

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO APANTALLADOR DE LOS TEXTILES FRENTE A LA EXPOSICIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEBIDA AL SISTEMA DE COMUNICACIONES BLUETOOTH

Alumno: *Portalea Galeano, Rodrigo Ezequiel*

Director: *Guerra Pereda, David*

Fecha: *Junio de 2018*

Curso: *2017-2018*

Fecha: *<Viernes 14, Junio, 2018>*

1 DATOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Alumno: Rodrigo Ezequiel Portalea Galeano

Director: David Guerra Pereda

Departamento: Ingeniería de Comunicaciones. Área de Ingeniería de señal, grupo TSR.

Título del proyecto: Caracterización del efecto apantallador de los textiles frente a la exposición electromagnética debida al sistema de comunicaciones bluetooth

Fecha de comienzo del proyecto: Septiembre 2017

Fecha prevista de finalización: Junio 2018

1.1 Resumen

En el presente proyecto se ha realizado un estudio sobre las características de la interfaz física de radiocomunicaciones Bluetooth centrado en los posibles efectos de contaminación radioeléctrica y a su contribución en la exposición electromagnética a la que los seres humanos están sometidos, especialmente aquellos usuarios de esta tecnología.

El objetivo del proyecto es doble. Por un lado, analizar si los niveles de señal empleados por el sistema Bluetooth en régimen de funcionamiento se encuentra por debajo de los niveles de referencia que aseguran la ausencia de efectos nocivos sobre la salud. Por otro lado, el análisis del **Electromagnetic Shielding Effectiveness (EMSE)** asociado a distintos tipos de tejidos textiles. De esta manera, se ha elaborado una tabla de referencia para conocer las pérdidas de transmisión debidas a los distintos tipos de tejidos con que se elaboran las prendas de vestir. Esta tabla se puede utilizar bien en busca de efectos de apantallamiento mayores que reduzcan la exposición a los campos electromagnéticos debidos a Bluetooth, o bien para evitar dichos efectos y mejorar la calidad de la comunicación.

El estudio de ambos objetivos se ha logrado a través de diferentes tipos de medida gracias a las cuales se ha conseguido obtener una respuesta final, a la pregunta: ¿Es o no adecuado el empleo del sistema Bluetooth a la hora de ofrecer comunicaciones inalámbricas seguras para sus usuarios? teniendo en cuenta las potencias nominales con las que trabaja el sistema.

1.2 Palabras clave

Bluetooth, Exposición electromagnética, Efectos nocivos, Textiles, Efectos de apantallamiento, Comunicación inalámbrica.

1.3 *Laburpena*

Proiektu honetan ikerketa bat egin da Bluetooth irrati-komunikazioen interfaze fisikoaren ezaugarri buruzkoa. Ikerketa irrati-elektriko kutsadurako efektu posibleetan ardaztuta dago eta haren kontribuzioan gizakiak menderatuta dauden esposizio elektromagnetikoari dagokionez, batez erabiltzaileak.

Proiektuaren helburua bikoitza da. Alde batetik, Bluetooth sistemaren seinaleko mailak erreferentizako mailak baino gutxiagoak direla aztertzea efektu kaltegarriak ez daudela bermatzeko. Beste aldetik, zuntz ehun mota ezberdinetako Electromagnetic Shielding Effectiveness (EMSE) deritzon parametroaren analisia. Honela, erreferentzia taula bat egin da zuntz ehun mota ezberdinek eragindako transmisio galerak ezagutzeko. Taula hau ondo erabili ahal da apantailamendu elektromagnetikoaren efektuak lortzeko zuntzen bidez, Bluetooth sistemak eragindako kutsadura elektromagnetikoa ekiditzeko, edo kontrakoan, komunikazioen kalitatea hobetzeko apantailamendua murriztu eta gero.

Helburu bien ikerketa lortu da, neurketa mota batzuen bidez eta horri esker azkeneko erantzuna eman zaio galdera honi: Bluetooth sistema egokia al da hari gabeko komunikazio sugurak erabiltzailei hornitzea? Sistemak erabiltzen dituen potentzia nominalak kontuan hartuta.

1.4 *Gako-hitzak*

Bluetooth, esposizio elektromagnetikoa, efektu kaltegarriak, zuntzak, apantailamenduaren efektuak, hari gabeko komunikazioak.

1.5 *Abstract*

In this project a study has been carried out on the characteristics of the physical Bluetooth radio interface focusing on the possible effects of radio pollution and its contribution to the electromagnetic exposure to which humans are exposed, especially those using this technology.

The objective of the project is twofold. On the one hand, to analyse whether the signal levels used by the Bluetooth system in operation are below the reference levels that ensure the absence of harmful effects on health. On the other hand, the analysis of Electromagnetic Shielding Effectiveness (EMSE) associated with different types of textile fabrics. In this way, a reference table has been drawn up to determine the transmission losses due to the different types of fabrics used in garments. This table can be used either in search of larger shielding effects that reduce exposure to electromagnetic fields due to Bluetooth, or to avoid such effects and improve the quality of communication.

The study of both objectives has been achieved through different types of measures thanks to which a final answer has been obtained, to the question: Is the use of the Bluetooth system adequate or not when offering secure wireless communications to its users? taking into account the rated powers with which the system works.

1.6 *Keywords*

Bluetooth, Electromagnetic exposure, Harmful effects, Textiles, Shielding effects, Wireless communication.

Índice General

1	DATOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO	I
1.1	Resumen.....	I
1.2	Palabras clave	I
1.3	Laburpena	II
1.4	Gako-hitzak.....	II
1.5	Abstract	II
1.6	Keywords.....	II
2	INTRODUCCIÓN	2
3	CONTEXTO.....	5
3.1	Introducción Al Sistema Bluetooth	5
3.2	Bluetooth Y La Salud.....	7
4	OBJETIVOS	11
4.1	Objetivo Principal	11
5	BENEFICIOS.....	12
5.1	Beneficios Técnicos	12
5.2	Beneficios Sociales	12
5.3	Beneficios Económicos.....	12
6	ESTADO DEL ARTE	13
6.1	Introducción	13
6.2	Introducción Al Bluetooth	13
6.2.1	Arquitectura De Red	14
6.2.2	Bluetooth Controller.....	15
6.2.2.1	Bluetooth Radio	15
6.2.2.2	Base Band	16
6.2.2.3	Link Manager	16
6.3	Evolución Del Estándar Y Sus Versiones	17
6.3.1	Estándares Bluetooth	17
6.3.2	Evolución Del Bluetooth	18
6.4	Espectro Asignado	20
6.5	Propagación En Interiores	21
6.5.1	Propagación En Espacio Libre	21
6.5.2	Propagación Con Obstáculos	21

6.6	Metodología De Medida.....	22
6.6.1	Configuración Del Equipamiento De Medida.....	22
6.7	Medida Con Textiles	24
6.7.1	Metodología De Medida En Textiles	24
7	ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA LA METODOLOGÍA DE MEDIDAS.....	26
7.1	Modelo De Dispositivos Y Emplazamiento	26
7.1.1	Dispositivos Portátiles	27
7.1.2	Emplazamiento.....	27
7.2	Equipamiento De Medida	28
7.2.1	Analizador De Espectros	28
7.2.2	Analizador De Redes	30
7.2.3	Antenas de medida.....	31
7.3	Medidas de caracterización.....	32
7.3.1	Caracterización del sistema en Cámara Anecoica.....	32
7.3.2	Caracterización del sistema en funcionamiento en situación real	33
7.3.3	Caracterización mediante analizador de redes.....	33
7.3.4	Discusión	34
8	DESCRIPCIÓN DE LA SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN	35
8.1	Caracterización en situación real de las emisiones electromagnéticas (EM) del sistema Bluetooth	35
8.2	Caracterización con analizador de redes	38
9	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y TAREAS DE TRABAJO.....	41
9.1	Equipo de trabajo	41
9.2	Definición de paquetes de trabajo	41
9.3	Hitos de control	43
10	DIAGRAMA GANTT	44
11	DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	45
11.1	Caracterización en funcionamiento en situación real.....	45
11.1.1	Potencia en posición Horizontal vs. Vertical sin obstáculo	45
11.1.2	Potencia en posición Horizontal vs. Vertical con obstáculo.....	46
11.1.3	Conclusiones.....	47
11.1.4	Cumplimiento de la normativa	49
11.2	Caracterización con analizador de redes	51
11.2.1	Textiles simples más utilizados	51
11.2.2	Textiles compuestos	53
11.2.3	Conjunto de diferentes textiles	55

12	PRESUPUESTO	58
12.1	Material Amortizable.....	58
12.2	Material Fungible	58
12.3	Recursos Humanos	59
12.4	Presupuesto Total.....	59
13	CONCLUSIONES	61
14	BIBLIOGRAFÍA	63
14.1	Referencias	63
1	ANEXO I	67
1.1	ORDEN IET/787/2013	67
1.2	REAL DECRETO 1066/2001	67
1.3	ORDEN CTE/23/2002	70
2	ANEXO II	72
2.1	DISTANCIA CAMPO LEJANO	72
3	ANEXO III	73
4	ANEXO IV	76
5	ANEXO V	78
5.1	Ecuaciones.....	78
5.2	Antena microstrip rectangular	78
5.3	Programa en MATLAB	80
6	ANEXO VI	81
7	ANEXO VII	82
7.1	Grosos	82
7.2	Textiles principales	82
7.3	Compuestos.....	85

Índice de Tablas

Tabla 1. Restricciones Básicas y Niveles de Referencia Bluetooth.....	9
Tabla 2. Clases de dispositivos Bluetooth.....	16
Tabla 3. Comparativa de versiones Bluetooth.....	19
Tabla 4. Condiciones de mediciones	22
Tabla 5. Configuración del analizador de espectros	23
Tabla 6. Grosor y constante dieléctrica de cuatro materiales diferentes	25
Tabla 7. Modelos de Analizador de Espectro	29
Tabla 8. Criterio de elección de Analizador de Espectros.....	29
Tabla 9. Modelos de Analizadores de Redes	30
Tabla 10. Criterios de elección del Analizador de Redes	30
Tabla 11. Características antena fabricada.....	31
Tabla 12. Tabla resumen de las diferentes caracterizaciones	34
Tabla 13. Potencias medidas en H vs. V sin obstáculo.....	45
Tabla 14. Potencias medidas en H vs. V con obstáculo	46
Tabla 15. Resumen de potencias en los 20 escenarios.....	49
Tabla 16. Resumen de Intensidad de campo eléctrico en los 20 escenarios	50
Tabla 17. Potencia de referencia en la caracterización con analizador de redes	51
Tabla 18. Valores medidos en textiles más utilizados	51
Tabla 19. Valores medidos en textiles compuestos simples.....	53
Tabla 20. Valores medidos en diferentes combinaciones	55
Tabla 21. Partida de amortizaciones	58
Tabla 22. Partida de fungibles	58
Tabla 23. Partida de recursos humanos	59
Tabla 24. Presupuesto del Trabajo Fin de Grado.....	59
Tabla 25. Restricciones básicas para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz).....	68
Tabla 26. Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados).....	69
Tabla 27. Parámetros a configurar en el analizador de espectros.....	74
Tabla 28. Grosor de los distintos textiles.....	82
Tabla 29. Tabla comparativa de diferentes capas de algodón.....	82

Tabla 30. Tabla comparativa de diferentes capas de poliéster	83
Tabla 31. Tabla comparativa de diferentes capas de plástico	83
Tabla 32. Tabla comparativa de diferentes capas de lino.....	84
Tabla 33. Tabla comparativa de diferentes capas de nylon.....	84
Tabla 34. Tabla comparativa de distintas capas de 82%Poliéster18%Elástico	85
Tabla 35. Tabla comparativa de distintas capas de 50%Poliéster50%Algodón	85
Tabla 36. Tabla comparativa de distintas capas de 65%Poliéster35%Algodón	86

Índice de Figuras

Figura 1. Radiación no ionizante e Ionizante.....	3
Figura 2. Ejemplo de Frequency Hopping.....	5
Figura 3. Phantoms simuladores para cálculo de SAR	9
Figura 4. Ejemplo de Piconet y Scatternet.....	14
Figura 5. Bluetooth Controller.....	15
Figura 6. RoadMap Bluetooth	18
Figura 7. Coexistencia Wi-Fi & Bluetooth en 2.4GHz.....	20
Figura 8. Visión directa vs Visión obstaculizada	21
Figura 9. Localización de antenas Tx y Rx	24
Figura 10. Medidas con textiles.....	25
Figura 11. Asus ZenFone 2 Laser	27
Figura 12. Analizador de espectros ESPI3 Test Receiver.....	28
Figura 13. Analizador de redes KEYSIGHT ENA E5071-280.....	30
Figura 14. Antena microstrip.....	31
Figura 15. Diagrama de radiación de la antena fabricada	31
Figura 16. Cámara anecoica	32
Figura 17. Montaje para medidas de caracterización en funcionamiento en situación real	35
Figura 18. Wi-Fi vs. Bluetooth	36
Figura 19. Bloque de hormigón utilizado de obstaculo	37
Figura 20. Montaje con analizador de redes	38
Figura 21. Parámetros S	39
Figura 22. Diagrama Gantt de planificación	44
Figura 23. Intensidad de campo eléctrico V/m.....	71
Figura 24. Regiones de campo	72
Figura 25. Calibración de analizador de redes.....	77

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Valores de potencia sin obstáculo H vs. V	45
Gráfica 2. Valores de potencia con obstáculo H vs. V.....	46
Gráfica 3. Potencias obtenidas en posición horizontal.....	47
Gráfica 4. Potencias obtenidas en posición vertical	48
Gráfica 5. Comparativa de diferentes capas en textiles más utilizados en prendas de vestir en base a la potencia de referencia	52
Gráfica 6. Comparativa de diferentes capas en textiles compuestos en base a la potencia de referencia	54
Gráfica 7. Comparativa de distintos tipos de textiles	56
Gráfica 8. Comparativa de diferentes capas de algodón	82
Gráfica 9. Comparativa de diferentes capas de poliéster	83
Gráfica 10. Comparativa de diferentes capas de plástico.....	83
Gráfica 11. Comparativa de diferentes capas de lino	84
Gráfica 12. Comparativa de diferentes capas de nylon	84
Gráfica 13. Comparativa de distintas capas de 82%Poliéster18%Elástico	85
Gráfica 14. Comparativa de distintas capas de 50%Poliéster50%Algodón.....	85
Gráfica 15. Comparativa de distintas capas de 65%Poliéster35%Algodón.....	86

Índice de Acrónimos

Acrónimo	Significado
OMS	Organización Mundial de la Salud
CEM	Campos Electromagnéticos
RF	Radiofrecuencia
EM	Electromagnética
RNI	Radiación No Ionizante
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
QoS	Calidad y Servicio
WPANs	Wireless Personal Area Networks
ISM Band	Industrial, Scientific and Medical Band
FH	Frequency Hopping
SAR	Specific Absorption Rate
FCC	Federal Communications Commission
PAN	Personal Area Network
TIC	Technology of Informatic and Communication
SIG	Special Interest Group
L2CAP	Logical Link Control Adaptation Protocol
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
SCO	Synchronous Connected Oriented
ACL	Asynchronous Connected Less
BLE	Bluetooth Low Energy
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
WLAN	Wireless Lan Area Network
BCWC	Body-Centric Wireless Communications
EHS	Hipersensibilidad Electromagnética
VNA	Vector Network Analyzer
LOS	Line Of Sight
CNAF	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente

Agradecer al apoyo de mi familia y amigos que han estado apoyándome en todo momento y dándome ánimos en los momentos más duros.

Por otra parte, y no menos importante mostrarle mi más sincero agradecimiento a mi tutor David Guerra Pereda por todo el apoyo y ayuda recibido durante la realización de este proyecto, mi estancia en el grupo de investigación y desde luego como alumno, gracias por tu paciencia y dedicación.

MEMORIA

2 INTRODUCCIÓN

En los últimos 10 años las tecnologías inalámbricas han ido creciendo y ganándole terreno a las tecnologías de comunicaciones que emplean el cable como medio de transmisión de información. Un ejemplo sencillo, en los hogares el teléfono fijo se está viendo desplazado por el teléfono inalámbrico. Cada día que pasa, las personas tienen más necesidad de estar conectadas constantemente con el mundo que les rodea y, como las personas están en continuo movimiento, las tecnologías cableadas no pueden satisfacer estas necesidades.

El tamaño y la autonomía de los dispositivos también son muy importantes y no hay que perder de vista el coste final del producto. Las diferentes tecnologías inalámbricas se han ido adaptando a estas demandas. El crecimiento ha sido exponencial, la investigación y el desarrollo ha conllevado una disminución del coste de producción facilitando el acceso final de los usuarios.

Sin embargo, el constante aumento de las tecnologías inalámbricas y la reputación de algunas de sus instalaciones, como las antenas en las estaciones base de telefonía móvil, han provocado una alarma social entre la ciudadanía ante la duda de posibles efectos nocivos sobre la salud debidos a estas tecnologías.

Ante la inquietud de gobiernos y ciudadanos, en 1996 la **Organización Mundial de la Salud (OMS)** constituyó el denominado Proyecto Internacional de Campos Electromagnéticos para evaluar con datos científicos los posibles riesgos sobre la salud de la contaminación electromagnética y, más concretamente de los **Campos electromagnéticos (CEM)** de **radiofrecuencia (RF)**. Desde entonces, la Organización Mundial de la Salud (OMS) promueve y divulga sus investigaciones sobre los campos de radiofrecuencia (RF) y salud para remediar la falta de conocimiento al respecto [1]. Sin embargo, existen estudios que aseguran que el uso de teléfonos móviles no provoca riesgos en la salud [2]. Existe, por tanto una necesidad de mayor análisis de la exposición a campos electromagnéticos (CEM).

En el análisis de la exposición **electromagnética (EM)**, en general, en función de la frecuencia, existen dos tipos de radiaciones que es necesario discernir:

- **Radiaciones ionizantes:** Aquellas radiaciones que pueden separar electrones de los átomos y las moléculas, produciendo cambios en la estructura de la materia (Rayos X). los potenciales efectos asociados a este tipo de radiación son:
 - Deposición de energía, Efectos sobre el ADN, genes, cromosomas, supervivencia celular y tejidos [3].
- **Radiaciones no ionizantes (RNI):** Aquellas radiaciones que no transfieren suficiente energía como para romper o cambiar la estructura de la materia. Sus potenciales efectos son térmicos, es decir, de aumento de temperatura y también efectos sobre el sistema nervioso y cardiovascular a frecuencias muy bajas [4]. Este el tipo de radiación asociada a las frecuencias utilizadas para la comunicación inalámbrica, Wi-Fi o Bluetooth.

Se puede apreciar los límites e inicios de cada una de ellas en la siguiente figura:



Figura 1. Radiación no ionizante e Ionizante

Cada país establece sus propias normas nacionales relativas sobre exposición a campos electromagnéticos (CEM). La mayoría de estas normas nacionales se basan en las recomendaciones de la **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)**. Esta organización no gubernamental, reconocida formalmente por la Organización Mundial de la Salud (OMS), evalúa los resultados de estudios científicos realizados en todo el mundo.

La normativa de protección radioeléctrica utilizada dentro de España es el **Real Decreto 1066/2001** [5] basado en la **Recomendación Europea 1999/519/CE** relativa a la exposición del público en general a los campos electromagnéticos (CEM) (0 Hz a 300 GHz). Es un reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones Electromagnética (EM) y medidas de protección sanitaria frente a dichas emisiones.

Este decreto toma por referencia los criterios de protección sanitaria frente a los campos electromagnéticos (CEM) que están establecidos en la Recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea, el 12 de julio de 1999, relativa a la exposición del público en general a dichos campos.

La normativa define estos criterios por medio de dos tipos de valores límites:

- **Restricciones básicas:** Según la frecuencia, se expresan en términos de inducción magnética (μT), densidad de corriente (A/m^2), densidad de potencia (W/m^2) o tasa de absorción específica de energía (W/kg). Estas magnitudes hacen referencia directa a los efectos térmicos que se pueden observar en los tejidos orgánicos, pero son difíciles de medir.
- **Niveles de referencia:** A efectos prácticos, y para facilitar las mediciones, se dan niveles de intensidad de campo eléctrico (V/m) o magnético (A/m), inducción magnética o densidad de flujo de potencia, que son magnitudes sencillas de medir en el aire mediante antenas, analizadores y la metodología adecuada.

El cumplimiento de los niveles de referencia garantiza el de las restricciones básicas y no deberán ser sobrepasados.

En el presente trabajo, se ha realizado un estudio sobre las características de la **interfaz física de radiocomunicaciones Bluetooth** centrado en los posibles efectos de contaminación radioeléctrica. Estudiando su contribución en la exposición electromagnética a la que los seres humanos están sometidos, especialmente aquellos usuarios de esta tecnología.

Bluetooth, es una tecnología inalámbrica diseñada para cumplir unos estándares de **Calidad Y Servicio (QoS)**, del cual se ha estudiado si los niveles de señal radioeléctrica necesarios para cumplir dichos estándares de QoS verifican los niveles de referencia.

El ámbito de uso de Bluetooth incluye sobre todo, las denominadas **Wireless Personal Area Networks (WPANs)**. Estas redes se encuentran normalmente constituidas por distintos dispositivos portados por la persona usuaria. Por ello, la ropa puede constituir una barrera en el canal de propagación de la señal radioeléctrica de la comunicación en las redes Wireless Personal Area Networks (WPANs).

Por tanto, el estudio se ha basado en encontrar una magnitud de referencia para cuantificar la contribución radioeléctrica de Bluetooth a los niveles de exposición electromagnética (EM) a los que se ven expuestos los seres humanos, teniendo en cuenta el apantallamiento ofrecido gracias a los diferentes tejidos de las prendas de vestir habituales.

3 CONTEXTO

El estudio realizado se basa en medidas de exposición electromagnética sobre el sistema Bluetooth para determinar si dicha exposición verifica o no los niveles de referencia que garantizan que no sean perjudicial para la salud.

Antes de comenzar, es necesario conocer en primer lugar en qué consiste y cómo funciona el sistema Bluetooth, prestando mayor importancia a las potencias utilizadas por el interfaz radioeléctrico.

3.1 Introducción Al Sistema Bluetooth

Bluetooth es una tecnología pensada para ser utilizada en Wireless Personal Area Networks (WPANs). Al sistema también se lo conoce como **IEEE 802.15.1** y permite conectar entre sí todo tipo de dispositivos electrónicos (teléfonos, ordenadores, impresoras, faxes, etc.) situados dentro de un radio limitado de 10 metros (ampliable a 100, aunque con mayor distorsión).

Para poder operar en todo el mundo, esta tecnología no requiere licencia de emisión, es decir, se puede operar sin licencia independientemente del lugar en el cual nos encontremos. Este requisito, únicamente se puede conseguir a través de la **banda Industrial, Scientific and Medical (ISM Band)** con restricciones únicamente en determinados países (Francia, España y Japón). Sus rangos frecuenciales de trabajo son:

- 902 - 928 MHz
- 2.4 – 2.4835 GHz
- 5.725 – 5.850 GHz

Debido a las características de esta banda, el sistema Bluetooth deberá estar preparado para evitar las múltiples interferencias que se pudieran producir. Éstas pueden ser evitadas utilizando un sistema que busque una parte inutilizada del espectro o un sistema de salto en frecuencia (**Frequency Hopping "FH"**).

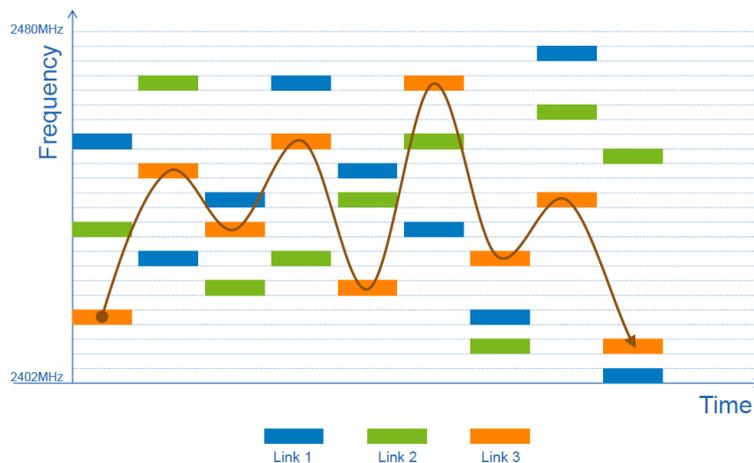


Figura 2. Ejemplo de Frequency Hopping

Como se observa en la figura anterior, el salto de frecuencia proporciona un método robusto para mantener una conexión en presencia de interferencia o de muchos otros dispositivos en el rango de radiocomunicación.

El sistema Bluetooth suele utilizar este método debido a que ésta tecnología puede ser integrada en equipos de baja potencia y bajo coste. Este sistema divide la banda de frecuencia en varios canales, donde, los transceptores (transmisor/receptor), durante la conexión van cambiando de un canal a otro de manera pseudo-aleatoria. Con esto se consigue que el ancho de banda instantáneo empleado sea muy pequeño optimizando el uso del espectro.

Por otra parte, el sistema ofrece un modo de funcionamiento de ahorro de energía o modo de bajo consumo cuya función es regular el tráfico para que este disminuya y el consumo de energía no se “dispare”. La gran ventaja de este modo de bajo consumo se aprecia en periféricos de pequeño tamaño, ya que si estos se encontrasen expuestos a un largo periodo de tráfico elevado podrían recalentarse y sufrir pérdidas de información.

Las ventajas de la tecnología Bluetooth son varias: es universal ya que es ampliamente utilizado en todos los países y por casi todos los sectores de la población, de utilización sencilla debido a que cualquier persona que no tenga conocimiento alguno acerca de esta tecnología, puede ser capaz de utilizarla, además es gratuito e inalámbrico y su control permite mantener información privada, con el fin de hacer una transferencia o permitir a alguien acceder a los archivos en el dispositivo.

Sin embargo, como todo en la vida también tiene sus desventajas asociadas, la calidad y continuidad de la señal puede tener problemas que pueden provenir de las interferencias, del equipo y del entorno, al utilizar una banda de frecuencias Scientific and Medical (ISM Band) de acceso “universal”. Por otra parte, el uso de batería es mayor si se deja activa la comunicación.

Por último, tiene un limitado radio de funcionamiento lo que implica que a partir de una distancia no hay garantías de transmisión adecuada de datos.

3.2 Bluetooth Y La Salud

Actualmente se encuentra demostrado que los campos electromagnéticos (CEM) de alta intensidad son capaces de provocar efectos dañinos sobre la salud a corto y medio plazo [6]. Los efectos producidos dependen de la intensidad y de la frecuencia de la señal electromagnética (EM).

A la hora de hablar de exposición electromagnética (EM) es necesario diferenciar, como se ha comentado anteriormente entre dos tipos de radiaciones, las cuales son las ionizantes y las no ionizantes (RNI).

La radiación ionizante ($3 \times 10^{15} \text{ Hz} - 3 \times 10^{24} \text{ Hz}$) está presente en todas partes. Los isótopos radiactivos que se originan de forma natural entran y permanecen en todos los seres vivos. Es inevitable. De hecho, todas las especies de este planeta han evolucionado en presencia de la radiación ionizante.

Aunque los seres humanos expuestos a dosis pequeñas de radiación pueden no presentar de inmediato ningún efecto biológico aparente, no hay duda de que la radiación ionizante, cuando se administra en cantidades suficientes, puede causar daño.

Si bien la radiación ionizante puede ser perjudicial, también tiene muchas aplicaciones beneficiosas. En medicina, los rayos X permiten obtener radiografías para el diagnóstico de lesiones y enfermedades internas.

La radiación no ionizante (RNI) ($0 \text{ Hz} - 3 \times 10^{15} \text{ Hz}$) está formada por campos eléctricos y magnéticos distinguibles por su frecuencia de trabajo. La exposición a estos campos se produce en todos los ámbitos de la sociedad: en el hogar, en el trabajo, en las escuelas y por el funcionamiento de medios de transporte de propulsión eléctrica. Allí donde hay conductores eléctricos, motores eléctricos y equipo electrónico, se crean campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia.

La radiación de radiofrecuencia (RF, frecuencias menores a 3 GHz), energía electromagnética y microondas (frecuencias entre 3 GHz-300 GHz) se utiliza en diversas aplicaciones en la industria, comercio, medicina e investigación, así como en el hogar.

En la gama de frecuencia de 3kHz a 300GHz encontramos aplicaciones muy conocidas tales como la radiodifusión sonora y la televisión, comunicaciones (telefonía de larga distancia, telefonía móvil, radiocomunicación), radar, etc...

Los campos electromagnéticos (CEM) [6] de las radiaciones no ionizantes (RNI), presentan distintas características en función de la frecuencia. En consecuencia, vienen caracterizados por distintos tipos de restricciones básicas:

- **Entre 0 y 1 Hz** se proporcionan restricciones básicas de la inducción magnética para campos magnéticos estáticos (0 Hz) y de la densidad de corriente para campos variables en el tiempo de 1 Hz, con el fin de prevenir los efectos sobre el sistema cardiovascular y el sistema nervioso central.
- **Entre 1 Hz y 10 MHz** se proporcionan restricciones básicas de la densidad de corriente para prevenir los efectos sobre las funciones del sistema nervioso.
- **Entre 100 kHz y 10 GHz** se proporcionan restricciones básicas del **Specific Absorption Rate (SAR)** para prevenir la fatiga calorífica de cuerpo entero y un calentamiento local excesivo de los tejidos.
- **Entre 10 GHz y 300 GHz** se proporcionan restricciones básicas de la densidad de potencia, con el fin de prevenir el calentamiento de los tejidos en la superficie corporal o cerca de ella.

Concretamente, el caso de Bluetooth, nos encontramos entre las frecuencias de 100 kHz-10 GHz, es decir, entre las radiaciones no ionizantes, donde el campos electromagnéticos (CEM) es capaz de penetrar en los tejidos [5] vivos y de generar calor debido a la absorción de la energía por parte de los mismos. Esto es conocido como efecto térmico.

La energía depositada en el tejido depende de la potencia de la radiación incidente y del tipo de tejido. La profundidad de penetración de estos campos es mayor cuanto menor sea su frecuencia. En cuanto a las magnitudes que permiten cuantificar esta radiación, la restricción básica impuesta se basa en el Specific Absorption Rate (SAR). Esta magnitud nos ofrece información sobre la energía que puede ser absorbida por un tejido. La evidencia experimental indica que exposiciones de 30 minutos a campos electromagnéticos (CEM) con Specific Absorption Rate (SAR) de aproximadamente 4 W/kg de tejido expuesto, pueden provocar en humanos en reposo incrementos de temperatura iguales o cercanos a 1 °C [6] que se consideran perjudiciales para la salud.

El Specific Absorption Rate (SAR) es la magnitud empleada por los organismos de regulación gubernamental de muchos países para certificar que los teléfonos móviles actuales cumplen la norma al estar utilizándolos en la región de campo cercano. En Estados Unidos, la **Federal Communications Commission (FCC)** ha impuesto un límite SAR de 1.6 W/kg, promediado sobre un volumen de 1 gramo de tejido, para la cabeza, mientras que en el continente Europeo, el límite es de 2 W/kg, en promedio de un volumen de 10 gramos de tejido corporal.

A nivel Europeo se deben seguir las directrices del International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) establecidas en la Recomendación Europea 1999/519/CE en cuanto a este y otros límites de exposición.

El objetivo principal y sobre todo fundamental es proteger de un calentamiento excesivo, evitando el efecto indeseado de aumentar 1 °C la temperatura de los tejidos orgánicos afectados.

La medición de las restricciones básicas es costosa y complicada, ya que si se quisiese medir el Specific Absorption Rate (SAR) sería necesario la colocación de una sonda en el interior del tejido bajo prueba, lo cual impide su medida in-vivo. Hoy en día, la mejor manera de medir este tipo de parámetros es a través de pruebas en phantoms rellenos de líquidos que simulan un cuerpo humano introduciendo una sonda en ellos.

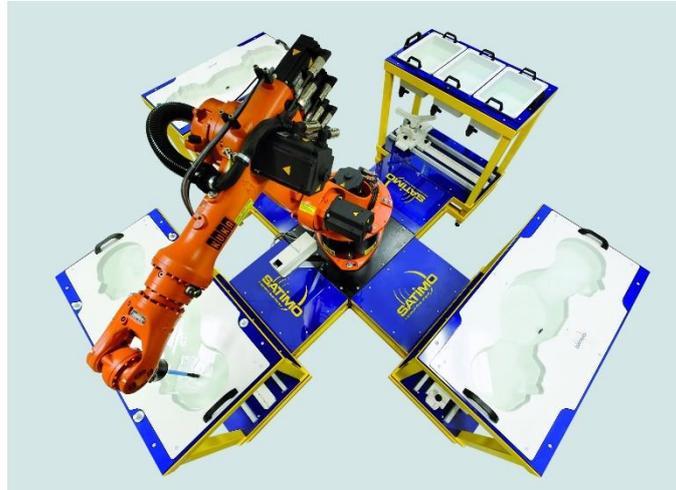


Figura 3. Phantoms simuladores para cálculo de SAR

Por ello, se definen los niveles de referencia, es decir, valores de campo eléctrico, campo magnético y densidad de potencia que pueden medirse de manera más sencilla en el aire y cuyos límites aseguran el cumplimiento de las restricciones básicas.

Sin embargo, las magnitudes de los niveles de referencia sólo pueden medirse de manera correcta en la región de campo lejano, es decir, a una distancia mínima de aproximadamente tres veces la longitud de onda de la frecuencia bajo análisis [7-8]. Esto presenta un problema para la caracterización de dispositivos que se pueden emplear a distancias menores, como ocurre con los teléfonos móviles.

Tabla 1. Restricciones Básicas y Niveles de Referencia Bluetooth

	Restricciones Básicas		Nivel de Referencia		Niveles de exposición máximos medidos en la población	
	SAR (cuerpo entero) (W/kg)	SAR (cabeza tronco) (W/kg)	Intensidad campo eléctrico (V/m)	Densidad de potencia (W/m^2)	SAR (cuerpo entero) (W/kg)	Intensidad campo eléctrico (V/m)
2.4 GHz	0.08	2	61	10	0.01-0.4	(a 20 cm) 0.4-3

Si observamos la tabla anterior, podemos destacar que la intensidad de campo eléctrico menor de 61 V/m garantiza la ausencia de efectos térmicos sobre la salud. En caso de registrarse valores de campo eléctrico elevados, la presencia de obstáculos o elementos intermedios en el canal de propagación puede provocar una disminución de los niveles. Esto implica una ventaja desde el punto de vista de la exposición electromagnética (EM) pero un inconveniente para el funcionamiento de un sistema.

Centrándonos en el sistema Bluetooth, la mayor aplicación y por la cual éste ha conseguido nacer en el mercado son las **Personal Area Networks (PANs)**, donde los obstáculos o elementos intermedios en el canal de propagación vienen determinados en la mayoría de los casos por la ropa de la persona usuaria del sistema. Por tanto, resulta de gran interés analizar cómo los diferentes tipos de tejido textil pueden tener efecto sobre la intensidad de la señal de radiofrecuencia (RF) empleada en el sistema Bluetooth.

Como conclusión, en cuanto al uso masivo y crecimiento exponencial de los teléfonos móviles cabe decir que el rápido desarrollo y la extensión del uso de los mismos, como un nuevo elemento que forma parte de nuestra vida cotidiana, es hoy un hecho incuestionable. Pero la puesta en uso de manera excesiva de este medio de comunicación con indudables ventajas sociales, no se ha realizado con los debidos controles sobre los efectos que la exposición a RF pueda tener sobre los tejidos biológicos. Debido a que todavía no se comprende bien su mecanismo de acción sobre los organismos vivos no se puede establecer de forma concluyente sus efectos sobre la salud. Desde hace ya bastantes años numerosos organismos internacionales han establecido programas de investigación e indicaciones sobre su uso que limitan de forma notable las consecuencias. Aunque estos límites tan solo han sido establecidos sobre los llamados efectos térmicos, la exactitud en la cuantificación de la exposición electromagnética (EM) debida a tecnologías como Bluetooth sigue siendo clave a la hora de determinar el alcance de sus efectos.

4 OBJETIVOS

A continuación se exponen los objetivos de Trabajo Fin de Grado, a los que se pretende llegar una vez aplicada la metodología adecuada a través de las medidas pertinentes y análisis de las mismas con rigurosidad.

4.1 *Objetivo Principal*

El objetivo principal de este trabajo consiste en realizar un análisis minucioso de las emisiones electromagnéticas (EM) debidas a la interfaz radioeléctrica de la tecnología Bluetooth en redes Wireless Personal Area Networks (WPANs). Dentro del análisis, es necesario resaltar la influencia de los tejidos textiles presentes en el canal de propagación debido a su efecto de apantallamiento frente a la exposición electromagnética (EM), así como el efecto causado sobre la calidad del servicio (QoS) de la tecnología Bluetooth.

Para poder conseguir dicho objetivo principal es necesario cumplir unos requisitos previos:

1) *Diferenciar la señal Bluetooth en relación a la presencia de otras señales que se encuentren en la misma banda frecuencial:*

A través de la evaluación de los datos medidos de la señal Bluetooth en presencia de señal WiFi, ya que esta última trabaja en su mismo rango frecuencial, se podrá observar si se puede realmente evadir o no la componente frecuencial debida a la señal Wi-Fi, es decir, observaremos si la señal Bluetooth sufre algún tipo de interferencia en la banda frecuencial de trabajo.

2) *Evaluación de posibles fallos en la comunicación:*

Debido a que la comunicación entre dispositivos puede fallar, se analizará si este fallo es debido al apantallamiento al cual la estamos exponiendo, es decir, si se encuentra directamente relacionado con que la potencia transmitida en este sistema es muy pequeña.

5 BENEFICIOS

La realización de este proyecto dará lugar a importantes beneficios. Es debido a estos beneficios por los que se ha observado la necesidad de la ejecución del presente trabajo.

5.1 Beneficios Técnicos

Gracias al estudio realizado en el presente trabajo sobre las emisiones electromagnéticas (EM) debidas a la interfaz radioeléctrica del sistema Bluetooth, se va a disponer de una metodología adecuada para la toma de medidas de dicha exposición.

A través del estudio realizado se obtendrá un mayor conocimiento del funcionamiento de las transmisiones Bluetooth según las circunstancias a las que se tenga que enfrentar la señal de propagación en función de las condiciones existentes en el canal de transmisión.

Por tanto, medir la exposición de las radiaciones electromagnética (EM) de este sistema (en sus entornos de transmisión) va a ofrecer experiencia tanto metodológica como conceptual del sistema propiamente dicho.

5.2 Beneficios Sociales

Los beneficios sociales son destacables, puesto que existe mucho desconocimiento en cuanto a tecnologías inalámbricas (sobre todo en cuanto a Bluetooth) y los efectos que conlleva su utilización.

Por esto, el hecho de que los usuarios de la tecnología Bluetooth dispongan de la información necesaria sobre la exposición electromagnética (EM) que pueden generar los dispositivos cercanos a ellos ayudará a que se emplee esta tecnología con mayor confianza y se explote todo su potencial.

Con la metodología de este trabajo, cualquier usuario con una estrecha relación con la tecnología nombrada, podrá disponer de un sistema de medida fiable de la exposición electromagnética (EM) al que está siendo sometido, para poder realmente comprobar su seguridad ante esta.

5.3 Beneficios Económicos

Existe una relación clara entre los beneficios sociales y económicos, ya que si los usuarios de la tecnología Bluetooth conocen y pueden comprobar la exposición electromagnética (EM) a la que se encuentran sometidos de manera fiable, al mismo tiempo se encontrarán comprobando la calidad del sistema.

Por otra parte, comprobando dicha calidad pueden “observar” que si es buena y fiable, estarán más dispuestos a la utilización de este sistema favoreciendo su expansión.

Esto implica poder realizar más investigaciones para su desarrollo, mejora y obtener nuevas versiones aún mejores con una exposición electromagnética (EM) más controlada.

6 ESTADO DEL ARTE

6.1 Introducción

En el presente apartado nos centraremos en describir el sistema Bluetooth únicamente en su capa física, más concretamente la interfaz física, ya que es la capa que influye para el presente trabajo. Por otra parte, veremos la evolución tanto del estándar Bluetooth en cuanto a versiones del mismo. Seguidamente hemos de comprender el espectro frecuencial asignado en el cual se realizan las comunicaciones Bluetooth y cómo es la propagación en este espectro.

Finalmente, se describirá cómo se ha de medir en la banda de frecuencias de trabajo del sistema en base a un artículo realizado en esta misma escuela (Escuela de Ingeniería de Bilbao) pero no sólo eso, sino que también basaremos las medidas a realizar en otro artículo relacionado con medidas sobre diferentes materiales textiles y el cual nos ofrece información relevante para el presente trabajo.

6.2 Introducción Al Bluetooth

Bluetooth es una tecnología que surgió a principios de 1998, de la colaboración de varias empresas líderes de la industria de las **Technology of Informatic and Communication (TIC)** como son: Ericsson, Nokia, Intel, IBM, Toshiba, Motorola y, más tarde, 3Com (Palm), que constituyeron el **Special Interest Group (SIG)**, al que actualmente ya pertenecen más de 1.600 empresas.[9-10]

Más allá de reemplazar los incómodos cables, la tecnología Bluetooth ofrece un puente hacia las redes de datos existentes, una interfaz con el exterior y un mecanismo para formar, en un momento dado, pequeños grupos de dispositivos conectados entre sí de forma privada fuera de cualquier estructura fija de red, las Wireless Personal Area Network (WPAN). La necesidad de intercambiar información ha sido siempre el punto de inicio de muchas tecnologías de telecomunicaciones. Las Wireless Personal Area Network (WPAN) brindan la posibilidad de interconectar dispositivos de manera sencilla, sin impactar en el consumo de energía y de manera rápida.

Esto es lo que ha popularizado en los dispositivos móviles a tecnologías como el sistema Bluetooth, el cual es un método para la comunicación que usa señales de radio de corto alcance a fin de eliminar los cables a la hora de interconectar equipos(ordenadores, laptops, móviles, tablets) y dispositivos en general.

6.2.1 Arquitectura De Red

Cada dispositivo Bluetooth está identificado por una dirección única de 48 bits. Todos los dispositivos Bluetooth tienen la capacidad de actuar en una red a modo de maestros (inicia la conexión y responsable de la sincronización) y esclavos (aceptan la conexión y se sincronizan). Cuando se habla de redes Bluetooth, se puede decir que existen dos topologías de red:

- Piconet: Red formada por un maestro y hasta un total de 7 esclavos.
- Scatternet: Red formada por un conjunto de piconets.

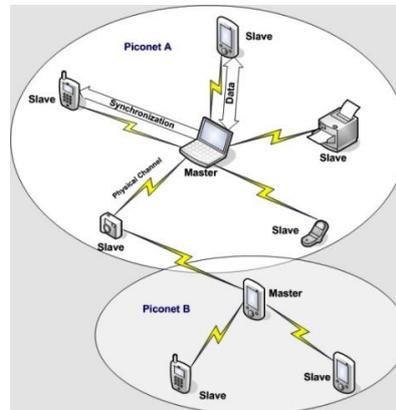


Figura 4. Ejemplo de Piconet y Scatternet

El modelo de red de una Piconet es bastante sencillo, existe un dispositivo maestro y los restantes serán esclavos. La función del dispositivo maestro abarca escoger el salto adecuado para mantener el enlace, controlar el tráfico del canal, reservar los slots para los archivos que son transmitidos, etc. Un dispositivo solo puede ser maestro en una Piconet, pero puede pertenecer a otras Piconet como esclavo. Todo dispositivo puede pertenecer a más de una Piconet [9].

6.2.2 Bluetooth Controller

La arquitectura Bluetooth puede ser dividida en las siguientes capas:

- Logical Link Control Adaptation Protocol (L2CAP): Suministra servicios de conexión de datos con y sin conexión para las capas superiores del protocolo. Ejecuta funciones de multiplexación, segmentación, control de flujo y de error y supervisión de grupo.
- Link Manager: Es la capa responsable para la codificación y decodificación de los paquetes Bluetooth del paquete de datos y parámetros relacionados con el canal físico, transporte lógico y enlace lógico.
- Base Band: Suministra el soporte para el link de radiofrecuencia (RF) en funciones como sincronización, salto de frecuencias y control de acceso al medio.
- Bluetooth Radio: Es la parte de la radiofrecuencia (RF) propiamente dicha.

Las 3 capas inferiores son normalmente implementadas en un Controlador Bluetooth (Bluetooth Controller). La interfaz entre este controlador y las capas superiores del protocolo fue estandarizada para garantizar la interoperabilidad. Esta interfaz es denominada Host Controller Interface (HCI).

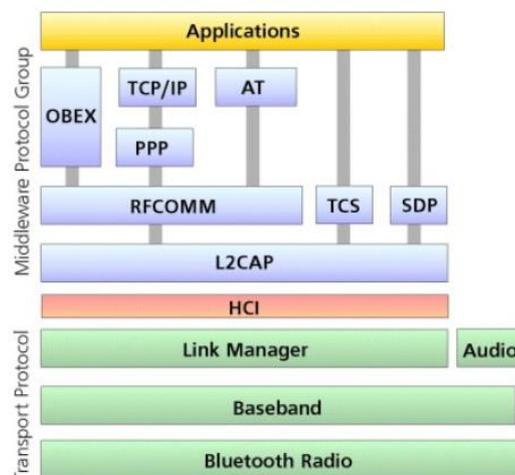


Figura 5. Bluetooth Controller.

6.2.2.1 Bluetooth Radio

Bluetooth opera en la banda de 2.4 GHz tanto en transmisión como en recepción. Se realiza **Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) o Frequency Hopping (FH)**, empezando en los 2.402 GHz y acabando en 2.48 GHz con un total de 40 canales de 2 MHz, dejando una banda de guarda de 2 MHz en la parte inferior de la banda y de 3.5 MHz en la superior, evitando así transmisiones fuera de banda.

$$f_{canal} = 2402 + 2 \cdot k \text{ (MHz)}, k = 0,1,2, \dots,39$$

Según la potencia de los dispositivos se distinguen tres clases:

Tabla 2. Clases de dispositivos Bluetooth

CLASE	POTENCIA MÁXIMA PERMITIDA		POTENCIA MINIMA PERMITIDA		DISTANCIA
CLASE 1	100 mW	20 dBm	1 mW	0 dBm	100 metros
CLASE 2	2.5 mW	4 dBm	0.25 mW	-6 dBm	10 metros
CLASE 3	1 mW	0 dBm	N/A	N/A	1 metros

6.2.2.2 Base Band

Este nivel permite el enlace físico entre unidades dentro de la Piconet. Además, se encarga del control de errores y el control de flujo. Existen dos tipos de enlaces físicos:

- **Synchronous Connected Oriented (SCO):** es un enlace punto a punto, simétrico entre maestro y esclavo de la Piconet. El maestro mantiene el enlace usando slots reservados en intervalos regulares. Al estar orientado a la conexión, este tipo de enlace se encarga del transporte de datos. Un maestro es capaz de soportar tres canales Synchronous Connected Oriented (SCO) simultáneos a una velocidad de 64 kbps.
- **Asynchronous Connected Less (ACL):** es un enlace punto a multipunto entre el maestro y todos los esclavos de la Piconet. La transmisión se realiza en los slots no reservados para enlaces Synchronous Connected Oriented (SCO), al no ser orientado a conexión puede que haya pérdida de paquetes y por lo tanto, retransmisiones.

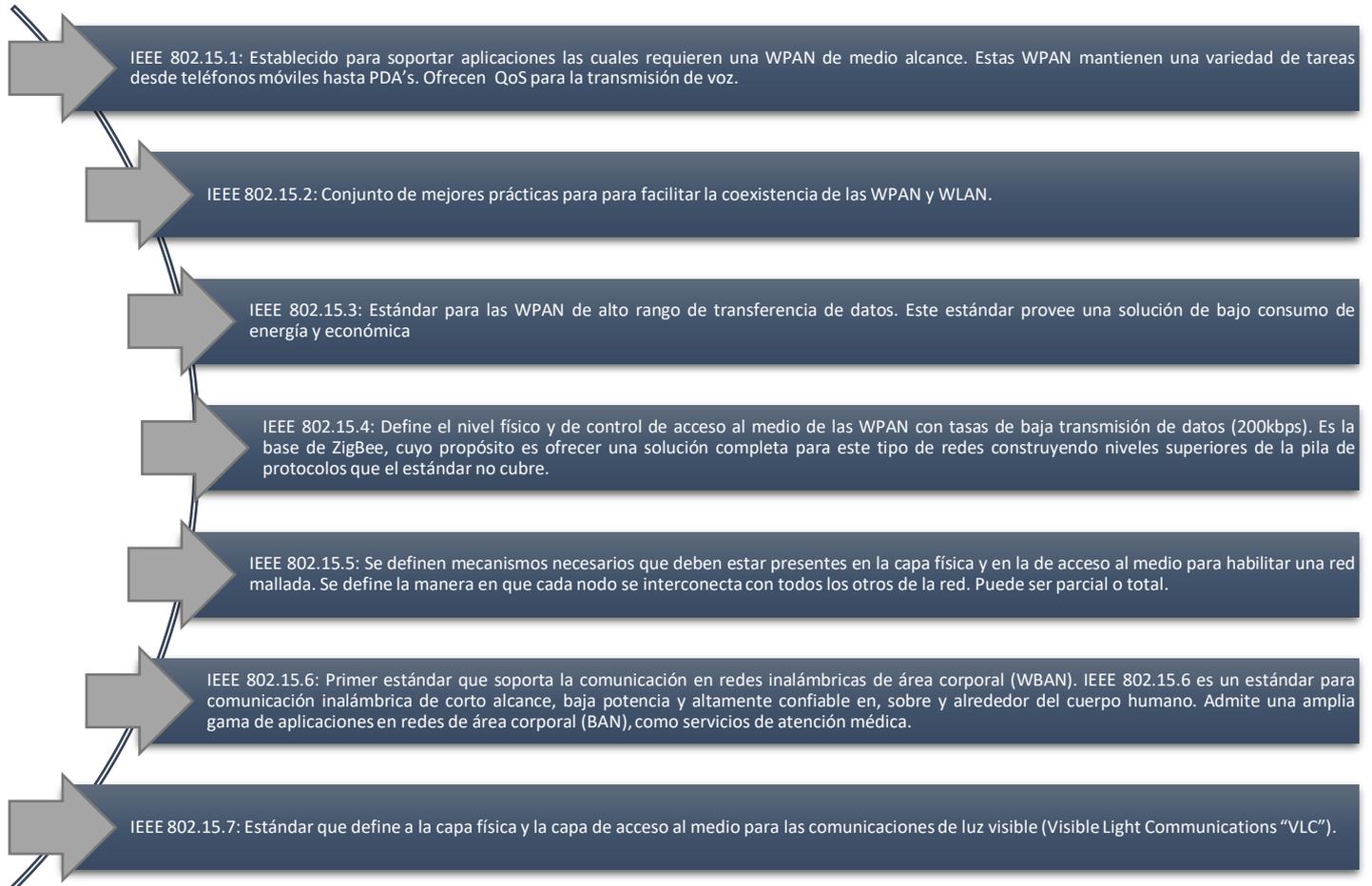
6.2.2.3 Link Manager

Responsable del establecimiento y finalización de las conexiones, así como de su autenticación en caso necesario. Además, realiza el control de tráfico y la planificación, junto con la gestión de consumo y supervisión del enlace.

6.3 Evolución Del Estándar Y Sus Versiones

6.3.1 Estándares Bluetooth

La finalidad del estándar 802.15 es proveer una plataforma para el desarrollo de dispositivos de bajo coste, corto alcance y bajo consumo de energía los cuales inalámbricamente se conectan al usuario. El estándar IEEE 802.15 está formado por siete estándares más. Ellos son [11]:



6.3.2 Evolución Del Bluetooth

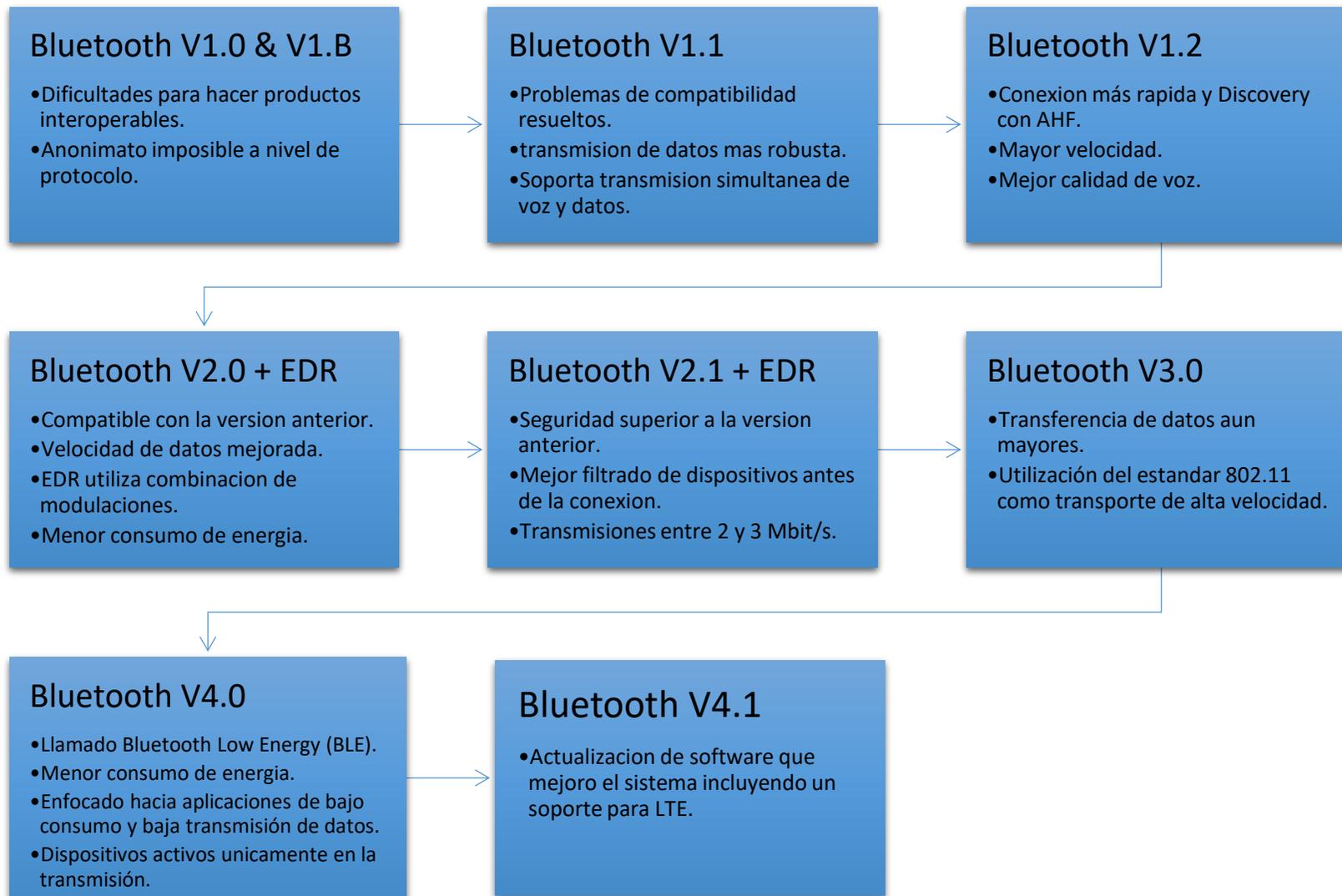


Figura 6. RoadMap Bluetooth

Tabla 3. Comparativa de versiones Bluetooth.

Versión Bluetooth Especificaciones	v1.0 & v1.B	v1.1	v1.2	v2.0 + EDR	v2.1 + EDR	v3.0	v4.0		v4.1	
							L.E	N.L.E	L.E	N.L.E
Velocidad de transmisión	720 kbit/s	720 kbit/s	0.7-1 Mbit/s	2.1 Mbit/s	2-3 Mbit/s	24Mbit/s	1Mbit/s	24Mbit/s	1Mbit/s	24Mbit/s
Compatibilidad hacia atrás	-	-	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Emparejado seguro	-	-	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Mejor resistencia a interferencias	-	-	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Rango de trabajo	10 metros	10 metros	10 metros	100 metros	100 metros	100 metros	100 metros		100 metros	
Mejora del emparejado	-	-	-	-	✓	✓	✓		✓	

NOTA:

L.E: Low Energy

N.L.E: No Low Energy

6.4 Espectro Asignado

Opera en la banda Scientific and Medical (ISM Band) de licencia libre de 2.4GHz a 2.48GHz, se definen 40 canales de 2MHz de ancho de banda por canal.

Existen dos tipos de canales:

- Los canales de anuncio:** Se utilizan para descubrimiento de dispositivos, transmisión de mensajes de broadcast y configuración de conexiones. Los dispositivos **Bluetooth Low Energy (BLE)** que operan en modo de anuncio transmiten periódicamente en tres canales (37, 38 y 39), que han sido asignados específicamente para minimizar la colisión con los canales de Wi-Fi que habitualmente son los más utilizados (1, 6 y 11) como se puede observar en la figura 7.
- Los canales de datos:** Se utilizan para las comunicaciones bidireccionales entre dispositivos conectados. Debido a que la banda Scientific and Medical (ISM Band) está abierta a cualquiera que desee utilizarla, el sistema Bluetooth está preparado para evitar las múltiples interferencias que se puedan producir con la técnica llamada Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS). Los sistemas con dicha tecnología dividen la banda de frecuencias en varios canales y, durante el transcurso de la comunicación, se produce una transición brusca (salto o hopping) de un canal a otro siguiendo la fórmula:

$$canal = (canal\ actual + salto) * mod\ 37$$

El valor del salto se comunica al establecer la conexión y es diferente por cada nueva conexión establecida. Esto hace que sea raro para más de un dispositivo transmitir en la misma frecuencia al mismo tiempo. Todos los canales utilizan una modulación **Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)** que permite reducir el pico de consumo.

En la siguiente figura se puede observar la coexistencia de las tecnologías Wi-Fi y Bluetooth en la banda comentada:

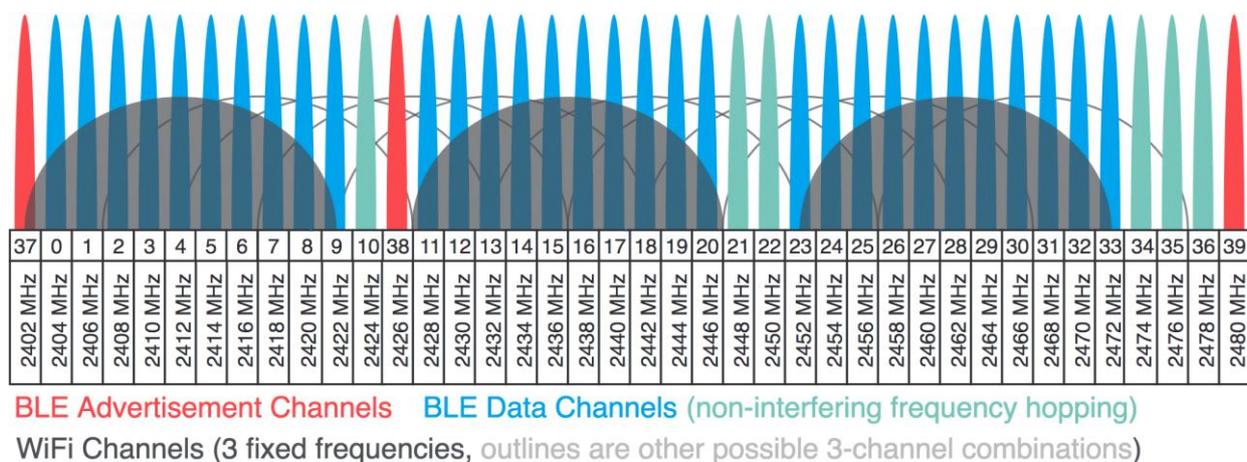


Figura 7. Coexistencia Wi-Fi & Bluetooth en 2.4GHz

6.5 Propagación En Interiores

Las medidas que se han realizado en este trabajo, únicamente se han hecho en interiores, es decir, son medidas ajustadas a una propagación electromagnética (EM) en interiores.

El termino propagación (en este campo) hace referencia a la comunicación existente entre un emisor y un receptor a través de ondas electromagnética (EM), es decir, a la manera en que la señal realiza el viaje por el medio de transmisión, dicho medio, en este caso es el aire. No obstante, dicha comunicación puede darse a través de una propagación en espacio libre es decir libre de obstáculos o no. Por tanto, es lógico analizar qué ocurriría en cada uno de dichos casos.

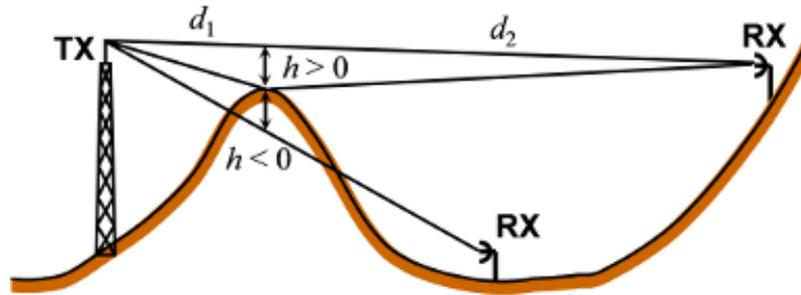


Figura 8. Visión directa vs Visión obstaculizada

6.5.1 Propagación En Espacio Libre

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, una propagación en espacio libre es una comunicación libre de obstáculos, en otras palabras, una comunicación entre emisor y receptor en visión directa.

Por tanto, las pérdidas existentes en la señal de comunicación se encuentran relacionada inversamente con la distancia entre ambos extremos ambos a través de la fórmula de FRIIS en campo lejano [12]. Además se han de tener en cuenta otros factores (reflexión, multitrayecto, etc.)

6.5.2 Propagación Con Obstáculos

Se ha comentado, que las medidas realizadas se han hecho en un entorno cerrado, en el cual existen multitud de obstáculos. Estos, afectan a la señal de determinada manera según cuál sea su origen:

- Objetos metálicos: reflejan las señales de radio, lo cual implica que reflejarán la señal y causarán desvanecimientos y atenuaciones.
- Madera, cristal, plástico y ladrillo, cierto porcentaje de señal penetra en dichos materiales, mientras que otro tanto por se refleja.
- Objetos con un alto grado de humedad absorben la mayor parte de la señal.
- En nuestro caso:
 - Textiles, los cuales se encuentran influenciados tanto por la temperatura ambiente como por la humedad existente en el instante de medida en el textil.

6.6 Metodología De Medida

En los últimos años, el crecimiento masivo de las comunicaciones en redes inalámbricas ha causado preocupación en la exposición a campos de radiofrecuencia (RF) en los seres humanos. Por esta razón, se ha incrementado la verificación del cumplimiento de las directrices internacionales en los sistemas de radiocomunicación. De hecho, los consumidores están cada vez más interesados en obtener información específica sobre los niveles de exposición debidos a **Wireless Lan Area Network (WLAN)**. Estas redes suelen encontrarse en interiores (hogares, escuelas u oficinas) y los transmisores están muy cerca de los usuarios.

Para la realización de medidas del presente trabajo hemos de conocer cómo se deben realizar medidas en la banda de frecuencias de trabajo del sistema Bluetooth, frecuencia que se ha comentado en el apartado [6.4 Espectro Asignado](#).

Teniendo en cuenta que las tecnologías, Bluetooth y Wi-Fi, emplean las mismas frecuencias (Banda ISM) y en ambas la señal es de naturaleza discontinua (a ráfagas), las metodologías de medida adecuadas para Wi-Fi, también lo son para Bluetooth.

6.6.1 Configuración Del Equipamiento De Medida

Las medidas del artículo [13] fueron realizadas en la Escuela de Ingenieros de Bilbao teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

Tabla 4. Condiciones de mediciones

Condiciones	Rango de frecuencias	Modo de trabajo
Controlado	Un canal	Ideal
	Un canal	Trafico
	Banda de 2.4GHz completa	Ideal
	Banda de 2.4 GHz completa	Trafico
No controlado	Un canal	Sin distinguir
	Banda de 2.4GHz completa	Sin distinguir

La medición de los niveles de exposición requiere el uso de alta resolución temporal y de frecuencia de los equipos International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), cumpliendo siempre con las normas de la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) [14]. Además, la configuración del equipo es un factor clave en este problema. De acuerdo con esto, un procedimiento de medición fue definido empíricamente con el fin de determinar la adecuada evaluación para la exposición WiFi.

Para este trabajo, el analizador de espectro EMI ESP13 de Rohde & Schwarz fue configurado para obtener la señal de un canal WiFi, así como en todo el banda de frecuencia WiFi. La configuración del mismo es la siguiente:

Tabla 5. Configuración del analizador de espectros

<i>Parámetros</i>	<i>Un canal</i>	<i>Banda de 2.4GHz completa</i>
<i>Frecuencia central</i>	2412MHz	2441.75MHz
<i>Span</i>	22MHz	84MHz
<i>Detector</i>	RMS	RMS
<i>Tiempo de barrido</i>	2.5ms	2.5ms
<i>Ancho de banda de resolución</i>	300kHz	1MHz
<i>Ancho de banda de video</i>	1MHz	3MHz
<i>Trace</i>	Clear/Write	Clear/Write

6.7 Medida Con Textiles

En los últimos años, las comunicaciones inalámbricas cercanas al cuerpo (**“Body-Centric Wireless Communications” BCWC**) han recibido gran interés debido a que en un futuro no muy lejano, los sistemas de comunicación podrán ser personalizados e integrados [15-16]. La integración de los mismos se encuentra en las proximidades del cuerpo humano con ropa, y por tanto, es crucial investigar si los textiles pueden tener un efecto significativo en canal de radiocomunicación en el cuerpo operando a 2.45 GHz.

Se han publicado muy pocos trabajos sobre la investigación del efecto de las prendas de vestir en un rango de frecuencias superiores a 60 GHz [17-18]. Sin embargo, ninguno de los estudios bibliográficos analiza el efecto de las prendas textiles para frecuencias más bajas, tales como 2.45 GHz.

6.7.1 Metodología De Medida En Textiles

Como ayuda al presente trabajo, se ha escogido de referencia un artículo [19], en el cual se analiza la influencia del textil en el canal de radiocomunicación en la banda de 2.45 GHz. el análisis del artículo se realizó en una cámara anecoica, ubicada en el Laboratorio de Hipersensibilidad Electromagnética (EHS), Politeknik Tuanku Syed Sirajuddin, Perlis, Malasia, utilizando un analizador de red vectorial portátil (Vector Network Analyzer “VNA”) y un par de antenas planares monopoles textiles omni-direccionales.



Figura 9. Localización de antenas Tx y Rx

Además se han utilizado dos cables coaxiales de 5 metros de baja pérdida para conectar las dos antenas al Vector Network Analyzer (VNA) con el fin de medir el parámetro S21. El tiempo de barrido del analizador es de 4.25ms con un tiempo de muestreo de 4.25ms.

La antena transmisora (Tx) fue montada en una ubicación fija en el cuerpo en la parte superior derecha del brazo derecho del cuerpo del sujeto. La antena receptora (Rx) se colocó en cuatro lugares diferentes en la parte superior del torso para el escenario Line-of-sight(LOS), es decir, pecho derecho, pecho izquierdo, cintura derecha y cintura izquierda. Otras tres localizaciones estaban en la parte posterior del cuerpo para el caso de Non-LOS, es decir, espalda derecha, espalda izquierda y brazo izquierdo.

La siguiente imagen ilustra dichas localizaciones:

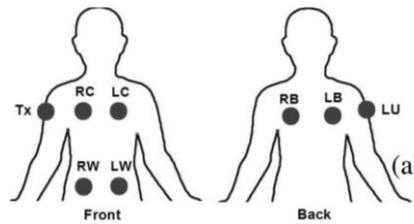


Figura 10. Medidas con textiles

En la siguiente tabla se resumen el grosor y constantes dieléctricas de los diferentes materiales sobre los cuales se realizaron las medidas:

Tabla 6. Grosor y constante dieléctrica de cuatro materiales diferentes

Material	Grosor (mm)	Constante dieléctrica (ϵ_r)
Seda	0.4	1.83
Algodón	0.64	1.76
Nylon	0.47	1.88
Poliéster	1.94	1.61

Las conclusiones obtenidas fueron:

- Se consiguió realizar una comparación de los valores de pérdida de trayecto entre los casos con y sin textiles.
 - El resultado mostró que la variación de la pérdida de trayecto para la Non- Line-of-sight(LOS) fue mayor que en el escenario de Line-of-sight(LOS), hasta el 13,9% para todos los materiales.
 - Los resultados también mostraron que la variación de la pérdida de trayecto dependía más de las propiedades dieléctricas así como del grosor del tejido en el caso de Line-of-sight(LOS) en comparación con el Non- Line-of-sight(LOS).

7 ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA LA METODOLOGÍA DE MEDIDAS

En el presente apartado se va a estudiar el procedimiento de medida de radiaciones no ionizantes, ya que, como se ha comentado en apartados anteriores, la radiación producida por una comunicación del sistema Bluetooth es de este estilo. Lo más importante a comentar en este punto es que no existe un procedimiento detallado de medidas en el sistema en el que nos encontramos que nos ofrezca una manera de obtener potencias y campo eléctrico. Sin embargo, la **Orden CTE/23/2002, de 11 de Enero en su Anexo IV** ofrece el “Procedimiento para la realización de medidas de niveles de emisión” en tres fases para radiaciones que se encuentren entre los 9kHz y 300GHz (Bluetooth (2.4GHz)) [20].

Los valores obtenidos se podrán comparar con los límites del **Real Decreto 1066/2001** [5]. Para plantear un procedimiento de medida lo primero que hay que considerar es el lugar donde se van a realizar las medidas y los instrumentos que vamos a utilizar para las mismas.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta los dispositivos utilizados en la transmisión y recepción de información, ya que la potencia de los mismos será crucial en el presente trabajo. Una vez seleccionados estos, debemos tener en cuenta que nos encontramos en un entorno en el que el sistema Bluetooth se encuentra en convivencia con la tecnología Wi-Fi y por tanto existe puntos de acceso Wi-Fi que pueden irrumpir en las medidas. Por tanto, a la hora de realizar las mediciones, primero se realizará una exploración de los diferentes emplazamientos de posible toma de medidas para asegurar la recepción de la señal Bluetooth y no del sistema Wi-Fi. En resumen, este apartado contará las alternativas de la metodología y del equipamiento hardware y software del cual se dispone para realizar las medidas pertinentes.

Para la selección de la alternativa más eficaz, se ha de tener en cuenta que lo que se pretende con este trabajo es ofrecer un análisis riguroso de emisiones radioeléctricas Bluetooth único e innovador.

El sistema de ponderación y valoración de diferentes criterios para la elección de los diferentes elementos necesarios para este trabajo como son los instrumentos de medida, antenas, dispositivos móviles, software, etc., se realizará en cada apartado ponderando de 1 a 9, realizando respectivamente en cada apartado el cálculo de los puntos que se obtiene dentro de los mismos.

7.1 Modelo De Dispositivos Y Emplazamiento

A día de hoy existe un sinfín de dispositivos que hacen uso de la tecnología Bluetooth como método de comunicación. Sin embargo, existen conceptos fundamentales a tener en cuenta. Una característica elemental es el concepto de movilidad, en la cual entran en juego los dispositivos portátiles (móviles, tablets, laptops) lo suficientemente pequeños para ser llevados cómodamente y poder ser utilizados en cualquier momento.

7.1.1 Dispositivos Portátiles

Para el presente trabajo, la principal característica a tener en cuenta en el dispositivo portátil es la disponibilidad de una conexión inalámbrica Bluetooth y para ello tenemos tres alternativas:

- Smartphone.
- Laptop.
- Tablet.

Teniendo en cuenta los criterios de movilidad, peso y manejo se opta por emplear el Smartphone como dispositivo principal para las medidas.

El Smartphone empleado ha sido un Asus ZenFone 2 Laser (ZE601KL), este dispositivo ha sido escogido debido a que cumple con las características necesarias de conectividad para que se pudiesen realizar las medidas necesarias de manera correcta.



Figura 11. Asus ZenFone 2 Laser

El Asus ZenFone 2 Laser (ZE601KL) es un Smartphone Android v6.0.1 Marshmallow con una pantalla IPS de 6 pulgadas, cámara de 13 megapixels, 3GB de RAM, 16GB de almacenamiento interno, procesador octa-core a 1.7GHz. En cuanto a la conectividad, el dispositivo dispone de Wi-Fi 802.11 b/g/n/ac, Bluetooth V4.1+EDR +A2DP, 3G/4G y GPS

7.1.2 Emplazamiento

El emplazamiento de medidas que se ha utilizado es el laboratorio ATLANTIS, el cual se encuentra situado en la planta 4ª del edificio B de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Para intentar que este trabajo resulte lo más asequible posible, se ha utilizado el material del laboratorio del grupo de Tratamiento de Señales y Radiocomunicaciones (TSR), ya que cuenta con la calidad suficiente para la realización del estudio detallado en este documento.

7.2 Equipamiento De Medida

7.2.1 Analizador De Espectros



Figura 12. Analizador de espectros ESI3 Test Receiver

En el laboratorio en el cual se han realizado las medidas (ATLANTIS de la Escuela de Ingeniería de Bilbao), los analizadores de espectro existentes y los cuales se han valorado, disponen de funciones más que necesarias para la ejecución de las medidas realizadas. Una de las características más importante (sino es la que más) es que todos ellos permiten poder trabajar en un rango de frecuencial lo suficientemente amplio (2.4 GHz-2.5 GHz) para asegurar que la señal radioeléctrica Bluetooth se va a poder detectar.

Los criterios de evaluación escogidos para la valoración de los distintos analizadores existentes en el laboratorio (ATLANTIS) de la Escuela de Ingeniería de Bilbao son:

- Dimensiones y peso: son criterios a tener en cuenta para la comodidad del desplazamiento en la recogida de medidas.
- Automatización de las medidas: Lo más importante a tener en cuenta de este criterio, es que la herramienta a utilizar tenga una programación sencilla de comprender, además de un posterior almacenamiento de las medidas realizadas en ficheros donde poder realizar un análisis de los resultados obtenidos.
- Sensibilidad en la banda de trabajo: La herramienta debe tener una sensibilidad adecuada para la posible ocasión de detección de potencias muy bajas teniendo en cuenta el sistema en el cual nos encontramos trabajando.

Los modelos de analizador de espectro disponibles para efectuar las medidas junto con sus características son:

Tabla 7. Modelos de Analizador de Espectro

Equipo	Dimensiones (mm)	Peso (kg)	Automatización	Sensibilidad (dBm)	Disponibilidad
Agilent E4402B	416 x 222 x 409	15.5	No	-120	Libre
R&S®ZVL6	408.8 x 158.1 x 465.3	7	Si	-140	Libre
R&S®ESPI3	412 x 197 x 417	10.5	Si	-155	Media

La valoración de los mismos se resume en la siguiente tabla:

Tabla 8. Criterio de elección de Analizador de Espectros

Criterio	Ponderación (%)	Agilent E4402B	R&S®ZVL6	R&S®ESPI3
Portabilidad	10	6	7	5
Automatización	65	1	5	8
Sensibilidad	25	5	7	8
Valoración	100	2.5	5.7	7.7

7.2.2 Analizador De Redes

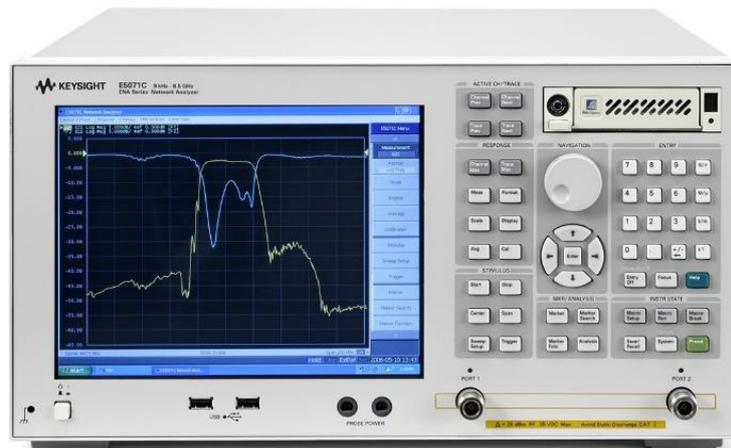


Figura 13. Analizador de redes KEYSIGHT ENA E5071-280

En el proyecto realizado, no solo se ha llevado a cabo con la utilización de un analizador de espectros, sino que también se ha utilizado un analizador de redes. Este analizador de redes (al igual que el de espectros) se encuentra en el laboratorio en el cual se han realizado las medidas (ATLANTIS) de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

Los criterios de evaluación escogidos para la valoración de los distintos analizadores existentes en el laboratorio (ATLANTIS) de la Escuela de Ingeniería de Bilbao son:

- Dimensiones y peso: son criterios a tener en cuenta para la comodidad del desplazamiento en la recogida de medidas.
- Rango dinámico: La herramienta debe tener un rango dinámico adecuado para que el equipo consiga discernir con claridad la señal a captar.

Los modelos de analizador de espectro disponibles para efectuar las medidas junto con sus características son:

Tabla 9. Modelos de Analizadores de Redes

Equipo	Dimensiones (mm)	Peso (kg)	Rango Dinámico (dBm)	Disponibilidad
ENA E5071C	426 x 222 x 472	18.2	153	Libre
R&S®ZVL6	408.8 x 158.1 x 465.3	7	145	Libre

La valoración de los mismos se resume en la siguiente tabla:

Tabla 10. Criterios de elección del Analizador de Redes

Criterio	Ponderación (%)	R&S®ZVL6	ENA E5071C
Portabilidad	30	7	5
Rango dinámico	70	6	8
Valoración	100	6.3	7.1

7.2.3 Antenas de medida

Además del equipamiento ya nombrado, también se han utilizado antenas adecuadas a la banda frecuencial en la que se han realizado las medidas. Dichas antenas han sido expresamente diseñadas y fabricada para el presente Trabajo Fin de Grado.

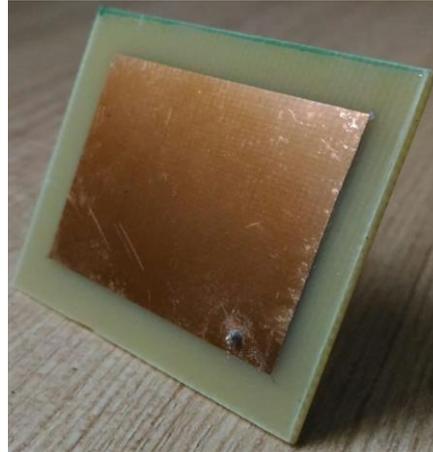


Figura 14. Antena microstrip

En cuanto a las características del presente diseño son:

Tabla 11. Características antena fabricada

Frecuencia de funcionamiento	2.4 GHZ-2.5 GHZ
Impedancia	50 Ω
Ganancia	3.73 dBi
Ancho de haz (3dB)	65°
S11	-10.5 dB

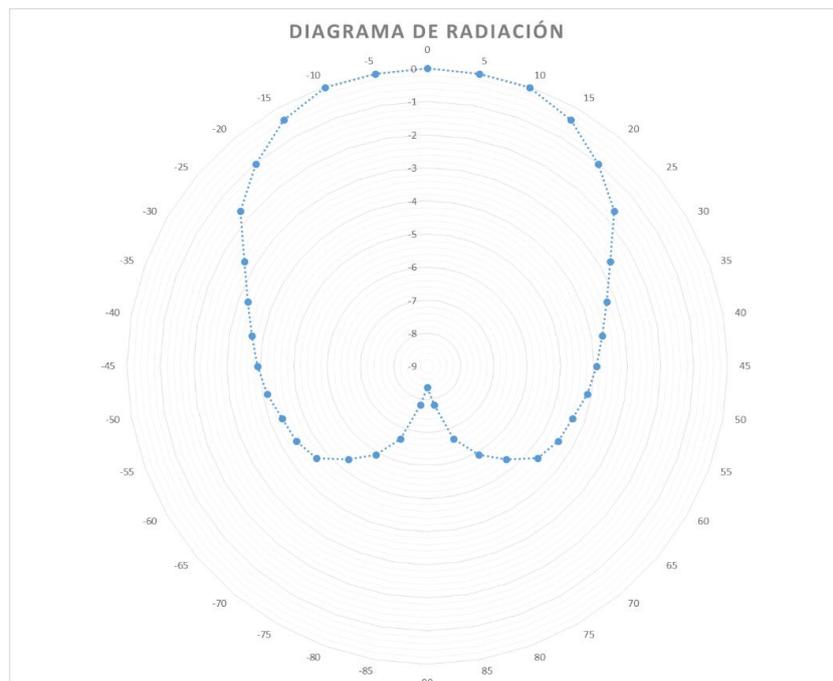


Figura 15. Diagrama de radiación de la antena fabricada

7.3 Medidas de caracterización

Para la caracterización del efecto apantallador de los textiles frente a la exposición electromagnética (EM) debida al sistema de comunicaciones Bluetooth, encontramos los siguientes tipos de escenarios de medidas del sistema:

- Caracterización en cámara anecoica.
- Caracterización del sistema en funcionamiento en situación real.
- Caracterización mediante analizador de redes.

Cada una de ellas tiene características propias, que se van a tratar en el presente apartado a fin de decidir cuál de ellas es la más correcta para el estudio en el que nos centramos.

7.3.1 Caracterización del sistema en Cámara Anecoica

El entorno para la realización de una caracterización ideal del sistema en funcionamiento se corresponde con un ambiente controlado (temperatura ambiente, humedad, interferencias electromagnéticas,...), para lo cual existen las denominadas cámaras anecoicas.

Las cámaras anecoicas son recintos cerrados que absorben la energía electromagnética que incide sobre sus paredes y consta de dos partes fundamentales: la **Jaula de Faraday** y los **materiales absorbentes** de ondas electromagnéticas. La **Jaula de Faraday** es una estructura que apantalla los campos incidentes exteriores, posibilitando que los **materiales absorbentes** se encarguen de absorber la energía que rebota en las paredes de la cámara para poder realizar medida con mayor precisión, generando así las características de propagación del espacio libre.



Figura 16. Cámara anecoica

Por tanto, las medidas de diagrama de radiación electromagnética, pueden realizarse empleando sistemas de posicionamiento y medida optimizados en cámaras anecoicas de manera que los resultados obtenidos sean de gran exactitud [21].

En el artículo [19] la investigación de la influencia de textiles en el canal de radiocomunicación en el cuerpo se realizó en una cámara anecoica, utilizando un analizador de red vectorial portátil (VNA) y un par de antenas omnidireccionales de monopolo textil planar. La antena transmisora (Tx) se montó sobre un soporte fijo en el cuerpo de la antena localizado en la parte superior derecha del brazo del cuerpo en cuestión.

Sin embargo, en condiciones reales de funcionamiento existen interferencias electromagnéticas y efectos de multitrayecto, por lo que en general caracterizar la radiación electromagnética en un ambiente controlado puede que no sirva para hacernos una idea de cómo va a ser fuera de dicho ambiente.

7.3.2 Caracterización del sistema en funcionamiento en situación real

Caracterizar el sistema en un laboratorio o en una cámara anecoica anula cualquier rayo reflejado y puede que haga que los usuarios se pregunten “¿Es suficiente esta caracterización para simular su funcionamiento real?”

Las mediciones del sistema en el escenario denominado de situación real se realizarán a través del envío de información en una Wireless Personal Area Network (WPAN). La toma de medidas, por tanto, se realiza a través de un analizador de espectros al cual ira ligada la antena para obtener en todo momento la potencia recibida por la misma y de esta manera poder caracterizar el sistema en pleno funcionamiento.

7.3.3 Caracterización mediante analizador de redes

Se plantea un tercer escenario de medidas posible; en este escenario se parametrizan directamente los textiles empleando para ello un analizador de redes. Para la correcta realización de este procedimiento de medidas se requiere del uso de un tipo específico de antenas adecuadas a la frecuencia de trabajo de Bluetooth en las que se tomarán las medidas.

Es de vital importancia comentar que en la disposición en la cual se han realizado las medidas, la distancia entre transmisor y receptor ha de corresponder a la región de campo lejano, teniendo en cuenta que la frecuencia a la que nos encontramos trabajando es de 2.45 GHz, su longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 12.2 \text{ cm}$$

Si comparamos la mayor dimensión de la antena (4.49 cm) con $\lambda/2$, observamos que es menor, por lo que el criterio de campo lejano ([ANEXO II](#)) que utilizaremos será:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2(4.49)^2}{12.2} = 3.29 \text{ cm}$$

Por lo que la distancia entre transmisor y receptor ha de ser mayor o igual a 3.29 cm de longitud. Haciendo uso de esta distribución y empleando antenas con lóbulos posteriores de valor despreciable, se puede asegurar la ausencia de efectos de multitrayecto en la caracterización de los textiles. Las posibles reflexiones que pudieran darse debidas a la dispersión de parte de la señal emitida serían mínimas y se percibirían por los lóbulos posteriores.

En otras palabras, la señal que es generada por el analizador de redes pasa prácticamente en su integridad desde una antena a la otra y a través del textil, obteniendo de este modo únicamente perdidas debidas al textil para poder así caracterizarlo.

7.3.4 *Discusión*

En los apartados anteriores hemos podido conocer tres tipos de caracterizaciones diferentes, sin embargo, todas ellas tienen como objetivo caracterizar las emisiones electromagnéticas (EM) del sistema de comunicaciones Bluetooth.

En primer lugar, se ha presentado la caracterización del sistema en cámara anecoica donde el ambiente en el que se encuentra la caracterización es controlado (libre de reflexiones y multitrayecto).

En segundo lugar, se encuentra la caracterización del sistema en funcionamiento en situación real, con pérdidas por multitrayecto y reflexión.

Las dos tipologías de caracterización anteriores son correctas, sin embargo, la primera (caracterización en cámara anecoica) no se corresponde con la realidad. Por otra parte, la segunda (caracterización del sistema en situación real) se realiza a través de toma de mediciones de una WPAN (Wireless Personal Area Network) en distintos regímenes de funcionamiento, lo cual sí nos sirve para caracterizar el funcionamiento del sistema. Esta caracterización ocupa el punto de partida para lograr el objetivo central de este Trabajo Fin De Grado: **caracterizar las pérdidas de inserción debidas a los distintos tipos de textiles en el canal de comunicaciones del sistema Bluetooth.**

En tercer lugar, se ha planteado una caracterización del efecto que causan los diferentes textiles en el canal de comunicaciones Bluetooth empleando para ello un analizador de redes. Una vez caracterizados los textiles, se puede agregar su efecto de apantallamiento o Electromagnetic Shielding Effectiveness (EMSE) a la caracterización del sistema Bluetooth en situación real y poder así realizar un análisis “completo” del sistema Bluetooth. Por tanto, a modo de resumen obtenemos:

Tabla 12. Tabla resumen de las diferentes caracterizaciones

	I. CARACTERIZACIÓN EN CÁMARA ANECOICA	II. CARACTERIZACIÓN EN SITUACIÓN REAL	III. CARACTERIZACIÓN CON ANALIZADOR DE REDES
Ventajas	Caracteriza una red real (WPAN) sin perturbaciones.	Caracterización que sí representa el canal de propagación real.	Caracterización del efecto de los textiles en el canal de propagación.
Desventajas	Caracterización que no representa el canal de propagación real.	Los efectos debidos al multitrayecto y a los textiles no se distinguen.	No se realiza una caracterización en una comunicación Bluetooth real.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y la tabla resumen de las diferentes caracterizaciones, podemos observar que todas ellas por separado no cumplen la función de poder caracterizar el canal de comunicaciones Bluetooth de manera completa. Sin embargo, si se combinan las caracterizaciones 2 y 3 sí se tiene una caracterización del efecto de los textiles en la comunicación Bluetooth.

8 DESCRIPCIÓN DE LA SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN

8.1 Caracterización en situación real de las emisiones electromagnéticas (EM) del sistema Bluetooth

El equipamiento para la realización de esta caracterización se encuentra formado por un analizador de espectros, dos Smartphones, un ordenador portátil, un altavoz con conexión Bluetooth para la creación de una WPAN (Wireless Personal Area Network) y una antena diseñada y fabricada para la banda de 2.4 GHz. todos los dispositivos electrónicos escogidos que no pertenecen a la Universidad son propios del autor del presente Trabajo Fin de Grado.

Teniendo todos estos detalles en cuenta, el montaje de la caracterización en funcionamiento en situación real queda de la siguiente manera:



Figura 17. Montaje para medidas de caracterización en funcionamiento en situación real

La caracterización en situación real se basa principalmente en el uso del analizador de espectros modelo **R&S®ESPI3** que opera de 9 KHz a 3 GHz [22].

Este equipo nos permite realizar medidas de potencia del espectro radioeléctrico a través de la función “Channel Power (CHAN PWR ACP)” y visualizarlo en pantalla. Por otra parte, tiene la virtud de poderse controlar de manera remota, en este caso, mediante un programa realizado en MATLAB ([ANEXO III](#)) que nos permite automatizar las medidas realizando así la toma de estas de manera más eficiente y sencilla

El software de control remoto para el analizador de espectros ESPI3 ha sido MATLAB (**v7.0 o inferior**) que es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). La plataforma de MATLAB está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos.

Para la automatización de las medidas del analizador de espectros, se ha elaborado un código que dispone de las funciones necesarias a través de una librería de comunicación (MEXRSIB) [23] con el analizador de espectros que puede descargarse de la página web de **Rohde&Schwarz**.

Con esta librería podemos tomar las medidas para su posterior exportación a Excel. El código es ejecutado desde un portátil conectado al analizador de espectros con un cable de red RJ-45.

El ordenador portátil empleado es un Toshiba NB520-108, además consta con Windows 7 de 32 bits con MATLAB v7.0 que son condiciones necesaria para el control remoto del analizador de espectros.

La razón de la utilización de dos Smartphones se debe a que en la banda frecuencial a medir conviven dos tecnologías (Wi-Fi vs. Bluetooth). Había que asegurarse que los únicos datos medidos correspondían a Bluetooth (ya que es en la tecnología en la centro el presente trabajo) para ello se realizó un envío de tráfico constante de un Smartphone al altavoz y por otra parte una recepción constante de información en Wi-Fi con el otro Smartphone.

Con ambos tráficos ya en funcionamiento, se realizó un software que permitía corroborar que la recepción Wi-Fi únicamente se encontraba en la frecuencia correspondiente al canal 1 de dicha tecnología (2.401 GHz – 2.423 GHz) mientras que Bluetooth se encontraba en el resto de la banda (2.423 GHz – 2.484 GHz).

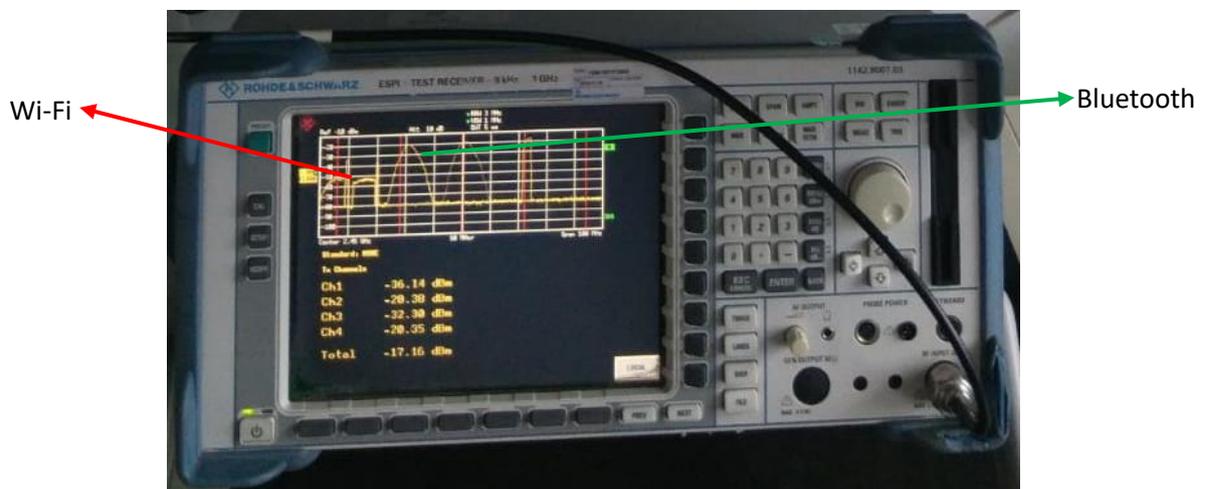


Figura 18. Wi-Fi vs. Bluetooth

Se captura la potencia emitida por el Smartphone a través de una antena unida al analizador de espectros. Dado que existen distintos factores que podrían influir en la medida realizada, se van a realizar medidas en distintos escenarios para caracterizar la influencia de dichos factores. Los criterios fundamentales son los siguientes:

- Distancia real desde el Smartphone al receptor: se han elegido 6 distancias, 3.6, 13.6, 23.6, 37, 100, 300 centímetros. En cada punto se ha tenido en cuenta dos colocaciones respecto al receptor: horizontal y vertical.
- Presencia o no de obstáculo: dos casos a distinguir, uno con visión directa y otro con un obstáculo (bloques de hormigón (14.5 cm de grosor) existentes en el laboratorio).



Figura 19. Bloque de hormigón utilizado de obstáculo

Aplicando estos criterios se nos presenta **20 escenarios de medida**. Las medidas tendrán un tiempo de exposición de 15 minutos cada una.

Una vez efectuadas las 20 medidas de potencia se calculará el valor del campo eléctrico en cada escenario mediante la siguiente ecuación:

$$E(dB\mu v/m) = V_r(dB\mu v) + K(dB/m)$$

Donde:

- E : Intensidad del campo eléctrico.
- V_r : Nivel de señal proporcionado por el sistema de referencia, que se calcula a partir del valor de potencia según esta ecuación: $V(dB\mu v) = Pr(dBm) + 107(dB)$ (para sistemas con impedancia 50Ω).
- K : Factor de la antena. Este parámetro depende de la ganancia de la antena y de la frecuencia de trabajo. $K(dB/m) = 20 \log f(MHz) - G(dB) - 29,78(dB)$. La frecuencia es 2450MHz y la ganancia G de la antena es: 3.73 dBi.
 - $K = 34.27(dB/m)$

8.2 Caracterización con analizador de redes

El equipamiento para la realización de esta caracterización se encuentra formado por un analizador de redes, *diferentes textiles* y dos antenas diseñadas y fabricadas a la frecuencia de trabajo de Bluetooth.

Teniendo estos detalles en cuenta, el montaje de la caracterización con analizador de redes queda de la siguiente manera:

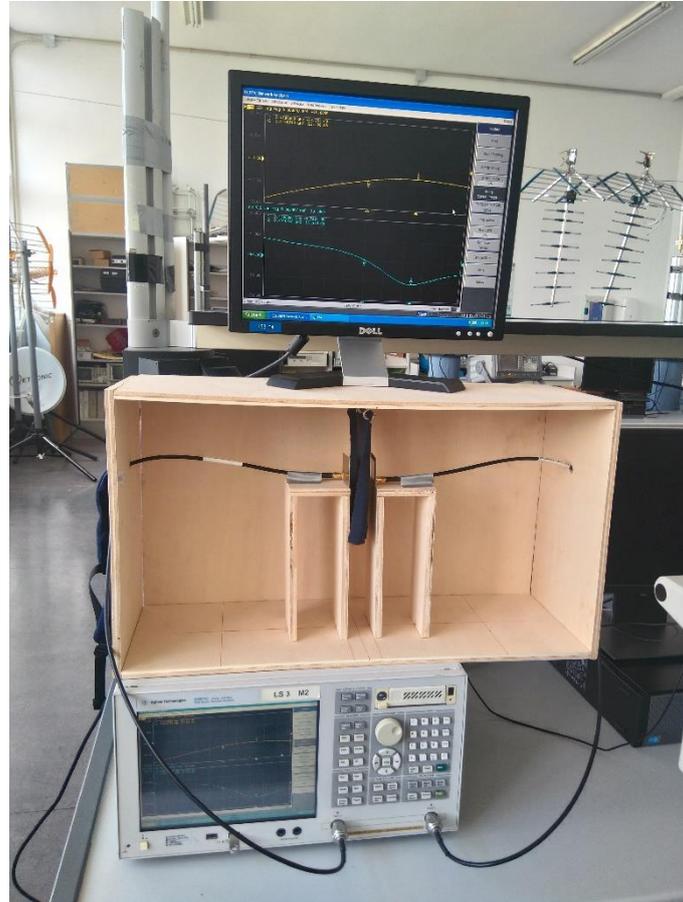


Figura 20. Montaje con analizador de redes

La caracterización a través de analizador de redes para conseguir parametrizar los diferentes textiles se realiza mediante el analizador de redes **KEYSIGHT ENA E5071C-280** [24].

Este equipo permite obtener medidas de los parámetros S_{11} y S_{21} que son estrictamente necesarios para poder caracterizar correctamente los diferentes textiles bajo prueba en el presente Trabajo Fin de Grado.

El parámetro S_{11} ofrece la información necesaria para saber si la antena fabricada es lo suficientemente buena, debido a que la información ofrecida es denominada pérdidas por retorno que hace referencia a la cantidad de potencia reflejada en la misma, esto es, cuanto menor sea el diseño será mejor.

Por otra parte, el parámetro S_{21} hace referencia a la potencia transmitida, debido al montaje realizado en esta caracterización ([7.3.3 Caracterización mediante analizador de redes](#)) se ha podido medir la potencia exacta que se pierden debido a los diferentes textiles y poder así caracterizarlos.

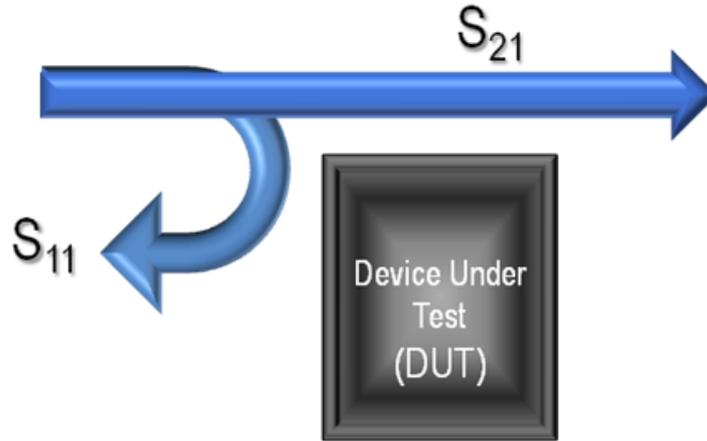


Figura 21. Parámetros S

Debido a que el principal objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es la caracterización de diferentes textiles, obtenemos **34 escenarios de medida** caracterizando en mayor medida aquellos tejidos con mayor porcentaje de aparición en las prendas de vestir.

Una vez efectuadas las 38 medidas se procederá a observar el apantallamiento de los diferentes textiles.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

9 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y TAREAS DE TRABAJO

El plan de trabajo que se ha llevado a cabo para la realización del Trabajo Fin de Grado consta en primer lugar el equipo de trabajo seguido del flujo de trabajo realizado, relacionando las actividades mediante el diagrama de Gantt del proyecto.

9.1 Equipo de trabajo

Director del Trabajo Fin de Grado: David Guerra Pereda, profesor del Grado en Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación. Investigador Doctor del grupo de Tratamiento de Señal y Radiocomunicaciones del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (UPV/EHU).

Projectista: Rodrigo Ezequiel Portalea Galeano, tiene como labor principal de desarrollar el plan de medidas, procesar datos y realizar estadísticas en base a ellos.

9.2 Definición de paquetes de trabajo

P.T.1	Inicio del Proyecto	1 sem
T.1.1	Definición de objetivos y alcance del proyecto: Definir que se desea cumplir con este Trabajo Fin de Grado y hasta qué punto se ha de llegar.	1 sem
P.T.2	Análisis del estado del arte	10 sem.
T.2.1	Documentación capa física del sistema Bluetooth: Búsqueda de toda la información necesaria sobre la tecnología Bluetooth para posteriormente saber el funcionamiento de la misma y poder realizar una documentación adecuada.	4 sem.
T.2.2	Legislación y Normativa (Límites de exposición a CEM): Además de la búsqueda de información referida a la tecnología en cuestión, también es necesario saber que normativa y legislación debe cumplirse para que llegados a la campaña de medidas, estas se realicen de manera correcta.	3 sem.
T.2.3	Sistemas de medidas existentes: Búsqueda exhaustiva sobre diferentes maneras de medir en la banda frecuencial en la que se encuentra la tecnología estudiada, no solo para tener una idea de cómo hacerlo, sino para mejorarlo.	3 sem.
T.2.4	Redacción de informe: Llegados a este punto, se comienza con la redacción del informe con la información disponible y estudiada.	6 sem.
P.T.3	Planificación de medidas	8 sem.
T.3.1	Valoración del material y recursos necesarios (SW/HW): Es necesario verificar el material que se utiliza, no solo para comprobar su buen funcionamiento sino porque el software a implementar va ligado al mismo.	2 sem.
T.3.2	Definición de escenarios de medida: Verificados ya los distintos sistemas de medidas existentes y tiempo de exposición a medir, es importante definir un nuevo escenario para realizar mejores estimaciones de las ya existentes.	3 sem.
T.3.3	Redacción de informe: Una vez empezada la redacción anterior, poder proseguir con la misma añadiendo el material a utilizar y escenarios de trabajo.	3 sem.

P.T.4	Diseño y fabricación de antenas microstrip	5 sem.
T.4.1	Diseño y simulación de las antenas: Conseguir resultados más óptimos diseñando antenas microstrip exclusivas para la banda frecuencial en la que trabaja la tecnología Bluetooth.	2 sem.
T.4.2	Análisis y validación de los diseños: Verificar que los parámetros de interés (S11) tengan valores adecuados para la posterior validación del diseño.	1 sem
T.4.3	Mejora del diseño: Realizaron determinados cambios para la mejora del diseño y su posterior fabricación en caso de ser necesario.	1 sem
T.4.4	Fabricación y Validación del prototipo: Pasada la fase de diseño, se crean las antenas y se realizan determinadas pruebas de validación.	1 sem
P.T.5	Medidas y procesado	8 sem.
T.5.1	Toma de medidas en los diferentes escenarios: En este punto, se realizan dos campañas de medidas distintas, una para la caracterización del sistema en situación real y otra para la caracterización con analizador de redes.	4 sem.
T.5.2	Procesado estadístico de las medidas: Clasificación y estudio de todas las medidas realizadas en ambas caracterizaciones para poder obtener conclusiones.	4 sem.
T.5.3	Obtención resultados: Obtener conclusiones solidas al estudio a realizar.	4 sem.
P.T.6	Redacción de la documentación	26 sem.
T.6.1	Revisión previa a la entrega: Realizar comprobaciones de las últimas "líneas" añadidas al Trabajo Fin de Grado para su posterior entrega.	1 sem
T.6.2	Redacción definitiva: Realizar los últimos retoques para proceder a entregar el Trabajo Fin de Grado.	26 sem.

9.3 Hitos de control

Para el seguimiento y control del Trabajo Fin de Grado, se realizaron varias reuniones entre el director del Trabajo Fin de Grado y el proyectista. Estas reuniones facilitaron el desarrollo del presente trabajo y guiaron cada paquete de trabajo a sus objetivos. Los hitos de control son:

Hitos	Nombre	Semana
H.1	Reunión de especificaciones del proyecto: Marca el principio del proyecto, en el cual se establecen las bases del mismo.	Semana 1
H.2	Comienzo de la documentación: Establecidas las bases y la tecnología a estudiar, realizar un primer documento informativo que ayude al proyectista para la redacción futura.	Semana 11
H.3	Posibles escenarios de medida: Este punto de control debe marca un antes y un después en el Trabajo Fin de Grado, ya que es en el cual se debe decidir que escenarios van a ser estudiados y como.	Semana 19
H.4	Supervisión general: En esta reunión se realiza una supervisión tanto de documento redactado como de diseño y fabricación de antenas para un buen comienzo de campaña de medidas.	Semana 24
H.5	Fin de medidas y procesado: Se han de tener todas las medidas acabadas he informar al director que se comenzara con el procesado de las mismas.	Semana 32
H.6	Fin de proyecto: En el último hito de control se comprueba que todo lo realizado es correcto y que el análisis se ha realizado como se debe. Si todo es correcto se procede a la entrega del Trabajo Fin de Grado.	Semana 37

10 DIAGRAMA GANTT

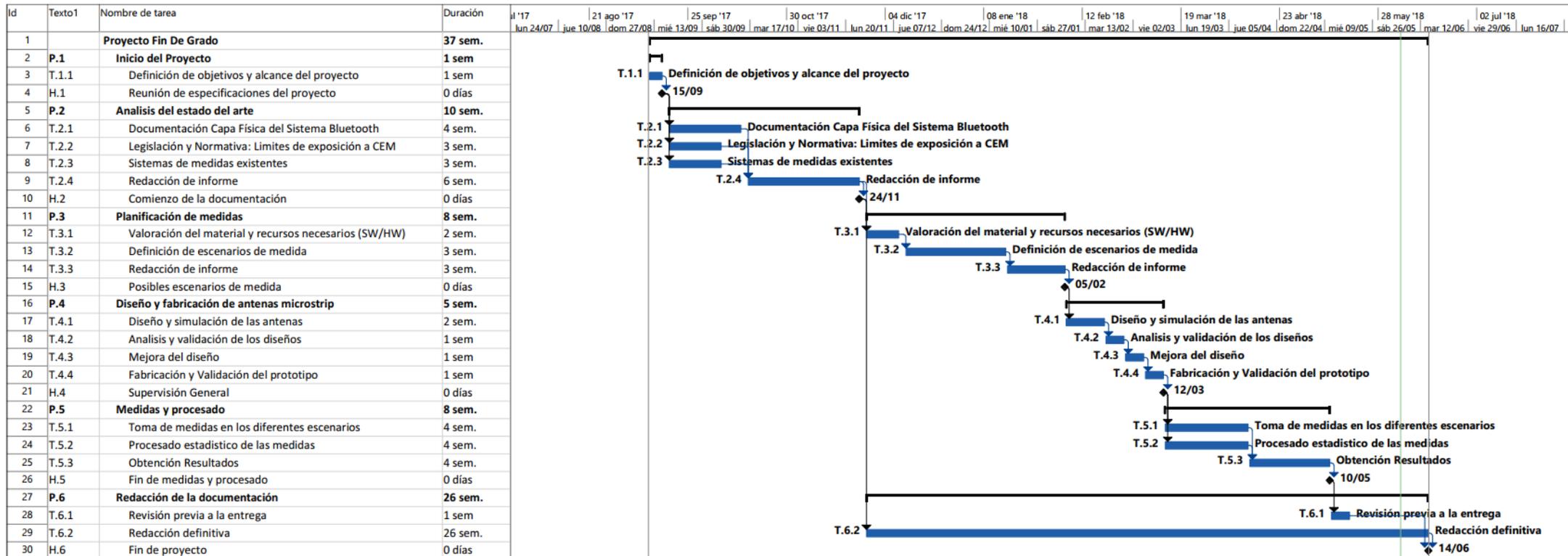


Figura 22. Diagrama Gantt de planificación

11 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

11.1 Caracterización en funcionamiento en situación real

En este apartado se muestran los resultados registrados en los 20 escenarios de medida. Como ya se ha comentado, el tiempo de medida es de 15 minutos de exposición, donde se recogen alrededor de 840 valores de potencia (*dBm*) en cada medida.

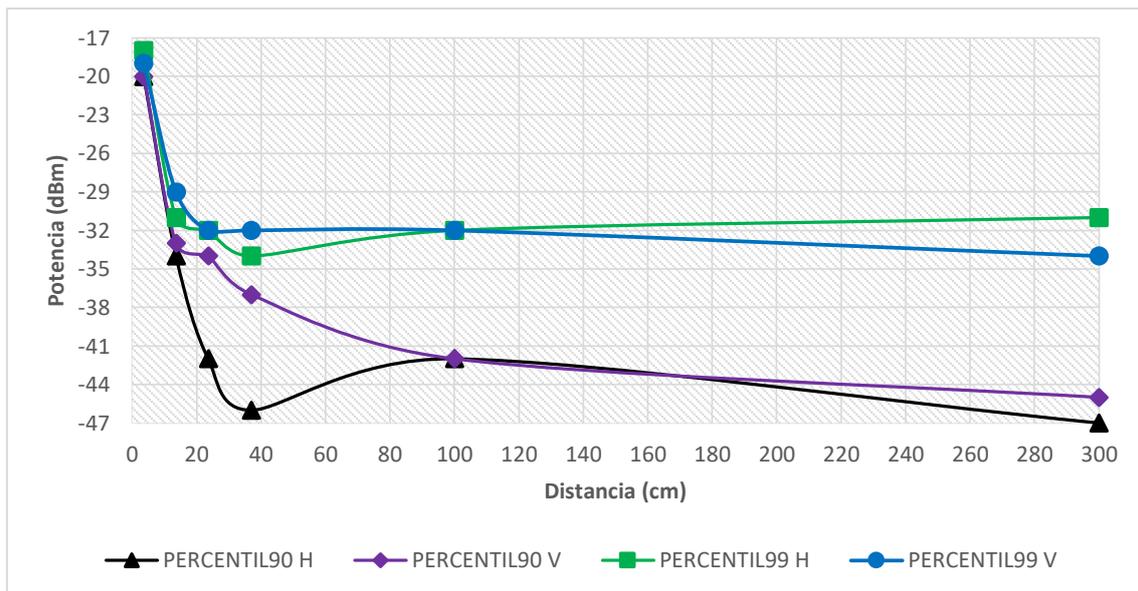
Para simplificar la interpretación de los valores se hará un análisis estadístico con la elección de los **percentiles** ([ANEXO VI](#)) más significativos: **10%, 50 % , 90% y 99%**.

11.1.1 Potencia en posición Horizontal vs. Vertical sin obstáculo

Tabla 13. Potencias medidas en H vs. V sin obstáculo

Distancia (cm)	3.6		13.6		23.6		37		100		300		
	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
Per. 10	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67
Per. 50	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67
Per. 90	-20	-20	-34	-33	-42	-34	-46	-37	-42	-42	-47	-45	
Per. 99	-18	-19	-31	-29	-32	-32	-34	-32	-32	-32	-31	-34	

Se considera que tanto los valores de potencia ofrecidos por el **percentil 10** como por el **percentil 50** hacen referencia a cuando no existe transmisión de información debido a la potencia excesivamente baja medida. La gráfica comparativa es la siguiente:



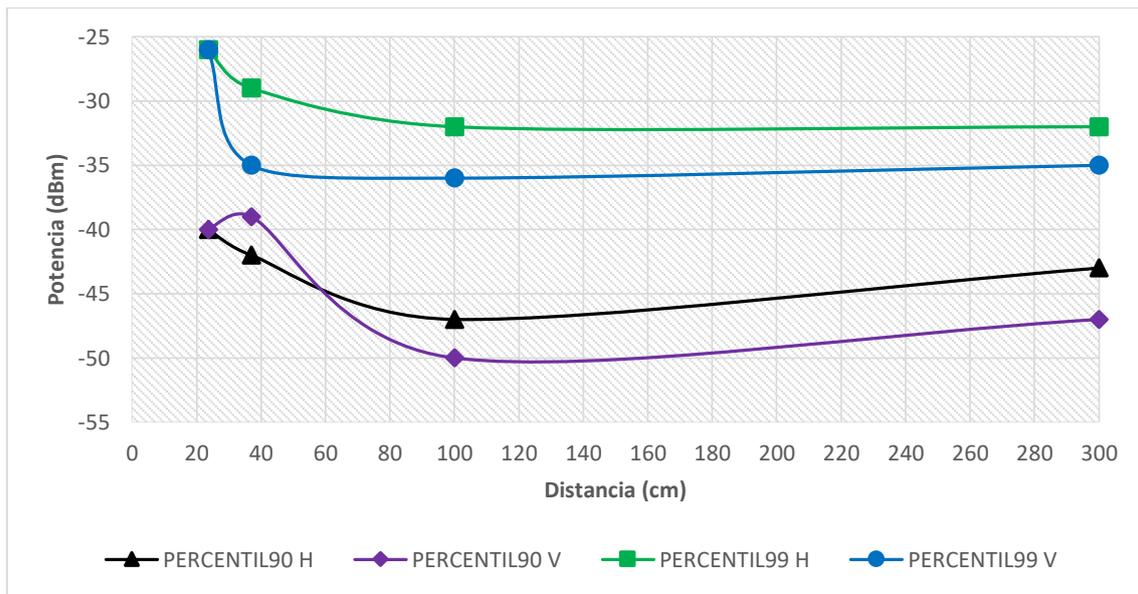
Gráfica 1. Valores de potencia sin obstáculo H vs. V

11.1.2 Potencia en posición Horizontal vs. Vertical con obstáculo

Tabla 14. Potencias medidas en H vs. V con obstáculo

Distancia (cm)	23.6		37		100		300	
	H	V	H	V	H	V	H	V
Per. 10	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67
Per. 50	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67	-67
Per. 90	-40	-40	-33	-39	-47	-50	-43	-41
Per. 99	-26	-26	-29	-35	-32	-36	-32	-35

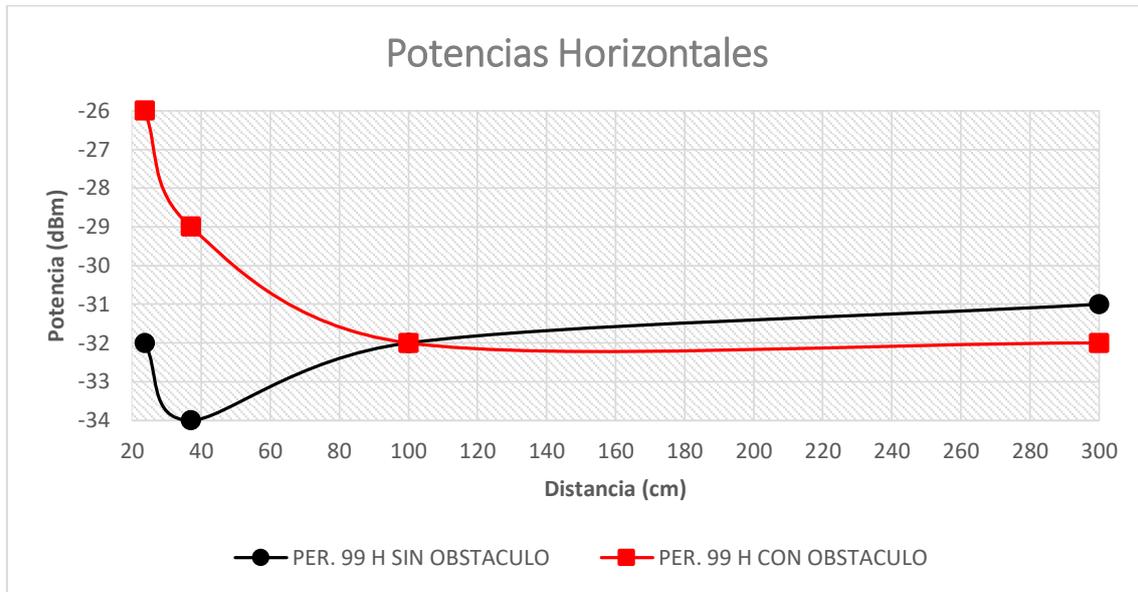
Al igual que en el caso anterior, los valores de potencia medidos por el percentil 10 y el percentil 50 tienen un valor demasiado bajo como para considerarlos en un gráfico comparativo, por lo que, la potencia medida en presencia de obstáculo es:



Gráfica 2. Valores de potencia con obstáculo H vs. V

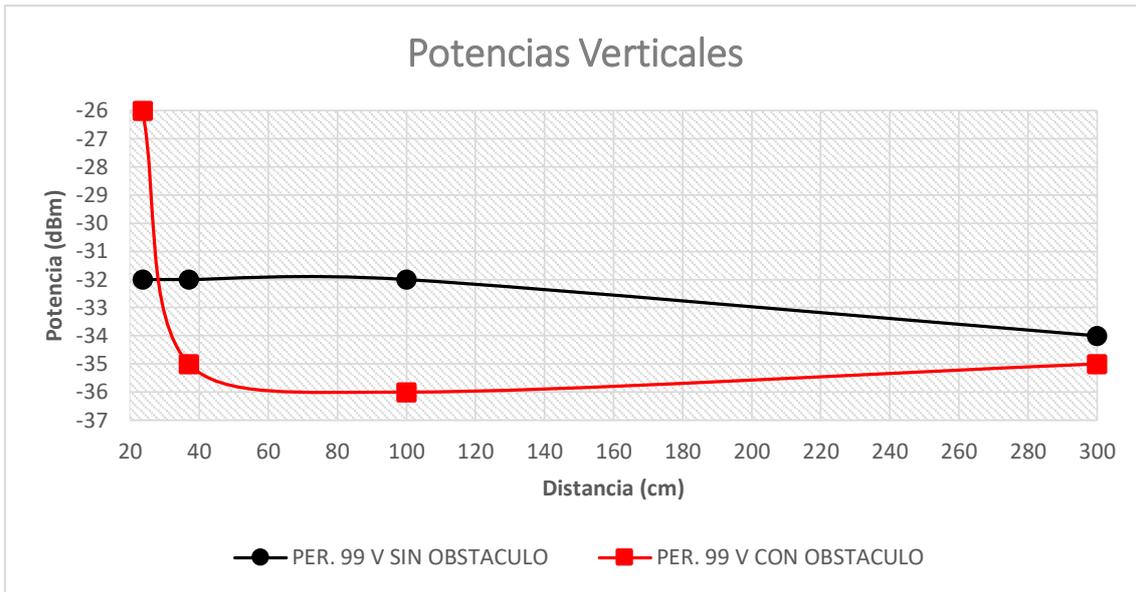
11.1.3 Conclusiones

Para observar el efecto que tiene la introducción de obstáculos entre transmisor y receptor o Electromagnetic Shielding Effectiveness (EMSE) a modo resumen se ofrecen las dos siguientes graficas:



Gráfica 3. Potencias obtenidas en posición horizontal

El comportamiento que se observa es que debido al obstáculo existente desde los 37 cm hasta el metro de distancia la potencia con la que el transmisor ha de enviar información al receptor es mucho mayor que si no estuviese el obstáculo de por medio. Sin embargo, pasados el metro aunque la potencia que tenga que enviar sea mayor, debido a que a la mayor separación existe mayores obstáculos que únicamente los bloques de hormigos, es decir, existe más multitrayecto lo cual afecta en mayor medida a la señal.



Gráfica 4. Potencias obtenidas en posición vertical

El comportamiento que se observa en cuanto a posicionamiento vertical es bastante similar al horizontal, se observa que en un principio la potencia necesaria en caso de obstáculo es mucho mayor que en caso de no obstáculo, sin embargo, el multirayecto existe a partir de los 37 cm de distancia afecta mucho más a la transmisión en posición vertical sin obstáculo que en el caso de posición horizontal sin obstáculo ya que se observa cómo va decayendo a medida que se aumenta la distancia.

11.1.4 Cumplimiento de la normativa

Teniendo en cuenta que el sistema Bluetooth funciona emitiendo señal mediante ráfagas, existen muchos periodos de tiempo en los que no se transmite nada por el canal (**percentiles 10 y 50**), lo que explica la diferencia de nivel de potencia entre los percentiles en cada escenario de medida.

Para hacer una comparativa con el **nivel de referencia de la normativa** [5], se han empleado los valores de los **percentiles 90 y 99 (peores casos)**, ya que estos representan valores máximos de potencia, es decir, si estos valores cumplen la normativa cualquier valor menor automáticamente también estará cumpliendo la normativa. Dichos percentiles son:

Tabla 15. Resumen de potencias en los 20 escenarios

Distancia (cm)	Obstáculo	Posición	Per 90	Per 99
3.6	NO	H	-20	-18
		V	-20	-19
13.6	NO	H	-34	-31
		V	-33	-29
23.6	NO	H	-42	-32
		V	-34	-32
	SI	H	-40	-26
		V	-40	-26
37	NO	H	-46	-34
		V	-37	-32
	SI	H	-33	-29
		V	-39	-35
100	NO	H	-42	-32
		V	-42	-32
	SI	H	-47	-32
		V	-50	-36
300	NO	H	-47	-31
		V	-45	-34
	SI	H	-43	-32
		V	-41	-27

Tabla 16. Resumen de Intensidad de campo eléctrico en los 20 escenarios

Distancia (cm)	Obstáculo	Posición	Per 90 (dBμV/m)	Per 99 (dBμV/m)
3.6	NO	H	121.27	123.27
		V	121.27	122.27
13.6	NO	H	107.27	110.27
		V	108.27	112.27
23.6	NO	H	99.27	109.27
		V	107.27	109.27
	SI	H	101.27	115.27
		V	101.27	115.27
37	NO	H	95.27	107.27
		V	104.27	109.27
	SI	H	108.27	112.27
		V	102.27	106.27
100	NO	H	99.27	109.27
		V	99.27	109.27
	SI	H	94.27	109.27
		V	91.27	105.27
300	NO	H	94.27	110.27
		V	96.27	107.27
	SI	H	98.27	109.27
		V	100.27	114.27

Para comprobar que efectivamente todos valores medidos cumplen con la normativa de exposición electromagnética hemos de compararlos con **61 V/m** que se exige como máximo de exposición [5]. Dicho valor son $155.71 \text{ dB}\mu\text{V/m}$, podemos observar que todos los valores se encuentran por debajo de dicho límite.

11.2 Caracterización con analizador de redes

En este apartado se muestran los resultados registrados en los 34 escenarios de medida. Como ya se ha comentado, las medidas para observar el apantallamiento ofrecido por los diferentes textiles se realizan en base a los parámetros S (**S21**) ofreciendo estas potencias en *dB*.

La potencia de referencia en esta caracterización es aquella en la que entre transmisor y receptor no existe obstáculo alguno (ningún textil), dicha medida es:

Tabla 17. Potencia de referencia en la caracterización con analizador de redes

	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)
NADA	-14.72	33.77

Para observar que textiles son los que mayor apantallamiento ofrecen en función de las capas y de las combinaciones realizadas, se remarcaran (en rojo) aquellos en los que se ha observado mayor influencia.

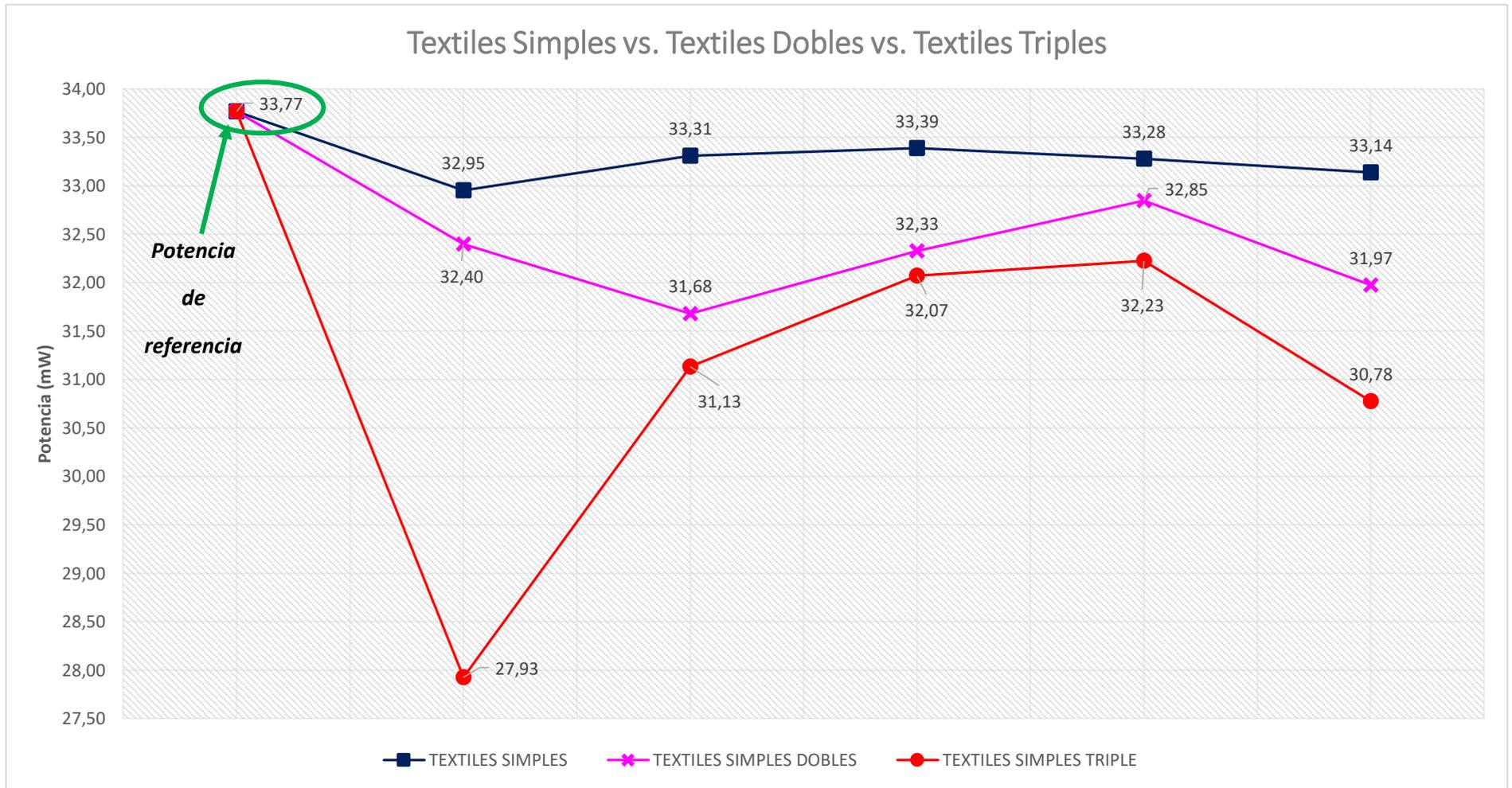
11.2.1 Textiles simples más utilizados

Introduciendo los diferentes textiles como obstáculos para poder caracterizarlos y sin olvidar cual es la **potencia de referencia** obtenemos los siguientes resultados para los **textiles más utilizados en prendas de vestir**:

Tabla 18. Valores medidos en textiles más utilizados

	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
100% ALGODÓN	-14.82	32.95	0.81
100% POLIESTER	-14.77	33.31	0.46
100% PLÁSTICO	-14.76	33.39	0.38
100% LINO	-14.78	33.28	0.49
100% NYLON	-14.80	33.14	0.63
100% ALGODÓN DOBLE	-14.90	32.40	1.37
100% POLIESTER DOBLE	-14.99	31.68	2.09
100% PLÁSTICO DOBLE	-14.90	32.33	1.44
100% LINO DOBLE	-14.84	32.85	0.92
100% NYLON DOBLE	-14.95	31.97	1.79
100% ALGODÓN TRIPLE	-15.54	27.93	5.84
100% POLIESTER TRIPLE	-15.07	31.13	2.64
100% PLÁSTICO TRIPLE	-14.94	32.07	1.70
100% LINO TRIPLE	-14.92	32.23	1.54
100% NYLON TRIPLE	-15.12	30.78	2.99

*NOTA: Regresión lineal de los diferentes textiles en el [ANEXO VII](#)



Gráfica 5. Comparativa de diferentes capas en textiles más utilizados en prendas de vestir en base a la potencia de referencia

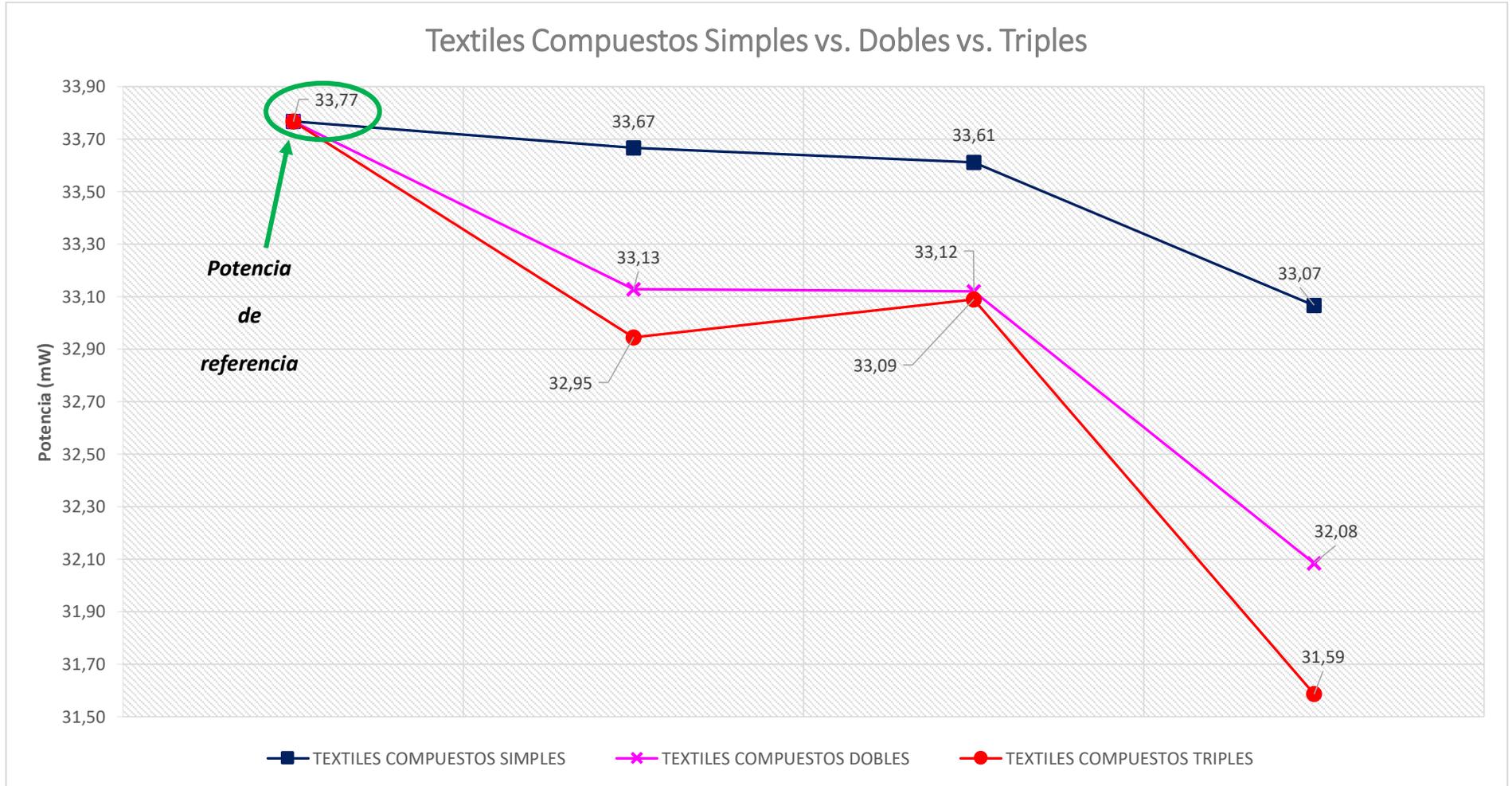
11.2.2 Textiles compuestos

Tabla 19. Valores medidos en textiles compuestos simples

	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
82% POLIESTER 18% ELASTICO	-14.73	33.67	0.10
50% POLIESTER 50% ALGODÓN	-14.74	33.61	0.16
65% POLIESTER 35% ALGODÓN	-14.81	33.07	0.70
82% POLIESTER 18% ELASTICO DOBLE	-14.80	33.13	0.64
50% POLIESTER 50% ALGODÓN DOBLE	-14.80	33.12	0.65
65% POLIESTER 35% ALGODÓN DOBLE	-14.94	32.08	1.68
82% POLIESTER 18% ELASTICO TRIPLE	-14.82	32.95	0.82
50% POLIESTER 50% ALGODÓN TRIPLE	-14.80	33.09	0.68
65% POLIESTER 35% ALGODÓN TRIPLE	-15.01	31.59	2.18

En la tabla anterior se puede observar que existe un comportamiento de mayor apantallamiento electromagnético por parte de la prenda que posee en sus características tanto algodón como poliéster.

Si observamos la tabla 17, los textiles con mayor apantallamiento son los recientemente nombrados (**poliéster y algodón**), por tanto, si nos basamos en dichos resultados podemos observar que en textiles compuestos también son los que más apantallamiento ofrecen.



Gráfica 6. Comparativa de diferentes capas en textiles compuestos en base a la potencia de referencia

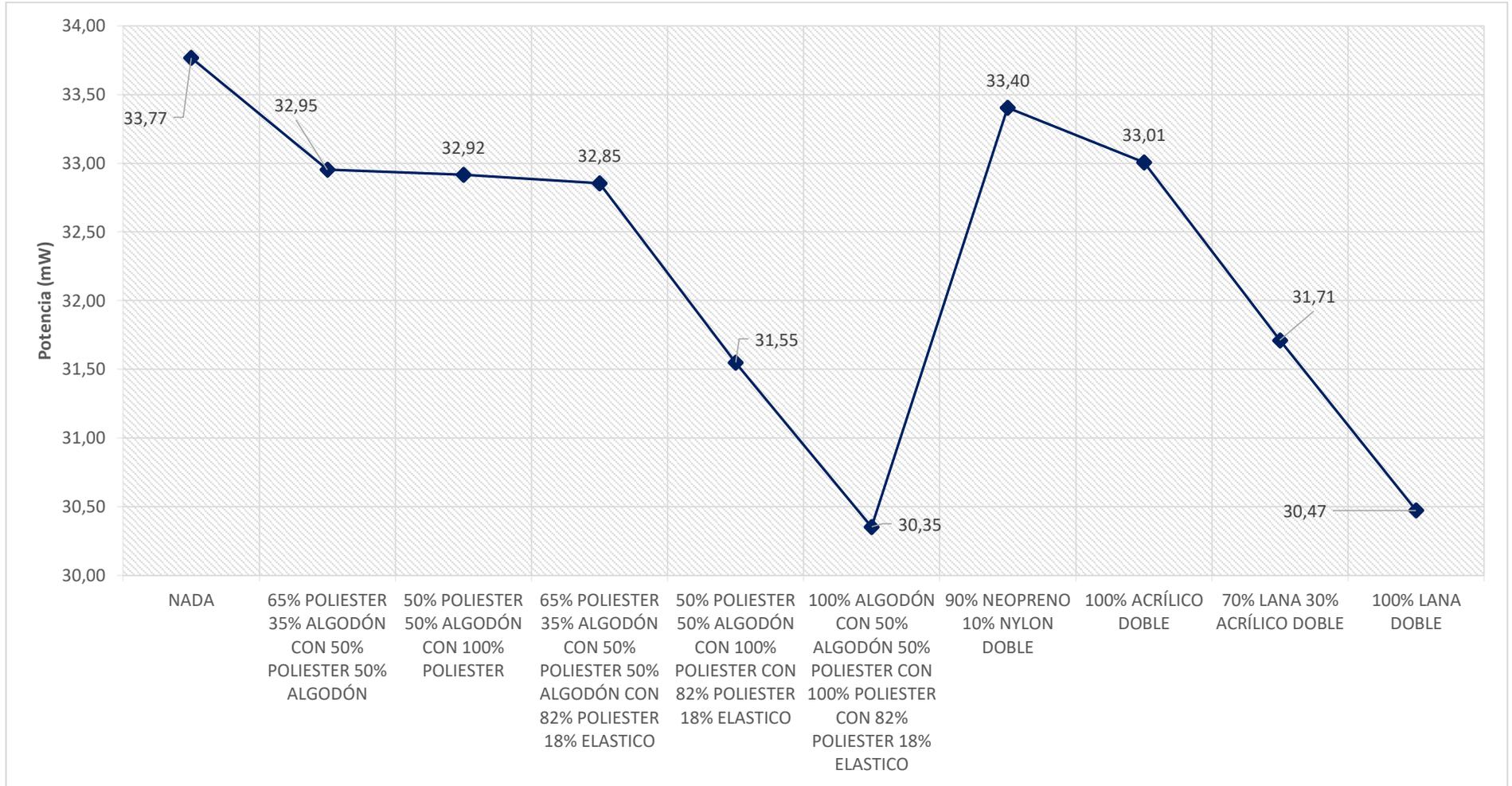
11.2.3 Conjunto de diferentes textiles

En esta última tabla se ofrece otros textiles utilizados para las mediciones, es un conjunto de diferentes combinaciones, en la que los resultados obtenidos son:

Tabla 20. Valores medidos en diferentes combinaciones

	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
65% POLIESTER 35% ALGODÓN CON 50% POLIESTER 50% ALGODÓN	-14.82	32.95	0.81
50% POLIESTER 50% ALGODÓN CON 100% POLIESTER	-14.83	32.92	0.85
65% POLIESTER 35% ALGODÓN CON 50% POLIESTER 50% ALGODÓN CON 82% POLIESTER 18% ELASTICO	-14.83	32.85	0.91
50% POLIESTER 50% ALGODÓN CON 100% POLIESTER CON 82% POLIESTER 18% ELASTICO	-15.01	31.55	2.22
100% ALGODÓN CON 50% ALGODÓN 50% POLIESTER CON 100% POLIESTER CON 82% POLIESTER 18% ELASTICO	-15.18	30.35	3.41
90% NEOPRENO 10% NYLON DOBLE 100% ACRÍLICO DOBLE	-14.76	33.40	0.36
	-14.81	33.01	0.76
70% LANA 30% ACRÍLICO DOBLE	-14.99	31.71	2.06
100% LANA DOBLE	-15.16	30.47	3.30

Observando los resultados, los más destacados tienen en su combinación poliéster y algodón, como ya se ha comentado tanto en el apartado anterior, estos tienen un comportamiento de mayor apantallamiento que otro tipo de textiles. Sin embargo, se observa que existe otro tipo de textil el cual sale destacado en esta última tabla, dicho textil es una doble capa de **LANA** que en esta tabla es el **segundo textil con mayor apantallamiento**.



Gráfica 7. Comparativa de distintos tipos de textiles

ASPECTOS ECONÓMICOS

12 PRESUPUESTO

En el presente apartado se van a recoger mediante partidas presupuestarias los gastos debidos a la realización del Trabajo Fin de Grado. Para la correcta realización del presupuesto, se ha optado por dividir el mismo en las siguientes partidas:

1. Material Amortizable
2. Material Fungible
3. Recursos Humanos

12.1 Material Amortizable

Material amortizable será considerado todo material que puede ser reutilizado en un futuro además del material previamente existente en el comienzo del Trabajo Fin de Grado.

Tabla 21. Partida de amortizaciones

Concepto	AMORTIZACIONES				Total
	Coste inicial (€)	NºUnidades	Vida útil (años)	Tiempo de uso (h/día)	
Ordenador Portatil Toshiba	140,00 €	1	4	0,42	4,83 €
Ordenador Portatil Asus	919,00 €	1	4	0,21	15,85 €
Telefono Móvil Asus	200,00 €	1	2	0,42	13,80 €
Telefono Móvil BQ	180,00 €	1	2	0,42	12,42 €
Altavoz	15,00 €	1	2	0,42	1,04 €
Analizador de espectros ESPI3	16.806,66 €	1	4	0,42	579,83 €
Analizador de redes	19.471,45 €	1	4	0,42	671,77 €
Hormigón	70,00 €	4	2	0,08	3,86 €
MATLAB	0,00 €	1	2	0,42	0,00 €
Office 2013	149,00 €	1	2	0,42	10,28 €
Total					1.313,68 €

12.2 Material Fungible

Como material fungible se han incluido materiales de oficina además de fungibles que incluyen dietas cuando las pruebas se extendían por la noche. Por otra parte, también se han incluido la fabricación de antenas y las impresiones previas de este mismo documento.

Tabla 22. Partida de fungibles

Concepto	FUNGIBLES		Total
	Cantidad	Precio (€/unidad)	
Material de oficina	-	-	10,00 €
Cables y conectores	-	-	2,00 €
Impresora (documentos en papel)	-	-	15,00 €
Fabricación de antenas	-	-	160,00 €
Varios	-	-	50,00 €
Total			237,00 €

12.3 Recursos Humanos

En el presente sub-apartado, se van a desglosar los recursos humanos necesarios para la realización del presente Trabajo Fin de Grado; especificando las horas que han dedicado cada miembro relacionado con el mismo.

Tabla 23. Partida de recursos humanos

Concepto	RECURSOS HUMANOS			Total
	Responsabilidad	Horas(h)	Coste unitario(€)	
David Guerra Pereda	Director TFG	115	45,00 €	5.175,00 €
Rodrigo Ezequiel Portalea Galeano	Proyetaista	500	0,00 €	0,00 €
Total				5.175,00 €

12.4 Presupuesto Total

A continuación se presentará una tabla resumen del presupuesto total del Trabajo Fin de Grado; este es obtenido a través de la suma de las partidas anteriores junto con una variación debida a imprevistos (2%) más una I.V.A del 21%.

Tabla 24. Presupuesto del Trabajo Fin de Grado

TOTAL PRESUPUESTO	
Amortizaciones	1.313,68 €
Recursos Humanos	5.175,00 €
Fungibles	237,00 €
SUBTOTAL 1	6.725,68 €
Imprevistos (3%)	201,77 €
SUBTOTAL 2	6.927,45 €
I.V.A (21%)	1.454,76 €
TOTAL	8.382,21 €

Como se puede observar en la tabla anterior, el presupuesto final del Trabajo Fin de Grado *“Caracterización Del Efecto Apantallador De Los Textiles Frente A La Exposición Electromagnética Debida Al Sistema De Comunicaciones Bluetooth”* asciende a ocho mil trescientos ochenta y dos euros y veintiún céntimos.

CONCLUSIONES

13 CONCLUSIONES

En este apartado se describirán brevemente las conclusiones del trabajo realizado.

Los sistemas Bluetooth utilizan una banda frecuencial (2.4 GHz – 2.5 GHz) de uso común en las cuales no es necesario una licencia para emisión. Sin embargo, existen rigurosas y estrictas regulaciones sobre la potencia máxima que pueden emitir afectando por igual a todos aquellos dispositivos que utilicen dichas frecuencias (en mi caso el Smartphone).

Con el objetivo de cuantificar la exposición electromagnética (EM) que afecta a las personas usuarias de Personal Area Networks (PANs) comunicadas mediante Bluetooth, se ha propuesto una metodología con dos partes bien diferenciadas.

Se ha distinguido por un lado, el nivel de la señal Bluetooth en régimen de funcionamiento real y sin obstáculos; y por otro se ha caracterizado el apantallamiento debido a distintos textiles que podría llevar una persona usuaria. La combinación de ambos estudios permitirá conocer los niveles de campos electromagnéticos (EM) de Bluetooth a que está expuesta una persona usuaria teniendo en cuenta la ropa que ejerce de barrera en el canal de radiocomunicación de las Personal Area Networks (PANs).

Por una parte, se ha realizado un análisis de la intensidad de campo eléctrico que genera un Smartphone en diferentes escenarios. Esto nos proporciona una idea general del comportamiento del campo eléctrico en diferentes situaciones.

El estudio realizado en el presente Trabajo Fin de Grado a través de una campaña de medidas, confirma que a la distancia más pequeña medible (región de campo lejano entre transmisor y receptor) los límites de seguridad de la exposición a las emisiones radioeléctricas se cumplen.

El **valor límite marcado por la legislación** es de 61 V/m [5]. Los **valores máximos observados** en este estudio son de 1.457 V/m que se alcanzan a una distancia de 3.6 cm. Los **valores mínimos** son de 0.036 V/m. Se puede observar que dichos valores se encuentran **muy lejanos del valor de referencia** marcado por la legislación de 61 V/m.

Por otra parte, se ha realizado un análisis del apantallamiento ofrecido por diferentes textiles y diferentes combinaciones de los mismos a través de distintos escenarios de medida. Esto nos proporciona una idea de la cantidad de “**protección**” que podemos tener frente a la exposición electromagnética gracias a las distintas prendas de vestir en la vida cotidiana.

El estudio realizado confirma que el **apantallamiento es realmente pequeño** comparado con las potencias de recepción. El **valor máximo de apantallamiento observado** en el estudio es de 5.84 mW menos (27.92 mW) respecto de la potencia base (33.76 mW) recibida. Este valor se consigue en base a una triple capa de 100% algodón de 45 μm por capa.

El **valor mínimo de apantallamiento** lo observamos en 0.1 mW menos (33.66 mW) respecto de la potencia base (33.76 mW) recibida. Este valor es conseguido por una prenda compuesta por 82% poliéster y 18% elástico de 75 μm .

Por tanto, el apantallamiento recibido por las diferentes prendas de vestir no es muy grande, sin embargo, se ha conseguido caracterizar cada una de las diferentes prendas y se ha observado que su comportamiento es progresivo, es decir, a medida que introducimos capas de un textil cuyo apantallamiento es bueno (algodón, poliéster, lana) este ira en incremento.

Finalmente, se concluye no solo demostrando que el sistema Bluetooth que no necesita licencia de emisión cumple con la legislación vigente, sino que también existe la posibilidad de apantallamiento debido a los diferentes textiles más utilizados en las prendas de vestir hoy en día y que parte de las perdidas existentes en el canal de comunicaciones por muy pequeñas que sean, son gracias a los textiles.

14 BIBLIOGRAFÍA

14.1 Referencias

- [1] «La conveniencia de aplicar los criterios del ICRP a las radiaciones no ionizantes»
- <http://www.sbpr.org.br/irpa13/AnaisdoIRPA2013/Radiacionnoionizante/3809.pdf>
- [2] «Los estudios científicos que confrontan los efectos sobre la salud de los móviles y el WiFi»
- <http://www.20minutos.es/noticia/3005030/0/posibles-efectos-sobre-la-salud-de-los-telefonos-moviles/>
- [3] «Radiaciones Ionizantes»
- <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/48.pdf>
- [4] «Radiaciones Ionizantes»
- <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/49.pdf>
- [5] «Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.»
- <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-18256>
- [6] «Campos Electromagnéticos y Salud Pública, Dirección General de Salud Pública y Consumo»
- http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/NivelesExposicion/Aspectos%20sanitarios/1.-%20Ministerio%20de%20Sanidad,%20Servicios%20Sociales%20e%20Igualdad/InformeTec_20012001_05_11.pdf
- [7] «Frenzel, L. 2012. What's The Difference between EM near Field and Far Field? Electronic design»
- [8] «Orden IET/614/2015, de 6 de abril, por la que se modifica la Orden IET/787/2013, de 25 de abril, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias.»
- <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-3864>
- [9] «Ad Hoc & Sensor Networks: Theory and Applications-Chapter 5»
- <http://professor.ufabc.edu.br/~joao.kleinschmidt/aulas/rsf2016/adhoc2.pdf>
- [10] «Bluetooth page»
- <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history>

[11] « Revisión estado del Arte de la tecnología Bluetooth »

- <http://publicaciones.unisimonbolivar.edu.co/rdigital/inovacioning/index.php/identica/article/viewFile/66/100>

[12] «Friis Transmission Equation»

- <https://cpb-us-west-2-juc1ugur1qwqqo4.stackpathdns.com/u.osu.edu/dist/0/890/files/2013/12/Friis-1ty893p.pdf>

[13] «Analysis of human exposure due to WiFi signals based on a novel measurement methodology»

[14] «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.»

[15] «Alomainy, A., et al., "Statistical analysis and performance evaluation for on body radio propagation with microstrip patch antenna," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 1, 245-248, 2007.»

[16] «Abbasi, Q. H., M. M. Khan, S. Liaqat, A. Alomainy, and Y. Hao, "Experimental investigation of ultra-wideband diversity techniques for on-body radio communications," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 34, 165-181, 2013.»

[17] «Xiao, Z., J. Xu, and T. Hu, "Research on the transmissivity of some clothing materials at millimeter-wave band," 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 1750-1753, Nanjing, China, Apr. 2008.»

[18] «Khaleda, A., A. Brizzi, A. Pellegrini, Y. Hao, and A. Alomainy, "Investigation of the effect of fabric in on-body communication using finite difference time domain technique at 60 GHz," Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC), 1-4, Loughborough, UK, Nov. 12-13, 2012.»

[19] «The Influence of Textile Dielectric Properties in On-body Radio Communication Channel Performance at 2.45 GHz.»

[20] «Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones. »

- <https://www.boe.es/boe/dias/2002/01/12/pdfs/A01528-01536.pdf>

[21] «Antenna Test Range»

- http://projects-web.engr.colostate.edu/ece-sr-design/AY09/antenna/Antenna_Test_Range_FA09_Report.pdf

[22] «Operating Manual EMI Test Receiver ESPI3»

- https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuels/gb_1/e/espi_1/espi_02e_incl_supplement.pdf

[23] «Using MATLAB for Remote Control and Data Capture with R&S Spectrum and Network Analyzers»

- https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ef46/1EF46_0E.pdf»

[24] «Keysight Technologies E5071C ENA Vector Network Analyzer

- <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5478EN.pdf>

[25] «Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias CNAF 2017»

- <http://www.minetad.gob.es/telecomunicaciones/espectro/CNAF/notas-UN-2017.pdf>

[26] «Decisión De Ejecución (UE) 2017/1483 De La Comisión»

- <https://www.boe.es/doue/2017/214/L00003-00027.pdf>

ANEXOS

1 ANEXO I

Este anexo es una extensión de cada reglamento y de la normativa aplicable previamente comentada en el apartado [3.2 Bluetooth Y La Salud](#).

1.1 ORDEN IET/787/2013

La orden nombrada, aprueba el **Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)**. El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) establece que las bandas frecuenciales comprendidas entre los 2300-2450 MHz, los 2450-2483.5 MHz y los 2483.5-2500 MHz, y algunas otras, están asignadas a los servicios fijo, móvil y radio localización, y que se podrá hacer uso mixto (privativo o de utilización por el Estado) o de uso especial de las mismas [8].

Por otra parte, establece determinadas excepciones que se detallan en las Notas UN para el uso común de algunas de estas bandas frecuenciales. En concreto, la Nota UN-85 [25] para aplicaciones ISM, establece que la banda de frecuencias de los 2400 a 2483.5 MHz podrá ser utilizada de forma libre en redes de área local para la interconexión inalámbrica (o sin hilos) entre ordenadores y terminales o dispositivos periféricos para aplicaciones en el interior de edificios e indica que la potencia total deberá ser inferior a 100 mW (**"Potencia Isotrópica Radiada Equivalente" PIRE**) y es conforme a la Decisión de Ejecución (UE) 2017/1483 [26] sobre la armonización del espectro radioeléctrico para su uso por dispositivos de corto alcance. Es esta Orden la que nos permite usar esta tecnología libremente en el interior de edificios y por tanto, también nos permitirá realizar las prácticas y medidas disponibles en el presente Trabajo Fin de Grado.

1.2 REAL DECRETO 1066/2001

Este reglamento en su artículo 1 declara el objeto del mismo y establece las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, la autorización, planificación e inspección de instalaciones radioeléctricas en relación con los límites de exposición a las emisiones electromagnéticas (EM), el establecimiento de otras restricciones a las emisiones radioeléctricas, la evaluación de equipos y aparatos y el régimen sancionador aplicable [5]. Hace desarrollo de la Ley 14/1986 General de Sanidad, del 25 de abril, en relación con el establecimiento de límites de exposición para la protección sanitaria y la evaluación de riesgos por emisiones radioeléctricas [20].

Su ámbito de aplicación es el de las emisiones de energía debidas a las ondas electromagnéticas, que se propagan por el aire. La banda Bluetooth de 2.4 GHz cae dentro de este ámbito. Este decreto fue publicado en el BOE el 29/09/2001 en respuesta a la alarma social creada en torno a las estaciones radioeléctricas y sigue la Recomendación 1999/519/CE del Consejo de Ministros de Sanidad Europeos relativa a la exposición del público general a los Campos Electromagnéticos (CEM).

Para la aplicación de las restricciones basadas en la evaluación de los posibles efectos de las emisiones radioeléctricas sobre la salud, este Decreto diferencia restricciones básicas de niveles de referencia:

- Restricciones básicas: Según la frecuencia se expresan en términos de inducción magnética (B), densidad de corriente (J), densidad de potencia (S) o índice de absorción específica de energía (SAR).
- Niveles de referencia: A efectos prácticos, y para facilitar las mediciones, se dan niveles de intensidad de campo eléctrico (E) o magnético (H), inducción magnética (B) o densidad de flujo de potencia (S). El cumplimiento de los niveles de referencia garantiza el de las restricciones básicas.

Los operadores deberán medir los niveles de exposición en zonas cercanas a sus instalaciones en las que puedan permanecer habitualmente personas. En caso de que los límites sean superados será estrictamente necesario señalizarse y en algunos casos vallar la zona.

Para las bandas no licenciadas como ISM y teniendo en cuenta los posibles efectos adversos sobre la salud, se aconseja realizar determinados procedimientos de inspección. A continuación se presenta una extracción de las tablas del Decreto respecto a estas restricciones:

Tabla 25. Restricciones básicas para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz)

Gama de frecuencia	Inducción magnética (Tm)	Densidad de corriente (mA/m²) (RMS)	SAR medio de cuerpo entero (W/kg)	SAR localizado (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR localizado miembros) (W/kg)	Densidad de potencia S (W/m²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
>0-1 Hz	-	8	-	-	-	-
1-4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4-1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1000 Hz-100 kHz	-	f/500	-	-	-	-
100 kHz-10 MHz	-	f/500	0.08	2	4	-
10 MHz-10 GHz	-	-	0.08	2	4	-
10-300 GHz	-	-	-	-	-	10

Donde f es la frecuencia en Hz. Todos los valores absorción específica de energía (SAR) deben ser promediados a lo largo de un período cualquiera de seis minutos.

La masa promediada de absorción específica de energía (SAR) localizado la constituye una porción cualquiera de 10 g de tejido contiguo; el absorción específica de energía (SAR) máximo obtenido de esta forma debe ser el valor que se utilice para evaluar la exposición.

Los niveles de referencia de exposición sirven para compararlos con los valores de las magnitudes medidas. Estos niveles de referencia se obtienen a partir de las restricciones básicas.

El respeto de todos los niveles de referencia asegurará el cumplimiento de las restricciones básicas.

Si las cantidades de los valores medidos son mayores que los niveles de referencia, no significa necesariamente que se hayan sobrepasado las restricciones básicas. En este caso, debe efectuarse una evaluación para comprobar si los niveles de exposición son inferiores a las restricciones básicas.

Tabla 26. Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados)

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μT)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m²)
0-1 Hz		3.2 x 10 ⁴	4 x 10 ⁴	
1-8 Hz	10 000	3.2 x 10 ⁴ /f ²	4 x 10 ⁴ /f ²	
8-25 Hz	10 000	4 000/f	5 000/f	
0.025-0.8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0.8-3 kHz	250/f	5	6.25	
3-150 kHz	87	5	6.25	
0.15-1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	
1-10 MHz	87/f ^½	0.73/f	0.92/f	
10-400 MHz	28	0.73/f	0.092	2
400-2000 MHz	1 375 f ^½	0.0037/f ^½	0.0046 f ^½	f/200
2-300 GHz	61	0.16	0.20	10

La medida de referencia que nos concierne, viene dada en la última fila de la tabla anterior, que es donde se encuentra la banda frecuencial en la que está incluida la tecnología Bluetooth.

El parámetro a observar es el debido a la intensidad de campo eléctrico E (V/m) que tiene como nivel de referencia en la banda de trabajo Bluetooth (2.4 GHz) 61 V/m; nivel de referencia al cual se añaden unos factores de seguridad. Dichos factores son márgenes señalados por la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) que investiga los peligros que pueden asociarse a las diferentes formas de radiaciones no-ionizantes.

Para las restricciones básicas, se aplica un factor de protección de 10 a los entornos ocupacionales, teniendo un factor de protección para la exposición del público en general de 50 [14].

1.3 ORDEN CTE/23/2002

ORDEN CTE/23/2002 del Ministerio de Ciencia y Tecnología, de 11 de enero, [20] por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.

La ORDEN establece el método a seguir para realizar las medidas de los niveles de emisión. En dicho método se distinguen tres fases de medida, dependiendo del grado de precisión y de las características del proceso de mediciones. En todos los casos, habrá de tenerse en cuenta un conjunto de consideraciones y actuaciones necesarias para la realización de las medidas que se han resumido en lo que se denomina fase previa.

- Fase previa a las mediciones: Previamente al proceso de medida, se deberá recopilar toda la información necesaria de la estación radioeléctrica a evaluar y su entorno, al objeto de asegurar que las mediciones se efectúen en puntos de máximo nivel de emisión en los espacios en los que puedan permanecer habitualmente personas, contemplando, para ello, tanto los factores del entorno, como los factores radioeléctricos que intervendrán en las mediciones.
 - Factores del entorno de las estaciones
 - Factores radioeléctricos
- Fase-1 de medida (vista rápida de ambiente radioeléctrico): se utilizarán equipos de medida de banda ancha con sondas isotrópicas que permiten caracterizar ambientes radioeléctricos de forma rápida, aunque no ofrecen información acerca de cada componente espectral.
- Fase-2 de medida: se deben utilizar analizadores de espectro o receptores de banda ancha selectivos en frecuencia. Este tipo de equipos tienen una mayor sensibilidad y son capaces de medir con gran precisión. Por el contrario, necesitan de un mayor tiempo para realizar la medida y deben emplearse antenas cuyas características radioeléctricas estén definidas.
- Fase-3 de medida: Cuando las fuentes emisoras a analizar estén operando en frecuencias distintas a las de la fase segunda, o bien no sea posible la realización de las medidas en «campo lejano», se procederá a la realización de estas medidas, con un análisis más exhaustivo de las emisiones, con la utilización del equipamiento de medida apropiado para cada caso y se realizarán mediciones de las magnitudes necesarias.

Para este trabajo se ha hecho uso de la Fase previa a las mediciones y de la Fase 2 de medida en la que se realizan medidas en la banda de frecuencias comprendida entre 9 kHz y 3 GHz.

Como se ha nombrado en el punto dos (Fase-2 de medida) es recomendable que las medidas que se realicen en campo lejano haciendo uso de analizadores de espectros o receptores de banda ancha selectivos en frecuencia.

En el presente trabajo se han seguido estas recomendaciones para observar el comportamiento de los Campos electromagnéticos (CEM) en campo lejano donde se comportan como ondas electromagnéticas (EM) planas y se puede aplicar la Teoría Electromagnética de Maxwell.

Los resultados obtenidos en el proceso de medida, para cada magnitud, deberán compararse con los denominados niveles de decisión. Estos niveles de decisión se establecen en 6 dB por debajo de los niveles de referencia señalados en el Real Decreto 1066/2001 como se muestra en la siguiente figura en el caso del campo eléctrico E (V/m):

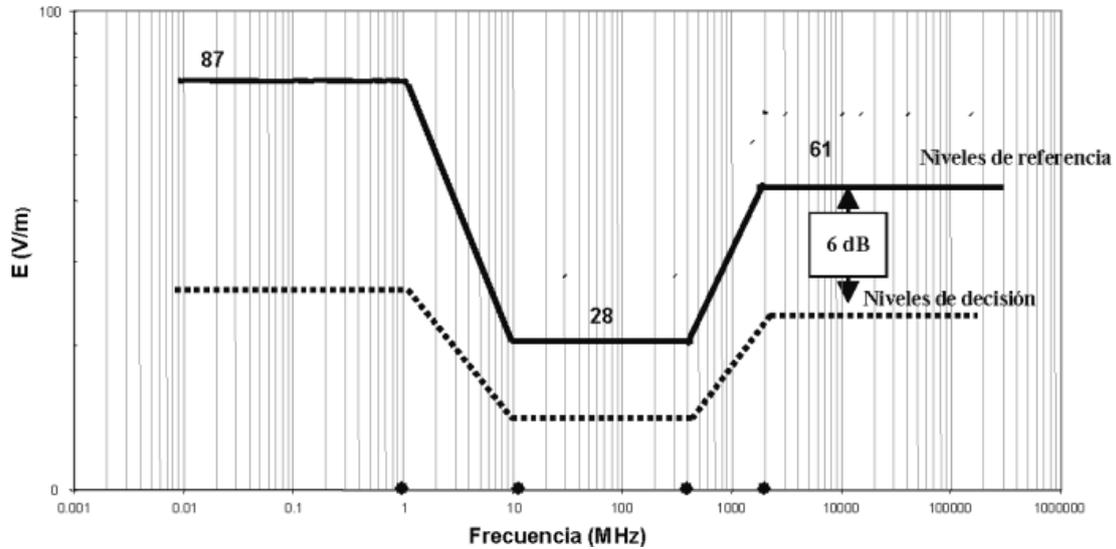


Figura 23. Intensidad de campo eléctrico V/m

Es importante comentar que a la frecuencia de trabajo no existe una metodología de medidas definidas, ya que es una banda frecuencial sin necesidad de licencia de emisiones, sin embargo, la ORDEN CTE/23/2002 especifica en su anexo IV la metodología expuesta para frecuencias comprendidas entre 9kHz-300GHz por lo que se ha considerado conveniente seguir dicha metodología para la toma de medidas en el presente Trabajo Fin de Grado.

2 ANEXO II

2.1 DISTANCIA CAMPO LEJANO

Las ecuaciones de los parámetros de las antenas son válidas en campo lejano, es decir, a una distancia tal que las ondas radiadas por la antena son planas.

El comportamiento de las ondas emitidas sobre un objeto varía en función de la distancia a la que se encuentre la antena de dicho elemento radiado. Esto se debe a que las propiedades electromagnéticas del campo electromagnético emitido varían con la distancia. Las ecuaciones clásicas de los parámetros de las antenas se definen en la región más alejada de la antena, que se corresponde con la de campo lejano, y que es donde las ondas adquieren la forma más plana.

Se distinguen tres regiones, en las que el comportamiento de las ondas va variando.

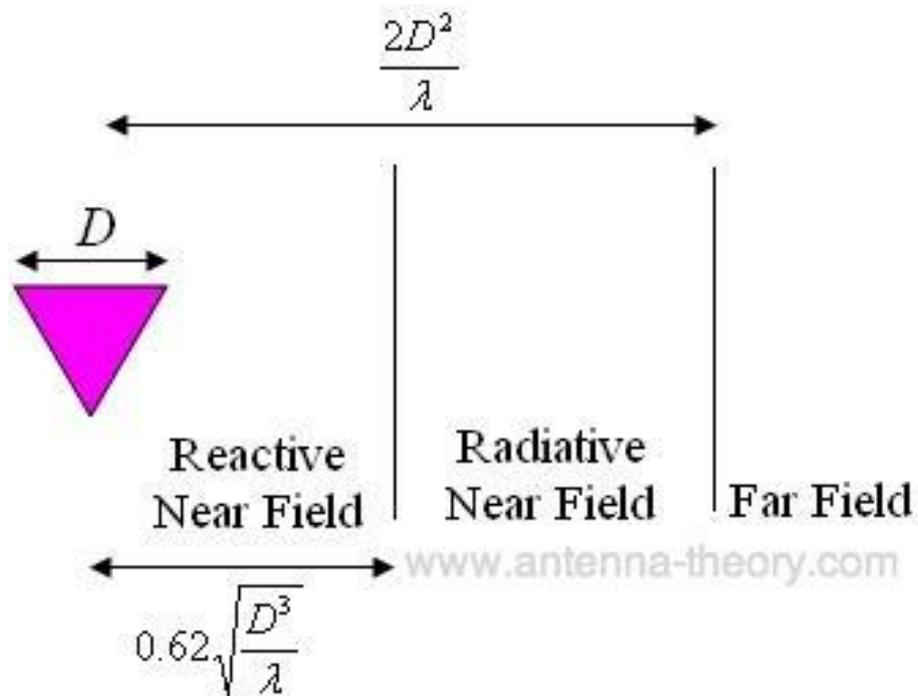


Figura 24. Regiones de campo

3 ANEXO III

MATLAB es el software utilizado para configurar el analizador de espectros ESPI3. El código MATLAB ha permitido la automatización de toma medidas con su posterior exportación a Microsoft Excel para el estudio de los datos y realización de gráficos y estadísticos.

Dicho código es el siguiente:

Programa principal

```
%ud -> identificador de dispositivo
array_z = [];
s = 0;
m = 0;
k = 0;
numero_medidas = 1;
ipESPI = '192.168.149.21';
while(numero_medidas)
    clear array_z;
    array_z = [];
    %guardamos en el identificador su dirección IP
    ud = mexrsib('ibfind', ipESPI);
    if (ud > 0)
        inicializacion(ud)
        tic
        n = 1;
        while (toc < 1000) % duración en segundos 900 = 60 * 15 mins;
            if(toc > n*1)
                mexrsib('ibwrt',ud,'CALC:MARK:FUNC:POW:RES? MCAC');
                pot = mexrsib('ibrdr',ud);
                [potencia, tmp] = calculopotencia(pot);
                %
                j=1;
                for j=1:4
                    array_z(n,j) = str2double(potencia(tmp(j):tmp(j+1)))
                end
                n = n+1;
            end
            s = s+1;
            if (s == 59)
                m = m+1;
                s = -1;
            end
            pause(1);
        end
    end
    array_z = array_z'; %creamos un array de columnas
    fecha = strrep(datestr(now),' ','-');
    fecha = strrep(fecha,':','-');
    nombre = strcat('MEDIDAX C/S OBSTACULO XCM V/H_', fecha, '.xlsx');
    %exportamos a un Excel
    xlswrite(nombre,array_z);
    pause(0.1);
    numero_medidas = numero_medidas - 1;
    array_z = [];
end
```

Para que el analizador de espectro funcione de manera correcta es necesario que se encuentre configurado en función al tipo de señal que nos encontramos midiendo.

Lo que nos lleva a realizar una configuración manual anterior a la realización del programa para ver qué parámetros del analizador de espectros son los correctos para medir. La configuración propuesta para la posterior programación del analizador de espectros es:

Tabla 27. Parámetros a configurar en el analizador de espectros

Parámetro	Valor
Frecuencia central	2450 MHz
Span¹	100 MHz
Detector²	RMS
SWT³	2.5 ms
RBW⁴	1 MHz
VBW⁵	3 MHz
Trace⁶	Clear/Write

Subrutina de inicialización

```
function [ ] = inicializacion( ud )
    %iniciamos el dispositivo
    mexrsib('ibwrt',ud,'*RST;*CLS')
    %identificamos el dispositivo
    mexrsib('ibwrt',ud,'*IDN?')
    IdStr = mexrsib('ilrd',ud,100);
    %actualización del Display en ON
    mexrsib('ibwrt',ud,'SYST:DISP:UPD ON');
    %transferencia de datos binaria
    mexrsib('ibwrt',ud,'FORM:DATA REAL,32');
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:SWE:TIME 2.5ms');
    %configuración del dispositivo
    mexrsib('ibwrt',ud,'DET RMS');
    %video bandwidth
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:BAND:VID 3MHZ');
    %resolution bandwidth
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:BAND:RES 1MHz');
    %nivel de referencia
    mexrsib('ibwrt',ud,'DISPLAY:TRACE:Y:RLEVEL -10dBm');
    %FRECUENCIA CENTRAL
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:FREQ:CENT 2.45GHz');
    %seleccionamos multicarrier acp
    mexrsib('ibwrt',ud,'CALC:MARK:FUNC:POW:SEL MCAC');
    %canales adyacentes 0
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:POW:ACH:ACP 0');
    %canales de transmisión 4
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:POW:ACH:TXCH:COUN 4');
    %SPAN (necesario la configuración después de la configuración de
    %canales adyacentes y de transmisión)
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:FREQ:SPAN 100MHz');
    %ancho de banda por canal 22MHz
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:POW:ACH:BWID:CHAN 22MHZ');
    %espacion entre canales 22MHz
    mexrsib('ibwrt',ud,'SENSe:POW:ACH:SPAC:CHAN 22MHZ');
    %Realizar un barrido y esperar a que la operación termine
    mexrsib('ibwrt',ud,'INIT;*OPC?')
    mexrsib('ibwrt',ud,'CALC:UNIT:POW DBM');
end
```

Subrutina de cálculo de potencias

```
function [ potencia, tmp ] = calculopotencia( pot )  
  
%quitamos punto y coma  
potencia = pot(1:length(pot)-1);  
%añadimos una coma al final  
potencia = strcat(',',potencia,',');  
%localizamos las comas  
tmp = regexp(potencia,',');  
%fin = length(tmp);  
end
```

***NOTA:**

1. El **Span** es el rango de frecuencia que se desea visualizar en la pantalla.
2. El **detector RMS** obliga al analizador de espectros a mostrar el valor de potencia que se obtiene como el valor cuadrático medio de las medidas tomadas por el analizador.
3. El **Sweep Time (SWT)**, o tiempo de barrido, es el tiempo que tarda el analizador en obtener en un sólo barrido los resultados del rango de frecuencias representado en la pantalla.
4. **Resolution Bandwidth (RBW)**, o ancho de banda de resolución determina qué tan bien se pueden separar señales próximas entre sí. Cuanto más pequeño sea el RBW, más claramente se pueden diferenciar dos señales cercanas como señales separadas y presentarlas con mayor precisión.
5. **Video Bandwidth (VBW)**, o ancho de banda de vídeo es el encargado de suavizar la traza mediante la reducción del ruido. Las medidas de potencia no serán correctas si el valor de VBW no es al menos tres veces el ancho de banda de resolución; es decir, $VBW \geq 3 \cdot RBW$
6. **Clear/Write**, el analizador sobrescribe la traza en cada barrido.

4 ANEXO IV

El presente anexo está dedicado al procedimiento que se ha de seguir para la calibración correcta del analizador de redes que ha sido utilizado (KEYSIGHT ENA E5071C-280).

El procedimiento es el siguiente:

1. Pulsar las teclas Channel Next/Channel Prev para seleccionar el canal para el que desea realizar la calibración.
2. Pulsar la tecla Cal.
3. Haga clic en Calibrar > Calibración de 2 puertos.
4. Haga clic en Seleccionar puertos y, a continuación, seleccione los puertos de prueba en los que realizará la calibración completa de 2 puertos. (En el procedimiento siguiente, los puertos de prueba seleccionados se indican como x e y.)
5. Haga clic en **Reflection**.
6. Conecte una salida OPEN al puerto de prueba x (el conector al que se va a conectar el DUT).
7. Haga clic en OPEN para iniciar la medición de calibración (x indica el puerto de prueba al que está conectado el estándar).
 - a. Tener cuidado con las salidas, observar bien si se conecta un macho (m) o hembra (f) ya que de ello depende la tecla a la que pulsar.
8. Desconecte la salida OPEN y sustitúyalo por una salida SHORT.
9. Haga clic en SHORT para iniciar la medición de calibración (x indica el puerto de prueba al que está conectado el estándar).
10. Desconecte la salida SHORT y sustitúyalo por una salida LOAD.
11. Haga clic en LOAD para iniciar la medición de calibración (x indica el puerto de prueba al que está conectado el estándar).
12. Repita el procedimiento anterior para el puerto y.
13. Haga clic en Volver.
14. Haga clic en **Transmission**.
15. Realice una conexión THRU entre los puertos x e y (entre los conectores a los que se va a conectar el DUT).
16. Haga clic en THRU para iniciar la medición de calibración (x e y indican los puertos de prueba entre los que se está realizando la conexión THRU).
17. Haga clic en Volver.
18. Si se debe realizar una calibración de **Isolation (Optional)** utilizando una salida LOAD, siga el procedimiento siguiente.
19. Haga clic en **Isolation (Optional)**.
20. Conecte una salida LOAD a cada uno de los dos puertos de prueba (conectores a los que se va a conectar el DUT).
21. Haga clic en ISOL para iniciar la medición de calibración (x e y indican los números de puerto a los que está conectado el estándar LOAD).
22. Haga clic en Volver.
23. Haga clic en Listo para finalizar el proceso completo de calibración de 2 puertos. Al pulsar esta tecla se calculan y memorizan los coeficientes de calibración. La función de corrección de errores también se activará automáticamente.

Por tanto, en la calibración completa de dos puertos, los datos de calibración se miden conectando una salida en OPEN (circuito abierto), una salida SHORT (cortocircuito) y una salida LOAD (carga adaptada de 50 Ω) a los dos puertos de prueba deseados y finalmente un THRU (conexión directa) entre los dos puertos, como se muestra en la siguiente figura:

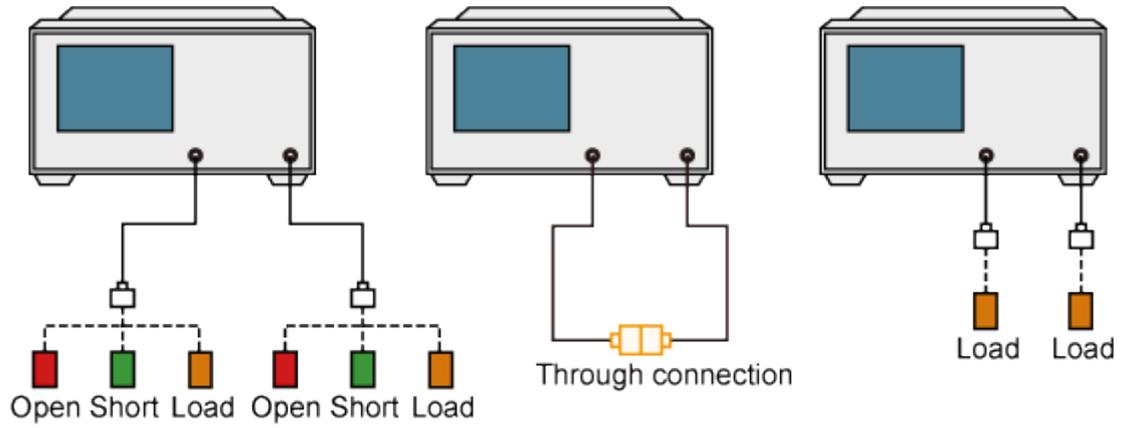


Figura 25. Calibración de analizador de redes

5 ANEXO V

Para el diseño y simulación de la antena utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado, se ha programado en MATLAB dicha antena. Sin embargo, primeramente fue necesario realizar un estudio de ecuaciones ligadas a antenas microstrip para saber las dimensiones que se debían de utilizar en el diseño.

5.1 Ecuaciones

Existen una serie de parámetros de diseño a tomar en cuenta:

- h : Altura del substrato (m)
- c : Velocidad de la luz (m/s)
- f_0 : Frecuencia de operación (Hz)
- ϵ_r : Permitividad efectiva del dieléctrico (Adimensional)
- ϵ_{eff} : Permitividad efectiva (Adimensional)

5.2 Antena microstrip rectangular

Debido a su sencillez para el diseño, el parche microstrip rectangular se define según su anchura (W) y su longitud (L).

Para una primera aproximación de diseño, se utilizan las siguientes expresiones para calcular la anchura y longitud que debe tener el parche para que resuene a la frecuencia de operación esperada en función de los siguientes parámetros:

Frecuencia:

$$f_0 = 2.45 \text{ GHz}$$

Material:

FR4: Fibra de vidrio

Constante dieléctrica:

$$\epsilon_r = 4.8$$

Altura del dieléctrico:

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

Velocidad de la luz:

$$c = 3 \times 10^8$$

Calculo del ancho (W)

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \cdot 2.45 \times 10^9 \sqrt{\left(\frac{4.8 + 1}{2}\right)}} = 35.952 \text{ mm}$$

Calculo del dieléctrico efectivo:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-1/2} = \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(1 + 12 \cdot \frac{1.5}{35.952}\right)^{-1/2} = 4.451$$

Incremento de la longitud (ΔL):

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \\
 &= 0.412 \cdot 1.5 \cdot \frac{(4.451 + 0.3) \cdot \left(\frac{35.952}{1.5} + 0.264\right)}{(4.451 - 0.258) \cdot \left(\frac{35.952}{1.5} + 0.8\right)} = 0.685 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Calculo de la Longitud Efectiva:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{3 \times 10^8}{2 \cdot 2.45 \times 10^9 \sqrt{4.451}} = 29.019 \text{ mm}$$

Calculo de la Longitud (L):

$$L = L_{eff} - 2 \cdot \Delta L = (29.019 - 2 \cdot 0.685) \text{ mm} = 27.649 \text{ mm}$$

Calculo de la longitud del plano de tierra (L_g):

$$L_g = 6 \cdot h + L = (6 \cdot 1.5 + 27.649) \text{ mm} = 36.649 \text{ mm}$$

Calculo de la anchura del plano de tierra (W_g):

$$W_g = 6 \cdot h + W = (6 \cdot 1.5 + 35.952) \text{ mm} = 44.952 \text{ mm}$$

Lugar de la alimentación:

$$y_f = \frac{W}{2} = \frac{35.952}{2} = 17 \text{ mm}$$

$$x_f = \frac{L}{\sqrt{\varepsilon_r}} = 13 \text{ mm}$$

5.3 Programa en MATLAB

Teniendo en cuenta los valores anteriores, el software realizado en MATLAB es el siguiente:

```
%Definimos el dieléctrico/Substrato
d = dielectric('Name','FR4',...
              'EpsilonR',4.8,...
              'LossTangent',0.0026,...
              'Thickness',0.0015);

%%
%Definimos la impedancia
le = lumpedElement('Impedance',50);
%%
%Rango de frecuencia
freqRange=2.3e9:15e6:2.5e9;
%%
%Caracterizamos la antena
pm = patchMicrostrip('Length',0.02765,...
                     'Width',0.035952,...
                     'Height',0.0015,...
                     'GroundPlaneLength',0.03665,...
                     'GroundPlaneWidth',0.044952,...
                     'PatchCenterOffset',[0 0],...
                     'Substrate',d,...
                     'FeedOffset',[-0.011 -0.013],...
                     'Tilt',0,...
                     'TiltAxis',[1 0 0],...
                     'Load',le);

%%
%Observamos el diseño de la misma
figure;
show(pm)
%Calculamos parámetro S11
figure;
s = sparameters(pm, freqRange);
rfplot(s)
%%
%Calculamos el ancho de haz
figure;
beamwidth(pm,2.45e9,0,1:1:360);
%%
%Distribución de carga
figure;
charge(pm,2.45e9,'dielectric')
%%
%Distribución de corrientes
figure;
current(pm,2.45e9,'dielectric')
%%
%Patrón de radiación
figure;
pattern(pm, 2.45e9)
%%
%VSWR
figure;
vswr(pm,freqRange,50)
```

6 ANEXO VI

Los percentiles son una manera de analizar los valores de una serie estadísticamente. El percentil es una medida de tendencia central que indica, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo de observaciones.

El **percentil 10** (PER. 10) muestra el valor que tiene el 90% de los valores por encima de él y por tanto, representa poca actividad. Este es el percentil adecuado para calcular valores mínimos de exposición electromagnética (EM).

El **percentil 50** (PER. 50) es la mediana y proporciona la distribución media de la potencia; es decir, la mitad de los valores están por debajo y la otra mitad por encima. Este es el valor adecuado para cuantificar el valor de la exposición electromagnética (EM). Si ambos percentiles (P10 y P50) fueran similares indicaría que apenas hay tráfico.

El **percentil 90** (PER. 90) es aquel valor que deja al 90% de los valores de la serie con magnitudes menores o iguales que él; o lo que es lo mismo, al 10% restante con magnitudes mayores o iguales que él. Este percentil representa, por tanto, bastante actividad y es adecuado para calcular valores máximos de exposición electromagnética (EM).

Los **percentiles 99** (PER. 99) representan prácticamente los valores máximos de potencia.

7 ANEXO VII

En el presente anexo se realizan graficas de cada material indicando el grosor de cada uno de ellos.

7.1 Grosores

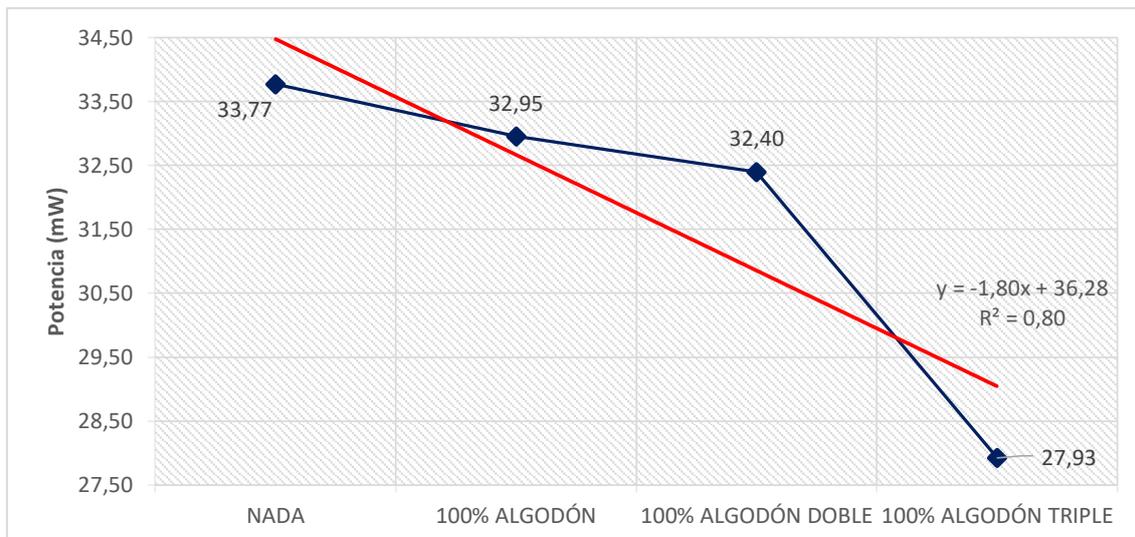
Tabla 28. Grosor de los distintos textiles

Textil	Grosor
ALGODÓN	45 μm
POLIÉSTER	55 μm
PLÁSTICO	25 μm
LINO	45 μm
NYLON	10 μm
82% POLIESTER 18% ELASTICO	75 μm
50% POLIESTER 50% ALGODÓN	85 μm
65% POLIESTER 35% ALGODÓN	50 μm
90% NEOPRENO 10% NYLON DOBLE	570 μm
100% ACRÍLICO DOBLE	825 μm
70% LANA 30% ACRÍLICO DOBLE	925 μm
100% LANA DOBLE	2 cm

7.2 Textiles principales

Tabla 29. Tabla comparativa de diferentes capas de algodón

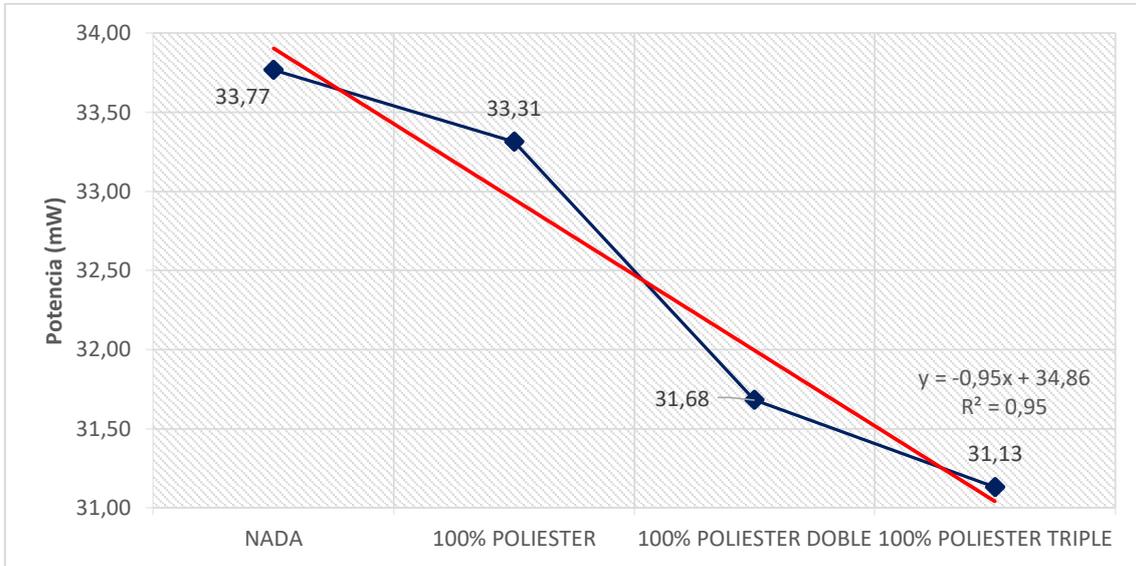
	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
100% ALGODÓN	-14.82	32.95	0.81
100% ALGODÓN DOBLE	-14.90	32.40	1.37
100% ALGODÓN TRIPLE	-15.54	27.93	5.84



Gráfica 8. Comparativa de diferentes capas de algodón

Tabla 30. Tabla comparativa de diferentes capas de poliéster

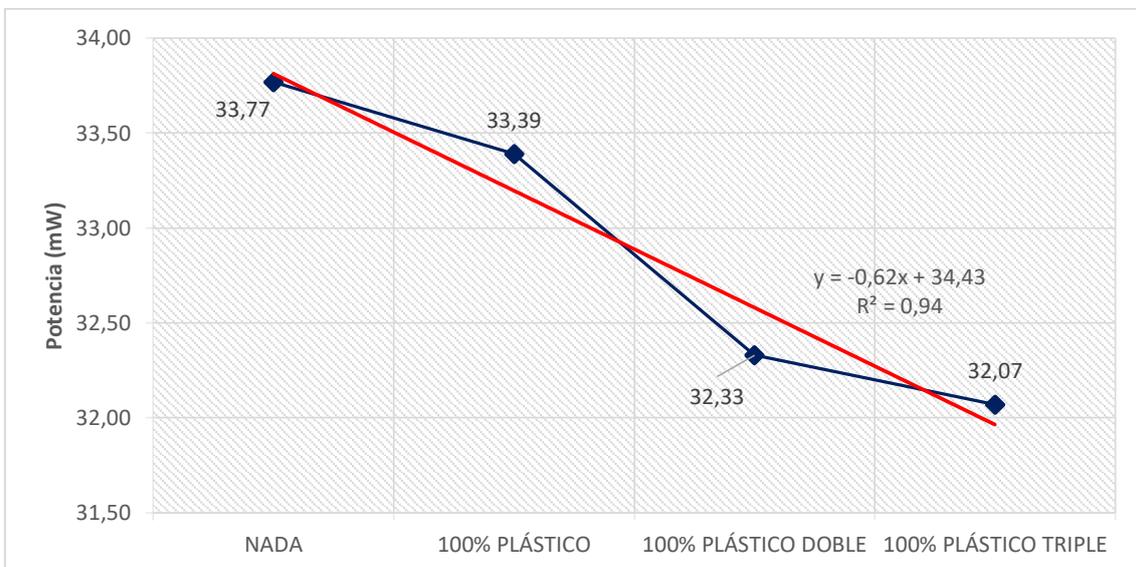
	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
100% POLIESTER	-14.77	33.31	0.46
100% POLIESTER DOBLE	-14.99	31.68	2.09
100% POLIESTER TRIPLE	-15.07	31.13	2.64



Gráfica 9. Comparativa de diferentes capas de poliéster

Tabla 31. Tabla comparativa de diferentes capas de plástico

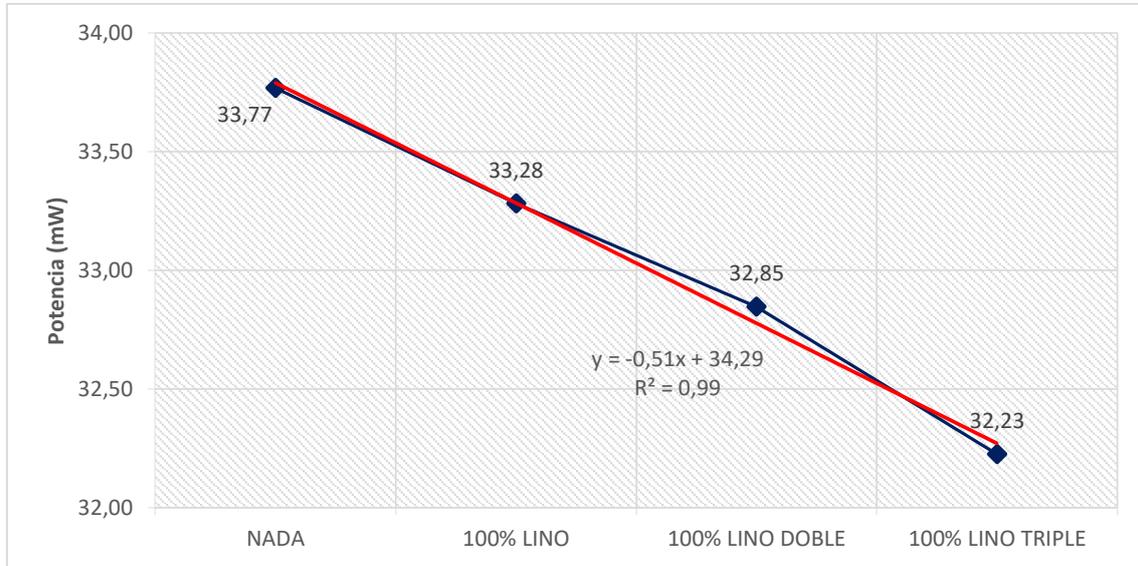
	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
100% PLÁSTICO	-14.76	33.39	0.38
100% PLÁSTICO DOBLE	-14.90	32.33	1.44
100% PLÁSTICO TRIPLE	-14.94	32.07	1.70



Gráfica 10. Comparativa de diferentes capas de plástico

Tabla 32. Tabla comparativa de diferentes capas de lino

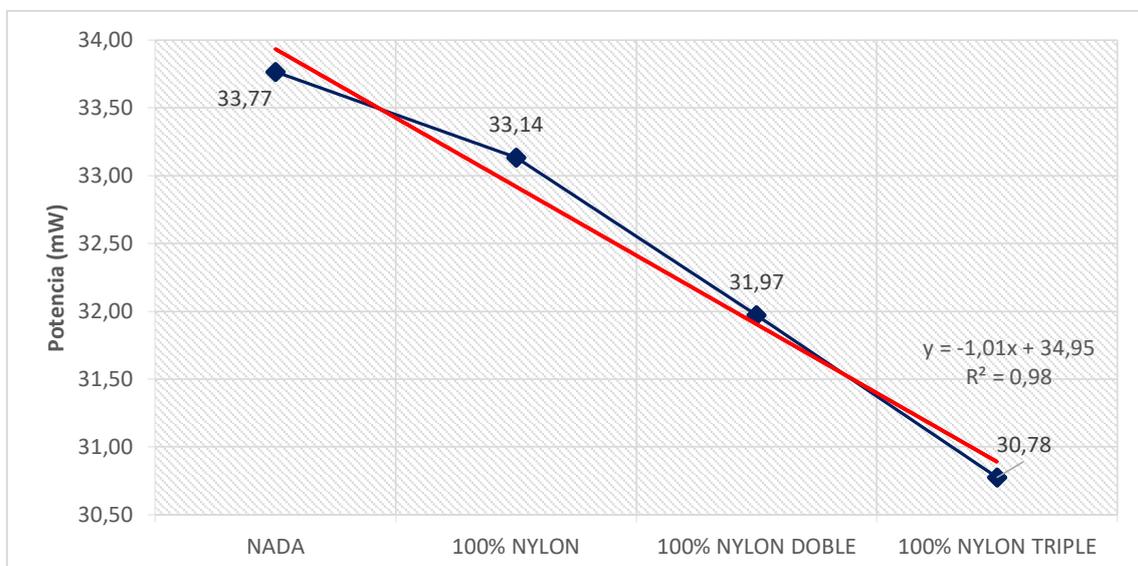
	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
100% LINO	-14.78	33.28	0.49
100% LINO DOBLE	-14.84	32.85	0.92
100% LINO TRIPLE	-14.92	32.23	1.54



Gráfica 11. Comparativa de diferentes capas de lino

Tabla 33. Tabla comparativa de diferentes capas de nylon

	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
100% NYLON	-14.80	33.14	0.63
100% NYLON DOBLE	-14.95	31.97	1.79
100% NYLON TRIPLE	-15.12	30.78	2.99

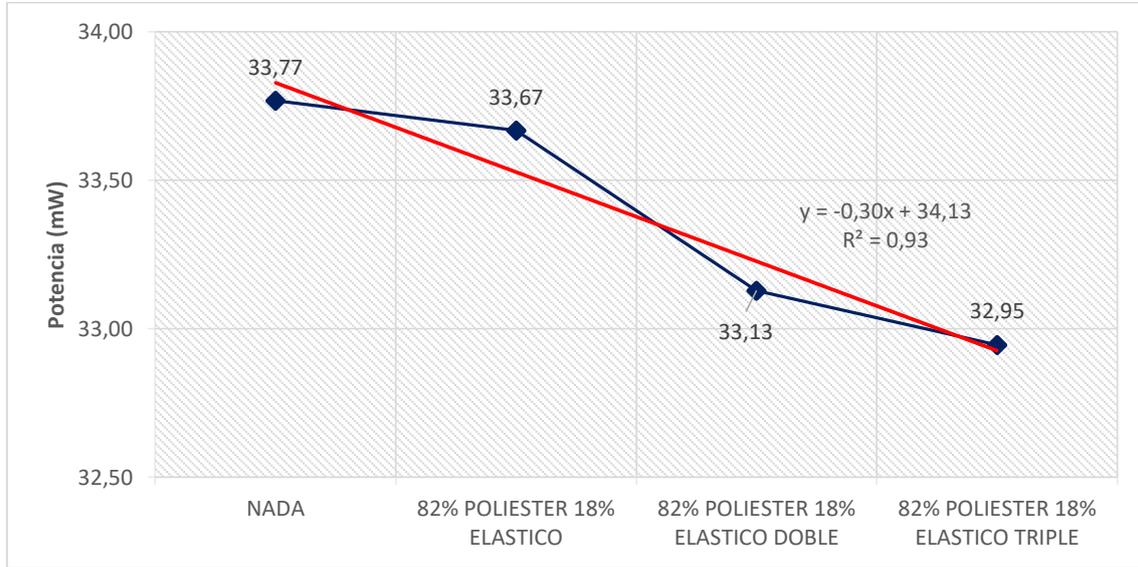


Gráfica 12. Comparativa de diferentes capas de nylon

7.3 Compuestos

Tabla 34. Tabla comparativa de distintas capas de 82%Poliéster18%Elástico

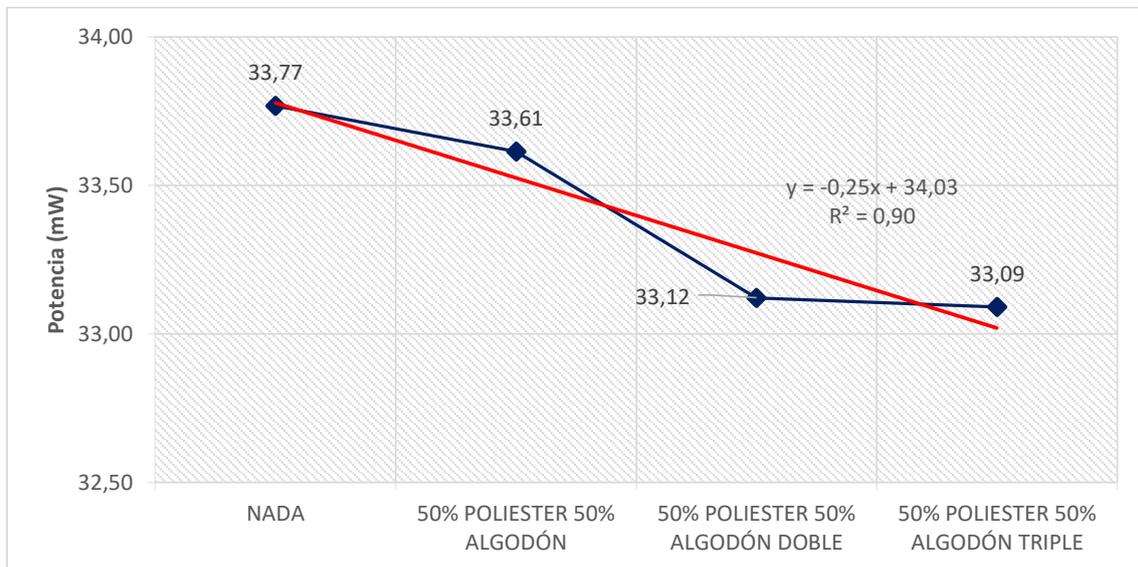
	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
82% POLIESTER 18% ELASTICO	-14.73	33.67	0.10
82% POLIESTER 18% ELASTICO DOBLE	-14.80	33.13	0.64
82% POLIESTER 18% ELASTICO TRIPLE	-14.82	32.95	0.82



Gráfica 13. Comparativa de distintas capas de 82%Poliéster18%Elástico

Tabla 35. Tabla comparativa de distintas capas de 50%Poliéster50%Algodón

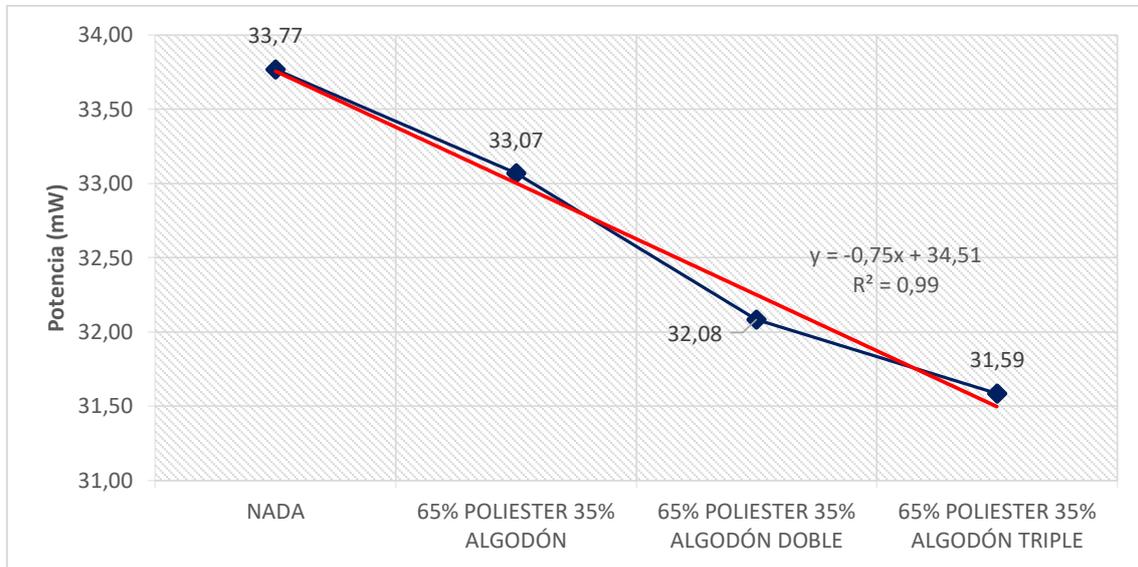
	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
50% POLIESTER 50% ALGODÓN	-14.74	33.61	0.16
50% POLIESTER 50% ALGODÓN DOBLE	-14.80	33.12	0.65
50% POLIESTER 50% ALGODÓN TRIPLE	-14.80	33.09	0.68



Gráfica 14. Comparativa de distintas capas de 50%Poliéster50%Algodón

Tabla 36. Tabla comparativa de distintas capas de 65%Poliéster35%Algodón

	Parámetro S21 (dB)	Parámetro S21 (mW)	Diferencia (mW)
65% POLIESTER 35% ALGODÓN	-14.81	33.07	0.70
65% POLIESTER 35% ALGODÓN DOBLE	-14.94	32.08	1.68
65% POLIESTER 35% ALGODÓN TRIPLE	-15.01	31.59	2.18



Gráfica 15. Comparativa de distintas capas de 65%Poliéster35%Algodón