

Diseño de antenas wearable de banda estrecha

Sergio Vived Sánchez

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Sistemas de Alta Frecuencia

Ignacio Gil Galí

Germán Cobo Rodríguez

Julio 2023

Índice

1. INTRODUCCION	4
2. DIAGRAMA DE GANTT	5
3. OBJETIVOS	5
4. METODOLOGÍA	6
5. ESTADO DEL ARTE	6
5.1 PARAMETROS DE ANTENA	6
5.1.1 PERDIDAS DE RETORNO [S_{11}]	6
5.1.2 ANCHO DE BANDA	7
5.1.3 EFICIENCIA	7
5.1.4 DIRECTIVIDAD	8
5.1.5 GANANCIA	8
5.1.6 PATRÓN DE RADIACIÓN	8
5.2 SUSTRATOS	9
5.2.1 PERMITIVIDAD	9
5.2.2 TANGENTE DE PERDIDAS	9
5.3 REVISIÓN DE LAS TÉCNICAS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA MICROSTRIP	10
5.3.1 MECANISMO DE RADIACIÓN	11
5.3.2 ALIMENTACIÓN DEL PARCHE	12
5.4 MATERIALES	17
5.4.1 MATERIALES NO CONDUCTORES	17
5.4.2 MATERIALES CONDUCTORES	19
5.4.3 DEFORMACIÓN MECÁNICA	21
5.5 TÉCNICAS DE FABRICACION	22
5.5.1 SERIGRAFIA	22
5.5.2 IMPRESIÓN POR CHORRO DE TINTA	22
5.5.3 HUECOGRABADO	23
5.5.4 LÁMINAS DE COBRE PEGADAS	23
5.5.5 ELECTROTEXTILES	23
5.5.6 SIW	24
5.5.7 BORDADO	24
5.6 ANTENAS MICROSTRIP	27
5.7 PRODUCTOS COMERCIALES	28
6. DISEÑOS	30
6.1 SOFTWARE	30
6.2 SIMULACIONES DE TEST	31
6.2.1 PRIMERA SIMULACIÓN	31
6.2.2 PRIMER DISEÑO	33
6.3 SIMULACIONES DE ANTENAS DEL ESTADO DEL ARTE	38
6.3.1 ANTENA DE DOS PUERTOS	38
6.3.2 ANTENA DE POLIESTER	41
6.3.3 ANTENA PIFA	44
6.3.4 ANTENA EN DENIM	47
6.3.5 ANTENA FRACTAL	50
6.3.6 ANTENA DOBLADA Y BORDADA	53
6.4 DISEÑOS PROPUESTOS	56
6.4.1 DISEÑO DE UNA ANTENA BASADA EN UNA CREMALLERA	56
6.4.2 DISEÑO DE UNA ANTENA BASADA EN UN BOTÓN	60
6.4.3 DISEÑO DE UNA ANTENA BASADA EN UN CINTURÓN	64
6.4.4 COMPARATIVA DE LAS ANTENAS DISEÑADAS	68
7. CONCLUSIONES	69
7.1 LINEAS DE TRABAJO FUTURAS	70
8. PRESUPUESTO	70
9. BIBLIOGRAFÍA	71

LISTA DE FIGURAS

1	Diagrama de Gantt	5
2	Patrón omnidireccional	8
3	Plano E y Plano H	8
4	Antena microstrip	10
5	Vista en perspectiva del mecanismo de radiación	11
6	Corte del mecanismo de radiación	11
7	Alimentación del parche a través de un orificio	12
8	Alimentación del parche desde un lateral	13
9	Alimentación del parche por inducción	13
10	Dimensiones respecto ϵ_r	15
11	Dimensiones respecto f_c	15
12	Eficiencia respecto h	16
13	Ancho de banda respecto h	16
14	Especificaciones del fabricante de LIBERATOR 40	21
15	Vista en planta y corte de fibra tejida	22
16	Vista en planta y corte de fibra tejida con una capa impresa	22
17	Proceso de fabricación de capas por impresión	23
18	Substrate Integrated Waveguides	24
19	Antena RFID con chip	25
20	Máquina de bordar ZSK SGW 0100-1375-1200	25
21	Proceso de bordado	26
22	Smart Gartments comercializados por Hexoskin	28
23	AOI Sleeve comercializada por Komodo Tech	28
24	Smart Digital Yoga Pants comercializadas por WearableX	29
25	T-shirt that integrated Smart Sensors por Ambiotex	29
26	Primera simulación – Esquema de diseño	31
27	Primera simulación – Layout generado	31
28	Primera simulación – Edición del sustrato	31
29	Primera simulación – Perdidas de retorno	32
30	Primera simulación – Diagrama de radiación	32
31	Primera simulación – Ganancia y directividad	32
32	Primer diseño – Layout	34
33	Primer diseño – Sustrato	35
34	Primer diseño – Perdidas de retorno	35
35	Primer diseño – Optimización	36
36	Primer diseño – Perdidas de retorno con optimización	36
37	Primer diseño – Diagrama de radiación	36
38	Primer diseño – Ganancia y directividad θ	37
39	Primer diseño – Ganancia y directividad φ	37
40	Simulación 1 – Vista desde arriba de la antena fabricada	38
41	Simulación 1 – S_{11} medida	38
42	Simulación 1 – Layout	38
43	Simulación 1 – Sustrato	39
44	Simulación 1 – Perdidas de retorno	39
45	Simulación 1 – Diagrama de radiación	39
46	Simulación 1 – Ganancia y directividad θ	40
47	Simulación 1 – Ganancia y directividad φ	40
48	Simulación 2 – La antena acabada	41
49	Simulación 2 – Layout	42
50	Simulación 2 – Sustrato	42
51	Simulación 2 – Perdidas de retorno	43
52	Simulación 2 – Diagrama de radiación	43
53	Simulación 2 – Ganancia y directividad θ	43
54	Simulación 2 – Ganancia y directividad φ	43
55	Simulación 3 – Antena F plana invertida PIFA	44

56	Simulación 3 – Layout	44
57	Simulación 3 – Sustrato	45
58	Simulación 3 – Pérdidas de retorno	45
59	Simulación 3 – Diagrama de radiación	45
60	Simulación 3 – Ganancia y directividad θ	46
61	Simulación 3 – Ganancia y directividad φ	46
62	Simulación 4 – Antena parche microstrip	47
63	Simulación 4 – Layout	47
64	Simulación 4 – Sustrato	48
65	Simulación 4 – Pérdidas de retorno	48
66	Simulación 4 – Diagrama de radiación	48
67	Simulación 4 – Ganancia y directividad θ	49
68	Simulación 4 – Ganancia y directividad φ	49
69	Simulación 5 – Antena parche fractal	50
70	Simulación 5 – Layout	51
71	Simulación 5 – Sustrato	51
72	Simulación 5 – Pérdidas de retorno	52
73	Simulación 5 – Diagrama de radiación	52
74	Simulación 5 – Ganancia y directividad θ	52
75	Simulación 5 – Ganancia y directividad φ	52
76	Simulación 6 – Antena monopolo hueco cavidad	53
77	Simulación 6 – Layout	53
78	Simulación 6 – Sustrato	54
79	Simulación 6 – Pérdidas de retorno	54
80	Simulación 6 – Diagrama de radiación	54
81	Simulación 6 – Ganancia y directividad θ	55
82	Simulación 6 – Ganancia y directividad φ	55
83	Cremallera – Imagen de una cremallera	56
84	Cremallera – Layout	57
85	Cremallera – Sustrato	57
86	Cremallera – Pérdidas de retorno	57
87	Cremallera – Optimización	58
88	Cremallera – Diagrama de radiación	59
89	Cremallera – Ganancia y directividad θ	59
90	Cremallera – Ganancia y directividad φ	59
91	Botón – Imagen de el botón	60
92	Botón – Layout	61
93	Botón – Sustrato	61
94	Botón – Pérdidas de retorno	62
95	Botón – Optimización	62
96	Botón – Diagrama de radiación	63
97	Botón – Ganancia y directividad θ	63
98	Botón – Ganancia y directividad φ	63
99	Cinturón – Imagen del cinturón	64
100	Cinturón – Layout	65
101	Cinturón – Sustrato	65
102	Cinturón – Pérdidas de retorno	66
103	Cinturón – Optimización	66
104	Cinturón – Diagrama de radiación	67
105	Cinturón – Ganancia y directividad θ	67
106	Cinturón – Ganancia y directividad φ	67
107	Comparación de pérdidas de retorno	69

LISTA DE TABLAS

1	Materiales conductores usados en la fabricación de parches	10
2	Materiales dieléctricos usados en la fabricación de parches	11
3	Propiedades dieléctricas de sustratos de materiales textiles	18
4	Propiedades de conductores en laminas	19
5	Propiedades de conductores en fibras monofilamento	19
6	Propiedades de conductores en fibras multifilamento	20
7	Propiedades de conductores en fibras multifilamento 100% acero inoxidable	20
8	Diferentes modelos de antenas	27
9	Resultados de la primera simulación	32
10	Especificaciones del primer diseño	35
11	Resultados del primer diseño	37
12	Especificaciones de la simulación 1	39
13	Resultados de la simulación 1	40
14	Especificaciones de la simulación 2	42
15	Resultados de la simulación 2	43
16	Especificaciones de la simulación 3	45
17	Resultados de la simulación 3	46
18	Especificaciones de la simulación 4	48
19	Resultados de la simulación 4	49
20	Resultados de la simulación 5	52
21	Resultados de la simulación 6	54
22	Especificaciones cremallera	56
23	Comparación con el valor optimizado de cremallera	58
24	Resultados cremallera	58
25	Especificaciones botón	60
26	Resultados botón	63
27	Especificaciones cinturón	64
28	Resultados cinturón	66
29	Comparativa de los diseños	68

1. INTRODUCCION

Hoy en día se dispone de una nueva tecnología que va a unir el mundo físico con el virtual, realizando la conexión entre objetos diferentes y entre objetos y redes, es el internet de las cosas “*Internet of Things (IoT)*”. Como una parte de IoT, la tecnología wearable permite conocer en tiempo real datos del portador, así, los accesorios wearables son cualquier tipo dispositivo electrónico diseñado para ser llevado por el usuario, puede ser joyería, dispositivos médicos, prendas de ropa o parte de ellas, un ejemplo sencillo puede ser un parche cutáneo con sensores que transmitan datos de forma inalámbrica a un centro hospitalario.

Siempre ha resultado sumamente práctico llevar puestos objetos que faciliten la vida, haciendo un poco de retrospectiva y salvando las distancias los orígenes de la tecnología wearable se remontan al siglo XIII con la invención de las gafas y en el siglo XV con el desarrollo de relojes lo suficientemente pequeños para llevarlos encima, de aquí hasta 1975, año en que la marca Pulsar comercializo el primer reloj de pulsera con calculadora, poco después, en 1979 Sony lanza al mercado el Walkman, muy popular para escuchar música en los años 80, durante esta década en el campo de la medicina aparecieron los primeros audífonos digitales en 1987, en 1994 Steve Mann, investigador canadiense, invento la cámara web inalámbrica portátil estableciendo un punto de partida de la tecnología IoT, a partir de aquí y ya en la década de los 2000 llegan los auriculares bluetooth, Fitbit y Nike+iPod sports kit, en 2013 las Google Glass, en 2015 el Apple watch, en 2016 ya las primeras gafas de VR Oculus Rift y ahora mismo los diseñadores de ropa están empezando a interesarse por integrar dispositivos inteligentes en las prendas.

El modo en que los sensores que un dispositivo wearable transmita la información puede variar, se puede dar el caso de que el receptor está muy cerca o puede ser que lo separe una distancia que haga necesaria la utilización de una antena.

Aunque en IoT wearable se están desarrollando aplicaciones que dan respuesta a campos como la medicina, sistemas de posicionamiento, medición de actividad deportiva, seguridad ciudadana o aplicaciones en el ámbito militar, en este TFG se aborda la necesidad futura de integrar las antenas como parte de la ropa, siendo varias las ideas de accesorios que pueden servir para dar soporte físico a la antena, se hace una introducción de los materiales textiles disponibles en la actualidad que son susceptibles de ser empleados en la fabricación de antenas wearable y que técnicas de fabricación están disponibles para producir las antenas wearable.

En estos últimos años se han realizado estudios y prototipos de antenas textiles, se muestran algunas de ellas y se han simulado mediante software, son antenas microstrip que presentan diversas formas y han servido de base para el desarrollo, estudio y simulación de las antenas wearable objeto del trabajo. Se realiza un estudio, simulación y optimización, obteniendo unos resultados en que quedan reflejados los principales parámetros de cada antena.

2. DIAGRAMA DE GANTT

La realización del TFG se ha distribuido por etapas, de 25 días, en cada una de las cuales se trata de llegar a un objetivo específico:

- PAC 1 → Recopilar de la información
- PAC 2 → Desarrollar agilidad con el uso del simulador
- PAC 3 → Realizar simulaciones para comprobar que elementos son viables
- PAC 4 → Desarrollar las antenas escogidas y elaborar el documento

Dentro de cada etapa se ha establecido una subdivisión con los apartados que se han considerado los más importantes.

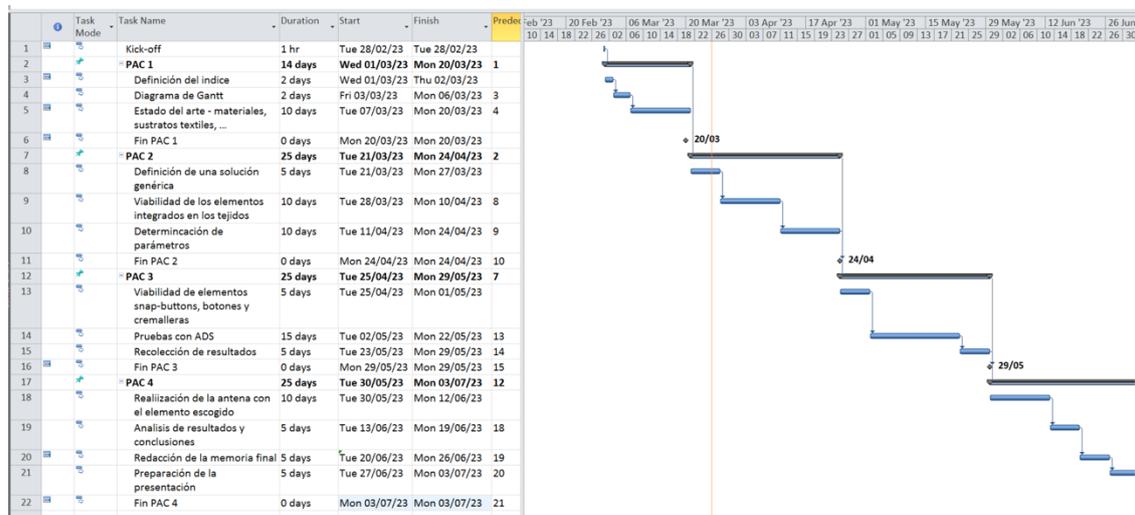


Figura 1 – Diagrama de GANTT

3. OBJETIVOS

Los objetivos del trabajo son los siguientes:

- Estudiar el estado del arte de las antenas wearable en sustratos flexibles y sus propiedades y aplicaciones.
- Determinar unas reglas de diseño y directrices para el diseño a nivel de layout de antenas microstrip wearable en sustratos flexibles textiles.
- El diseño de varias antenas wearable en tecnología microstrip analizando el impacto de diversos materiales dieléctricos y elementos metálicos, simular el comportamiento y prestaciones: frecuencia de operación, ganancia, directividad, eficiencia, patrón de radiación 3D
- Analizar el impacto de materiales propios textiles como son botones y cremalleras en el desarrollo de antenas wearable.

4. METODOLOGÍA

En un primer momento se hará una búsqueda del estado del arte de las antenas realizadas hasta la fecha incluyendo las propiedades eléctricas de los sustratos usados en la industria, así como una revisión de las técnicas de implementación de la tecnología microstrip y sus características técnicas. Esto permitirá generar unas reglas básicas de diseño que serán aplicadas para diseñar las antenas.

Seguidamente se estudiará la viabilidad de elementos integrados en los tejidos como botones o cremalleras para implementar antenas, de manera que formen parte de las prendas de vestir.

En todos los diseños se introducirá los parámetros de antena a desarrollar, el layout diseñado y una tabla con resultados de funcionamiento.

5. ESTADO DEL ARTE

Esta sección está dedicada a las antenas microstrip, que es la tecnología de implementación de antenas que se va a emplear en este documento, se comienza realizando una descripción de los parámetros de las antenas, sustratos y una revisión de las técnicas de implementación de estas antenas, también de los materiales textiles disponibles en el mercado y las técnicas de fabricación.

Se ha realizado una búsqueda y se ha seleccionado varias antenas que son representativas de los tipos más recientes de diseños, que luego se han simulado en el apartado 6.3. Finalmente se ha descrito alguna aplicación comercial existente.

5.1 PARAMETROS DE ANTENAS

Las antenas siempre forman parte de un sistema más amplio, entonces se deben de caracterizar por unos parámetros para describir las interacciones que provocan en los dispositivos en los que están integradas.

5.1.1 PERDIDAS DE RETORNO [S_{11}]

Es una medida de la magnitud de una señal de radiofrecuencia transmitida en relación con la magnitud reflejada de la señal radiofrecuencia en la antena. La transferencia máxima de potencia ocurre cuando la impedancia de la carga de transmisión se adapta perfectamente a la impedancia de la carga de la línea. El objetivo es minimizar los desajustes que pueda haber para garantizar la mejor eficiencia de transferencia de energía hacia la antena.

Cantidad de energía reflejada respecto a la cantidad de potencia aplicada, se mide en dB

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad S_{11}(\text{dB}) \in (-\infty, 0] \quad (1)$$

Z_o es la impedancia característica de la línea de transmisión, habitualmente 50Ω

También se emplea la relación de onda estacionaria (ROE)

$$\text{ROE} = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad \text{ROE} \in [1, \infty) \quad (2)$$

La medida de la ecuación (1) es en dB, pero es muy común en ingeniería de radio utilizar ROE, la conversión se muestra en la ecuación (2), VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) es el mismo término que ROE.

5.1.2 ANCHO DE BANDA

En que frecuencias la antena funciona correctamente, es el rango de frecuencia, a ambos lados de la frecuencia central, que coincide con la frecuencia de resonancia, donde las características de la antena, tales como impedancia y ganancia, están dentro de un valor aceptable de los asignados a la frecuencia central.

$$\text{BW} = 100 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_c} \quad (3)$$

$f_c \rightarrow$ frecuencia central

$f_c \rightarrow$ frecuencia máxima

$f_c \rightarrow$ frecuencia mínima

5.1.3 EFICIENCIA DE LA ANTENA

Se debe de tener en cuenta que no toda la potencia suministrada a la antena se irradia, una parte se convierte en calor y se disipa, interesa conocer la parte de la potencia que es radiada, así la eficiencia nos da la medida de que parte de la potencia entregada es radiada y es la relación entre la potencia entregada a la antena y la potencia radiada por la antena

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_e} = \frac{P_r}{P_r + P_\Omega} \quad (4)$$

$P_r \rightarrow$ potencia radiada

$P_r \rightarrow$ potencia entregada

$P_\Omega \rightarrow$ potencia disipada debido a las pérdidas de la antena

5.1.4 DIRECTIVIDAD

La relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esta misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena transmisora. [25]

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\wp(\theta, \varphi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (5)$$

$\wp(\theta, \varphi) \rightarrow$ Densidad de potencia

$4\pi r^2 \rightarrow$ Se refiere a una antena isotrópica

5.1.5 GANANCIA

Depende de la directividad, de la eficiencia de la antena y de la dirección de máxima radiación.

$$G(\theta, \varphi) = \eta_r \cdot D(\theta, \varphi) \quad (6)$$

5.1.6 PATRON DE RADIACIÓN

Es la representación gráfica de la directividad de una antena, tridimensional en coordenadas esféricas (r, θ, Φ) en la que el centro es el origen del sistema de coordenadas

En la figura (2) se representa un patrón omnidireccional

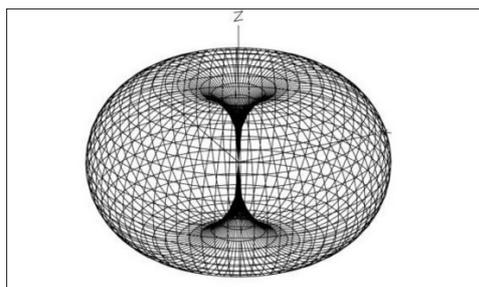


Figura 2 - Patrón omnidireccional [26]

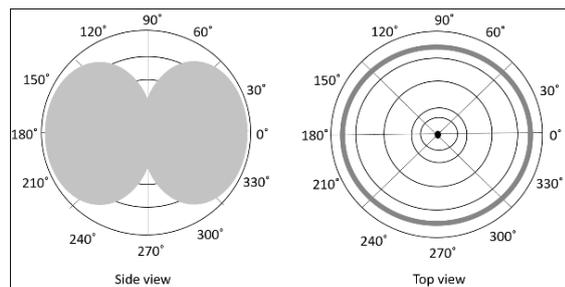


Figura 3 - Plano E y Plano H [26]

Si se atraviesa con dos planos la figura (1), uno vertical y uno horizontal, se obtienen lo que se denomina plano E y plano H, tal como muestra la figura (3). [26]

7.2 SUSTRATOS

En esta sección se va a tratar el sustrato, que es el soporte de la antena, el espesor del sustrato es importante ya que a menor espesor mayor frecuencia de resonancia y menor ancho de banda, es importante tener en cuenta que el sustrato es un dieléctrico que se encuentra entre dos conductores y que está expuesto a un campo que altera sus características y tiene influencia en dos parámetros que dependen de cada material que son determinantes en el funcionamiento de la antena.

5.2.1 PERMITIVIDAD

La aplicación del campo eléctrico sobre el dieléctrico mueve los centros de carga eléctrica a nivel atómico, entonces se cambia la cantidad de carga almacenada en el campo eléctrico, la propiedad de energía almacenada se conoce como permitividad relativa, que mide la relación entre la permitividad del material y la del vacío, es una medida de cómo es afectado por el campo eléctrico el material.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (7)$$

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m} \rightarrow$ permitividad del vacío

5.2.2 TANGENTE DE PERDIDAS

Este parámetro nos da una idea de cuánto puede atenuarse la energía de una onda que se propague a través del material, son pérdidas de conducción que aparecen por el movimiento libre de los portadores de carga, cuanto menor sea su valor se obtiene mayor aislamiento.

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon} \quad (8)$$

$\sigma \rightarrow$ conductividad

$\omega \rightarrow$ frecuencia angular = $2\pi f$

$\epsilon \rightarrow$ permitividad

5.3 REVISION DE LAS TECNICAS DE IMPLEMENTACION DE LA TECNOLOGIA MICROSTRIP

Las antenas microstrip se patentaron en 1955 pero no fue hasta los años 70 del siglo anterior cuando se empezaron a popularizar.

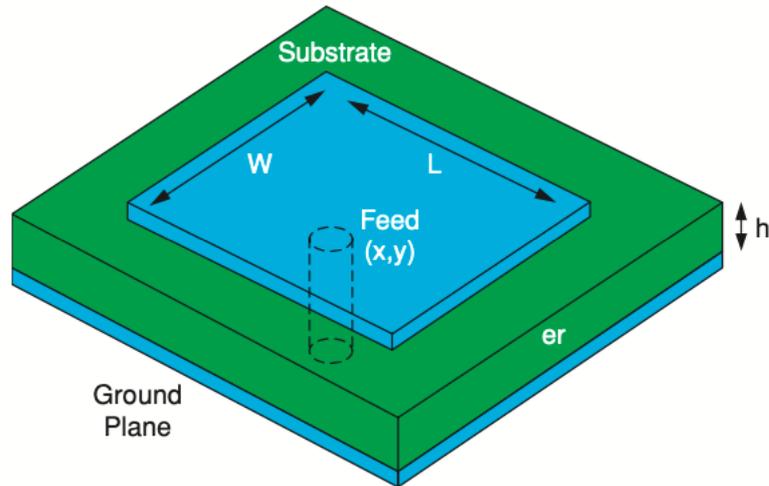


Figura 4 - Antena microstrip

[38]

La antena microstrip se compone de cuatro partes:

- El parche conductor
- El sustrato dieléctrico
- El plano de masa
- La línea de alimentación

El parche conductor y el plano de masa suelen estar fabricados del mismo material.

El ancho, la longitud y el espesor del parche son lo que determina la frecuencia de resonancia y las características. El material del sustrato y su espesor también son importantes.

MATERIALES CONDUCTORES USADOS EN LA FABRICACION DE PARCHES		
Material	Conductividad (σ S/m)	Permitividad relativa (ϵ_r)
Aluminio	$3.5 \cdot 10^7$	1
Latón	$2.6 \cdot 10^7$	1
Cobre	$5.8 \cdot 10^7$	1
Oro	$4.8 \cdot 10^7$	1

Tabla 1 – Materiales conductores usados en la fabricación de parches

[38]

MATERIALES DIELECTRICOS USADOS COMO SUBSTRATO DE PARCHES		
Material	Permitividad relativa (ϵ_r)	Tangente de pérdidas ($\tan \delta$)
RAlumna	$\sim 9 - 10$	0.0003
FR-4	~ 4.5	0.025
Silicio	~ 11.9	0.004
Teflón	~ 2.1	0.0004

Tabla 2 – Materiales dieléctricos usados en la fabricación de parches

[38]

La permitividad relativa y la tangente de pérdidas son dependientes de la frecuencia, además, el material del parche afecta a la eficiencia de la antena mientras que el tipo de sustrato afecta a la dimensión de la antena.

La antena microstrip está construida normalmente con un parche rectangular sobre un sustrato dieléctrico que a su vez está sobre el plano de masa, la línea de alimentación provee a la antena de una señal eléctrica para que la antena la convierta en una onda electromagnética.

Una antena microstrip es fácil de construir y puede ser producida en un entorno de laboratorio. Una placa de circuito impreso de doble cara puede ser empleada para un prototipo de antena microstrip.

5.3.1 MECANISMO DE RADIACIÓN

Cuando el parche es excitado a través de la línea de alimentación, la parte inferior del parche en un momento dado tiene una distribución de carga positiva y el plano de masa tiene una distribución de carga negativa. Las fuerzas de atracción entre estas cargas se mantendrán en las superficies superior e inferior del parche y en el plano de masa. En la superficie del parche cargas repulsivas tienden a empujar a las cargas a través de los bordes, estas cargas producen un efecto franja causando la radiación, la radiación en los flancos laterales del parche se cancela entre sí.

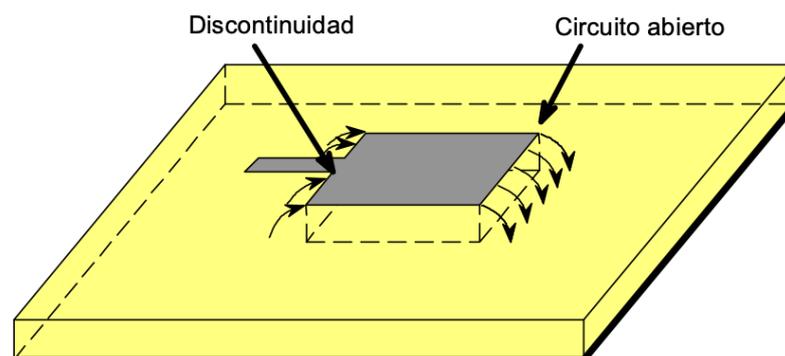


Figura 5 - Vista en perspectiva del mecanismo de radiación

[38]



Figura 6 - Corte del mecanismo de radiación

[38]

Puntos a favor:

- Fácil de fabricar y bajo costo de fabricación
- Puede adaptarse a una superficie curva
- Resistente a golpes y vibraciones
- Puede trabajar con polarización lineal o circular
- Se puede integrar como una parte de un circuito de microondas en el mismo sustrato

Puntos en contra

- Ancho de banda limitado
- Para parches y dieléctricos delgados hay pérdidas que afectan a la eficiencia
- Son sensibles a la temperatura y la humedad

5.3.2 ALIMENTACIÓN DEL PARCHÉ

- Desde el plano de masa a través de un orificio en el sustrato

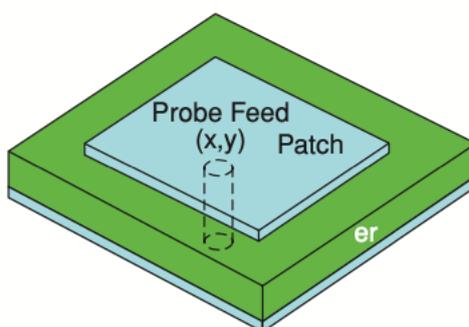


Figura 7 - Alimentación del parche a través de un orificio

[38]

- Desde un lateral del parche en la misma capa, se calcula la línea para adaptar la impedancia a la antena, si se alimenta desde dos extremos con una diferencia de fase de 90° la polarización pasa de lineal a circular.

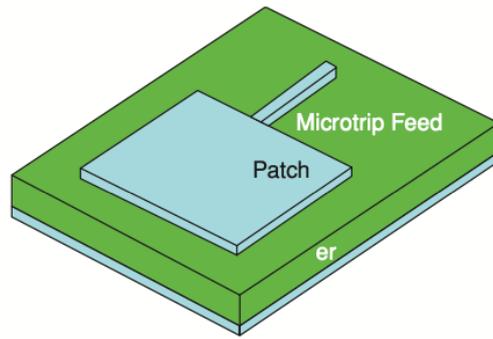


Figura 8 - Alimentación del parche desde un lateral

[38]

- Línea al sustrato, no directamente al parche, induce la corriente al parche

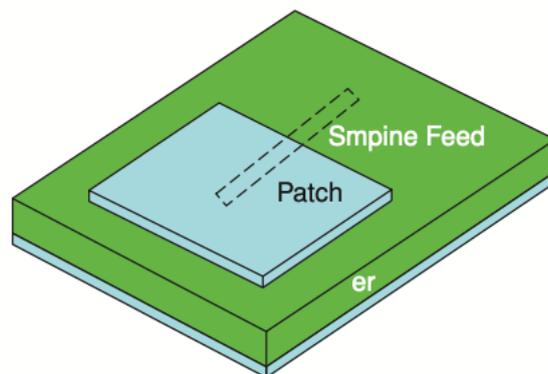


Figura 9 - Alimentación del parche por inducción

[38]

Hay principalmente tres métodos de análisis para el diseñar y modelar los parches

- Modelo de línea de transmisión, en que la antena microstrip es vista como una línea de transmisión cargada en los dos extremos, usualmente no es usado para sustratos muy estrechos. No resulta muy preciso.
- Modelo de cavidad, se trata de un resonador de cavidad considerando la antena y el plano de masa como paredes eléctricas y los lados del sustrato como paredes magnéticas, las distribuciones de carga crean varios modos transversal magnéticos (TM)

Usualmente se emplea para el modo dominante con la frecuencia resonante más baja, a efectos prácticos se usa TM_{10}

$$h \ll (L, W) \quad (9)$$

$$L > W > h \quad (10)$$

$$f_r \cong \frac{c_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

$$W = \lambda_g/2 \quad (12)$$

- Modelo de onda completa consiste en analizar la estructura y resolver ecuaciones de Maxwell 3-D que caracterizan su comportamiento. Hay varias herramientas de simulación que están basadas en el método de momentos (MOM) o también el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), también hay herramientas con el método de elementos finitos (FEM) para simulaciones EM.

Los parámetros de la antena dependen de las propiedades del material conductor y del dieléctrico, las dimensiones del parche, la frecuencia de operación y la altura del parche desde el plano de masa.

Si fijamos un espesor del substrato de 1 mm, dependiendo del material (ϵ_r)

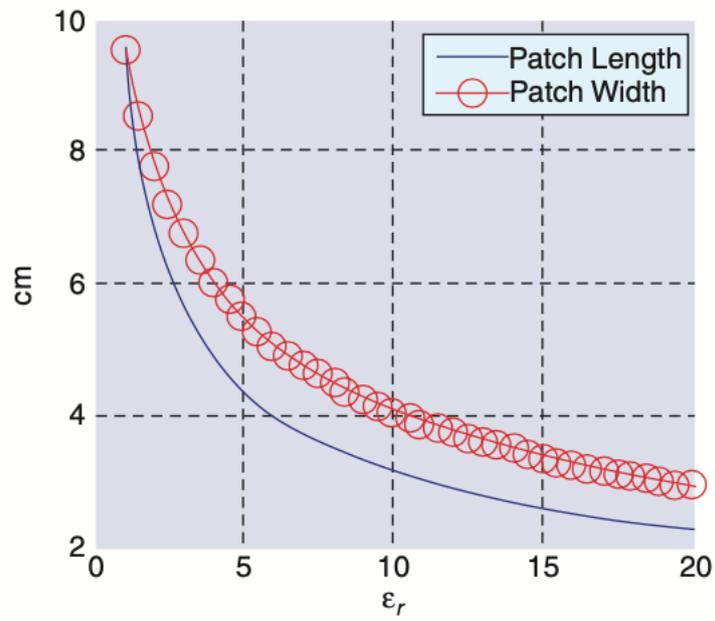


Figura 10 - Dimensiones respecto ϵ_r

[38]

Si fijamos un espesor del sustrato de 1 mm, dependiendo de la frecuencia (f_c), para dos materiales (ϵ_r)

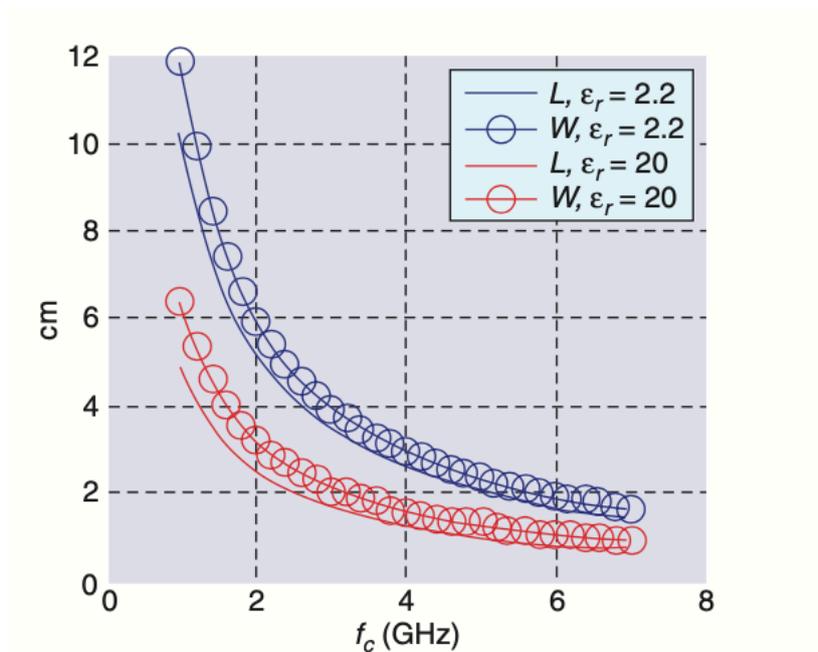


Figura 11 - Dimensiones respecto f_c

[38]

Muestra la eficiencia del parche en función del espesor del sustrato normalizado a la longitud de onda para dos materiales (ϵ_r)

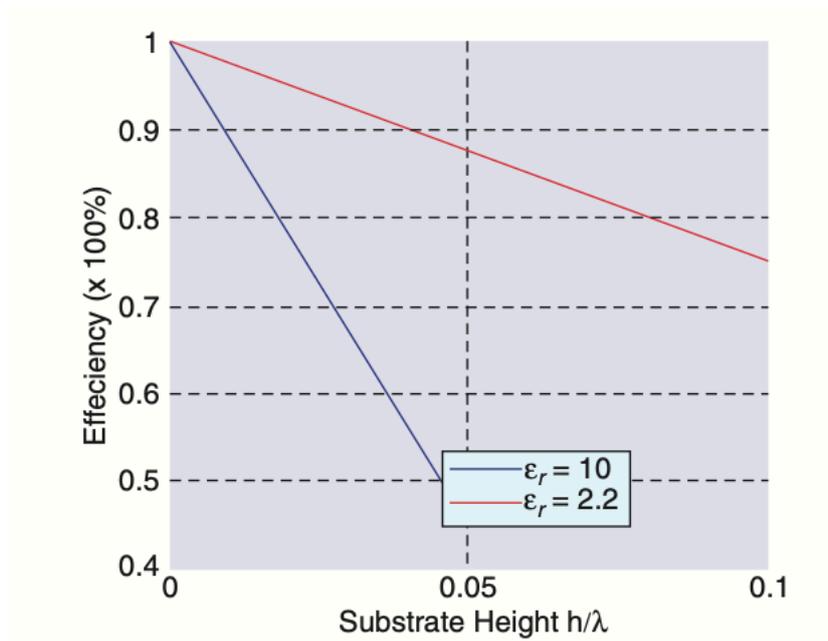


Figura 12 - Eficiencia respecto h

[38]

Muestra la influencia en el ancho de banda del espesor del sustrato normalizado a la longitud de onda para dos materiales (ϵ_r)

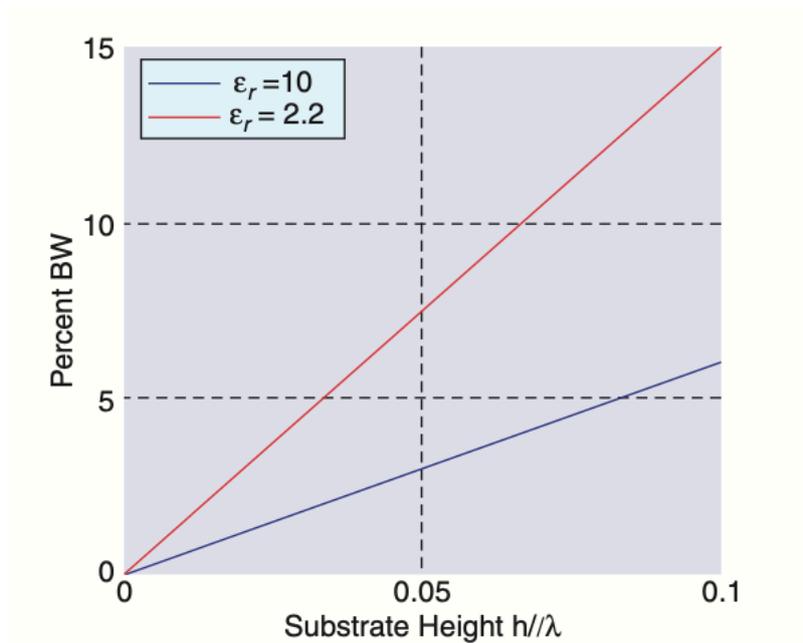


Figura 13 - Ancho de banda respecto h

[38]

5.4 MATERIALES

El aluminio es el material empleado para fabricar antenas de TV ya que sus características: ligero, resistente a la corrosión, resistencia mecánica, buen conductor eléctrico y de calor, no tóxico y dúctil cumplen con las expectativas al ser elementos que se encuentran a la intemperie. Si nos fijamos en otro tipo de antenas como las telescópicas de los aparatos de radio convencional, fabricadas en latón (aleación de cobre con un 30% de zinc) o bronce (cobre con un 10% de estaño), llevan una capa de níquel para dotarlas de una apariencia plateada, otras antenas convencionales que se pueden encontrar en los hogares son las antenas bobinadas para WI FI[®], estas antenas son las que se encuentran a la vista en cualquier hogar, aunque en el interior de otros dispositivos que habitualmente se usan, como ordenadores portátiles, teléfonos móviles o en las mismas televisiones se encuentran antenas parche, que están fabricadas la gran mayoría en cobre.

En el ámbito de las antenas wearable se plantean soluciones que permitan cierto confort al usuario que se pueden aplicar tanto en el ámbito de la salud como en el ámbito militar.

Para que las antenas sean confortables, se usan materiales textiles que tienen unas características conductoras un tanto diferentes a los materiales tradicionales de las antenas convencionales.

El rendimiento de una antena wearable depende de su parte conductora, que es el elemento radiante y de su parte no conductora, la base donde se encuentra el elemento radiante, el sustrato.

Los materiales que se emplean como sustrato son elegidos por sus propiedades dieléctricas y por su capacidad de deformación, mientras que los materiales que se emplean como conductores son seleccionados por su conductividad eléctrica.

5.4.1 MATERIALES NO CONDUCTORES

Deben de tener como principal característica una mínima permitividad relativa y mínima pérdida dieléctrica para alcanzar una eficiencia deseable y un adecuado ancho de banda. El sustrato seleccionado tiene un gran impacto en el rendimiento del conjunto de la antena, es decir, que su función no está solo limitada a soportar el elemento radiante, sino que afecta a las pérdidas de retorno, la eficiencia y el ancho de banda, además, el sustrato es muy crítico para la fabricación, también crítico a la hora de integrarlo en la prenda de vestir escogida. En general se deben de tener en cuenta que la permitividad y el espesor repercuten en el ancho de banda, la tangente de pérdidas afecta a la eficiencia y la flexibilidad a la adaptación con los usuarios.

Propiedades dielectricas de sustratos de materiales textiles

	Permitividad (ϵ_r)	Tangente de perdidas ($\tan \delta$)
Denim	1.6	0.0093
Jeans	1.67	0.0025
Polialgodon	1.56	0.01
Poliester	1.44	0.02
Tejido de sarga	2	0.01
Tejido de franela	1.7	0.01
Algodon	1.6	0.02
Felt	1.22	0.016
Algodon cortina	1.47	0.040
Silk	1.75	0.012
Tween	1.69	0.0084
Cordura®	1.90	0.0098
Cordura / Lycra ®	1.50	0.0093
Quartzel ® fibras de cristal de cuarzo	1,95	0.0004
Cordura® /Licra	1,50	0.0093
Moleskin	1.45	0.05
Panama	2.12	0.05
Leather	2.72	0.02

Tabla 3 - Propiedades dieléctricas de sustratos de materiales textiles

[46]

Otro de los materiales empleado es el papel en el cual se imprime la antena por serigrafía, es un método de bajo coste. Se encuentran también materiales poliméricos como poliimida, PET, PDMS y polímero líquido (LP), los materiales poliméricos presentan excelentes capacidades mecánicas en relación con la deformación.

En el bordado se realiza sobre una fibra textil de base, hay varios tipos de fibras.

Uno de los más usados es organza, posee ligereza y flexibilidad y su principal ventaja es que posee propiedades dieléctricas cercanas al aire [28], debido a esto no interfiere en el rendimiento del componente conductor a bordar.

La organza es un tipo de tejido ligero de tejido liso. Este tipo de tela es transparente, lo que significa que está tejida en una densidad extremadamente baja que da como resultado un tejido transparente y relativamente endeble. Una de las aplicaciones más comunes de Organza en Occidente es en vestidos de novia. Estos tipos de vestidos a menudo tienen numerosos pliegues y áreas esponjosas que se crean con telas transparentes. [27]

Hay otros como el Kevlar, muy conocido por su fuerza, en [29] los autores han desarrollado una antena bordada espiral en Kevlar para aplicaciones en estructuras aeronáuticas para poder resistir condiciones de fatiga mecánica y altas temperaturas.

Otro material es el fieltro, que es un material de baja permitividad y bajas perdidas, antena de fieltro parche con una guía coplanar (CPW) alimentada con conductor magnético artificial (AMC) la presentan los autores en [30].

Se usa también un sustrato de polímero que se adhiere al hilo textil en un proceso de curado, este es el PDMS o dimeticona es un sustrato polimérico altamente flexible y con bajas pérdidas, es resistente al agua, inherente estabilidad química, se puede fabricar a temperatura ambiente y permitividad dieléctrica ajustable. La constante dieléctrica se puede cambiar controlando la dispersión de los polvos cerámicos dentro de la estructura del PDMS. Los autores en [31] realizan una antena parche empleando PDMS como sustrato.

5.4.2 MATERIALES CONDUCTORES

Son usados para el elemento radiante y el plano de masa, La corriente que fluye a través del conductor crea que crea el campo de radiación depende de la conductividad del material. La conductividad es la capacidad del material de permitir el paso de carga eléctrica, se mide en siemens por metro (S/m), la conductividad de un conductor eléctrico perfecto es infinita, en la práctica está limitada a las características del material, por ejemplo un buen conductor como el cobre tiene un valor de $5.8 \cdot 10^7 S/m$, en antenas wearable se emplean e-textile's, que si bien, no tienen tan buenas características conductoras como el cobre o el aluminio, tienen otras características como la flexibilidad, elasticidad, homogeneidad.

Se encuentran en diferentes formatos que dependen de la técnica de fabricación:

- En láminas para cortar:

CONDUCTOR	CONDUCTIVIDAD [$S \cdot m/mm^2$]	ESPESOR [mm]
Zelt	$1.75 \cdot 10^5$	0.0635
Flectron	$5.88 \cdot 10^7$	0.05
Shieldit	$6.67 \cdot 10^5$	0.1
Taffeta	$2.5 \cdot 10^5$	0.05
PCPTF (Pure Cooper Polyester Taffeta Fabric)	$2.5 \cdot 10^5$	0.08
NCRSF (Niquel/Cobre cubierto de nylon)	$4.17 \cdot 10^6$	0.08

Tabla 4 – Propiedades de conductores en laminas

[46]

- En fibra monofilamento

CONDUCTOR	CONDUCTIVIDAD [$S \cdot m/mm^2$]
Cu	58.5
Cu/Ag	58.5
Ag 99%	62.5
Ms* 70	16.0
Ms/Ag	16.0
AgCu	57.5
Bronze	7.5
Steel 304	1.4
Steel 316L	1.3
ELITEX ⁰	1.2

Tabla 5 – Propiedades de conductores en fibras monofilamento

[46]

- En fibra multifilamento

CONDUCTOR	CONDUCTIVIDAD [S/m]
Silver-plated copper 159 mm	$5.2 \cdot 10^6$
Silver-plated copper 40 mm	$6.7 \cdot 10^5$
X-static	$3.3 \cdot 10^4$
Polyester/stainless steel	$2.3 \cdot 10^3$
(Density 1/4 20 PPI)	$1.2 \cdot 10^6$
Silver-plated copper 80 mm	$1.2 \cdot 10^5$
Silver-plated copper 40 mm	$6.0 \cdot 10^3$
Litz wire	$5.5 \cdot 10^3$

Tabla 6 – Propiedades de conductores en fibras multifilamento

[46]

- En fibra multifilamento 100% acero inoxidable

CONDUCTOR	CONDUCTIVIDAD [S/m]
Agsis™	$2.9 \cdot 10^6$
Liberator™ 40	$1.2 \cdot 10^7$
Liberator™ 80	$8.6 \cdot 10^6$
Amberstrand + 166	$6.0 \cdot 10^6$
Amberstrand + 332	$6.5 \cdot 10^7$

Tabla 7 – Propiedades de conductores en fibras multifilamento 100% acero inoxidable

[46]

Es difícil encontrar un compromiso entre materiales que poseen alta conductividad y la flexibilidad que se requiere para las antenas wearable. Así que aparecen materiales, que no teniendo una alta conductividad, $1 \cdot 10^6$ S/m, entran dentro de las especificaciones para antenas wearables.

Se dispone Comercialmente se dispone de otros hilos conductores que se describen a continuación:

X-Steel

Son filamentos de acero inoxidable recubiertos de níquel, cobre o plata, se entrelazan normalmente 16 filamentos para formar un hilo, el diámetro es de 0,19 mm, presenta buena estabilidad térmica, buena conductividad eléctrica y se puede soldar.

Liberator

Hilo electrónico multifilamento revestido de metal, la nomenclatura Liberator-20/40/80 indica el número de filamentos que forman el hilo electrónico, cada filamento tiene un alma de fibra Vectran® de polímero de cristal líquido (LCP) de aproximadamente 23 µm recubierto de una capa interna de cobre y una externa de plata. Según el giro por pulgada (TPI) para formar el hilo el diámetro puede variar, Por ejemplo, el Liberator-20 y Liberator-40 torcidos a un TPI de 4,5 dan diámetros de 0,22 mm y 0,27 mm, respectivamente.

LIBERATOR™ 40	
Fiber	Kururay Vectran®
Structure	Liquid Crystal Polymer (LCP)
Filament count	40
Outer Metallization Layers Available	Copper/Nickel/Silver
Yarn Diameter*	0.0070 in
Flat Width**	0.0219 in
% Metal by Weight	82.10%
Weight	0.0849 lbs/1,000 ft
Weight	0.0385 g/ft
DC Resistance	~1 Ω/ft
Breaking Load	11.42 lbs
Tensile Strength	3.0 GPa
Operating Temperature	Up to 200 °C
Melting point	350 °C
* Ideal close-packed calculated diameter	
** Width of material as it lays in a braiding configuration	

Figura 14 – Especificaciones del fabricante de uno de los hilos comentados [23]

Amberstrand

Hilo electrónico multifilamento revestido de metal, como en el caso anterior Amberstrand 166/332/664 nos indica el número de filamentos, cada filamento tiene un alma de Toyobo Zylon® y está recubierto de cobre, níquel o plata. El diámetro final varía según los filamentos que contenga y el TPI, por ejemplo, el Amberstrand 166 con un TPI de 4,5 tiene un diámetro de 0,24 mm.

Elektrisola

Hilos conductores esmaltados ultrafinos, son metales o aleaciones, la capa exterior es un esmalte para aislar el cable, se suelen usar esmaltes de colores para conseguir hilos de diferentes colores. Si son monofilamentos son muy finos, pero poco resistentes, si se emplea multifilamento ofrece resistencia al doblaje y a la tracción. Los diámetros oscilan entre 0,010 mm (56 AWG) y 0,500 mm (24 AWG). La elección de diferentes materiales del núcleo y del exterior permite el control de varios parámetros, como la resistencia a la corrosión y las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas

5.4.3 DEFORMACIÓN MECÁNICA

No se puede evitar el doblado de las antenas cuando se usan materiales flexibles. En [17] se realiza una investigación de cómo afecta el doblado en el rendimiento de las antenas.

5.5 TECNICAS DE FABRICACION

El método de fabricación es una parte importante del diseño de una antena, afecta al rendimiento de la antena, al coste, al tiempo de proceso de fabricación y a la precisión de la antena, hay varios métodos:

5.5.1 SERIGRAFÍA

Es un método rápido, de fácil implementación y bajo coste que ha sido empleado tradicionalmente por fabricantes de electrónica. La tinta es forzada a través de una pantalla hasta fijarse en el sustrato ayudándose de una escobilla de goma que la empuja. La tinta es liberada en la parte del sustrato que coincide con el patrón grabado en la pantalla. La manera de aplicar la técnica de la serigrafía es plana, rotativa y cilíndrica. La principal desventaja es la baja resolución restringida a un número de capas, el espesor de las capas conductoras no se puede variar.

5.5.2 IMPRESIÓN DE CHORRO DE TINTA

Es uno de los más empleados a causa de la rapidez del proceso desde el diseño a disponer del producto. Se utilizan tintas con nanopartículas de oro o plata que realizan la función de material conductor, tiene bastante precisión ya que la gota de tinta es extremadamente pequeña, la impresora está especialmente diseñada para proyectar la tinta en el lugar indicado sin desperdicios. Como desventaja se encuentra la dificultad de crear pistas continuas altamente conductoras.

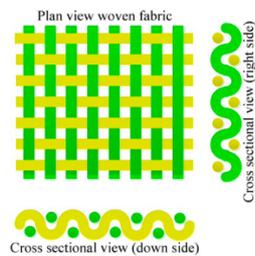


Figura 15 - Vista de planta y corte de fibra tejida [42]

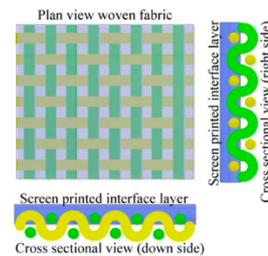


Figura 16 - Vista de planta y corte de fibra tejida con una capa impresa [42]

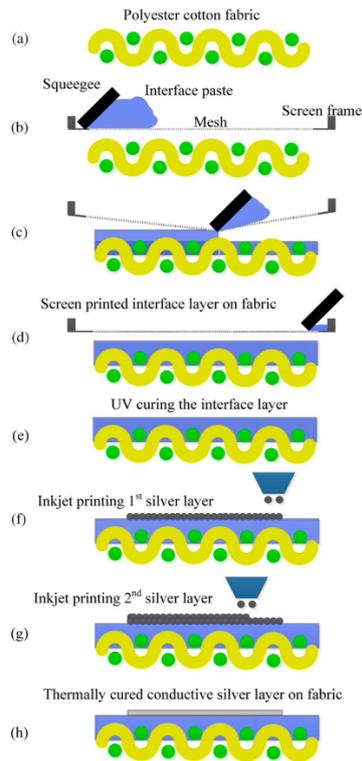


Figura 17 - Proceso de fabricación de capas por impresión [42]

5.5.3 HUECOGRABADO

Se transfiere tinta prensando el diseño en el sustrato, el proceso de impresión utiliza un cilindro de cobre con un revestimiento de acero para dotarlo de mayor resistencia, el diseño se graba en la superficie del cilindro en diferentes profundidades y anchos mecanizándolo o bien mediante laser, el hueco se llena de tinta, los restos de la tinta los elimina una cuchilla en contacto con el exterior del cilindro. El diseño se transfiere al sustrato bajo presión creando la impresión, es de bajo coste, se puede ajustar la profundidad y tiene alta resolución.

5.5.4 LAMINAS DE COBRE PEGADAS

Se adhiere láminas de cobre flexible a sustratos textiles, tiene bajo coste, es rápido y fiable, tiene el inconveniente de posible deslaminación, baja precisión y no soporta alta temperatura y humedad

5.5.5 ELECTROTEXTILES

Fibras conductoras que son obtenidas intercalando fibras normales con hilos conductores metálicos, es fácil de realizar operaciones de cosido y cortado, soporta lavado, planchado y deformaciones. Como desventaja es menos preciso cuando se corta manualmente y si se deforma en exceso se puede deslaminar.

5.5.6 SIW. (Substrate Integrated Waveguides)

Es una nueva tecnología en la que las guías de onda quedan integradas en el sustrato, en el futuro la arquitectura “*System on Substrate (SoS)*” será crucial en el desarrollo con bajo coste unido a la facilidad de fabricación del interfaz para tecnología de alta frecuencia. Consiste en unos orificios metalizados que están integrados en el sustrato que realizan la misma función que la guía de onda.

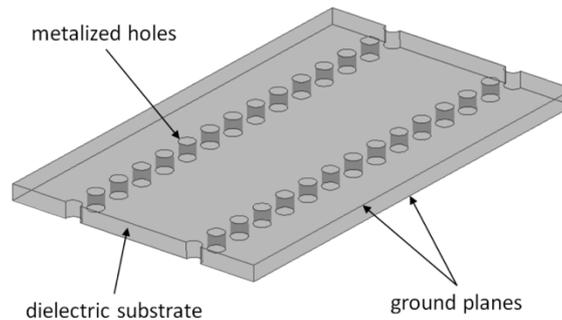


Figura 18 - Substrate Integrated Waveguides

5.5.7 BORDADO

Se borda la forma requerida de las partes conductoras directamente sobre el sustrato, la parte radiante se integra directamente en el tejido, sin embargo, las costuras provocan arrugas que dan a la antena una apariencia deformada.

Es un proceso que usa una máquina de bordado con microprocesador y hilos conductores para bordar antenas sobre fibras de manera automática.

Pasos

1. Diseño de la antena

Se realiza un diseño que cumpla unos criterios de rendimiento como ganancia, ancho de banda, tamaño, frecuencia de operación.

2. Digitalización

Se trata de identificar el camino que la aguja ha de seguir durante el bordado puntada a puntada. El formato se ha de transferir desde un fichero CAD a un fichero compatible con una máquina de bordado, un ejemplo son las máquinas de bordar ZSK, que dispone de una serie ZSK Technical dedicada especialmente a aplicaciones como antenas y sensores.

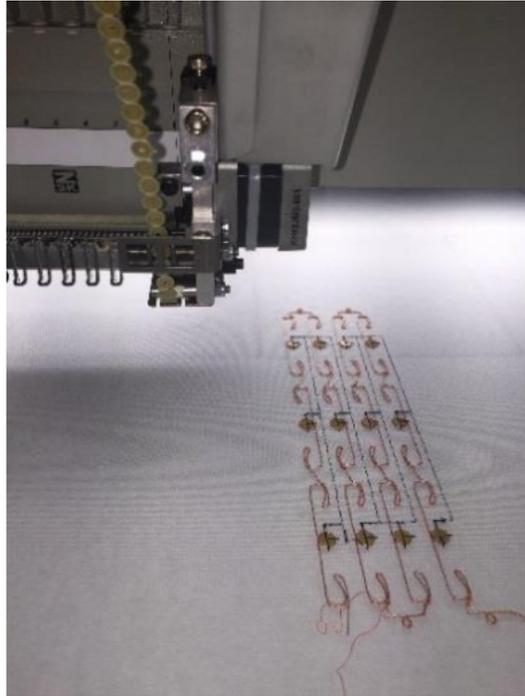


Figura 19 - Antena RFID con chip [23]



Figura 20 – Maquina de bordar ZSK SGW 0100-1375-1200 [23]

3. Proceso de bordado

Para el proceso de bordado se emplea el sustrato, un carrete de hilo conductor y un carrete de hilo no conductor que se enhebra en la aguja, de manera que el hilo no conductor entra por la parte superior y el hilo conductor por la parte inferior. Hay que tener en cuenta ajustar parámetros como la tensión, también se puede optar por variar el número de filamentos, el objetivo es aumentar la precisión del bordado para obtener alta conductividad.

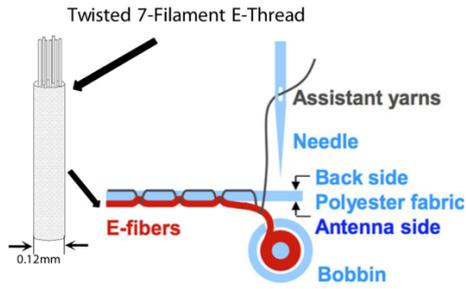


Figura 21 – Proceso de bordado [28]

Las antenas de parche cuadradas son las que mejor se pueden adaptar para la implementación Wearable, Como se trata de prototipos se realiza la antena en laboratorio, para un lanzamiento comercial la opción del bordado es la más interesante, ya que hay maquinaria para bordar como zsmachines que pueden realizar en serie la producción, de la misma manera que algunas gorras de baseball llevan impreso el logo de los equipos que se fabrican con este método.

5.6 ANTENAS MICROSTRIP

Se han realizado búsquedas de los tipos de antenas más recientes, se muestran en la siguiente tabla, son antenas textiles o diseñadas para acoplarse a una prenda textil, las antenas se simulan en el apartado 6.3.

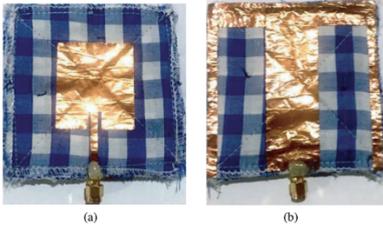
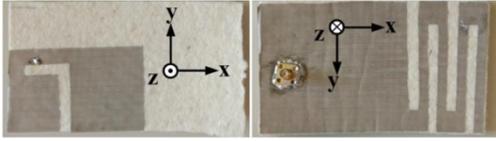
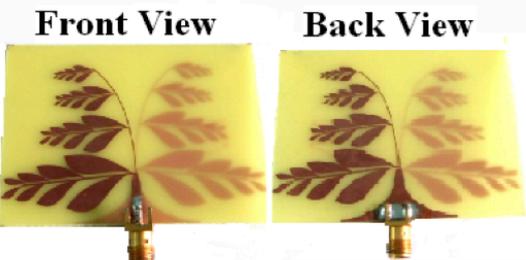
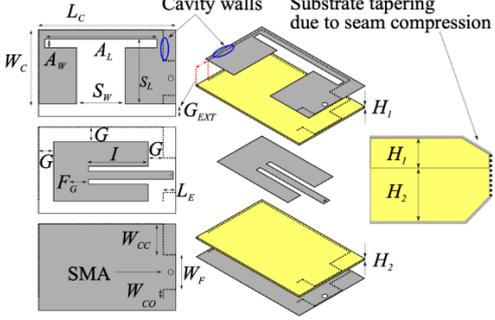
	<p>Antena de dos puertos [14]</p> <p>Diseño de una antena textil en sustrato jeans con una frecuencia de operación de 3.39 GHz a 4.42 GHz</p>
	<p>Antena en poliéster [15]</p> <p>Diseño de una antena textil en poliéster para frecuencia ISM (2.4 GHz)</p>
	<p>Antena F invertida PIFA [34]</p> <p>Diseño de una antena textil en felpa de doble banda, a 433 MHz y 2.4 GHz</p>
	<p>Antena en denim [9]</p> <p>Diseño de una antena textil en denim para una frecuencia de 2.4 GHz</p>
	<p>Antena fractal [39]</p> <p>Diseño de una antena fractal inspirado en unas hojas, para una frecuencia de 19.7 GHz</p>
	<p>Antena doblada bordada [40]</p> <p>Diseño de una antena multi capa de hueco cavidad para una frecuencia de 923 MHz</p>

Tabla 8 – Diferentes modelos de antenas

5.7 PRODUCTOS COMERCIALES

En el mercado existen varios productos que incorporan la tecnología Wearable Textil, la principal funcionalidad es monitorizar en tiempo real variables del cuerpo humano, así, por ejemplo, la compañía Hexoskin [20] dispone de ropa con sensores para monitorizar la actividad y el ritmo cardiaco.



Figura 22 – Smart Garments comercializados por Hexoskin [20]

Otra compañía, komodo technologies [21], comercializa una manga de compresión que también monitoriza el ritmo cardiaco y actividad.



Figura 23 – AIO Sleeve comercializada por KomodoTech [21]

El campo de la actividad deportiva y el cuidado personal también tiene productos textiles Wearable, la compañía Wearable X [22] comercializa unas mallas que ayudan a practicar yoga.



Figura 24 – Smart Digital Yoga Pants comercializadas por WereableX [22]

También en el ámbito del deporte, concretamente para entrenamientos de running la compañía Ambiotex [19] comercializa una camiseta que monitoriza el ritmo cardiaco y la respiración.



Figura 25 – T-shirt that Integrated Smart Sensors por Ambiotex [19]

Las aplicaciones comercializadas hasta el momento se centran en el ámbito aeroespacial, de la salud y el deporte.

6. DISEÑOS

6.1 SOFTWARE

Sistema de Diseño Avanzado (ADS) es el software líder en diseño, simulación y automatización de circuitos electrónicos desarrollado por PathWave Design, perteneciente a Keysight Technologies.

El software ADS ofrece un entorno integrado para diseñar sistemas electrónicos de RF como redes inalámbricas, teléfonos móviles, comunicaciones por satélite, buscapersonas, enlaces de datos de alta velocidad y sistemas de radar. Su lanzamiento inicial apareció en 1985 con el nombre de Microwave Design System (MDS). ADS se introdujo en 2016 con una mejora en su velocidad, rendimiento y flexibilidad de diseño.

Momentum es un simulador electromagnético dedicado a microstrip, existen varios algoritmos numéricos en el mercado para aproximar soluciones de las ecuaciones de Maxwell, este en concreto se basa en el método de los momentos (MoM). El simulador subdivide la estructura planar donde se propaga la señal en celdas elementales, diminutas en comparación con la longitud de onda, es en estas celdas donde el algoritmo realiza las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales por sumatorios de productos con coeficientes y funciones básicas.

6.2 SIMULACIONES DE TEST

En esta sección se realizan las primeras simulaciones con el software ADS.

6.2.1 PRIMERA SIMULACIÓN

Como primera propuesta, con el objetivo de familiarizarse con el simulador ADS, se ha optado por una antena básica a una frecuencia de 2.4GHz

Se ha realizado la simulación de:

Design of 2.4GHz Patch Antennae for WLAN Applications [44]

En un primer paso se realiza un esquema a partir del cual se genera una layout:

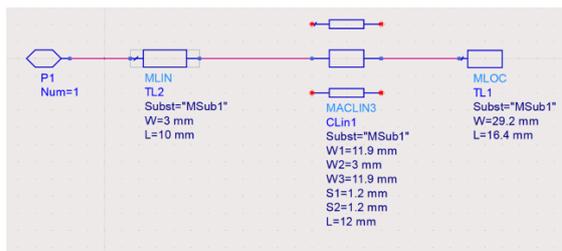


Figura 26 – Esquema del diseño

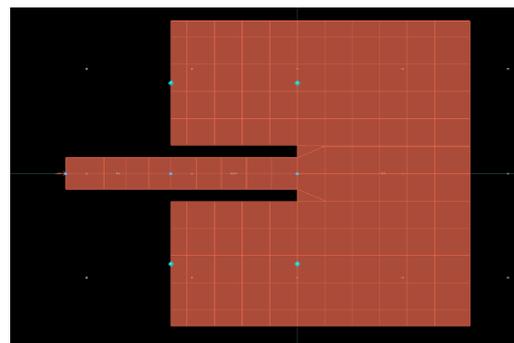


Figura 27 – Layout generado

En un primer momento la frecuencia de resonancia daba 2.6 GHz, con lo que se ha modificado el tamaño del parche, en concreto la L de 17.2 mm a 16.4 mm.

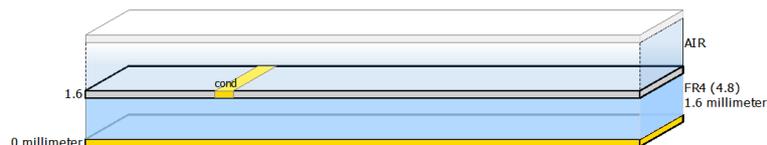


Figura 28 – Edición del sustrato

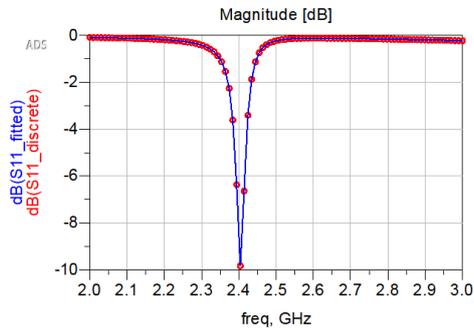


Figura 29 – Perdidas de retorno

A efectos prácticos superar los -9,54 dB es aceptable.

Frequency	E_max	Theta_max	Phi_max	Directivity_max	Gain_max	RadiatedPower
2.404E9	0.646	0.000	247.000	6.248	4.927	0.002

Tabla 9 – Resultados de la primera simulación

El siguiente paso de la simulación es el diagrama de radiación y la realización de un corte.

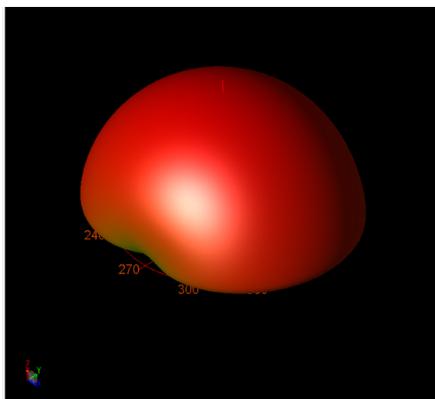


Figura 30 – Diagrama de radiación

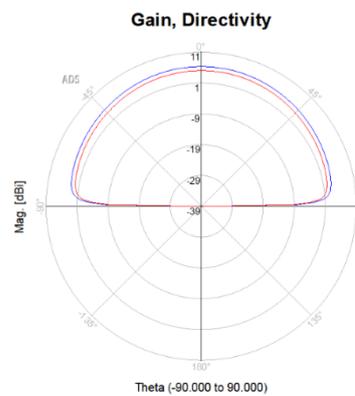


Figura 31 – Ganancia y directividad

6.2.2 PRIMER DISEÑO

De manera general, el objetivo de diseñar una antena wearable es determinar la geometría de la antena que cumple con ciertos criterios de diseño, que tienen que ver con los parámetros de rendimiento para una cierta aplicación.

En un primer paso se realiza un cálculo en bruto de las dimensiones de la antena mediante fórmulas analíticas.

Se propone el cálculo de una primera antena parche textil original, para ello se va a realizar con tejido Denim, con las siguientes características:

Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.4
Constante dieléctrica ϵ_r	1.6
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.01
Espesor del sustrato h_s (mm)	0.15

Se procede a calcular la longitud y ancho del parche para posteriormente introducir estos datos en el diseño del layout

Se comienza con el cálculo del ancho

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^9 \sqrt{\frac{(1.6 + 1)}{2}}} = 54.78 \text{ mm} \quad (13)$$

Cálculo de la constante dieléctrica efectiva, depende de la altura, de la constante dieléctrica y del ancho calculado anteriormente

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} = \quad (14)$$

$$\frac{1.6 + 1}{2} + \frac{1.6 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.15}{54.78} \right]^{-\frac{1}{2}} = 1.5951 \quad (15)$$

Cálculo de la longitud efectiva

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2 \cdot f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^9 \sqrt{1.5951}} = 49.45 \text{ mm} \quad (16)$$

Cálculo de la extensión de longitud

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} = \quad (17)$$

$$= 0.412 \cdot 0.15 \frac{(1.5951 + 0.3) \cdot \left(\frac{54.78}{0.15} + 0.264\right)}{(1.5951 - 0.258) \cdot \left(\frac{54.78}{0.15} + 0.8\right)} = 87.46 \text{ mm} \quad (18)$$

Cálculo de la longitud del parche

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L = 49.45 - 2 \cdot 0.08746 = 49.28 \text{ mm} \quad (19)$$

Se han obtenido los siguientes resultados:

Width:	54.78 mm
Length:	49.28 mm

Después la antena debe ser optimizada, para realizar esta tarea se utiliza el simulador ADS Momentum. Se introduce el layout con las dimensiones del parche, para la línea de alimentación se ha utilizado la aplicación Linecalc, los resultados de la línea microstrip de alimentación son

Ancho de la línea microstrip W_l (mm)	0.563
Longitud de la línea microstrip L_l (mm)	25,95

El material de la antena es cobre con un espesor de 0.035 mm

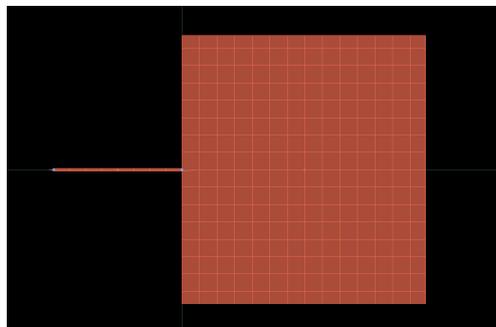


Figura 32 - Layout

Entonces las dimensiones de la antena

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.4
Constante dieléctrica ϵ_r	1.6
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.01
Ancho del parche W_p (mm)	54.78
Longitud del parche L_p (mm)	49.28
Altura del parche h_p (mm)	0.035
Ancho del sustrato W_s (mm)	60
Longitud del sustrato L_s (mm)	60
Espesor del sustrato h_s (mm)	0.15
Ancho del plano de masa W_g (mm)	60
Longitud del plano de masa L_g (mm)	60
Altura del plano de masa h_g (mm)	0.035
Ancho de la línea microstrip W_l (mm)	0.56

Tabla 10 – Especificaciones del primer diseño

A continuación se configura el sustrato



Figura 33 - Sustrato

Se realiza la simulación y obtenemos un S(1,1)

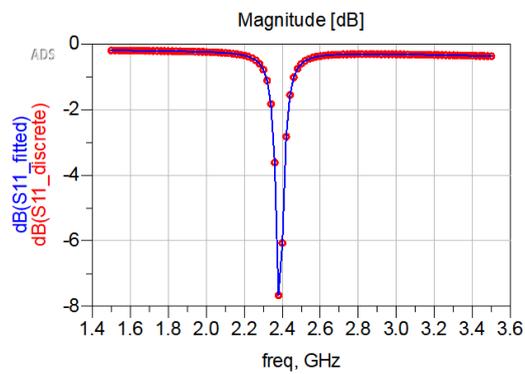


Figura 34 - Pérdidas de retorno

Se realiza una optimización del parche

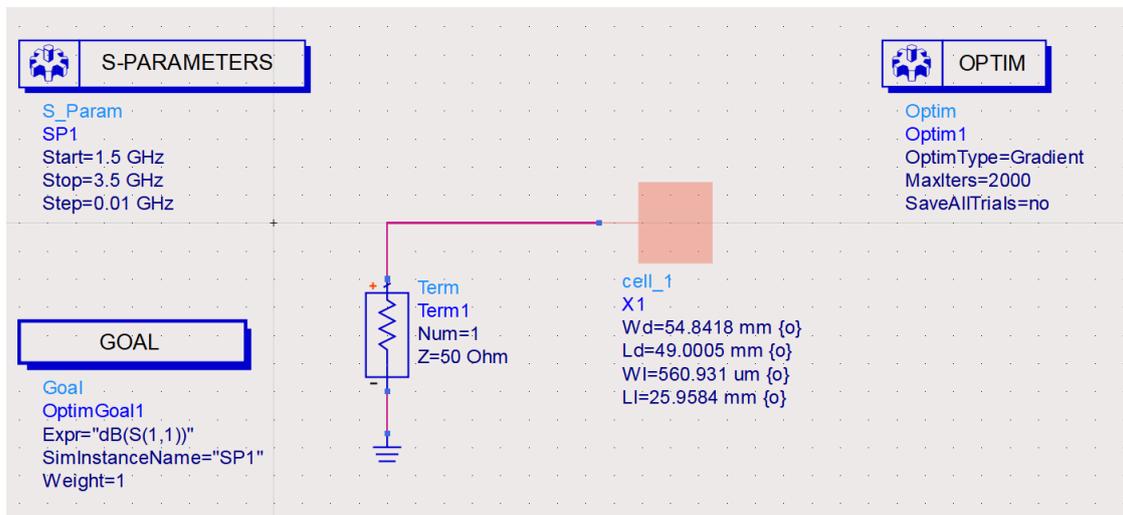


Figura 35 - Optimización

Después de la optimización se obtienen cambios en las dimensiones del parche

Dimensiones	Calculadas	Optimizadas
Width:	54.78 mm	54.84 mm
Length:	49.28 mm	49 mm

Se obtiene un S(1,1) optimizado y una representación 3D

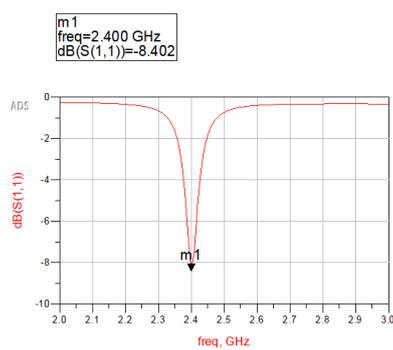


Figura 36 - Perdidas de retorno con optimización

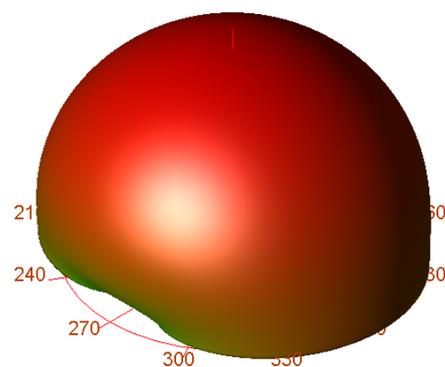


Figura 37 – Diagrama de radiación

Parámetros

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.4
E_max	0.282
θ_{max}	1
φ_{max}	0
Directividad_max	8.338
Ganancia_max	-2.065

Tabla 11 – Resultados del primer diseño

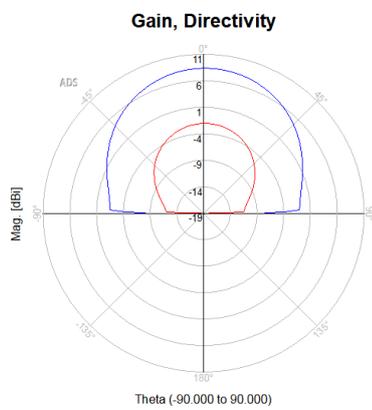


Figura 38 – Ganancia y directividad θ

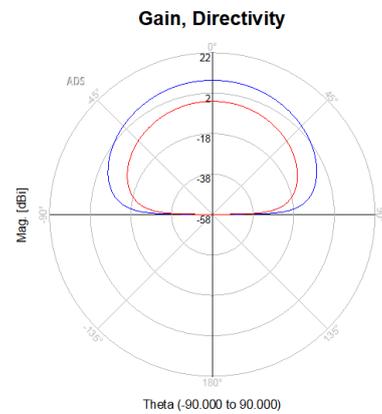


Figura 39 – Ganancia y directividad φ

6.3 SIMULACIONES DE ANTENAS DEL ESTADO DEL ARTE

6.3.1 ANTENA DE DOS PUERTOS

Objetivo general : El diseño y prueba de una antena de dos puertos que opera desde 3.39 GHz a 4.42 GHz, está fabricada en un sustrato Jeans y el plano de masa está modificado con el resultado de un aislamiento de los puertos.

Metodología utilizada : Se realiza una simulación y una construcción real, la cual se mide con un analizador vectorial de redes.



Figura 40 Top view of the fabricated antenna

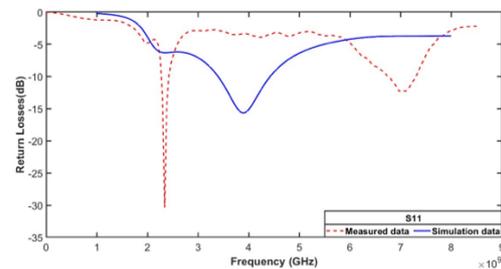


Figura 41 Measured S_{11}

Conclusión : De los resultados simulados a los resultados reales se observa que hay un desplazamiento de la frecuencia debido a la naturaleza flexible del material.

Hasta aquí la descripción del paper [14] de la bibliografía, a continuación se va a realizar la simulación.

Realización de la simulación de antena de dos puertos sobre sustrato Jeans

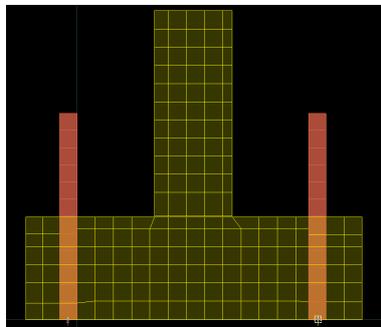


Figura 42 - Layout

Parámetro	Valor	Esquema
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	3.9	
Constante dieléctrica ϵ_r	1.7	
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.025	
G_1 (mm)	16	
G_2 (mm)	32	
G_3 (mm)	12	
Ancho del sustrato W (mm)	48	
Longitud del sustrato L (mm)	52	
F_L (mm)	32	
F_W (mm)	2.7	
F_S (mm)	35.8	

Tabla 12 – Especificaciones de la simulación 1

Se usa como sustrato Denim con un espesor de 1 mm

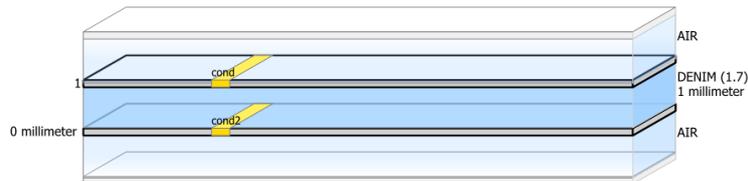


Figura 43 - Sustrato

Resultado de $S(1,1)$ de la simulación y representación 3D

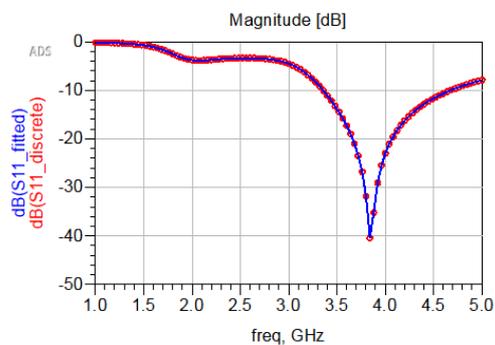


Figura 44 - Pérdidas de retorno

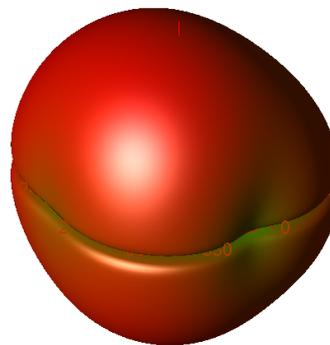


Figura 45 – Diagrama de radiación

Parámetros de la antena simulada

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	3.88
E_max	0.589
θ_{max}	108
φ_{max}	185
Directividad_max	4.318
Ganancia_max	3.704

Tabla 13 – Resultados de la simulación 1

Cortes de los planos principales

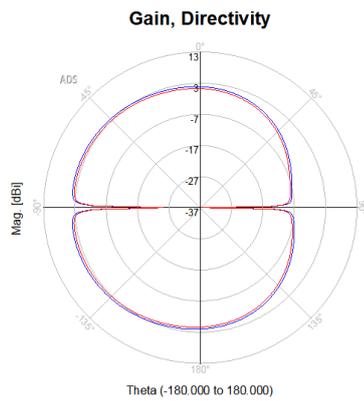


Figura 46 – Ganancia y directividad θ

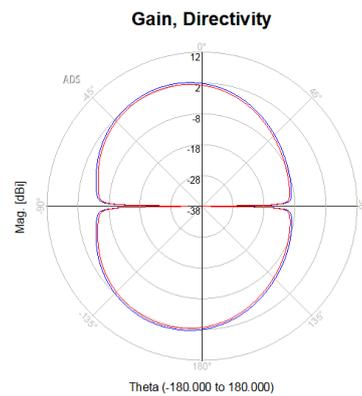


Figura 47 – Ganancia y directividad φ

6.3.2 ANTENA EN POLIESTER

Objetivo general : Se describe una antena Wearable que opera a 2.4 GHz, banda de ISM (Industrial, Scientific and Medical), la antena es usada en para una aplicación médica en la que se sustituye el módulo la antena original por la Wearable.

Metodología utilizada : La antena tiene un sustrato de poliéster con $\epsilon_r = 1.44$ y se ha diseñado para $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ $VSWR \leq 2.00$, ganancia $\geq 2 \text{ dBi}$ y SAR de 1.6 W/Kg .

Se muestra como es el prototipo:

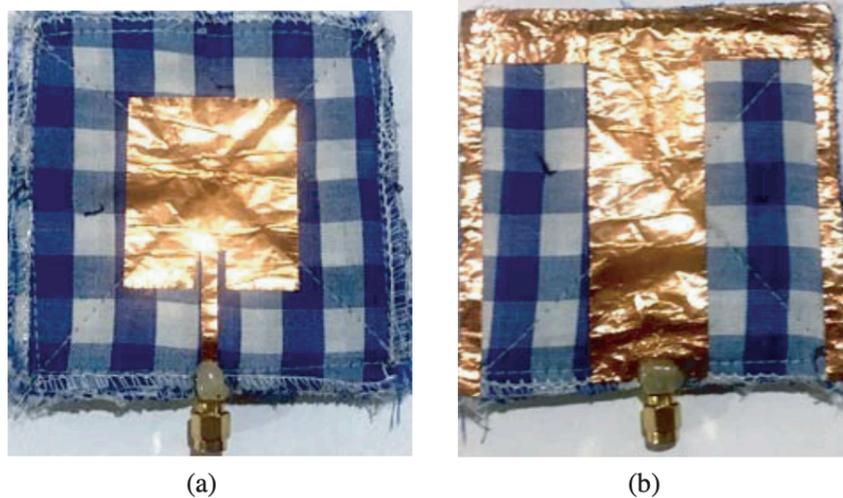


Figura 48 The developed antenna. (a) Front-view. (b) Back-view

Conclusión : Con el prototipo de antena se realizan varias pruebas, tumbado el paciente y de pie, con LOS (Line-of-Sight) y NLOS (Non-Line-of-Sight) y en diferentes momentos del día durante tres días, comparando los resultados con el módulo original los resultados son satisfactorios y la antena Wearable puede sustituir al módulo.

Hasta aquí la descripción del paper [15] de la bibliografía, a continuación se va a realizar la simulación.

Representación del layout, se trata de una antena con dos conductores, uno a cada lado del sustrato, ejerciendo uno de los lados como elemento radiante y el otro como plano de masa.

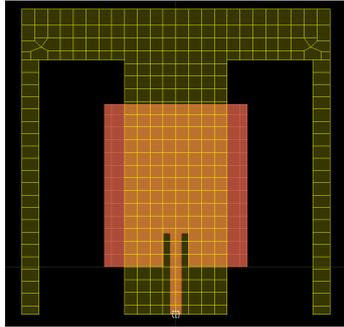


Figura 49 - Layout

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.4
Constante dieléctrica ϵ_r	1.44
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.01
Ancho del parche W_p (mm)	47.83
Longitud del parche L_p (mm)	41.82
Altura del parche h_p (mm)	0.06
Ancho del sustrato W_s (mm)	90
Longitud del sustrato L_s (mm)	90
Espesor del sustrato h_s (mm)	2.85
Ancho del hueco en el plano de masa (mm)	25
Alto del hueco en el plano de masa (mm)	75
Ancho del extremo en el plano de masa (mm)	5
Ancho de la línea microstrip W_l (mm)	3.3
Longitud de la línea microstrip L_l (mm)	24
Longitud de la muesca d (mm)	10
Ancho de la muesca g (mm)	2

Tabla 14 Especificaciones de la simulación 2

Se usa como sustrato poliester con un espesor de 2.85 mm



Figura 50 - Sustrato

Resultado de S(1,1) de la simulación y representación 3D

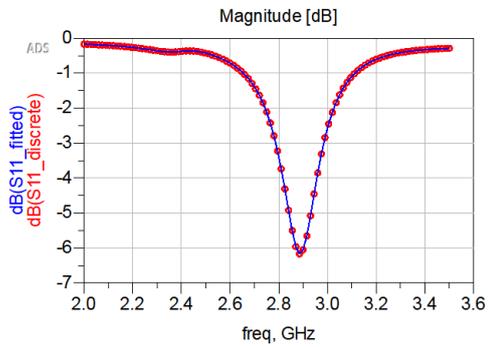


Figura 51 - Perdidas de retorno

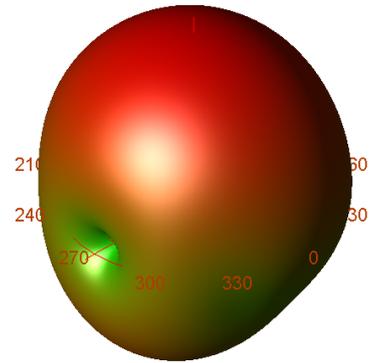


Figura 52 – Diagrama de radiación

Parámetros de la antena simulada

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.85
E_max	0.891
θ_{max}	1
φ_{max}	180
Directividad_max	8.608
Ganancia_max	8.608

Tabla 15 – Resultados de la simulación 2

Cortes de los planos principales

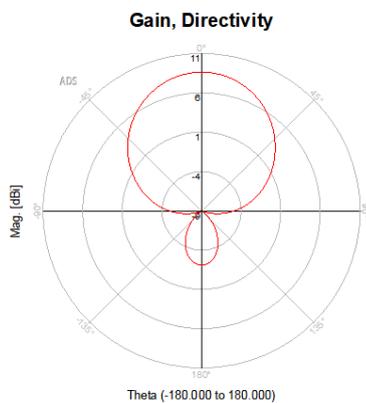


Figura 53 – Ganancia y directividad θ

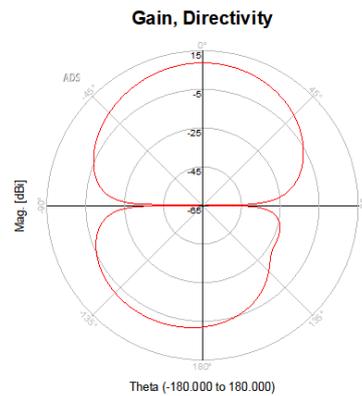


Figura 54 – Ganancia y directividad φ

6.3.3 ANTENA PIFA

Se describe una antena en forma de F invertida (PIFA) textil, este tipo de diseño con materiales convencionales se ha usado ampliamente para las llamadas antenas chasis para terminales de telefonía móvil. La masa de la parte inferior es usada como radiador que puede incrementar el ancho de banda de la antena, el tamaño de la masa situada en la parte trasera debe de ser mucho mayor que la parte del radiador delantera. La clave es elegir cuidadosamente la localización del radiador de la parte delantera de manera que la parte trasera se excite de manera eficiente.

El sustrato es de felpa con un espesor de 6 mm, la capa metálica tiene un espesor de 0.17 mm, con una conductividad de $1,18 \cdot 10^5 S/m$. El método de fabricación es cortando a mano el textil y pegándolo con pegamento y una plancha.

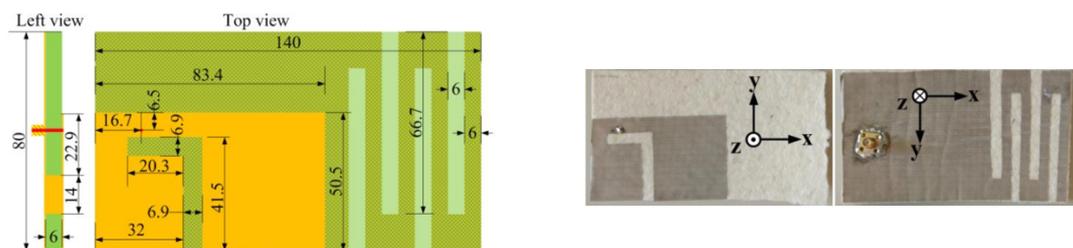


Figura 55 Antena F plana invertida PIFA

[34]

Simulación y optimización de antena F plana invertida PIFA

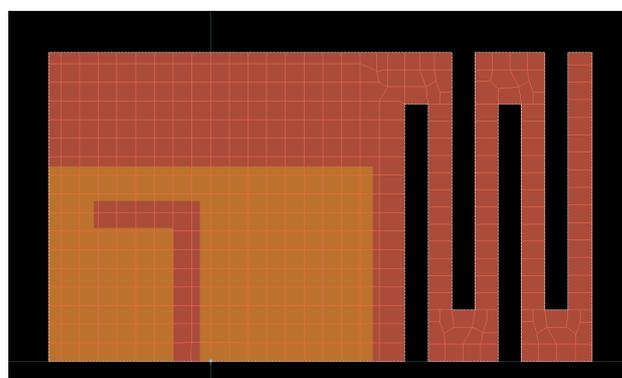


Figura 56 - Layout

Parámetro	Valor	Esquema
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	1,115	
Constante dieléctrica ϵ_r	1.3	
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.044	

Tabla 16 – Especificaciones de la simulación 3



Figura 57 - Sustrato

Resultado S(1,1) de la simulación y representación 3D

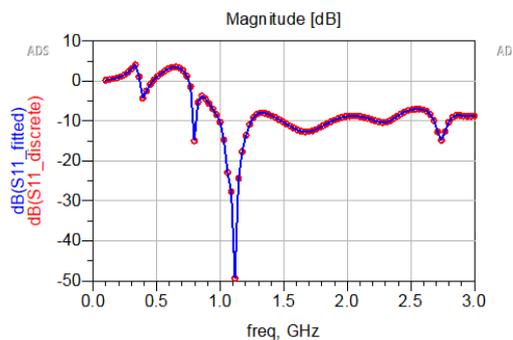


Figura 58 - Pérdidas de retorno

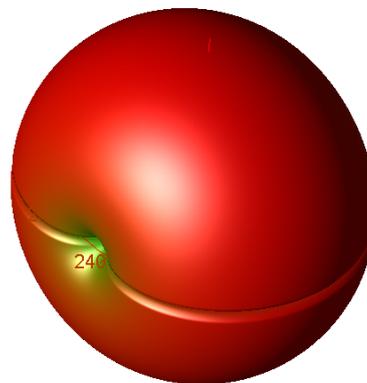


Figura 59 – Diagrama de radiación

Parámetros de la antena simulada

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	1.115
E_max	0.537
θ_{max}	133
φ_{max}	11
Directividad_max	2.427
Ganancia_max	2.427

Tabla 17 – Resultados de la simulación 3

Cortes de los planos principales

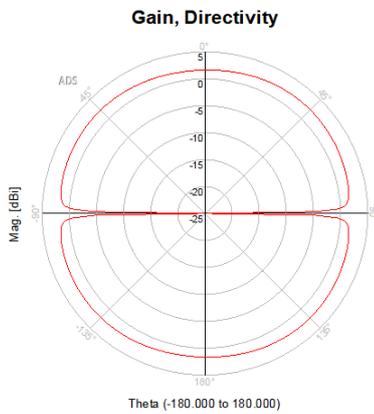


Figura 60 – Ganancia y directividad θ

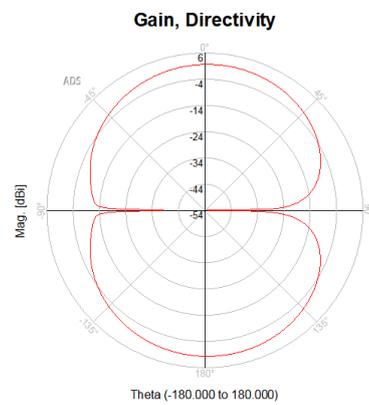


Figura 61 – Ganancia y directividad φ

6.3.4 ANTENA EN DENIM

Se describe una antena microstrip wearable [9] para WBAN (Wireless Body Area Network) a una frecuencia de 2,4 GHz, los materiales textiles se pueden usar como dieléctricos realizando la función de sustrato debido a su baja constante dieléctrica, si $\epsilon_r < 2$ la antena wearable puede tener una eficiencia aceptable y una alta ganancia.

El diseño se ha realizado en dos etapas, en la primera se ha diseñado la antena y simulado mediante Keysight ADS y en la segunda se ha fabricado la antena y se ha integrado convenientemente dentro de prendas de vestir.

Shieldit® Super está fabricado por LessEM Incorporated (USA), tiene un peso de 230 S/m^2 , un espesor de $0,17 \text{ mm}$, una conductividad de $6,67 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ y una resistividad menor de $0,5 \text{ } \Omega/\text{sq}$, el material tiene en la parte trasera un adhesivo que con una plancha domestica se puede quedar pegado al sustrato. El tejido Denim es barato, ligero y flexible, se caracteriza por su $\epsilon_r = 1,70$ con un espesor de 1 mm ,

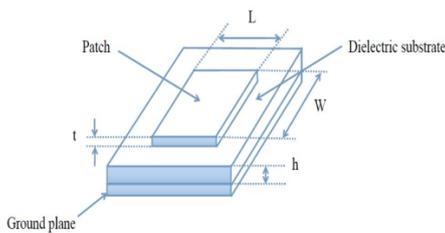


Figura 62 - Antena parche microstrip

[9]

Simulación de antena parche microstrip

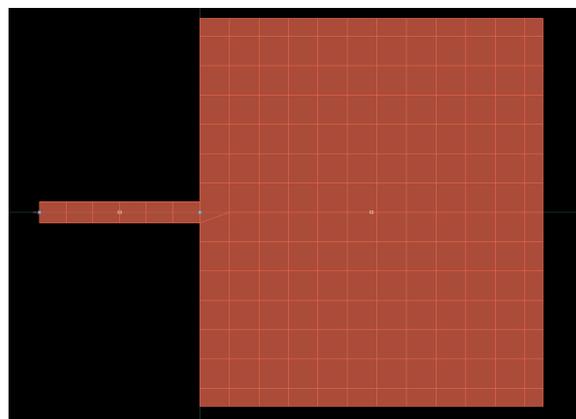


Figura 63 - Layout

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.4
Constante dieléctrica ϵ_r	1.7
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.025
Ancho del parche W_p (mm)	53.791
Longitud del parche L_p (mm)	47.13
Altura del parche h_p (mm)	0.17
Espesor del sustrato h_s (mm)	1
Ancho de la línea microstrip W_l (mm)	2.9
largo de la línea microstrip L_l (mm)	22

Tabla 18 – Especificaciones de la simulación 4

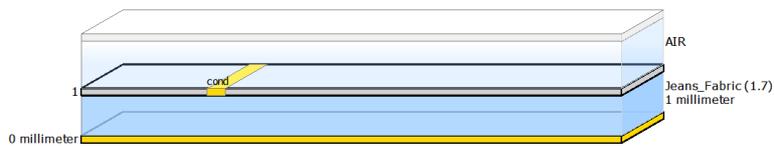


Figura 64 - Sustrato

Resultado S(1,1) de la simulación y representación 3D

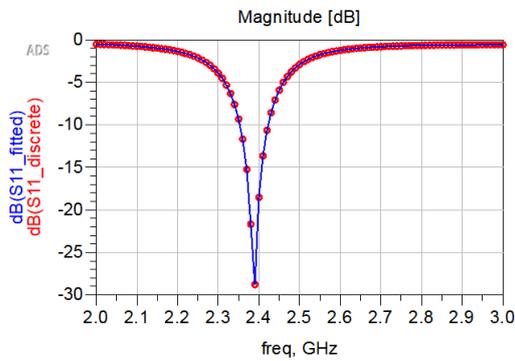


Figura 65 - Pérdidas de retorno

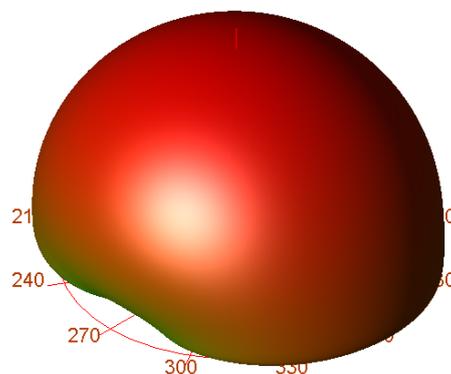


Figura 66 – Diagrama de radiación

Parámetros de la antena simulada

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	2.4
E_max	0.514
θ_{max}	4
φ_{max}	0
Directividad_max	8.113
Ganancia_max	2.515

Tabla 19 – Resultados de la simulación 4

Cortes de los planos principales

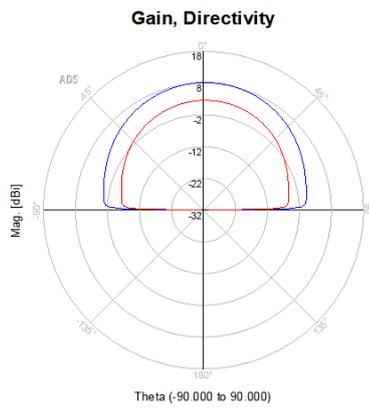


Figura 67 – Ganancia y directividad θ

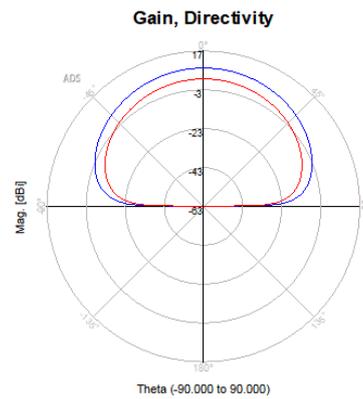


Figura 68 – Ganancia y directividad φ

6.3.5 ANTENA FRACTAL

Se realiza la descripción de una antena fractal, con forma de hojas, en el anverso y reverso del sustrato. Este tipo de antenas se denominan Vivaldi, fueron desarrolladas en un primer momento por Gibson como antenas con muesca, pero en posteriores evoluciones llevaron a que los elementos radiantes se dispusieran a cada lado del sustrato, para aplicaciones médicas tiene gran utilidad. En este caso el tallo de la hoja tiene una forma exponencial que le da un gran rendimiento. En general es mejor definir este tipo de antena como una evolución de las antenas PIFA del apartado anterior.

Como sustrato se emplea una capa de 50.8 x 62 de FR4 de espesor 0.8 mm, con una constante dieléctrica ϵ_r de 1.7 y una tangente de pérdidas $\tan \delta$ de 0.025.

Se ha realizado el diseño y simulado con ADS, los resultados exponen una antena con muy buenas características.

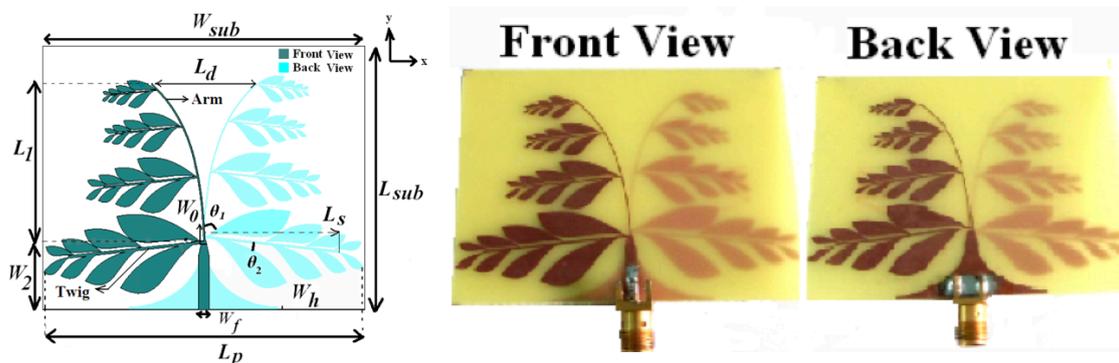


Figura 69 - Antena parche fractal

[39]

Simulación de antena parche fractal:

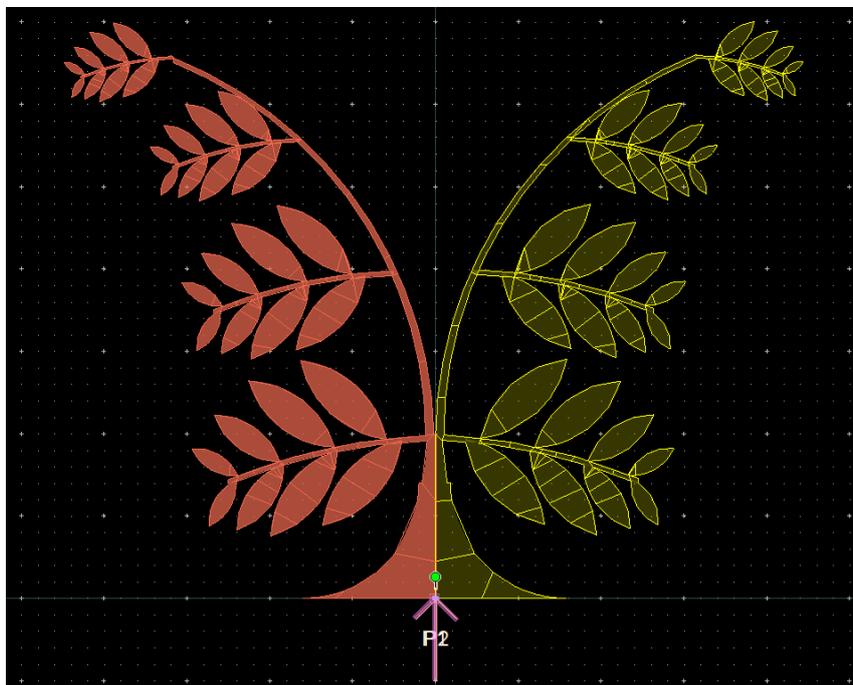


Figura 70 - Layout

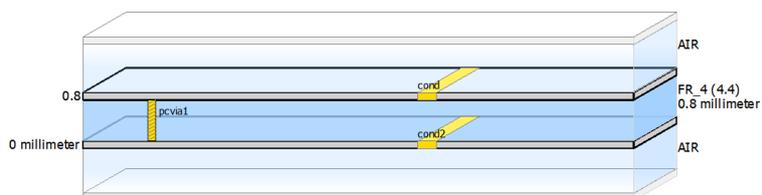


Figura 71 - Sustrato

Resultado S(1,1) de la simulación y representación 3D

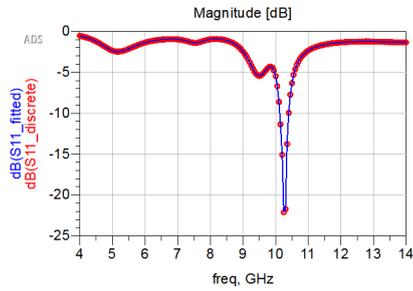


Figura 72 - Perdidas de retorno

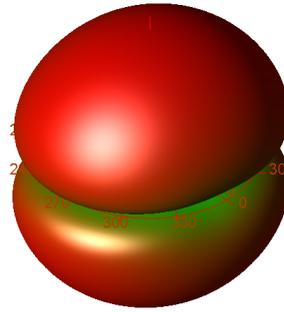


Figura 73 – Diagrama de radiación

Parámetros de la antena simulada

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	10.25
E_max	0.206
θ_{max}	45
φ_{max}	69
Directividad_max	3.675
Ganancia_max	-5.465

Tabla 20 – Resultados de la simulación 5

Cortes de los planos principales

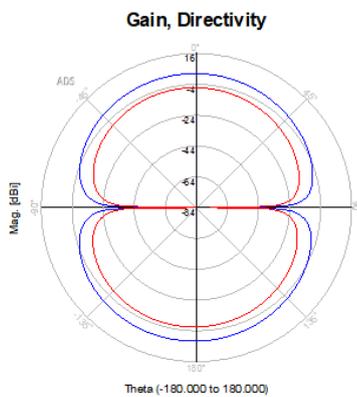


Figura 74 – Ganancia y directividad θ

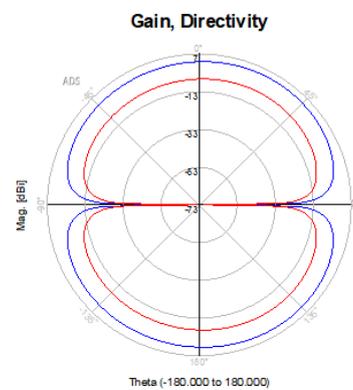


Figura 75 – Ganancia y directividad φ

6.3.6 ANTENA DOBLADA Y BORDADA

Se presenta una antena textil multicapa con una cavidad doblada y con un bordado para cerrar. Las dimensiones totales son 34 mm x 22 mm con un espesor de 1.49 mm. La capa superior contiene un monopolo como elemento radiante, la capa intermedia contiene el mecanismo de alimentación y la capa inferior un plano de masa finito. Es conveniente prestar atención a la capa intermedia ya que la forma del parche adapta la impedancia. El material del sustrato es Cumming Microwave PF-4 [47], que es una espuma de bajas pérdidas con una constante dieléctrica ϵ_r de 1.06 y una tangente de pérdidas $\tan \delta$ de 0.0001, las capas radiantes se han creado usando Marktex NCS95R-CR [48] con una resistencia de $0.09 \Omega/sq$.

Simulación de antena monopolo hueco cavidad

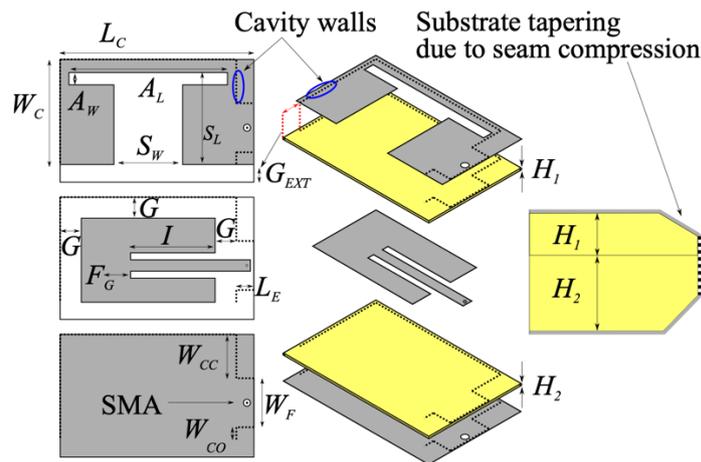


Figura 76 – Antena monopolo hueco cavidad

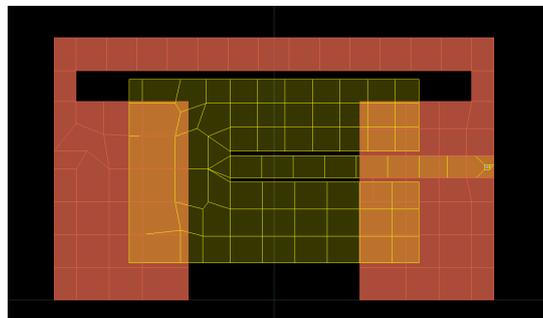


Figura 77 - Layout

Sustrato

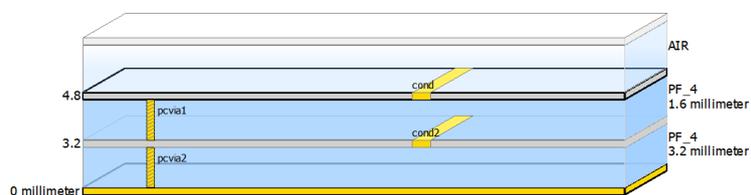


Figura 78 - Sustrato

Resultado S(1,1) de la simulación y representación 3D

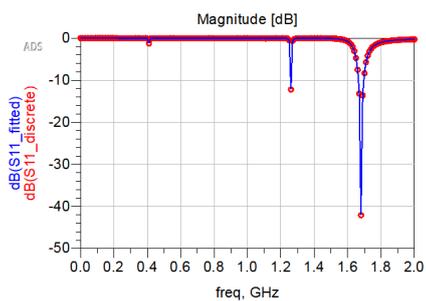


Figura 79 - Perdidas de retorno

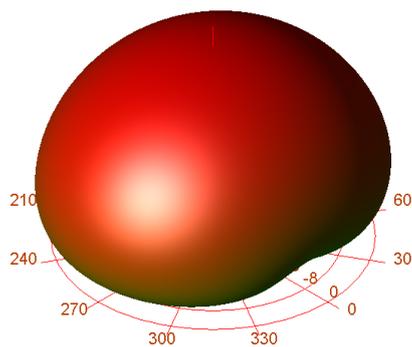


Figura 80 – Diagrama de radiación

Parámetros de la antena simulada

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	1.7
E_max	0.002
θ_{max}	0
φ_{max}	45
Directividad_max	8.756
Ganancia_max	-19.289

Tabla 21 - Resultados de la simulación 6

Cortes de los planos principales

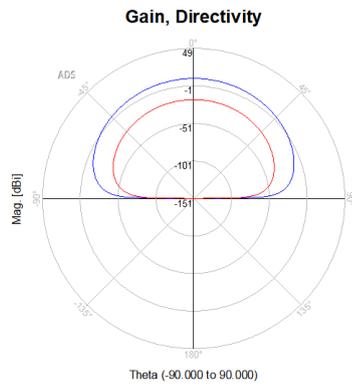


Figura 81 – Ganancia y directividad θ

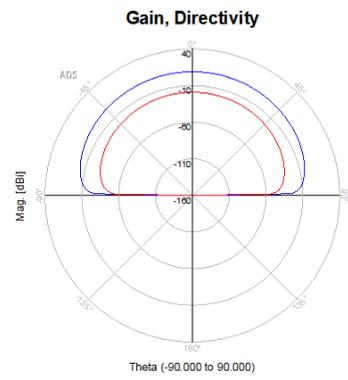


Figura 82 – Ganancia y directividad φ

6.4 DISEÑOS PROPUESTOS

6.4.1 DISEÑO DE UNA ANTENA BASADA EN UNA CREMALLERA

Los textiles que se usan para vestimenta llevan accesorios incorporados que pueden servir como antena, una cremallera, por ejemplo, tiene partes metálicas que pueden servir como elemento radiante.



Figura 83 – Imagen de una cremallera

Se ha encontrado alguna implementación como [3] que es un primer prototipo y una aplicación en un bolso de mano [49]. Integrarlo en una prenda textil es barato, por ejemplo, en un bolsillo de una prenda de abrigo puede ser una buena opción.

Para la realización del prototipo, se han tomado las siguientes dimensiones:

Parámetro	Valor
Constante dieléctrica ϵ_r	1.6
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.01
Ancho de elemento W_T (mm)	1
Longitud del elemento L_T (mm)	4.5
Altura del parche h_T (mm)	4
Ancho del sustrato W_S (mm)	25
Longitud del sustrato L_S (mm)	100
Espesor del sustrato h_S (mm)	1
Ancho del plano de masa W_g (mm)	25
Longitud del plano de masa L_g (mm)	100
Altura del plano de masa h_g (mm)	1

Tabla 22 – Especificaciones cremallera

Se ha simulado con las dimensiones anteriores, los elementos radiantes son los componentes metálicos que integran el cierre, como se puede apreciar en el layout el pin de alimentación se ha situado en el centro.

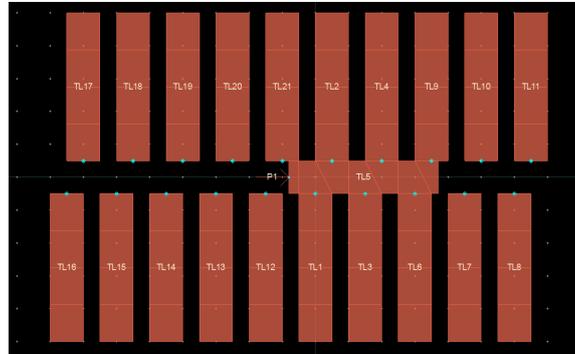


Figura 84 – Layout

Con los datos de la tabla se realiza también la configuración del sustrato, se ha empleado Denim como material y el elemento radiante en la parte superior.

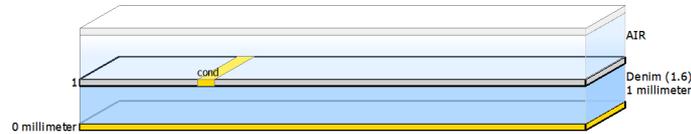


Figura 85 – Sustrato

Se realiza la simulación, la antena radia a 5.45 GHz con cerca de -30 dB, se puede decir que es muy buen resultado.

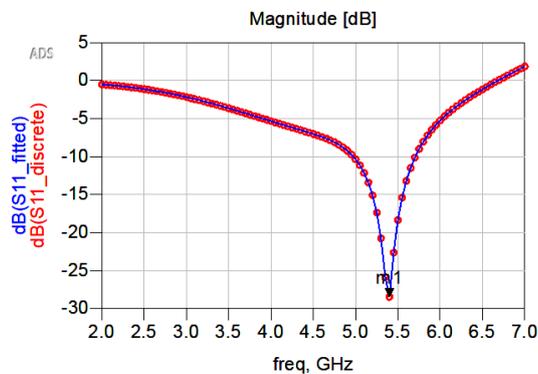


Figura 86 – Perdidas de retorno

En este caso las medidas de los elementos radiantes son fijas, ya que viene de un elemento comercial que no se puede modificar, pero si por alguna razón, se pudiera elegir la medida y fabricar la cremallera, se ha realizado una optimización de los elementos radiantes.

Parámetro	Valor real	Valor optimizado
Ancho de elemento W_T (mm)	1	1.32
Longitud del elemento L_T (mm)	4.5	4.25

Tabla 23 – Comparación con el valor optimizado de cremallera

En la siguiente figura se muestra el proceso de optimización de los elementos radiantes con ADS, en este caso se ha elegido para optimizar la longitud y el ancho de cada elemento y los resultados se muestran en la tabla anterior.

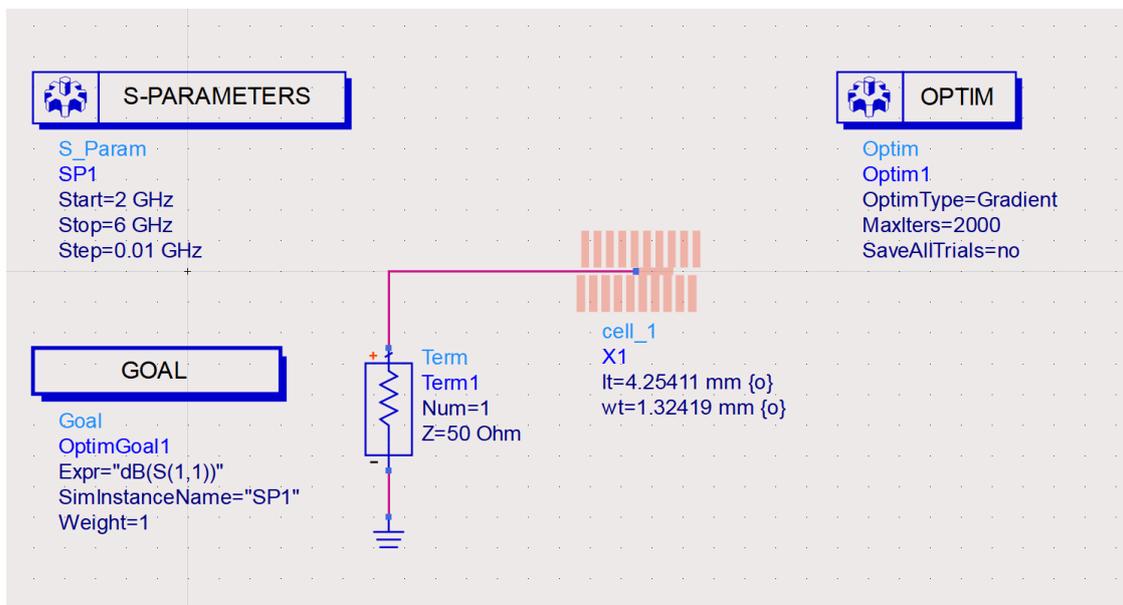


Figura 87 – Optimización

En el caso que se presenta los resultados son los de la cremallera tal como es:

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	5.45
E_max	0.574
θ_{max}	1
φ_{max}	292
Directividad_max	6.709
Ganancia_max	3.443

Tabla 24 – Resultados cremallera

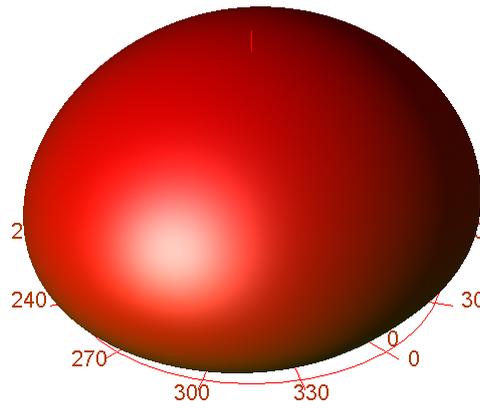


Figura 88 – Diagrama de radiación

Se presenta a continuación los cortes del diagrama de radiación, en el que numéricamente nos da más información de la antena:

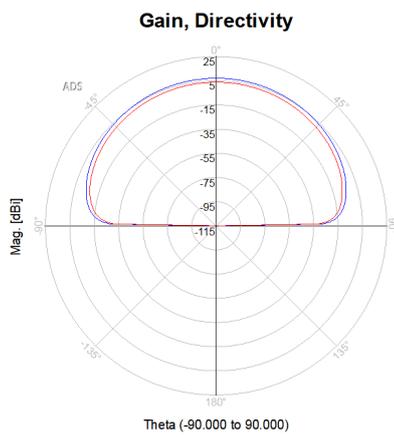


Figura 89 – Ganancia y directividad θ

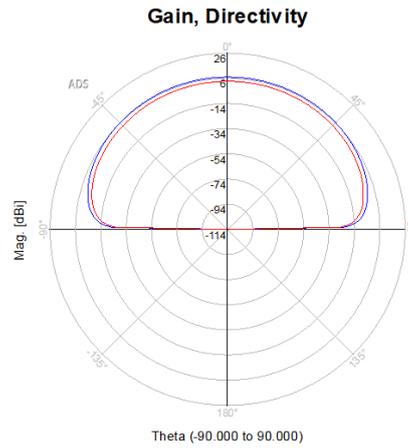


Figura 90 – Ganancia y directividad φ

6.4.2 DISEÑO DE UNA ANTENA BASADA EN UN BOTON

Se ha escogido un botón, las dimensiones del botón original es de 22 mm de diámetro, con los orificios para el cosido de 2 mm. Los botones de este tamaño pueden ser habituales en abrigos, así que la implementación es más natural.

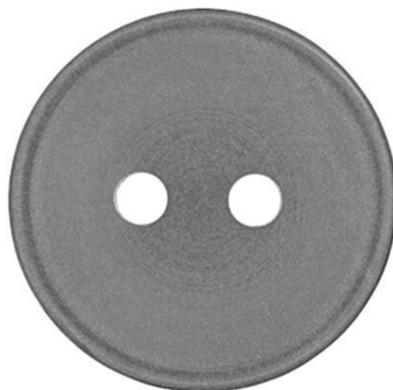


Figura 91 – Botón

La forma del botón es circular, para que tenga un mayor rendimiento se ha cortado la superficie por la parte inferior y superior, de manera que no toda la superficie del botón va a ser radiante.

Parámetro	Valor
Constante dieléctrica ϵ_r	4.6
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.01
Ancho de elemento W_T (mm)	22
Longitud del elemento L_T (mm)	19
Altura del parche h_T (mm)	0.035
Ancho del sustrato W_s (mm)	22
Longitud del sustrato L_s (mm)	22
Espesor del sustrato h_s (mm)	1.6
Ancho del plano de masa W_g (mm)	22
Longitud del plano de masa L_g (mm)	22
Altura del plano de masa h_g (mm)	0.035

Tabla 25 – Especificaciones botón

Entonces en el layout se puede ver la forma que se ha tomado para la superficie radiante

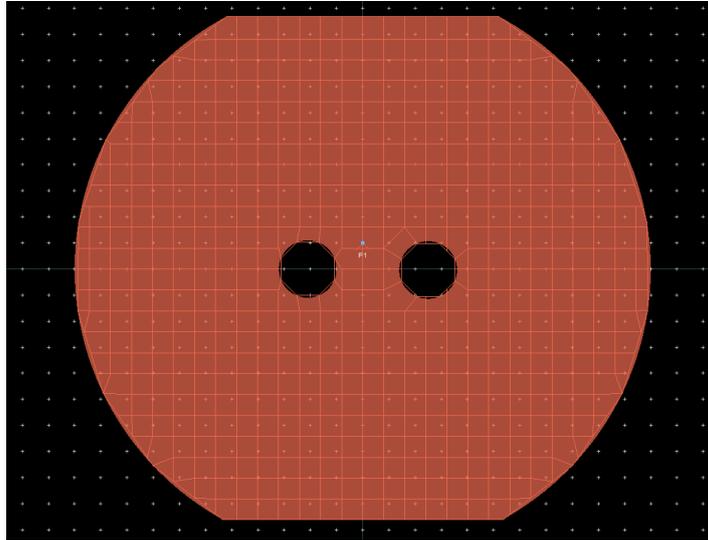


Figura 92 – Layout

Se realiza la configuración del sustrato, se ha tomado FR4_Core, si que este material es el empleado habitualmente para la impresión de circuitos impresos, en este caso, como se trata de prototipo, se puede simplemente tomar una lámina de FR4, mecanizar los orificios y el contorno, de manera que nos cumple perfectamente la función.



Figura 93 – Sustrato

Se realiza la simulación, la antena radia a 7.6 GHz, el valor de las pérdidas de retorno es de -15.9 dB, es un resultado convincente.

Se ha de señalar que no es un primer resultado, se ha probado diversos tamaños, tanto de contorno como de los orificios, también en un primer momento la idea era que la superficie radiante ocupara toda la superficie del botón, se ha encontrado que la línea recta superior e inferior da mucho más rendimiento, esto es lógico, ya que en la teoría de las antenas parche comentada en este mismo documento se hace referencia a las discontinuidades para generar la radiación.

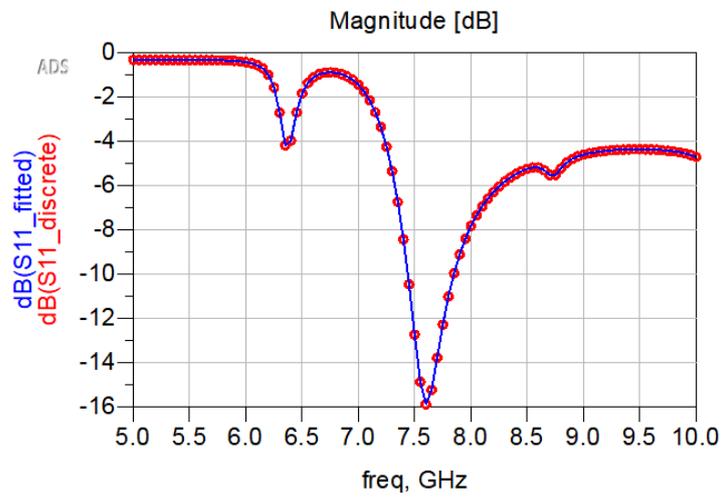


Figura 94 – Perdidas de retorno

Se realiza una optimización para la frecuencia de 7.6 GHz, pero finalmente se encuentra que no es posible la mejora.

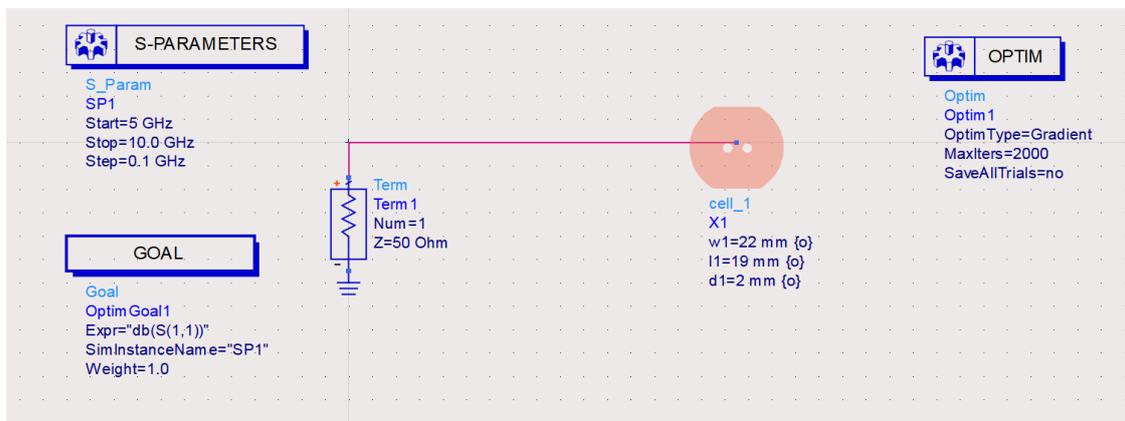


Figura 95 – Optimización

Los resultados de la antena con los parámetros

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	7.6
E_max	0.432
θ_{max}	57
φ_{max}	90
Directividad_max	6.484
Ganancia_max	1.058

Tabla 26 – Resultados botón

Diagrama de radiación a 7.6 GHz

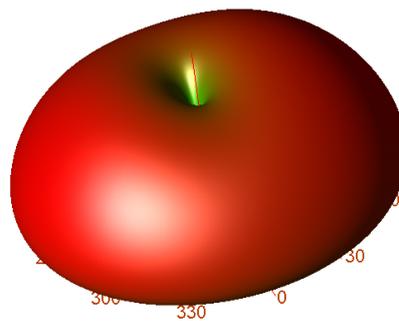


Figura 96 – Diagrama de radiación

Los cortes del diagrama de radiación

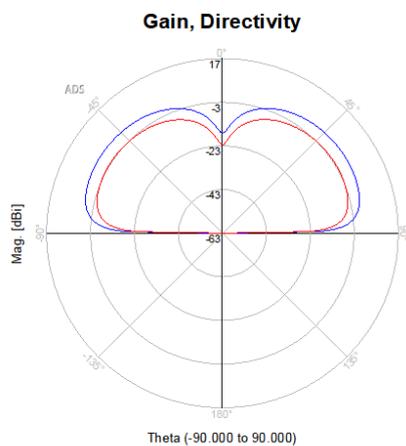


Figura 97 – Ganancia y directividad θ

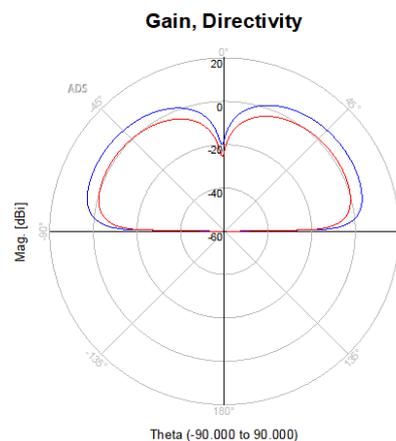


Figura 98 – Ganancia y directividad φ

6.4.3 DISEÑO DE UNA ANTENA BASADA EN UN CINTURON

Se presenta un cinturón, el sustrato es el cuero, una placa delantera como elemento radiante y en la parte trasera el plano de masa. Las medidas del elemento radiante de los largos es 25 mm de alto y 25 mm de ancho, el ancho de ambos es 5 mm.

El cinturón es convencional, como puede ser el de la imagen, en el que para la fabricación de la antena se corta una plancha de cobre de la medida y se pega.



Figura 99 – Imagen del cinturón

Así los datos de diseño de la antena quedan como sigue:

Parámetro	Valor
Constante dieléctrica ϵ_r	2.72
Tangente de pérdidas $\tan \delta$	0.02
Ancho de elemento W_T (mm)	5
Longitud del elemento L_T (mm)	25
Ancho de elemento W_L (mm)	5
Longitud del elemento L_L (mm)	26
Altura del parche h_T (mm)	1
Ancho del sustrato W_s (mm)	25
Longitud del sustrato L_s (mm)	26
Espesor del sustrato h_s (mm)	1.8
Ancho del plano de masa W_g (mm)	25
Longitud del plano de masa L_g (mm)	16
Altura del plano de masa h_g (mm)	1

Tabla 27 – Especificaciones cinturón

Se han introducido las medidas en el simulador ADS

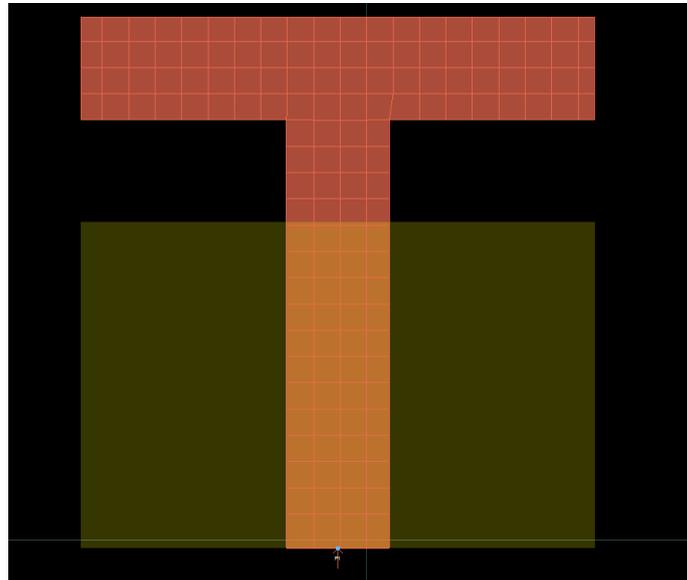


Figura 100 – Layout

La configuración del sustrato queda como en la imagen:



Figura 101 – Sustrato

Se realiza la simulación y en un principio la antena funciona a 3.96 GHz con un rendimiento bastante aceptable.

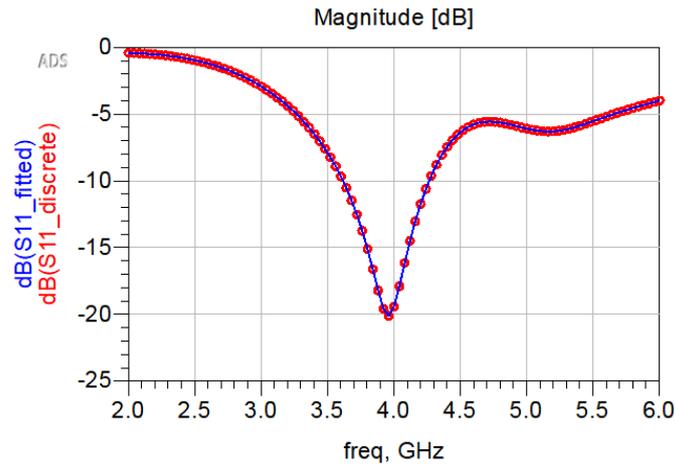


Figura 102 – Perdidas de retorno

Se decide dar el paso de optimizar las dimensiones de la antena, pero apenas han variado las dimensiones y los resultados son prácticamente los mismos, si que se ha movido la frecuencia a 4GHz.

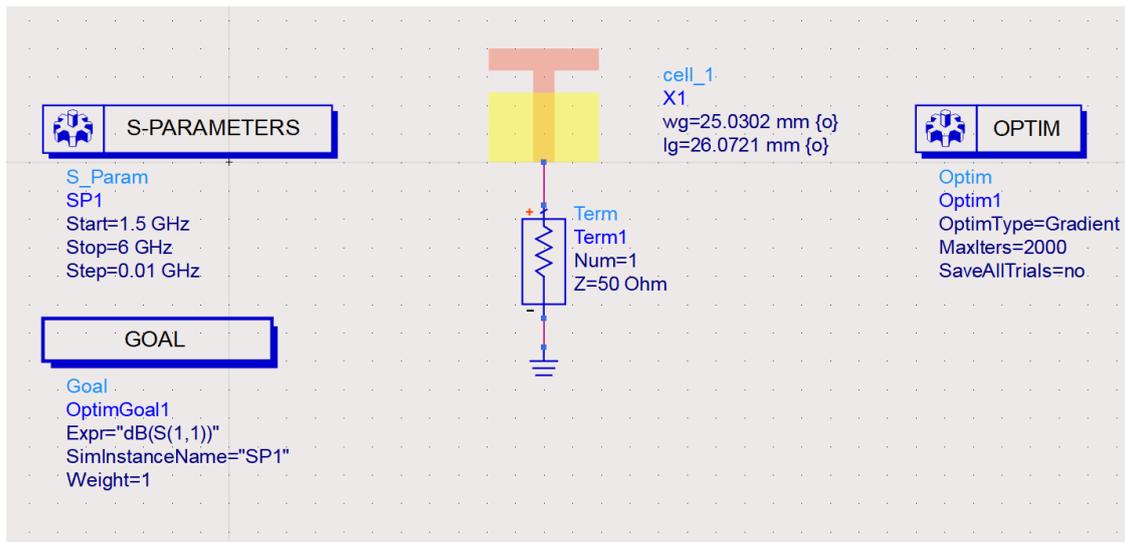


Figura 103 – Perdidas de retorno

Entonces los resultados de la simulación quedan así:

Parámetro	Valor
Frecuencia de resonancia f_r (GHz)	4
E_max	0.268
θ_{max}	45
φ_{max}	90
Directividad_max	8.948
Ganancia_max	-3.140

Tabla 28 – Resultados cinturón

Se realiza el diagrama de directividad:

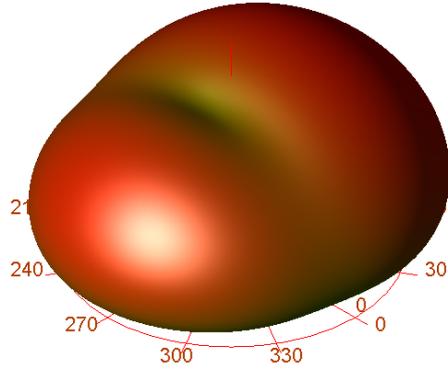


Figura 104 – Diagrama de radiación

Y los resultados numéricos de la simulación:

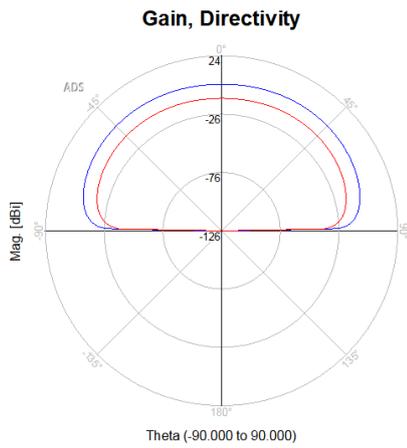


Figura 105 – Ganancia y directividad θ

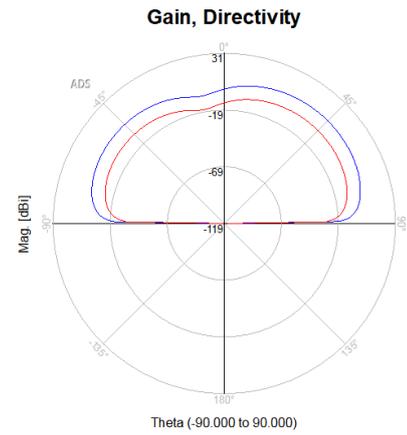


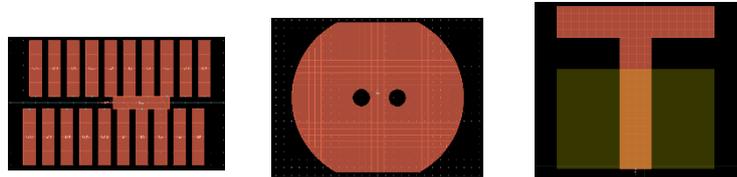
Figura 106 – Ganancia y directividad φ

6.4.4 COMPARATIVA DE LAS ANTENAS DISEÑADAS

A la hora de realizar una comparativa de las antenas diseñadas se deben de tener en cuenta varios aspectos fundamentales:

- Los materiales del sustrato y de los elementos radiantes
- La forma de la antena
- La frecuencia de radiación

Si bien las tres antenas radian en un solo sentido, están diseñadas para que sea hacia el exterior del cuerpo humano.



f_r (GHz)	5.45	7.6	4
Material (ϵ_r) [$\tan \delta$]	Denim (1.6) [0.01]	FR4 (4.6) [0.01]	Cuero (2.72) [0.02]
Espesor sustrato	1	1.6	1.8
Directividad_max	6.709	6.484	8.948
Ganancia_max	3.443	1.058	-3.140

Tabla 29 – Comparativa de los diseños

Como se puede apreciar, la cremallera tiene mejores resultados, obtiene una ganancia de 3.443 vs 1.058 del botón y -3.140 del cinturón, esto es debido a que son varios los elementos que intervienen en la creación del campo radiado, es un array de elementos que lo conforma cada uno de los dientes.

Los resultados de directividad del botón se asemejan a los de la cremallera, no así la ganancia, que es menor, el material es completamente diferente y a diferente frecuencia.

Respecto al cinturón, sí que la directividad es mayor que las otras dos, el valor de la tangente de pérdidas, al ser mayor, influye en un peor resultado de la ganancia, la antena está perfectamente adaptada, es decir que en alguna de las direcciones de radiación el rendimiento no sea el adecuado.

Los elementos a los que se ha de adaptar la antena son diferentes, la forma de los elementos radiantes también lo es, en consecuencia, la frecuencia de resonancia no es la misma, los materiales del sustrato tienen diferentes características de permitividad y de tangente de pérdidas, también el espesor es diferente. En consecuencia, los resultados de ganancia y directividad son muy dispares.

En la figura (103) se muestra una comparación de las pérdidas de retorno, en la que las características indican que las tres antenas están adaptadas y funcionan en el rango de frecuencia en que entran en resonancia.

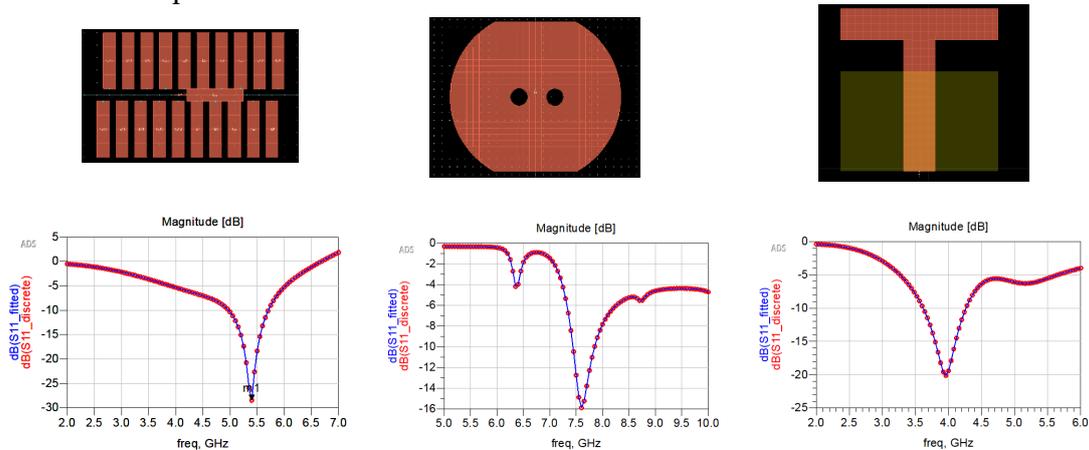


Figura 107 - Comparación de pérdidas de retorno

7 CONCLUSIONES

Se han probado diferentes materiales y configuraciones de antenas wearable textiles, el comportamiento de los materiales textiles es descrito por la constante dieléctrica, que es baja, ya que son materiales muy porosos y la presencia del aire acerca su valor a uno.

El espesor del sustrato influye en el ancho de banda, con espesores mayores se consiguen bandas estrechas.

La eficiencia de una antena η es un indicador claro de las pérdidas dentro de la antena

$$G = \eta \cdot D \quad (20)$$

Está determinada por la constante dieléctrica del sustrato y su espesor. Entonces lo ideal son materiales con poco espesor y alta constante dieléctrica, se han encontrado materiales para las antenas simuladas que cumplen los requisitos para ser eficientes.

Como los materiales son una restricción, entonces para conseguir mejor eficiencia la forma que se le da a la antena da la diferencia para tener antenas eficientes. En el caso de la cremallera su forma con múltiples elementos de los dientes favorece la eficiencia. En el caso del botón, la forma circular no acababa de dar un resultado satisfactorio, dando forma recta en la parte superior e inferior la eficiencia aumento. El cinturón se ha realizado con la forma más optimizada posible y pese al sustrato de cuero funciona correctamente.

En base a las simulaciones realizadas, los resultados son altamente satisfactorios, estas antenas se pueden integrar fácilmente en prendas de vestir.

7.1 LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

De un diseño determinado de los expuestos en el trabajo, el punto de donde se alimenta la antena se puede cambiar a un orificio en el sustrato o usar alimentación por inducción para poder comparar los resultados y determinar si es una solución mejor.

En los diseños de botones y el cinturón, tomándolos como base, desarrollar un array con estos elementos, entonces, tomando como ejemplo la antena del cinturón, repetir la forma a lo largo del contorno de una cintura.

Si bien en este trabajo se realizan simulaciones con software de antenas textiles, puede ser interesante la realización física de los prototipos, de manera que con equipo de laboratorio se pueda medir los resultados.

8 PRESUPUESTO

ITEM	PRECIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Ingeniero técnico de telecomunicación	60 €/h	250 h	15000
Portatil Galaxy Book2 con Windows 11	899.90 €	1 ud	899.90
Keysight ADS 2023	2500 €	1 ud	2500
Microsoft 365 personal	37.50 €	1 ud	37.50
Microsoft Project 2013 Profesional	149.95 €	1 ud	149.95
			18587.35
		IVA (21%)	3903.34
			2249.69 €

9 **BIBLIOGRAFIA**

1. El Gharbi M, Fernández-García R, Ahyoud S, Gil I. A Review of Flexible Wearable Antenna Sensors: Design, Fabrication Methods, and Applications. *Materials (Basel)*. 2020 Aug 27;13(17):3781. DOI: 10.3390/ma13173781.
2. Ali SM, Sovuthy C, Imran MA, Socheatra S, Abbasi QH, Abidin ZZ. Recent Advances of Wearable Antennas in Materials, Fabrication Methods, Designs, and Their Applications: State-of-the-Art. *Micromachines*. 2020; 11(10):888. DOI: 10.3390/mi11100888
3. M. Mantash, A. -C. Tarot, S. Collardey and K. Mahdjoubi, "Zip based monopole antenna for wearable communication systems," 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, Czech Republic, 2012, pp. 762-764, DOI: 10.1109/EuCAP.2012.6206237.
4. Bozzi, M. (2012). Substrate integrated waveguide (SIW): An emerging technology for wireless systems. 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings. doi:10.1109/apmc.2012.6421736 DOI: 10.1109/APMC.2012.6421736
5. C. Musu and A. Fanti, "Wearable rectangular patch antenna for ICT application: Dosimetry evaluation," 2014 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2014, pp. 795-798, DOI: 10.1109/TELFOR.2014.7034526.
6. Atanasova GL, Atanasov BN, Atanasov NT. Fully Textile Dual-Band Logo Antenna for IoT Wearable Devices. *Sensors (Basel)*. 2022 Jun 15;22(12):4516. DOI: 10.3390/s22124516.
7. Salvado R, Loss C, Gonçalves R, Pinho P. Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey. *Sensors*. 2012; 12(11):15841-15857. DOI: 10.3390/s121115841
8. P. M. Potey and K. Tuckley, "Design of wearable textile antenna with various substrate and investigation on fabric selection," 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), Dhanbad, India, 2018, pp. 1-2, DOI: 10.1109/ICMAP.2018.8354539.
9. E. N. F. S. E. Embong, K. N. A. Rani and H. A. Rahim, "The wearable textile-based microstrip patch antenna preliminary design and development," 2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS), Bangkok, Thailand, 2017, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICETSS.2017.8324149.
10. International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS), Bangkok, Thailand, 2017, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICETSS.2017.8324149.
11. P. Jha, A. Kumar, A. De and R. K. Jain, "Flexible and Textile Two-port compact antenna for WLAN and wearable applications," 2021 8th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India, 2021, pp. 308-311, DOI: 10.1109/SPIN52536.2021.9565985.
12. A. Tronquo, H. Rogier, C. Hertleer and L. Van Langenhove, "Applying textile materials for the design of antennas for wireless body area networks," 2006 First European Conference on Antennas and Propagation, Nice, France, 2006, pp. 1-5, DOI: 10.1109/EUCAP.2006.4584573.
13. Fatemeh Nikbakhtnasrabadi; Hatem El Matbouly; Markellos Ntagios; Ravinder Dahiya; (2021). Textile-Based Stretchable Microstrip Antenna with Intrinsic Strain Sensing. *ACS Applied Electronic Materials*, (), -. DOI: 10.1021/acsaelm.1c00179.
14. H. S., A. S., S. R., A. A., K. K. Kishor and B. V., "A Compact Flexible Two-Port Textile Antenna," 2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON), Kochi, India, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/INDICON56171.2022.10040193.
15. Hasri Ainun Harris Radial Anwar Yuyu Wahyu Mohamad Ismail Sulaiman Zuhani Mansor Dwi Andi Nurmantris, "Design and Implementation of Wearable Antenna Textile for ISM Band," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 120, 11-26, 2022. DOI: 10.2528/PIERC22022501.
16. Varma, Sanjit & Sharma, Somia & John, Merbin & Bharadwaj, Richa & Dhawan, Anuj & Koul, Shiban. (2021). Design and Performance Analysis of Compact Wearable Textile Antennas for IoT and Body-Centric Communication Applications. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2021. 1-12. DOI: 10.1155/2021/7698765.
17. Ismahayati Adam; Muhammad Ramlee Kamarudin; Rambe, Ali H; Norshakila Haris; Rahim, Hasliza A; et al.. *International Journal of Antennas and Propagation; New York* Tomo 2021, (2021). DOI: 10.1155/2021/5563528.
18. R. Sreelakshmy, G. Vairavel, Novel cuff button antenna for dual-band applications, *ICT Express*, Volume 5, Issue 1, 2019, Pages 26-30, ISSN 2405-9595, DOI: 10.1016/j.ict.2018.01.012.

19. Ambiotex – T-shirt for sports [en línia] [consulta: 17 de marzo de 2023]. Disponible a <https://www.hypesportsinnovation.com/startup/ambiotex-gmbh/>
20. Hexoskin – Continuous Cardiac, Pulmonary, Activity & Sleep data [en línia] [consulta: 17 de marzo de 2023]. Disponible a <https://www.hexoskin.com/>
21. komodotec – Smart Sleeve [en línia] [consulta: 17 de marzo de 2023]. Disponible a <https://komodotec.com/>
22. Wearablex – Smart Yoga Pants [en línia] [consulta: 17 de marzo de 2023]. Disponible a <https://www.wearablex.com/collections/nadi-x-smart-yoga-pants>
23. zskmachines – Embroidery machines [en línia] [consulta: 17 de marzo de 2023]. Disponible a <https://www.zskmachines.com/embroidery-machines/>
24. Shieldex – Smart Clothes & Wearables [en línia] [consulta: 17 de marzo de 2023]. Disponible a <https://www.shieldex.de/en/>
25. A.Cardama, L.Jofre, J.M.Rius, J.Romeu, S.Blanch, “Antenas”, Edicions UPC
26. Antenna theory radiation pattern [en línia] [consulta: 25 de marzo de 2023]. Disponible a https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_radiation_pattern.htm
27. Organza y Organdi suizo [en línia] [consulta: 9 de abril de 2023]. Disponible a <https://www.traetela.com/339-organza-y-organdi-suizo>
28. S. Alharbi et al., "E-Textile Origami Dipole Antennas With Graded Embroidery for Adaptive RF Performance," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2218-2222, Dec. 2018, DOI: 10.1109/LAWP.2018.2871643.
29. J. Zhong, A. Kiourti, T. Sebastian, Y. Bayram and J. L. Volakis, "Conformal Load-Bearing Spiral Antenna on Conductive Textile Threads," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 230-233, 2017, DOI: 10.1109/LAWP.2016.2570807.
30. Mantash, Mohamad & Tarot, Anne-Claude & Collardey, Sylvain & Mahdjoubi, Kouros. (2012). Investigation of Flexible Textile Antennas and AMC Reflectors. *International Journal of Antennas and Propagation*. 2012. DOI: 10.1155/2012/236505.
31. Z. Wang, L. Zhang, Y. Bayram and J. L. Volakis, "Embroidered Conductive Fibers on Polymer Composite for Conformal Antennas," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 9, pp. 4141-4147, Sept. 2012, DOI: 10.1109/TAP.2012.2207055.
32. M. A. B. Abbasi, S. S. Nikolaou, M. A. Antoniadis, M. Nikolić Stevanović and P. Vryonides, "Compact EBG-Backed Planar Monopole for BAN Wearable Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 453-463, Feb. 2017, DOI: 10.1109/TAP.2016.2635588.
33. W. El Hajj, C. Person and J. Wiart, "A Novel Investigation of a Broadband Integrated Inverted-F Antenna Design; Application for Wearable Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 7, pp. 3843-3846, July 2014, DOI: 10.1109/TAP.2014.2318061.
34. S. Yan, V. Volskiy and G. A. E. Vandenbosch, "Compact Dual-Band Textile PIFA for 433-MHz/2.4-GHz ISM Bands," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2436-2439, 2017, DOI: 10.1109/LAWP.2017.2723419.
35. S. Yan, P. J. Soh and G. A. E. Vandenbosch, "Wearable Dual-Band Magneto-Electric Dipole Antenna for WBAN/WLAN Applications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 9, pp. 4165-4169, Sept. 2015, DOI: 10.1109/TAP.2015.2443863.
36. R. Moro, S. Agneessens, H. Rogier, A. Dierck and M. Bozzi, "Textile Microwave Components in Substrate Integrated Waveguide Technology," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 2, pp. 422-432, Feb. 2015, DOI: 10.1109/TMTT.2014.2387272.
37. Rano, Dinesh; Hashmi, Mohammad (2019). Extremely compact EBG-backed antenna for smartwatch applications in medical body area network. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(7), 1031–1040. DOI: 10.1049/iet-map.2018.6021.
38. Sharawi, M.S. (2006). Use of low-cost patch antennas in modern wireless technology. *IEEE Potentials*, 25(4), 35–47. DOI:10.1109/mp.2006.1664068.
39. B. Biswas, R. Ghatak and D. R. Poddar, "A Fern Fractal Leaf Inspired Wideband Antipodal Vivaldi Antenna for Microwave Imaging System," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 11, pp. 6126-6129, Nov. 2017, DOI: 10.1109/TAP.2017.2748361.
40. S. P. Pinapati, D. C. Ranasinghe and C. Fumeaux, "Textile Multilayer Cavity Slot Monopole For UHF Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2542-2545, 2017, DOI: 10.1109/LAWP.2017.2731978.

41. N. Chahat, M. Zhadobov, L. Le Coq and R. Sauleau, "Wearable Endfire Textile Antenna for On-Body Communications at 60 GHz," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 11, pp. 799-802, 2012, DOI: 10.1109/LAWP.2012.2207698.
42. W. G. Whittow et al., "Inkjet-Printed Microstrip Patch Antennas Realized on Textile for Wearable Applications," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 71-74, 2014, DOI: 10.1109/LAWP.2013.2295942.
43. Syscom advanced materials – Conductive metal Clad Fibers [en línia] [consulta: 06 de abril de 2023]. Disponible a <https://metalcladfibers.com>
44. M. Karthick, "Design of 2.4GHz patch antennae for WLAN applications," 2015 IEEE Seventh National Conference on Computing, Communication and Information Systems (NCCCIS), Coimbatore, India, 2015, pp. 1-4, DOI: 10.1109/NCCCIS.2015.7295902.
45. K. N. Paracha, S. K. Abdul Rahim, P. J. Soh and M. Khalily, "Wearable Antennas: A Review of Materials, Structures, and Innovative Features for Autonomous Communication and Sensing," in IEEE Access, vol. 7, pp. 56694-56712, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909146.
46. Singh, V.. (2014). A Review of Textile Materials for Wearable Antenna. journal of Microwave Engineering & Technologies (ISSN: 2349-9001). 1. 07-14.
47. cumingmicrowave.com - [en línia] [consulta: 9 de junio de 2023]. Disponible a <https://www.cumingmicrowave.com/pdf/210-Dielectrics/210-6%20C-FOAM%20PF-2%20&%20PF-4.pdf>
48. marktek-inc.com [en línia] [consulta: 9 de junio de 2023]. Disponible a <https://marktek-inc.com/wp-content/uploads/2021/08/NCS95R-CR-0920-ds.pdf>
49. G. Li, Y. Huang, G. Gao, X. Wei, Z. Tian and L. -A. Bian, "A Handbag Zipper Antenna for the Applications of Body-Centric Wireless Communications and Internet of Things," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 10, pp. 5137-5146, Oct. 2017, DOI: 10.1109/TAP.2017.2743046.