34	43.35

Tabla 47: Valor del campo eléctrico para cada una de las antenas de la red cuando la antena está en contacto con el cuerpo en campo lejano (60 GHz)

Análisis de los resultados

Tasa SAR y potencia absorbida

En las siguientes gráficas los valores referenciados en el eje horizontal con la categoría de una antena hacen referencia a los valores obtenidos al hacer las mediciones cuando solamente había una antena en la red, es decir, en la situación inicial. Los referenciados con la categoría de campo cercano son los valores obtenidos cuando ya se ha creado la red de dos antenas y los cuerpos de cada antena están separados una distancia de 20 mm en el caso de antena de 800 MHz y 2 mm en el caso de la de 60 GHz. Por último, los valores referenciados con la categoría de campo lejano son los valores obtenidos cuando ya se ha creado la red de dos antenas y los cuerpos de cada antena están separados una distancia de 110 mm en el caso de antena de 800 MHz y 30 mm en el caso de la de 60 GHz.

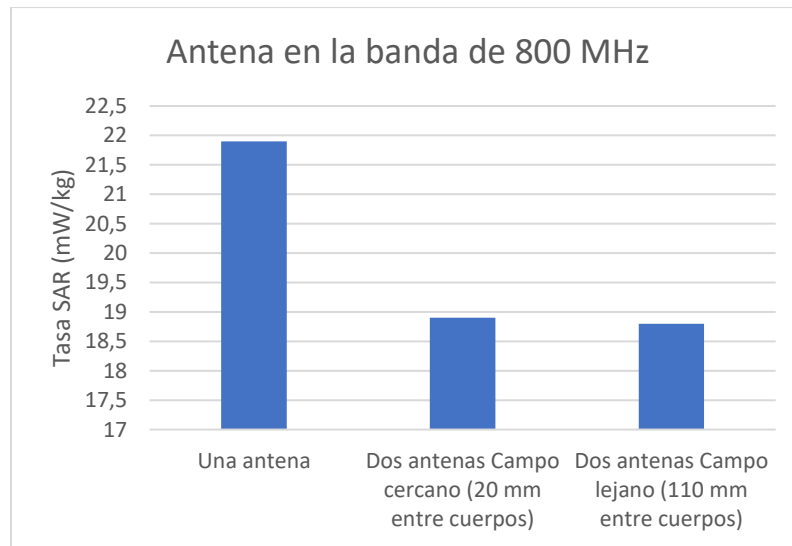


Gráfico 13: Comparativa tasa SAR promediada en 10 g según el nº de antenas y la distancia entre ellas (800 MHz)

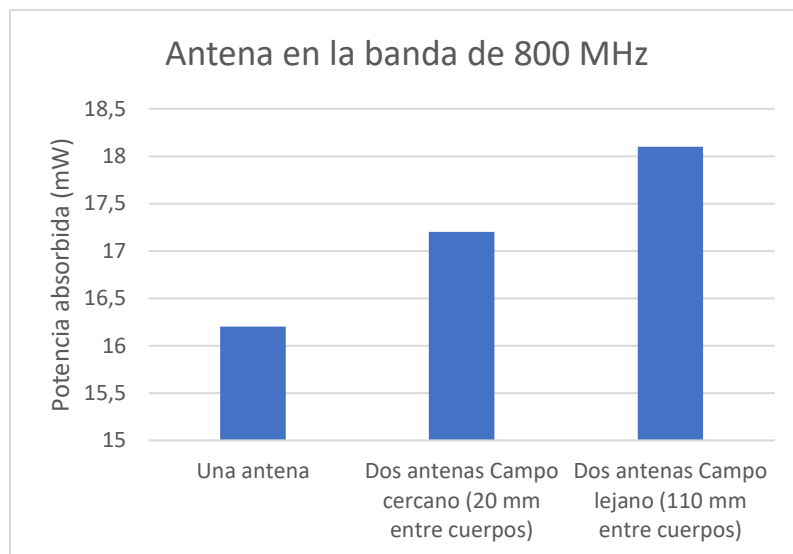


Gráfico 14: Comparativa potencia absorbida por el cuerpo según el nº de antenas y la distancia entre ellas (800 MHz)

En el caso de la antena de 800 MHz la tasa SAR disminuye lo mismo colocando las antenas a una distancia de campo lejano como a una de campo cercano. En cambio, la potencia absorbida aumenta al implementar la red de dos antenas en comparación con el valor de potencia obtenido para una.

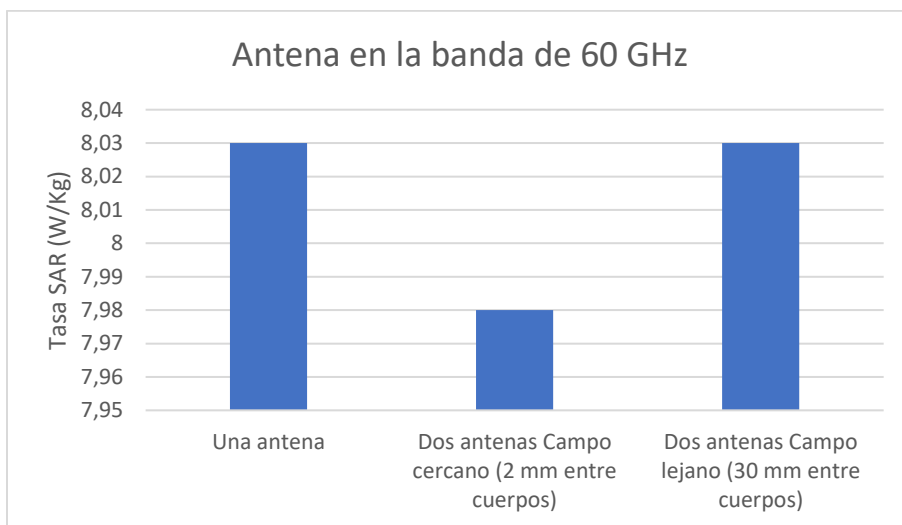


Gráfico 15: Comparativa tasa SAR promediada en 10 g según el nº de antenas y la distancia entre ellas (60 GHz)

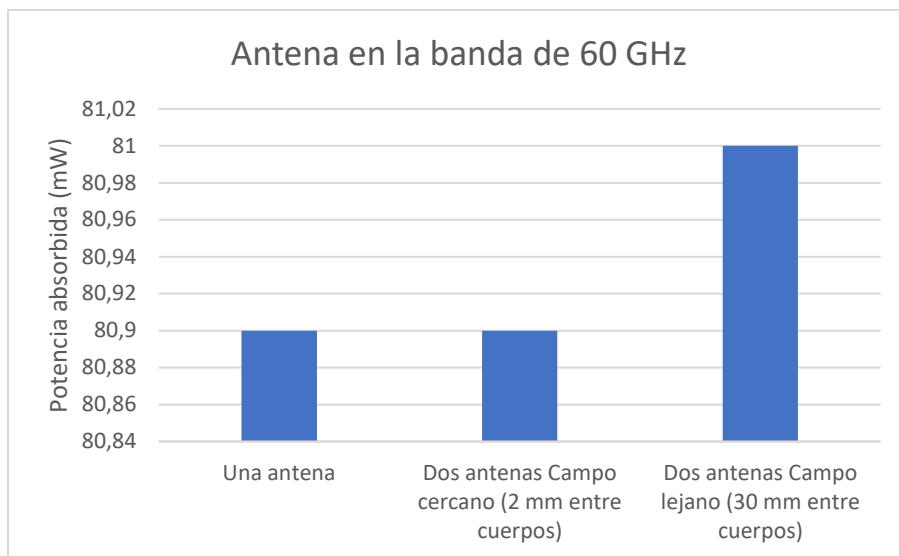


Gráfico 16: Comparativa potencia absorbida por el cuerpo según el nº de antenas y la distancia entre ellas (60 GHz)

Para la antena que opera en la banda de 60 GHz el hecho de implementar una red de dos antenas no afecta a la tasa SAR promediada en 10 g ni a la potencia absorbida, ya que, los valores obtenidos son muy similares a los obtenidos con una sola antena.

Campo eléctrico

Se ha considerado antena nº 1 a la que está colocada en la misma posición que en la que estaba colocada la antena cuando había una sola y antena nº 2 a la que se ha colocado a cierta distancia de la antena nº 1. En las gráficas 17 y 18 esa distancia ha sido de 110 mm, ya que, se ha analizado la red de dos antenas cuando se han colocado a una distancia considerada como campo lejano.

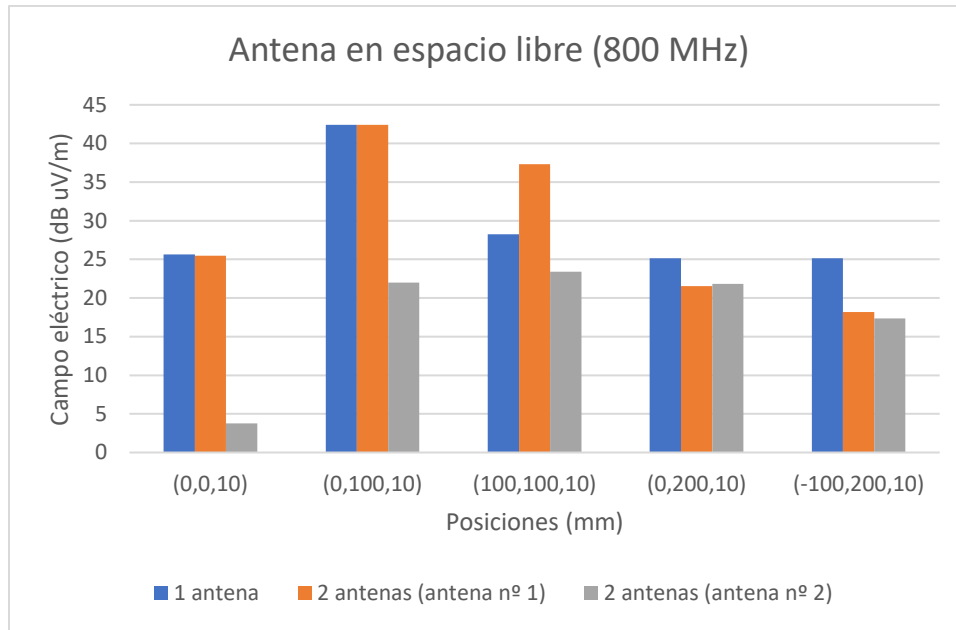


Gráfico 17: Campo eléctrico en espacio libre en cada posición para cada antena (800 MHz)

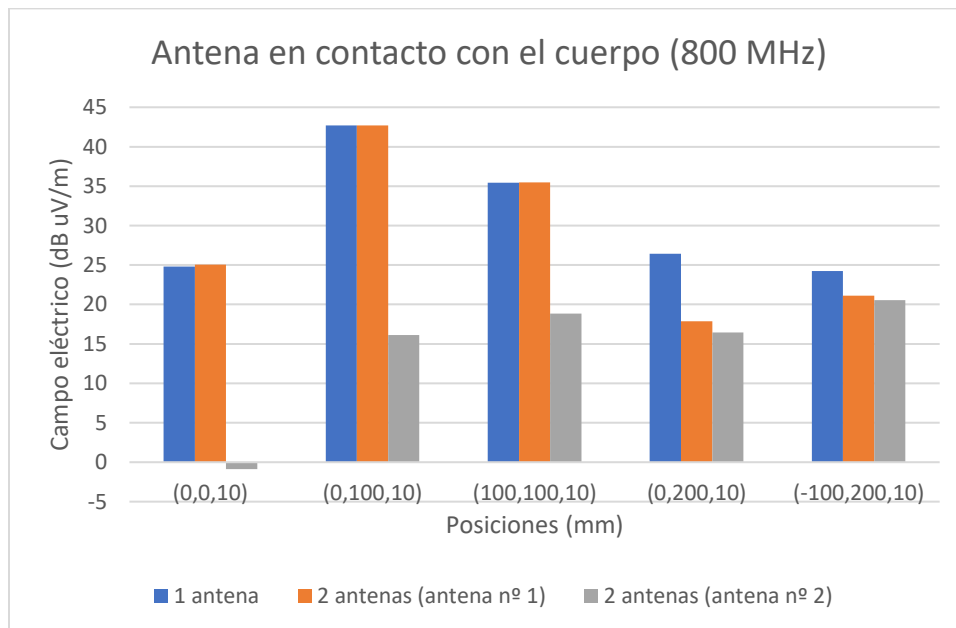


Gráfico 18: Campo eléctrico con la antena en contacto con el cuerpo en cada posición para cada antena (800 MHz)

En los Gráficos 17 y 18 se puede observar como la antena nº 1, es decir, la que está colocada en la posición inicial, es la que más campo eléctrico obtiene en sus sondas en comparación con la antena nº 2. Por otra parte, al implementar la red de dos antenas el campo eléctrico en la antena nº 1 es menor que el que se obtenía cuando se implementaba una sola antena.

En las gráficas 19 y 20 la distancia de separación de las antenas ha sido de 29 mm, puesto que, se ha analizado la red de dos antenas cuando se han colocado las antenas a una distancia considerada como campo lejano.

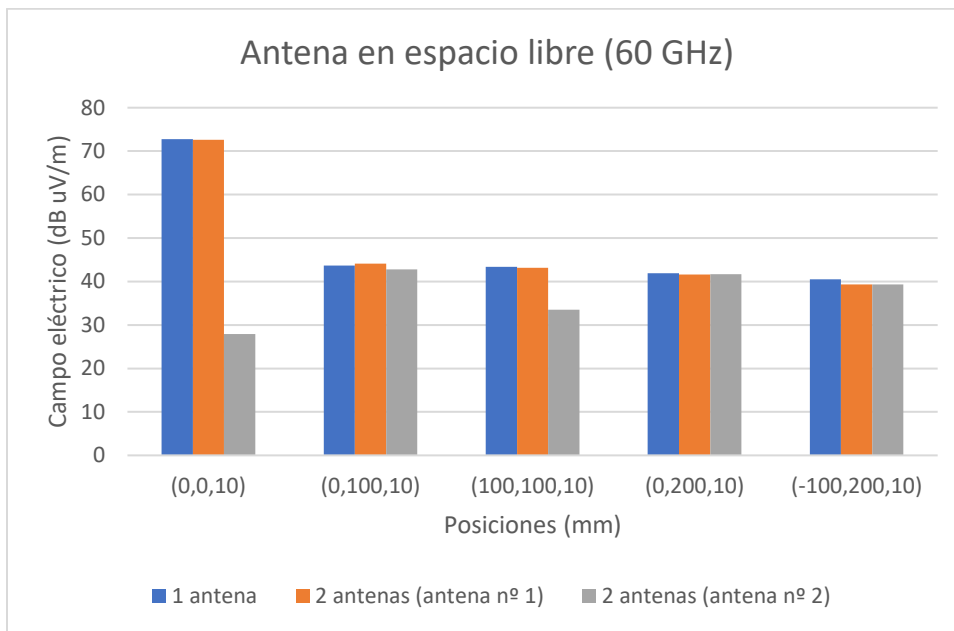


Gráfico 19: Campo eléctrico en espacio libre en cada posición para cada antena (60 GHz)

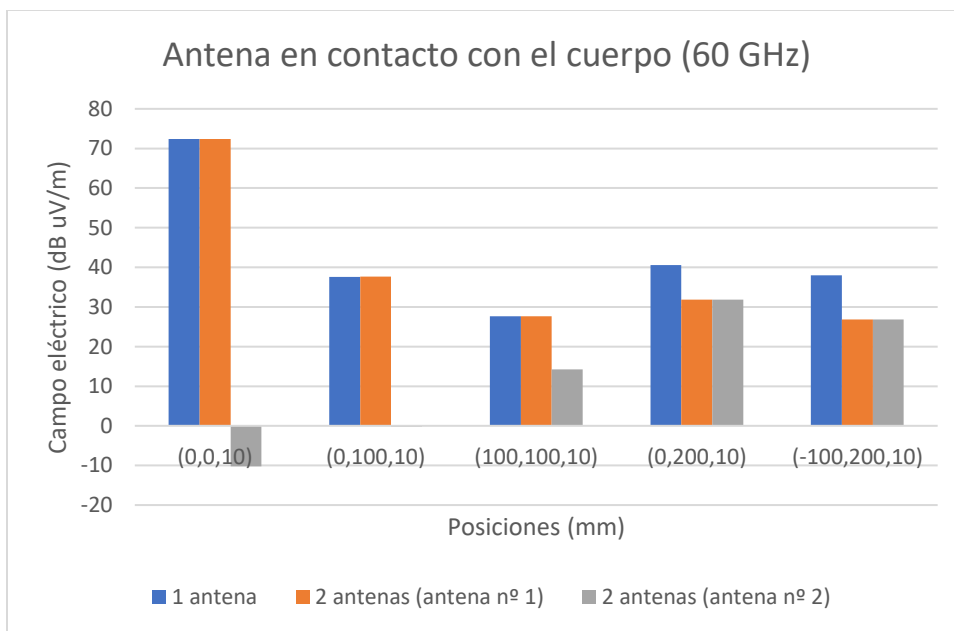


Gráfico 20: Campo eléctrico con la antena en contacto con el cuerpo en cada posición para cada antena (60 GHz)

En los Gráficos 19 y 20 ocurre lo mismo que para la antena de 800 MHz, la antena nº 1 es la que más campo eléctrico obtiene en sus sondas en comparación con la antena nº 2. Además, al analizar las dos gráficas se ve como el campo eléctrico disminuye al estar la antena en contacto con el cuerpo.

6.4. Conclusiones de los resultados obtenidos

A continuación, se resumirán las conclusiones más significativas del trabajo, las cuales están descritas en el apartado anterior.

El efecto al realizar cambios en los diferentes parámetros o al realizar las simulaciones en diferentes escenarios se ve que el cambio obtenido en los resultados es más relevante en el caso de la antena de 60 GHz.

- Cambio al añadir el cuerpo al escenario de la antena en espacio libre
 - o Parámetro S11

Al estar la antena en contacto con el cuerpo en la banda de 800 MHz la frecuencia del mínimo del parámetro S11 apenas ha variado y, por otra parte, en el caso de la de 60 GHz el cambio ha sido más notorio. En cuanto a la amplitud, para la antena de 800 MHz el mínimo del parámetro S11 ha disminuido y en el caso de la de 60 GHz ha aumentado.

Frecuencia de trabajo de la antena	Frecuencia del parámetro S11 en espacio libre (GHz)	Frecuencia del parámetro S11 al añadir el cuerpo (GHz)	Amplitud del parámetro S11 en espacio libre (dB)	Amplitud del parámetro S11 al añadir el cuerpo (dB)
800 MHz	0.8004	0.8028	-24.56	-28.99
60 GHz	60.008	60.416	-31.69	-24.32

Tabla 48: Variación del parámetro S11 al añadir el cuerpo en función de la frecuencia

- o Campo eléctrico

Estudiando la Tablas 24 y 25 y teniendo en cuenta los valores obtenidos para campo lejano, se ha sacado la conclusión de que el valor del campo eléctrico obtenido por las sondas ha disminuido al añadir el cuerpo a la antena.

- Comparación de la tasa SAR obtenida mediante el programa CST con los niveles de exposición (ICNIRP)

Se ha comprobado que el valor obtenido para la tasa SAR es menor que el de las restricciones básicas (SAR) en la banda de 60 GHz, puesto que, el valor restrictivo es 0.08 W/kg y el valor calculado ha sido $1.61 \cdot 10^{-3}$ W/kg para un cuerpo de 50 kg y

$1.16 \cdot 10^{-3}$ W/kg para un cuerpo de 70 kg. Estos datos garantizan que no existen efectos nocivos para la salud.

- Valor del campo E en diferentes posiciones

En el caso de la antena de 800 MHz como en la de 60 GHz, mientras la sonda está más alejada de la antena, el campo E obtenido por la sonda es menor. En cambio, en campo cercano no está clara esta disminución del valor en todas las posiciones.

- Valor del campo eléctrico obtenido por las sondas en varias posiciones a diferentes alturas

Al analizar el valor del campo E en campo lejano se puede observar cómo al aumentar la altura a la que se colocan las sondas sobre la antena el valor del campo eléctrico aumenta.

- Tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida por el cuerpo en varias posiciones a diferentes alturas

Mientras la distancia entre la antena y el cuerpo aumenta la tasa SAR promediada en 10 g disminuye.

La potencia absorbida por el cuerpo disminuye al separar la antena del cuerpo. Al utilizar la antena de 60 GHz la potencia absorbida es mayor que al usar la que trabaja en la banda de 800 MHz.

- Tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida por el cuerpo para diferentes materiales y grosores

La tasa SAR promediada en 10 g y la potencia absorbida por el cuerpo disminuye al añadir un textil entre el cuerpo y la antena y también al aumentar el grosor del textil.

En la banda de 800 MHz el algodón es el material que más consigue disminuir la potencia absorbida por el cuerpo.

- Tasa SAR promediada en 10 g y potencia absorbida por el cuerpo en una red formada por dos antenas

En el caso de la antena de 800 MHz la tasa SAR disminuye lo mismo colocando las antenas a una distancia de campo lejano como a una de campo cercano y la potencia absorbida aumenta al implementar la red de dos antenas en comparación con el valor de potencia obtenido para una.

Para la antena que opera en la banda de 60 GHz el hecho de implementar una red de dos antenas no afecta a la tasa SAR ni a la potencia absorbida.

- Campo eléctrico obtenido en una red formada por dos antenas

La antena colocada en la posición inicial, antena n° 1, es la que más campo eléctrico obtiene en sus sondas en comparación con la antena n° 2. Por otra parte, al implementar la red de dos antenas el campo eléctrico en la antena n° 1 es menor que el que se obtenía cuando se implementaba una sola antena.

7. Planificación

En este apartado se detallarán las diferentes fases que se han llevado a cabo para la realización de este Trabajo de Fin de Máster. El proyecto se ha dividido en paquetes de trabajo (P.T). En primer lugar, se describe el equipo de trabajo y seguidamente se describen los P.T y los hitos. Por último, se representa todo mediante un diagrama de Gantt.

7.1. Equipo de trabajo

Este proyecto lo ha llevado a cabo el siguiente equipo de trabajo:

Identificador	Nombre	Responsabilidad	Rol
I.1	David Guerra	Ingeniero sénior	Director del proyecto
I.2	Marta Fernández	Ingeniera sénior	Codirectora del proyecto
I.3	Lidia de Luis	Ingeniera junior	Desarrolladora del TFM

Tabla 49: Equipo de trabajo

7.2. Definición de paquetes de trabajo

P.T.1: Gestión y supervisión del proyecto		
T.1.1	Gestión y seguimiento del proyecto: Se harán reuniones periódicas entre los miembros con el fin de controlar el desarrollo de cada tarea, evaluar los avances y corregir los fallos.	27 sem.
T.1.2	Definición de objetivos: Se determinarán cuáles son los objetivos generales y específicos del trabajo, de modo que quede determinado lo que se quiere conseguir con el desarrollo del proyecto.	1 sem.
T.1.3	Determinación del plan de trabajo: Se definirán cuáles serán los pasos a seguir para lograr los objetivos previamente definidos.	1 sem.

Tabla 50: P.T.1: Gestión y supervisión del proyecto

P.T.2: Estudios previos		
T.2.1	Estudio del estado del arte: En esta tarea se analizará la biografía relacionada con el tema del proyecto. También se buscarán proyecto relacionados con antenas “wearable” en la banda de 800 MHz y 60 GHz.	5 sem.
T.2.2	Familiarización con el programa CST Studio Suite: Aprender a utilizar el programa CST Studio Suite mediante videos tutoriales, ejemplos y ayuda de los miembros del grupo.	3 sem.

Tabla 51: P.T.2: Estudios previos

P.T.3: Diseño y optimización de las antenas		
T.3.1	Diseño de las antenas: Diseñar dos antenas de parche para las bandas de 800 MHz y 60 GHz.	3 sem.
T.3.2	Análisis y validación de los diseños: Comprobar que los parámetros de interés (S11) se correspondan con las características de las antenas que se quieren diseñar.	1 sem.
T.3.3	Optimización de los diseños: Optimización de los valores de los parámetros utilizados para el diseño de las antenas con el fin de que opere en la frecuencia deseada.	2 sem.
T.3.4	Diseño de los modelos de cuerpo humano: crear los modelos humanos con los que se van a realizar las simulaciones: uno para la banda de 800 MHz de tres capas (piel, grasa y músculo) y otro para la de 60 GHz con una sola capa (piel).	1 sem.

Tabla 52: P.T.3: Diseño y optimización de las antenas

P.T.4: Simulaciones		
T.4.1	Definición de los escenarios de simulación: Se definirán diferentes campos de simulación: <ul style="list-style-type: none"> - Espacio libre - Modelo de cuerpo pegado a la antena y a diferentes distancias. - Con textiles: poniendo textiles entre el cuerpo y la antena - Red formada por dos antenas. 	8 sem.
T.4.2	Realización de las simulaciones: se realizarán medidas de los parámetros de interés en los escenarios propuestos.	6 sem.
T.4.3	Recopilación de datos: Se procede a guardar los datos obtenidos en las diferentes simulaciones para su posterior análisis.	1 sem.

Tabla 53: P.T.4: Simulaciones

P.T.5: Análisis y evaluación de los resultados		
T.5.1	Análisis y evaluación de los resultados: Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones y evaluar los aspectos más relevantes.	1 sem.
T.5.2	Comparación de los datos obtenidos: Se compararán los resultados obtenidos en los escenarios de simulación entre ellos y con los niveles de exposición.	1 sem.

Tabla 54: Análisis y evaluación de los resultados

P.T.6: Documentación		
T.6.1	Redacción del trabajo de Fin de Master: Redactar todos los pasos seguidos en el proceso del proyecto.	19 sem.

Tabla 55: P.T.6: Documentación

7.3. Hitos

Para que todos los miembros del equipo de trabajo puedan seguir el desarrollo del proyecto es necesario realizar una serie de reuniones. De esta manera, se asegura que se van cumpliendo los objetivos definidos para cada paquete de trabajo. Seguidamente, se muestra una tabla con los hitos definidos para el control del proyecto:

Hitos	Descripción	Semana
H.1	Comienzo del proyecto	Semana 1
H.2	Proyecto definido	Semana 3
H.3	Diseño de antenas y cuerpos finalizado	Semana 9
H.4	Fin de medidas y procesado	Semana 22
H.5	Fin del análisis de los resultados	Semana 24
H.6	Fin de proyecto	Semana 27

Tabla 56: Hitos

7.4. Diagrama de Gantt

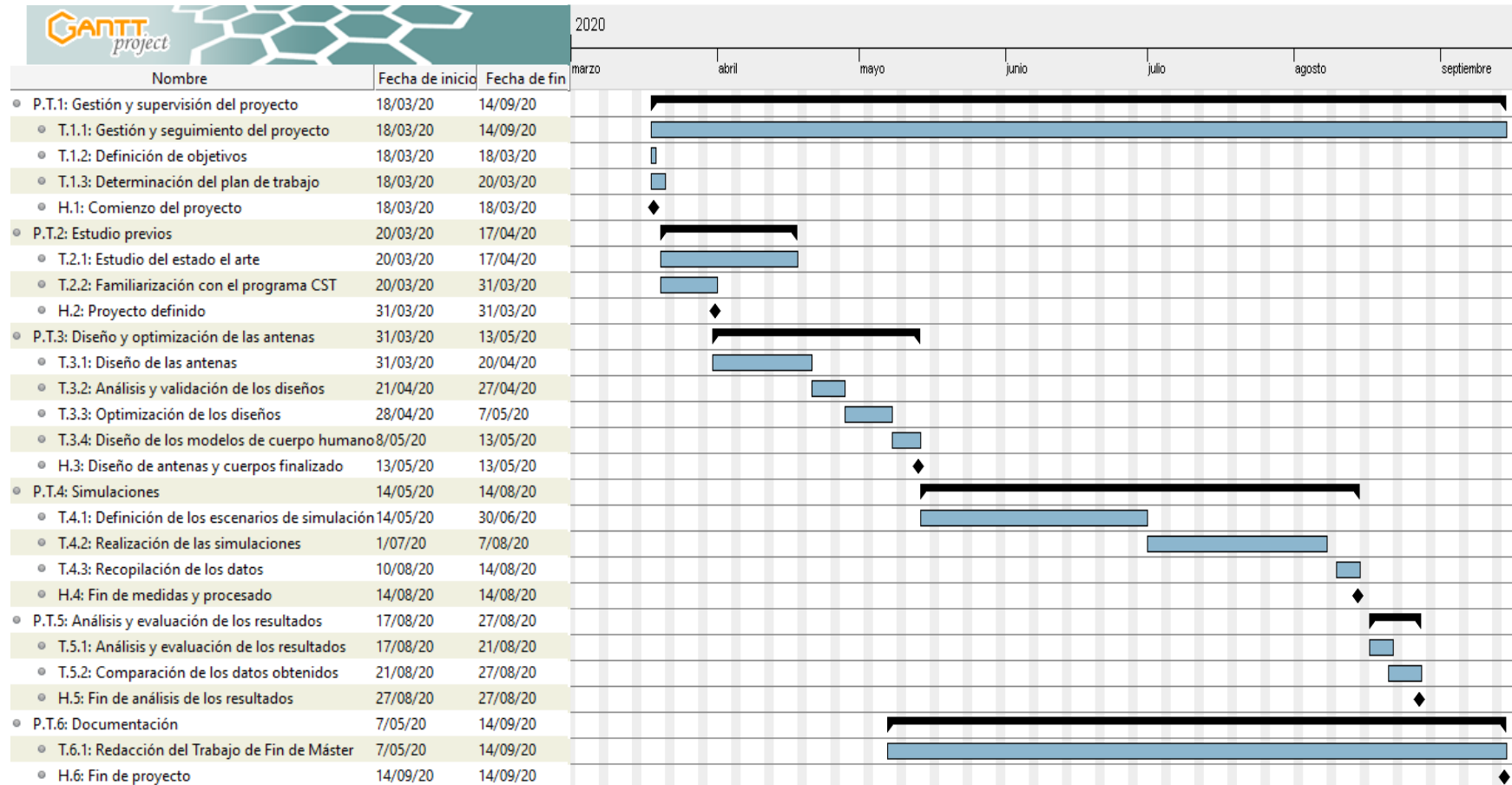


Ilustración 30: Diagrama de Gantt

8. Presupuesto

En este apartado, se va a calcular el coste total del proyecto. Para ello, se han dividido todos los costes en cuatro grupos: recursos humanos, amortizaciones y gastos del trabajo.

8.1. Recursos humanos

En la siguiente tabla se muestra el coste total de cada miembro del equipo teniendo en cuenta su participación en horas dentro del trabajo.

Identificador	Tasa horaria (€/h)	Horas (h)	Coste (€)
I.1	50	60	3000
I.2	50	70	3500
I.3	30	700	21000
		TOTAL	27500 €

Tabla 57: Costes recursos humanos

8.2. Amortizaciones

Son los costes realizados debido a material que constaba previamente antes del trabajo, y que debido a su uso en el proyecto se debe de realizar su respectiva amortización.

Descripción	Coste inicial (€)	Vida útil (años)	Tiempo de uso (horas)	Amortización (€)
Ordenador portátil	800	5	700	12.78
CST Studio Suite	2000	1	600	136.98
Microsoft Word 2019	149.90	1	550	9.41
			TOTAL	159.18

Tabla 58: Costes amortizaciones

8.3. Gastos del trabajo

En este apartado se indican los gastos realizados en materiales que sirven en exclusividad para este trabajo, es decir no podrán volver a ser utilizados.

Gasto	Coste inicial (€)
Material de oficina	30
Conexión a Internet	50
Otros	40
TOTAL	120

Tabla 59: Costes en el apartado de gastos

8.4. Resumen económico

Para terminar, se hace un resumen del presupuesto total necesario para llevar a cabo el proyecto.

Concepto	Coste (€)
Recursos humanos	17500
Amortizaciones	159.18
Gastos	120
TOTAL	17779.18

Tabla 60: Resumen presupuesto final

9. Análisis previo de riesgos

El objetivo de este apartado es analizar los riesgos que podían aparecer en el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se identificaron los riesgos que se podrían dar, de qué modo podrían afectar al proyecto y de qué manera se podrían solucionar.

A la hora de realizar este análisis de riesgos se tuvieron en cuenta dos conceptos. Por una parte, la probabilidad de que aparezca cada riesgo y por otra, el impacto que ese riesgo pueda causar en el proyecto. Por tanto, a la hora de evaluar el riesgo, se tendrá en cuenta la probabilidad de que esto suceda y el impacto que pueda tener.

A continuación, se describen los riesgos y las medidas de contingencia para evitar cada uno de ellos.

Por último, se ilustrarán gráficamente estos riesgos mediante una matriz probabilidad-impacto.

9.1. Pérdida de datos (A)

La mayor parte del trabajo de este proyecto se hará en un ordenador, y la pérdida de información (por un apagón, por una avería del ordenador...) tendría un factor de impacto medio.

Sin embargo, la probabilidad de que ocurra este riesgo es baja, ya que almacenar datos en diferentes dispositivos evitaría el riesgo.

9.2. Escasez de recursos (B)

El programa CST requiere muchos recursos como alta capacidad de RAM, alta memoria y un procesador rápido. Esto puede ocasionar que las simulaciones vayan mal o muy lentamente e incluso provocar que la simulación falle.

La probabilidad de que esto ocurra es alta y el impacto alto medio. Para prevenir que este riesgo no aparezca se recomienda optimizar las simulaciones y darle prioridad a la simulación de las partes que son de mayor interés.

9.3. Retraso en la entrega de plazos (C)

El segundo riesgo a considerar sería el incumplimiento de los objetivos propuestos dentro del plazo previsto. La probabilidad de que ocurra este riesgo es media y su impacto bajo.

Para evitar esto, se debe medir con precisión el tiempo requerido para completar cada sección del proyecto, y se deben anticipar los factores que podrían causar que se exceda este período.

9.4. Baja de los trabajadores (D)

Se debe tener en cuenta en que en cualquier momento en un proyecto o trabajo un compañero de trabajo puede ausentarse por enfermedad o accidente y por ello no poder realizar su trabajo por un tiempo.

A pesar de la muy baja probabilidad, se considera un evento de alto impacto. De hecho, dependiendo de la fase del proyecto, conseguir que otro miembro del equipo trabaje bien puede provocar retrasos importantes y poner en peligro todo el proyecto.

Para hacer frente a este problema, es recomendable tener al menos dos personas en cada lugar con conocimientos suficientes para trabajar allí. De esta forma, si uno se coge baja, el otro puede hacer su trabajo.

9.5. Matriz probabilidad-impacto

En esta matriz se ven representados los riesgos descritos anteriormente. Los riesgos situados en la esquina inferior izquierda son riesgos de menor importancia. Sin embargo, aquellos riesgos situados en la esquina opuesta son los riesgos de mayor importancia, y, por tanto, aquellos en los que hay que dedicar un mayor tiempo de análisis y tener preparadas diversas medidas de contingencia para poder actuar rápidamente en el caso de que ocurrieran. Por otra parte, también se puede diferenciar la importancia del riesgo por el color del recuadro en el que esté situado, siendo el color verde poco riesgo, el color amarillo/naranja riesgo moderado y el color rojo máximo riesgo.

Casi Seguro					
Bastante probable			B		
Probable		C			
Poco probable			A	D	
Rara vez					
Probabilidad Impacto	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto

Ilustración 31: Matriz probabilidad-impacto

9.6. Impacto del Covid-19 en el TFM

Este TFM está basado en simulaciones, por ello la pandemia del Covid-19 no ha tenido impacto en las tareas que se iban a realizar en un primer momento y no hubo que cambiarlas.

Debido a la pandemia del Covid-19 se ha tenido que realizar algunos cambios en la metodología habitual. Al no poder acudir al laboratorio se ha tenido que conectar a un ordenador de manera remota. Por otra parte, las tutorías han tenido que ser realizadas vía online, aunque esto no ha sido ningún problema, siempre es más fácil comunicarse y entenderse en persona.

10. Conclusiones

En los próximos años, se espera que el crecimiento del uso de la tecnología 5G sea cada vez mayor. Por ello, es necesario realizar trabajos de análisis de exposición a campos electromagnéticos, ya que se está creando una alarma social debido a la exposición EM que el despliegue y uso de esta red pueda ocasionar.

Mediante este proyecto se han analizado el efecto de antenas típicas que funcionan en contacto o muy próximas a las personas en los sistemas 5G en las bandas de 800 MHz y 60 GHz. Con el objetivo de cuantificar la exposición EM a la que estarían sometidas las personas usuarias de la red 5G, se ha propuesto una metodología adecuada para poder analizar los valores de exposición y estudiar el comportamiento que tienen en el cuerpo humano para poder cuantificar qué parte de la potencia radiada por la antena absorbe el cuerpo.

Además, se explican los pasos para realizar estos cálculos de exposición EM mediante simulaciones, para lo que ha sido necesario el diseño de antenas adecuadas para las frecuencias de 800 MHz y 60 GHz. También se han diseñado modelos planos de cuerpo humano para analizar la influencia de las antenas sobre estos. Se han realizado simulaciones de SAR, de la potencia absorbida por el cuerpo, de los campos eléctricos... y se han dado los resultados obtenidos. Estas simulaciones podrán ser usadas como ejemplos, para otros trabajos futuros. Para poder sacar conclusiones generalizables, las medidas se han realizado en diferentes escenarios.

En cuanto a las medidas, se puede ver cómo las configuraciones probadas no superan los límites de exposición establecidos por el ICNIRP. Por otra parte, se ha visto en los resultados obtenidos que, al añadir cambios en los escenarios de simulación, la antena de parche diseñada para operar en la banda de 60 GHz es bastante más sensible a los cambios que la de 800 MHz. Además, se han sacado dos conclusiones sobre el campo eléctrico. Por una parte, el valor del campo eléctrico obtenido por las sondas ha disminuido al colocar el cuerpo sobre la antena. Por otra parte, al alejar la sonda de la antena se ha visto que el campo E obtenido por la sonda también es menor, por ejemplo, en el caso de la antena de 800 MHz el valor obtenido cuando la sonda estaba colocada a 141.42 mm de la antena ha sido de 25.82 V/m, cuando la sonda estaba a 200 mm ha sido de 20.02 V/m y cuando estaba a 223.6 mm el valor obtenido por la antena ha sido de 18.07 V/m.

Por otro lado, se ha verificado que se cumplen las restricciones básicas (SAR) en la banda de 60 GHz, puesto que, el valor restrictivo es 0.08 W/kg y el valor calculado ha sido $1.61 \cdot 10^{-3}$

W/kg para un cuerpo de 50 kg y $1.16 \cdot 10^{-3}$ W/kg para un cuerpo de 70 kg, por lo que está garantizado que no existen efectos nocivos para la salud. También se ha observado que la tasa SAR promediada en 10 g de cuerpo es mucho mayor usando la antena que opera en 60 GHz que la que trabaja en 800 MHz, siendo 8.03 W/kg en el primer caso y $2.19 \cdot 10^{-2}$ W/kg en el segundo.

Otra de las conclusiones a la que se ha llegado es que cuanto más grande sea el valor de la distancia entre el cuerpo y la antena, menor es el valor de la tasa SAR promediada en 10 g y de la potencia absorbida por el cuerpo. Además, analizando los resultados se ha visto que al añadir un textil entre el cuerpo y la antena la tasa SAR promediada en 10 g y la potencia absorbida en el cuerpo disminuye y disminuye aún más a medida que se aumenta el grosor del textil. Por último, en la banda de 800 MHz, se ha llegado a la conclusión de que el algodón es el material que más consigue disminuir la potencia absorbida por el cuerpo.

11. Bibliografía

- [1] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. Available at: <https://avancedigital.gob.es/5G/Paginas/Index.aspx>
- [2] Cuervo, A. Comité Científico Asesor En Radiofrecuencias Y Salud - Tecnología 5G, 2020. Available at: <http://ccars.org.es/saber-mas/5g>
- [3] Europa retrasa el lanzamiento generalizado de sus redes 5G debido al Covid-19 - ON5G, 2020. Available at: <https://on5g.es/europa-retrasa-lanzamiento-generalizado-redes-5g-debido-covid-19/>
- [4] Carpenter, D. O. “Human disease resulting from exposure to electromagnetic fields¹”, *Reviews on environmental health*, Vol. 28, nº 4, 2013.
- [5] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, *ICNIRP Guidelines*, Vol. 74, nº 4. April 1998.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). “Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300GHz)”, *Health Physics*, vol. 118, nº 5, 2020.
- [7] T. Nakamura, A. Yamamoto, “Near-Field Measurement System for 5G Massive MIMO Base Stations”, *Anrichu Technical Review*, nº 25, 2017.
- [8] C. Balanis, *Antenna Theory - Analysis and Design*. 1997.
- [9] Hall, P. S., & Hao, Y, “Antennas and propagation for body centric communications”, *First European Conference on Antennas and Propagation*, November, 2006.
- [10] Zhadobov, M., Chahat, N., Sauleau, R., Le Qument, C., & Le Drean, Y, “Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances”, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 3, nº 2, Mar. 2011.
- [11] Chahat, N., Zhadobov, M., Le Coq, L., & Sauleau, R. “Wearable endfire textile antenna for on-body communications at 60 GHz”, *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012.

- [12] Thakur, E., Jaglan, N., Gupta, S. D., & Srivastava, S. "Compact microstrip antenna design at 60 GHz for next generation communication systems", International Journal of Microwave and Optical Technology, 2018.
- [13] Ur-Rehman, M., Kalsoom, T., Malik, N. A., Safdar, G. A., Chatha, H. T., Ramzan, N., & Abbasi, Q. H. "A wearable antenna for mmWave IoT applications." International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2018.
- [14] Chahat, N., Zhadobov, M., Le Coq, L., Alekseev, S. I., & Sauleau, R. "Characterization of the interactions between a 60-GHz antenna and the human body in an off-body scenario", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, n° 12, 2012.
- [15] Shrivastava, P., & Rao, T. R. "Specific Absorption Rate Distributions of a Tapered Slot Antenna at 60 GHz in Personal Wireless Devices". IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 59, n° 6, 2017.
- [16] Federal Communications Commission (FCC). Code of Federal Regulations (CFR), title 47, part 2, 1093, 2010.
- [17] Orefice, M., Pirinoli, P., & Dassano, G. "Electrically-small wearable antennas for emergency services applications", International Workshop on Antenna Technology (iWAT). IEEE, 2016.
- [18] Marasco, I., et al. "Compact and flexible meander antenna for Surface Acoustic Wave sensors", Microelectronic Engineering, 2020.
- [19] Camacho-Gomez, C., Sanchez-Montero, R., Martínez-Villanueva, D., López-Espí, P. L., & Salcedo-Sanz, S. "Design of a Multi-Band Microstrip Textile Patch Antenna for LTE and 5G Services with the CRO-SL Ensemble", Applied Sciences, 2020.
- [20] Microstrip square patch antenna using CST by Shamsur Rahman Akash, 2016. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Iqr12UiUcsk>
- [21] Kaur, G., & Goyal, E. S. "To study the effect of substrate material for microstrip patch antenna", Int. J. Eng. Trends Technol. (IJETT), 2016.
- [22] Qualcomm. Retrieved 15 July 2020. Available at: https://avancedigital.gob.es/es-es/Participacion/RespuestasPlan5G/38_Qualcomm.pdf

[23] Dielectric Properties » IT'IS Foundation. Retrieved 13 July 2020. Available at: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>

[24] Cafe, K. Dielectric Constant, Strength, & Loss Tangent - RF Cafe. Retrieved 2 August 2020. Available at: <https://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectric-constants-strengths.htm>