Universitat Oberta de Catalunya

uoc.edu

Diseño de una antena-sensor en sustratos flexibles

Alejandro Navarro Pérez
Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación
Área de Sistemas de Alta Frecuencia

Ignacio Gil Galí
Germán Cobo Rodríguez

Junio 2020

Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 España de Creative Commons

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	*Diseño de una antena-sensor en sustratos flexibles*
Nombre del autor:	*Alejandro Navarro Pérez*
Nombre del consultor/a:	*Ignacio Gil Galí*
Nombre del PRA:	*Germán Cobo Rodríguez*
Fecha de entrega:	06/2020
Titulación:	*Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación*
Área del Trabajo Final:	*Sistemas de Alta Frecuencia*
Idioma del trabajo:	*Castellano*
Palabras clave	*antenas, sensores, sustratos flexibles*

Resumen del Trabajo:

En la actualidad, la impresión electrónica de circuitos de microondas sobre sustratos flexibles, con técnicas como *inkjet printing*, es una alternativa de fácil acceso y a un coste muy competitivo. En este ámbito, las antenas-sensor para la detección de variables ha centrado buena parte del interés de la comunidad científica. Esto es debido a que al utilizar el mismo sensor como transmisor inalámbrico se consigue simplificar la complejidad de los circuitos implicados.

En la primera fase del presente Trabajo de Final de Grado se realiza un profundo estudio del estado de la cuestión. A continuación, se reseñan cuáles son los parámetros principales de diseño de estas antenas-sensor sobre sustratos flexibles. La parte práctica del proyecto se inicia con la simulación de algunos de los ejemplos visto durante el estado del arte. Tras esta fase de entrenamiento, se aborda el primer diseño de antena-sensor a nivel de *layout* para la detección

de temperatura del cuerpo humano. Finalmente, se optimiza este diseño para mejorar sus prestaciones y sensibilidad.

Como resultado final, se obtiene una antena-sensor de parche microstrip que opera a la frecuencia de los 38 GHz. Este diseño muestra unas prestaciones y una sensibilidad suficiente para poder considerarse una alternativa válida en aplicaciones 5G de detección de temperatura. La memoria termina con la presentación de las conclusiones finales y las líneas de trabajo futuras.

Abstract:

Nowadays, the electronic printing of microwave circuits on flexible substrates, using technics like inject printing, is an accessible alternative and at a highly competitive cost. In this context, the sensor antennas for detection of variables captures the attention of the international scientific community. This keen interest is due to the fact that while using the same sensor as wireless transmitter, it is possible to simplify the complexity of the involved circuits.

In the first stage of this Final Degree Project, a detailed study of the state of the art is carried out, followed by descriptions of the main design parameters of these sensor antennas on flexible substrates. The practical part of this project starts with simulations of selected examples exposed in the state of the art. After this training phase, we will dwell on the layout of the first design of the antenna sensor for detection of human body temperature. Lastly, this design will be optimized to improve its performance and responsiveness.

In the final reckoning, we obtain a microstrip patch sensor antenna which operates at frequency of 38 GHz. This design shows satisfactory results in terms of performance and responsiveness, thus it can/with regards to be considered as an adequate option for 5G detection temperature applications. The project report closes with the conclusions and future work lines.

Índice

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO 1

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO 1

1.3 ENFOQUE Y MÉTODO SEGUIDO 2

1.4 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO 3

1.4.1 Recursos 3

1.4.2 Planificación temporal y tareas a realizar 4

1.5 BREVE SUMARIO DE PRODUCTOS OBTENIDOS 5

1.6 PRESUPUESTO DEL PROYECTO 5

1.7 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS OTROS CAPÍTULOS DE LA MEMORIA 6

2. ESTADO DEL ARTE DE LAS ANTENAS-SENSOR Y DE LOS SUSTRATOS FLEXIBLES 8

2.1 ANTENAS-SENSOR PARA LA DETECCIÓN DE VARIABLES 8

2.1.1 Sensores inalámbricos pasivos tipo LC 8

2.1.2 Antena de parche microstrip como elemento sensor 10

2.1.2.1 Ejemplo de antena-sensor de parche microstrip flexible en sustrato de Kapton para la detección de estrés mecánico 11

2.1.2.2 Ejemplo de antena-sensor flexible de parche microstrip en sustrato textil para la detección de temperatura 14

2.1.2.3 Ejemplo de antena-sensor de parche microstrip en sustrato epoxi FR4 para la medición del pH en soluciones líquidas 16

2.1.3 Otros ejemplos de antenas-sensor 18

2.1.3.1 Antena-sensor flexible basada en un resonador de anillo abierto en sustrato textil 18

2.2 ELECTRÓNICA IMPRESA 21

2.2.1 Serigrafía 22

2.2.2 Impresión por inyección de tinta 24

2.2.3 Tintas de impresión electrónica 25

2.3 PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS DE LOS SUSTRATOS FLEXIBLES EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA 28

2.3.1 Reseña de los resultados de un estudio experimental 29

3. PARÁMETROS PRINCIPALES DEL PRESENTE PROYECTO 33

3.1 PARÁMETROS DEL SUSTRATO FLEXIBLE 33

3.1.1 Permitividad eléctrica 33

3.1.1 Tangente de pérdidas 34

3.2 RANGO DE FRECUENCIAS Y VARIABLE A DETECTAR 34

3.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE ANTENA Y TOPOLOGÍA A DISEÑAR 35

3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANTENA 36

3.4.1 Impedancia de antena 36

3.4.2 Eficiencia de radiación y de antena *37*
3.4.3 Diagrama de radiación *37*
3.4.4 Directividad y ganancia *39*
3.4.5 Polarización *40*
3.4.6 Ancho de banda *40*
3.5 IMPACTO DEL CUERPO HUMANO EN LAS PRESTACIONES DE LA ANTENA 41
3.7 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE *INKJET PRINTING* PARA UNA POSIBLE FABRICACIÓN DEL DISEÑO 45
4. ANÁLISIS DE DISEÑOS DE ANTENAS-SENSOR CONOCIDAS SOBRE SUSTRATOS FLEXIBLES 47
4.1 ADVANCED DESIGN SYSTEM (ADS) 47
4.2 ANÁLISIS DE LA PRIMERA ANTENA-SENSOR CONOCIDA 48
4.2.1 Presentación del primer diseño conocido *48*
4.2.2 Diseño con ADS *49*
4.2.3 Simulaciones y resultados *50*
4.2.4 Conclusiones *52*
4.3 ANÁLISIS DE LA SEGUNDA ANTENA-SENSOR CONOCIDA 52
4.3.1 Presentación del segundo diseño conocido *52*
4.3.2 Diseño con ADS *53*
4.3.3 Simulaciones y resultados *54*
4.3.4 Conclusiones *56*
5. DISEÑO DE UNA ANTENA-SENSOR SOBRE SUSTRATO FLEXIBLE 57
5.1 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO 57
5.2 DISEÑO Y PERFECCIONAMIENTO 59
5.3 SIMULACIONES PARA EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE ANTENA 61
5.4 RENDIMIENTO DE LA ANTENA-SENSOR EN EL ESPACIO LIBRE 64
5.4.1 Simulaciones y resultados *64*
5.4.2 Conclusiones *67*
5.5 RENDIMIENTO DE LA ANTENA-SENSOR SOBRE FANTASMA CORPORAL 67
5.5.1 Análisis de parámetros *68*
5.5.2 Simulaciones y resultados *70*
5.5.3 Conclusiones *71*
6. OPTIMIZACIÓN DE LA ANTENA-SENSOR MEDIANTE REDISEÑO PARAMÉTRICO 72
6.1 PRESENTACIÓN Y REDISEÑO 72
6.2 SIMULACIONES PARA EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA ANTENA REDISEÑADA 73
6.3 RENDIMIENTO DE LA ANTENA-SENSOR REDISEÑADA 76
6.4 CONCLUSIONES Y COMPARATIVA 77
7. CONCLUSIONES 79

7.1 DESCRIPCIÓN 79
7.2 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS 80

GLOSARIO 82

BIBLIOGRAFÍA 83

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de Gantt de la planificación temporal de las tareas 4
Figura 2. Presupuesto del proyecto..... 5
Figura 3. Esquema de funcionamiento antena-sensor LC 10
Figura 4. Configuración básica de parche (4)..... 11
Figura 5. Desplazamiento de la frecuencia de resonancia en función 13
Figura 6. Comparación entre las mediciones y los cálculos teóricos 13
Figura 7. Esquema e imagen real de la antena-sensor..... 14
Figura 8. Desplazamiento de frecuencia de resonancia en función 15
Figura 9. Desplazamiento de la frecuencia de resonancia en..... 15
Figura 10. Esquema de la antena sensor (7) 16
Figura 11. Imagen real de la antena-sensor (7) 17
Figura 12. Comparativa de los resultados obtenidos para 5 soluciones (7) 17
Figura 13. Imágenes reales de la antena-sensor (8)..... 18
Figura 14. Antena-sensor: Esquema e imagen real (9)..... 19
Figura 15. Comparativa de los cálculos teóricos y la simulación (9) 19
Figura 16. Radios de flexión (9) 20
Figura 17. Comparativa de los resultados obtenidos para 20
Figura 18. Frecuencia de resonancia para los diferentes..... 21
Figura 19. Clasificación de las técnicas de impresión (11)..... 22
Figura 20. Proceso de la serigrafía (10) 23
Figura 21. QSY-3401 de Madell Tecnhology Corporation (12)..... 23
Figura 22. Impresoras BeiJing TORCH T1000 (13) y Easy Print MSP-2030T (14) 23
Figura 23. Inyección bajo demanda (material piezoeléctrico) (10) 25
Figura 24. Dimatix Materials Printer DMP-2850 25
Figura 25. Características de las tintas de NovaCentrix (17) 26
Figura 26. Características de las tintas de Methode Electronics Inc. y InkTec (17) 27
Figura 27. Características de diferentes sustratos flexibles (10)..... 28
Figura 28. Condiciones de curado de los sustratos (18) 29
Figura 29. Espesor promedio de los conductores (18)..... 30
Figura 30. Valores de la resistencia de la lámina (18)..... 30

Figura 31. Valores de la resistencia de la lámina para diferentes 31
Figura 32. Valores de la resistencia de la lámina con dos tintas 31
Figura 33. División del espectro electromagnético (19) 34
Figura 34. Geometrías más comunes de los elementos radiantes en antena de parche (20) 36
Figura 35. Ejemplo de diagrama de radiación en coordenadas cartesianas y polares (21) 38
Figura 36. Representación de diagramas de radiación 38
Figura 37. Polarización lineal, circular y elíptica (21) 40
Figura 38. Permitividad (izquierda) y conductividad (derecha) de los diferentes tejidos humanos (23) 42
Figura 39. Permitividad relativa para el rango de frecuencias 0.5-20 GHz (20) 43
Figura 40. Conductividad para el rango de frecuencias 0.5-20 GHz (20) 43
Figura 41. Atenuación de los diferentes tejidos humanos (23) 44
Figura 42. Medidas antena-sensor (mm) 48
Figura 43. Antena generada mediante comandos en la ventana Layout de ADS 49
Figura 44. Sustrato de Kapton con ε_r =3.6 y tanδ=0.002 49
Figura 45. Gráfica del parámetro S_{11} obtenida en la simulación 50
Figura 46. Tabla de deformaciones producidas por la aplicación de tensión mecánica en la dirección L 51
Figura 47. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la tensión mecánica 51
Figura 48. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación 52
Figura 49. Antena generada mediante comandos en la ventana Layout de ADS 53
Figura 50. Sustrato de algodón con ε_r =1.6 y tanδ=0.02 53
Figura 51. Visualización de diferentes perspectivas de la antena-sensor en tres dimensiones 54
Figura 52. Variación de la constante dieléctrica del sustrato de algodón en función de la temperatura 54
Figura 53. Gráfica del parámetro S_{11} obtenida en la simulación 55

Figura 54. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura 55
Figura 55. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación 56
Figura 56. Simulación de control del parámetro S_{11} 59
Figura 57. Dimensiones mejoradas de la antena-sensor (mm) 60
Figura 58. Sustrato de algodón con ε_r =1.6 y tanδ=0.02 60
Figura 59. Visualización de la antena-sensor en tres dimensiones 60
Figura 60. Gráfica del parámetro S11 obtenida en la simulación 61
Figura 61. Impedancia de entrada con Carta de Smith obtenida en la simulación 61
Figura 62. Diagrama de radiación en tres dimensiones 62
Figura 63. Diagramas bidimensionales de ganancia, radiación y área efectiva (plano ZX) 62
Figura 64. Resumen de parámetros de antena 63
Figura 65. Representación gráfica de los parámetros de antena 63
Figura 66. Variación de la constante dieléctrica en función de aumentos de temperatura en pasos de 5 ºC 64
Figura 67. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura en pasos de 5ºC 65
Figura 68. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación (pasos de 5ºC) 65
Figura 69. Variación de la constante dieléctrica en función de aumentos de temperatura en pasos de 1 ºC 66
Figura 70. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura en pasos de 1ºC 66
Figura 71. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación en (pasos de 1ºC) 67
Figura 72. Sustrato de algodón sobre fantasma corporal (piel, grasa y músculo) (26) 68
Figura 73. Gráfica del parámetro S11 en el espacio libre y sobre fantasma corporal 68
Figura 74. Impedancia de entrada con Carta de Smith obtenida sobre fantasma corporal 69

Figura 75. Representación gráfica de los parámetros de antena sobre fantasma corporal 69
Figura 76. Resumen de parámetros de antena sobre fantasma corporal 70
Figura 77. Parámetro S_{11} en función de la temperatura en (pasos de 5ºC) sobre fantasma corporal..... 70
Figura 78. Resultados en la simulación para pasos de 5ºC sobre fantasma corporal 71
Figura 79. Dimensiones de la antena-sensor rediseñada (mm) 72
Figura 80. Gráfica del parámetro S11 obtenida en la simulación 73
Figura 81. Impedancia de entrada con Carta de Smith obtenida en la simulación 73
Figura 82. Diagrama de radiación en tres dimensiones 74
Figura 83. Diagramas bidimensionales de ganancia, radiación y área efectiva (plano ZX)..... 74
Figura 84. Resumen de parámetros de antena 74
Figura 85. Representación gráfica de los parámetros de antena 75
Figura 86. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura en pasos de 1ºC 76
Figura 87. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación en pasos de 1ºC 76
Figura 88. Tabla comparativa del primer diseño propio y el diseño optimizado 78

1. Introducción

1.1 Contexto y justificación del Trabajo

La implementación de circuitos de microondas impresos en sustratos flexibles de bajo coste ha suscitado especial interés en la comunidad científica durante los últimos años gracias a su gran potencial en cuanto a posibles aplicaciones se refiere. En particular, ha acontecido una importante línea de investigación la tecnología de sensores inalámbricos para aplicaciones médicas, de producción industrial, de monitorización de estructuras y de ámbito militar. En este propósito, las antenas-sensor devienen como una alternativa que presenta la ventaja de que el propio sensor se utiliza como transmisor inalámbrico, reduciendo así la complejidad de los circuitos implicados en el sistema.

En el mismo orden de cosas, la posibilidad de utilizar sustratos flexibles, como los textiles o el papel, permite obtener un producto final eco-compatible, de gran flexibilidad, de fácil acceso y con un coste muy competitivo. De hecho, en los últimos años se han implementado varias soluciones de antenas y circuitos en estos materiales para una amplia gama de aplicaciones.

Por las consideraciones anteriores, en el presente proyecto se estudiará el estado del arte de la tecnología de antenas-sensor y se llevará a cabo el diseño y simulación de una antena-sensor en sustratos flexibles.

1.2 Objetivos del Trabajo

Los objetivos del presente proyecto son los siguientes:

- Estudiar el estado del arte de las antenas-sensor, las técnicas de impresión electrónica y los sustratos flexibles.
- Establecer los parámetros de diseño y construcción de una antena-sensor sobre sustratos flexibles.

- Familiarizarse y aprender a trabajar con el entorno de diseño y simulación del *software* Advanced Design System (ADS).
- Entender los principios de operación de las antenas-sensor reproduciendo con el ADS algunos de los diseños estudiados en el estado del arte.
- Elaborar un diseño propio a nivel de *layout* de antena-sensor con el ADS y estudiar sus principales parámetros de antena y su capacidad de detección como sensor.
- Rediseñar y optimizar el diseño propio a nivel de *layout* en términos de sensibilidad y prestaciones.

1.3 Enfoque y método seguido

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de un producto novedoso en el ámbito de las antenas-sensor. Para ello, se realiza una primera y profunda etapa de investigación del estado del arte analizando algunos de los diseños más representativos que se encuentran presentes en la literatura científica. Desde el primer momento, se otorga una especial relevancia a los sustratos flexibles y a las técnicas de impresión electrónica como ejes fundamentales del diseño, sin perder nunca de vista una posible fabricación real del producto. Por consiguiente, estas dos cuestiones también centran una parte importante de los esfuerzos de investigación realizados durante esta etapa.

Tras la primera etapa, se establecen y analizan los principales parámetros de diseño a nivel de *layout* del producto, teniendo también en cuenta aquellos que solamente cobrarían importancia en el momento de su fabricación real. A partir de este punto, el enfoque del proyecto adopta una fórmula totalmente distinta para centrarse en las etapas prácticas de desarrollo del producto.

En primer lugar, a modo de entrenamiento, se reproducen algunos de los diseños estudiados en el estado del arte con ADS. Con este método de trabajo se logra

acumular una experiencia muy útil en el análisis de los principios de operación de las antenas-sensor, y en el entorno de diseño y simulación del ADS.

Es en este momento, con los conocimientos acumulados en las etapas anteriores, es cuando se aborda el desarrollo propio de la antena-sensor tipo parche microstrip sobre un sustrato flexible. A partir de aquí, el enfoque se centra en el análisis matemático, el diseño a nivel de *layout* y las simulaciones pertinentes para lograr un producto final acorde a los objetivos.

En la última etapa del desarrollo práctico del proyecto, se optimiza el diseño propio para mejorar las prestaciones de la antena-sensor, buscando sobre todo un producto mejorado en términos de sensibilidad. Además, se realiza una comparación de resultados donde se hace notar la superioridad del diseño optimizado. Para terminar, se reseñan las conclusiones finales, se indican los objetivos logrados y se definen las líneas de trabajo futuras.

1.4 Planificación del Trabajo

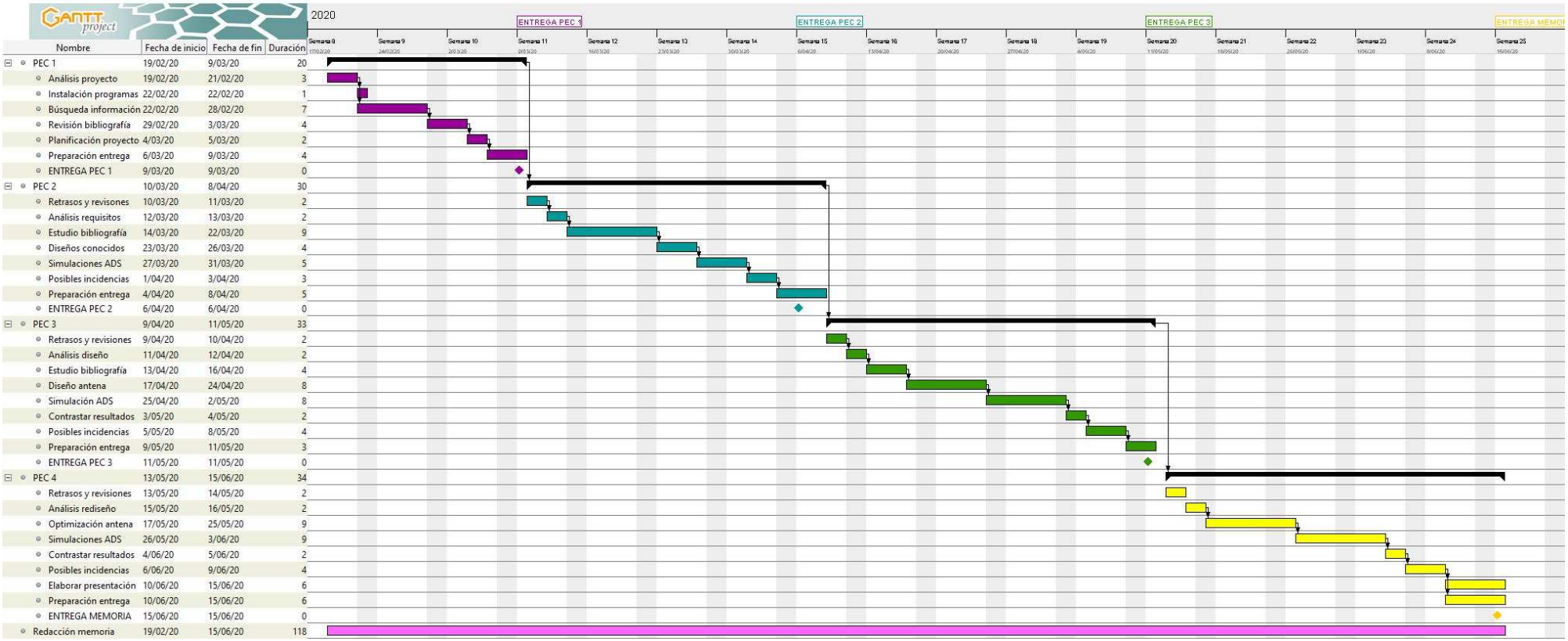
1.4.1 Recursos

Los recursos utilizados para llevar a cabo el presente proyecto son los siguientes:

- Recursos humanos: en la elaboración del proyecto se puede diferenciar un área de I+D encargada de la investigación del estado de la técnica y del desarrollo del producto, y un área administrativa para la redacción de la memoria. No obstante, al tratarse de un trabajo individual, las dos áreas han sido asumidas por el autor de este trabajo, Alejandro Navarro Pérez.
- Recursos materiales:
    - Equipamiento: ordenador portátil con micrófono integrado.
    - *Software*: Microsoft Word, GanttProject, Advanced Design System (ADS), Microsoft PowerPoint y Windows Movie Marker.
    - Documentación: bibliografía básica de las asignaturas de Antenas y Circuitos de Microondas de la UOC, así como libros, artículos y proyectos científicos en el ámbito de estudio del proyecto.

1.4.2 Planificación temporal y tareas a realizar

En el diagrama de Gantt de la figura 1 se distinguen las diferentes tareas a realizar y su planificación temporal.



Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin	Duración
PEC 1	19/02/20	9/03/20	20
Análisis proyecto	19/02/20	21/02/20	3
Instalación programas	22/02/20	22/02/20	1
Búsqueda información	22/02/20	28/02/20	7
Revisión bibliografía	29/02/20	3/03/20	4
Planificación proyecto	4/03/20	5/03/20	2
Preparación entrega	6/03/20	9/03/20	4
ENTREGA PEC 1	9/03/20	9/03/20	0
PEC 2	10/03/20	8/04/20	30
Retrasos y revisones	10/03/20	11/03/20	2
Análisis requisitos	12/03/20	13/03/20	2
Estudio bibliografía	14/03/20	22/03/20	9
Diseños conocidos	23/03/20	26/03/20	4
Simulaciones ADS	27/03/20	31/03/20	5
Posibles incidencias	1/04/20	3/04/20	3
Preparación entrega	4/04/20	8/04/20	5
ENTREGA PEC 2	6/04/20	6/04/20	0
PEC 3	9/04/20	11/05/20	33
Retrasos y revisiones	9/04/20	10/04/20	2
Análisis diseño	11/04/20	12/04/20	2
Estudio bibliografía	13/04/20	16/04/20	4
Diseño antena	17/04/20	24/04/20	8
Simulación ADS	25/04/20	2/05/20	8
Contrastar resultados	3/05/20	4/05/20	2
Posibles incidencias	5/05/20	8/05/20	4
Preparación entrega	9/05/20	11/05/20	3
ENTREGA PEC 3	11/05/20	11/05/20	0
PEC 4	13/05/20	15/06/20	34
Retrasos y revisiones	13/05/20	14/05/20	2
Análisis rediseño	15/05/20	16/05/20	2
Optimización antena	17/05/20	25/05/20	9
Simulaciones ADS	26/05/20	3/06/20	9
Contrastar resultados	4/06/20	5/06/20	2
Posibles incidencias	6/06/20	9/06/20	4
Elaborar presentación	10/06/20	15/06/20	6
Preparación entrega	10/06/20	15/06/20	6
ENTREGA MEMORIA	15/06/20	15/06/20	0
Redacción memoria	19/02/20	15/06/20	118

Figura 1. Diagrama de Gantt de la planificación temporal de las tareas

1.5 Breve sumario de productos obtenidos

Al final del proyecto se ha obtenido el diseño a nivel de *layout* de una antena-sensor flexible para la detección de temperatura corporal. El sistema opera a la frecuencia de 38 GHz y es compatible con aplicaciones de WBAN desplegadas sobre tecnología 5G. Además, se ha obtenido la memoria con los detalles del proceso de investigación, de entrenamiento y de desarrollo de esta antena-sensor.

1.6 Presupuesto del proyecto

El presupuesto necesario para llevar a cabo el presente proyecto es el siguiente:

Unidad	Cantidad	Concepto	Precio	Total
u	1	Ordenador portátil con W10	550€	550€
u	1	Licencia universitaria ADS	2500€	2500€
u	1	Licencia Microsoft Office 2016	69€	69€
u	1	Licencia GanttProject	0€	0€
h	360	M.O. Graduado en Ingeniería	65€	23400€
			21% IVA	5569€
			TOTAL PROYECTO	32087€

Figura 2. Presupuesto del proyecto

En el caso de llevar a cabo una posible fabricación real del producto habría que añadir el coste de los materiales como el cobre para el plano de masa, el sustrato de algodón y la tinta conductora. Aunque realmente todo esto representarían un incremento del precio despreciable. Sin embargo, una máquina para la impresión electrónica, como la Dimatix Materials Printer DMP-2850, tiene un coste muy elevado, en torno a 36000€.

1.7 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

Los otros capítulos de la memoria del proyecto son los siguientes:

- Capítulo 2. Estado del arte de las antenas-sensor y de los sustratos flexibles: en este capítulo se realiza un profundo análisis del estado del arte de las antenas-sensor, de la electrónica impresa y de los sustratos flexibles.

- Capítulo 3. Parámetros principales del presente proyecto: en este capítulo se presentan los principales parámetros implicados en el diseño y fabricación de las antenas-sensor.

- Capítulo 4. Análisis de diseños de antenas-sensor conocidas sobre sustratos flexibles: en este capítulo se reproducen dos de las antenas-sensor estudiadas en el estado del arte. Por un lado, se diseña y simula una antena-sensor flexible de parche microstrip en sustrato de Kapton para la detección de estrés mecánico. Por otro lado, se diseña y simula una antena-sensor flexible de parche microstrip en sustrato textil para la detección de temperatura.

- Capítulo 5. Diseño de una antena-sensor sobre sustrato flexible: con el conocimiento y experiencia adquirida en los capítulos anteriores, en este capítulo se aborda el diseño propio de una antena-sensor flexible de parche microstrip sobre sustrato de algodón. A continuación, se analizan sus parámetros de antena y se pone a prueba su capacidad para la detección de temperatura corporal.

- Capítulo 6. Optimización de la antena-sensor mediante rediseño paramétrico: en este capítulo, se optimiza el diseño de la antena-sensor del capítulo anterior para mejorar sus prestaciones y su sensibilidad. De nuevo, se analizan sus parámetros de antena y se pone a prueba su capacidad de detección de temperatura corporal. Para terminar, se comparan los resultados obtenidos con los del diseño del capítulo anterior.

- Capítulo 7. Conclusiones: en este capítulo, se describen las conclusiones finales del proyecto, los objetivos logrados y las líneas de trabajo futuras.

2. Estado del arte de las antenas-sensor y de los sustratos flexibles

2.1 Antenas-sensor para la detección de variables

Habitualmente, los sensores se suelen concebir como dispositivos electrónicos específicos de bajo consumo provistos de baterías. En este contexto, el consumo de energía es una cuestión relevante a tener en cuenta en la etapa de diseño, puesto que en ocasiones se requiere que funcionen sin recarga durante años. Un sensor inalámbrico, normalmente, consta de tres componentes:

- Interfaz de detección: convierte la señal del sensor analógico en datos digitales.
- *Kernel*: almacena y procesa los datos.
- Transceptor: permite la comunicación digital con otros sensores o con un servidor de puerta de enlace inalámbrico.

Sin embargo, el uso de sensores que funcionan también como antena, permite que se pueda disfrutar de un sistema con capacidad pasiva. Es decir, presenta la ventaja de que no es necesario el uso de baterías, eliminando la dependencia de la energía y las limitaciones que ello conlleva. Una antena-sensor debe mantener sus características de radiación intactas (ganancia, patrón de radiación, polarización, etc.). En cambio, otros parámetros como la frecuencia de resonancia son los que sí se modifican en función de los diferentes valores de la variable a detectar [1]. Con estos principios, se han diseñado antenas-sensor para la detección de estrés mecánico (presión y tensión), temperatura, pH y otras variables físico-químicas.

2.1.1 Sensores inalámbricos pasivos tipo LC

Los sensores inalámbricos basados en una antena de RF resonante inductiva-capacitiva (LC) han sido ampliamente investigados para medir parámetros físicos, químicos y biológicos. Estos sensores se basan en una estructura

resonadora formada por una inductancia (L) y una capacidad (C) conectados en serie. La antena LC se compone de inductores planos y condensadores interdigitales (IDC) que pueden imprimirse fácilmente en diferentes sustratos como papeles, plásticos y cerámicas [2].

El sistema de detección se basa en que la variable de interés provoca un cambio de una forma conocida en alguna propiedad de la antena-sensor. En este tipo de sensores, la modificación se puede producir en la capacitancia o en la inductancia eléctrica. Estas variaciones inducen un cambio en la amplitud resonante, en la frecuencia de resonancia o en el factor de calidad del circuito resonante. La frecuencia de resonancia en estos sistemas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

De esta ecuación se deriva que en el momento en que se produce una variación en el factor LC, se modifica necesariamente la frecuencia de resonancia. Por otro lado, el factor de calidad Q se puede expresar mediante las siguientes expresiones:

$$Q = \frac{2\cdot\pi\cdot f_r\cdot L}{R} \quad (2) \qquad\qquad Q = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot f_r\cdot C\cdot R} \quad (3)$$

donde R representa las pérdidas óhmicas, que interesa que sean lo menor posible para obtener valores máximos de Q. Tal como se puede observar, el factor de calidad Q también depende de LC.

Estos sistemas LC también cuentan con una segunda bobina acoplada inductivamente a la bobina del sensor, que facilita la detección inalámbrica de las variaciones. El acoplamiento inductivo suele producirse de forma pasiva, así que la energía necesaria para la operación del sensor debe ser proporcionada por el lector. La explicación física de esta cuestión es que gracias a que la antena (bobina) de lectura genera un campo electromagnético, penetra el área transversal de la bobina y el área de alrededor de ella. Puesto que la longitud de onda es varias veces mayor que la distancia entre la antena de lectura y el

sensor, el campo electromagnético entre ellos puede interpretarse como un campo magnético. Este campo es alternante y está afectado por la distancia a la que se encuentre el lector [3]. El siguiente esquema muestra el funcionamiento de este tipo de sistemas.

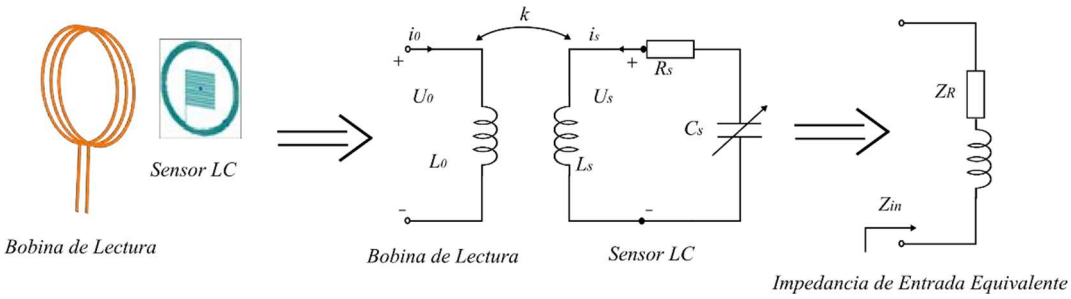


Figura 3. Esquema de funcionamiento antena-sensor LC

2.1.2 Antena de parche microstrip como elemento sensor

Tal como ya se ha comentado, las antenas-sensor presentan la ventaja de que el mismo sensor sirve como transmisor inalámbrico. Esto permite que en aplicaciones donde es necesario implementar redes de sensores para mediciones de campo en áreas más grandes, se elimine la necesidad de cableado eléctrico externo. Otra ventaja es que las antenas-sensor pueden conmutarse de forma remota y que se pueden utilizar técnicas de multiplexación por división de frecuencia. Uno de los diseños de antena-sensor más eficiente para lograr estas características son los basados en la tecnología de antena de parche microstrip.

Una antena de parche microstrip está formada en su configuración más básica por un plano conductor encima del cual se sitúa un parche metálico. Entre el parche y el plano de masa existe un dieléctrico (aire o cualquier medio más denso). Sin embargo, se pueden utilizar materiales con permeabilidades magnéticas (μ) superiores a la unidad, e incluso combinaciones de materiales con constante dieléctrica relativa (ε_r) y permeabilidad magnética relativa (μ_r) mayores que uno. El parche puede presentar una geometría cuadrada, circular, triangular, e incluso basada en geometrías fractales que permiten obtener diferentes prestaciones [4].

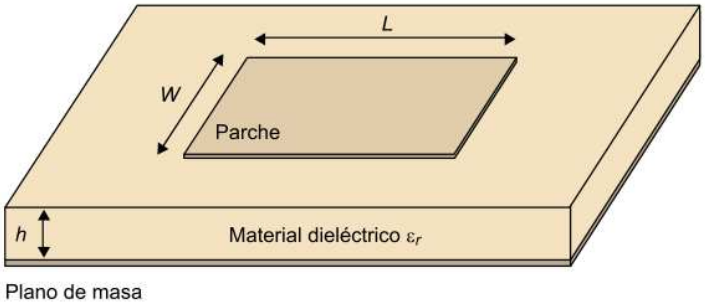


Figura 4. Configuración básica de parche [4]

Cuando el parche presenta una forma rectangular, la antena tiene dos modos de radiación fundamentales: el TM_{10}, donde la corriente eléctrica se orienta a lo largo de la dirección longitudinal del parche y el TM_{01}, donde la corriente eléctrica se orienta a lo largo de la dirección del ancho del parche [5]. Asumiendo que el plano de tierra del parche es un conductor perfecto, las frecuencias resonantes, que son aquellas en las que las pérdidas de retorno son mínimas, se calculan mediante la siguiente expresión:

$$fr = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}} \frac{1}{L_e + 2\Delta L_c} \quad (4)$$

donde c es la velocidad de la luz, L_e la longitud eléctrica, ε_e la constante dieléctrica equivalente y ΔL_c la extensión de línea. La constante dieléctrica equivalente y la extensión de línea se calculan a partir de la constante dieléctrica del sustrato, su altura (h) y su ancho eléctrico (W). Las características de radiación de la antena de parche microstrip pueden describirse mediante el parámetro de dispersión de la reflexión S_{11}, puesto que representa las pérdidas de retorno en función de la frecuencia. Asumiendo que la longitud es mayor que el ancho, la frecuencia fundamental más baja es la del modo TM_{10} y la más alta la del modo TM_{01} [5].

2.1.2.1 Ejemplo de antena-sensor de parche microstrip flexible en sustrato de Kapton para la detección de estrés mecánico

La expresión 4 denota que la frecuencia de resonancia en un modo de radiación dado es inversamente proporcional a la longitud eléctrica. Si la antena de parche se une a una estructura a la que se aplica estrés mecánico, el parche se alargará

o contraerá, provocando un cambio en las frecuencias resonantes. La clave es poder establecer una relación entre el estrés aplicado y la variación en la frecuencia de resonancia.

En el caso de que el estrés mecánico sea aplicado a lo largo del eje longitudinal del parche, la longitud eléctrica final se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$L_{ef} = (1+t)\, L_{eo} \quad (5)$$

donde L_{eo} y L_{ef} son la longitud eléctrica original y final, y t es el estrés mecánico aplicado. Por otro lado, el cambio también afecta al ancho eléctrico y al grosor del sustrato por el efecto de Poisson.

$$W_{ef} = \left(1-\mu_p \cdot t\right) W_{eo} \quad (6) \qquad\qquad h_f = \left(1-\mu_s \cdot t\right) h_o \quad (7)$$

donde W_{eo} y W_{ef} son el ancho eléctrico original y final del sustrato, h_o y h_f son la altura original y final del sustrato, μ_p y μ_s son las relaciones de Poisson del parche y del sustrato. Empleando las expresiones 4, 5 y 6 se puede concluir que la relación entre la frecuencia resonante y el estrés mecánico aplicado es la siguiente:

$$\frac{\Delta f_{rf}}{f_{rf}} = \frac{f_{rf} - f_{ro}}{f_{rf}} = K \cdot t \quad (8)$$

donde K es una constante negativa que puede calcularse mediante la constante dieléctrica del sustrato, el ancho eléctrico de la antena, la altura del sustrato y las relaciones de Poisson. Con las expresiones 4 y 5 se puede observar que el estrés mecánico aplicado es directamente proporcional a la modificación de la frecuencia de resonancia.

En el trabajo experimental de referencia [5] se fabrica un parche de antena de 15 mm de longitud y de 12,75 mm de ancho. Se selecciona una película delgada de Kapton (película de poliimida) como material para el sustrato debido a que es flexible, térmicamente estable, tiene buena resistencia mecánica y bajas

pérdidas dieléctricas. La tensión se aplica a lo largo de la dirección de la longitudinal. El resultado obtenido se refleja en las siguientes gráficas.

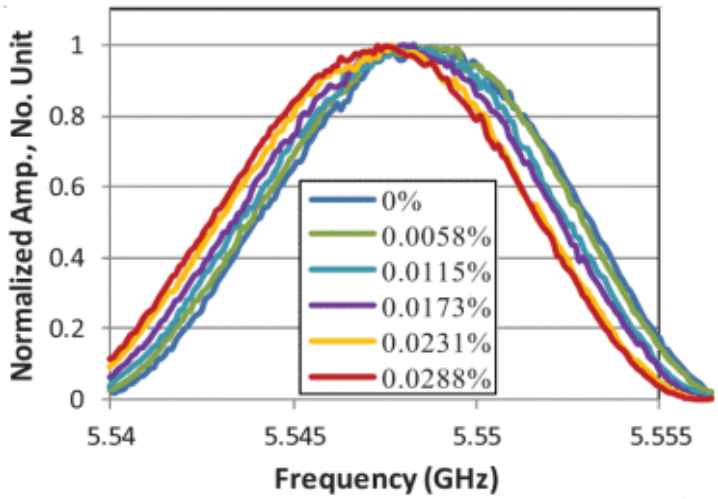


Figura 5. Desplazamiento de la frecuencia de resonancia en función de las deformaciones aplicadas

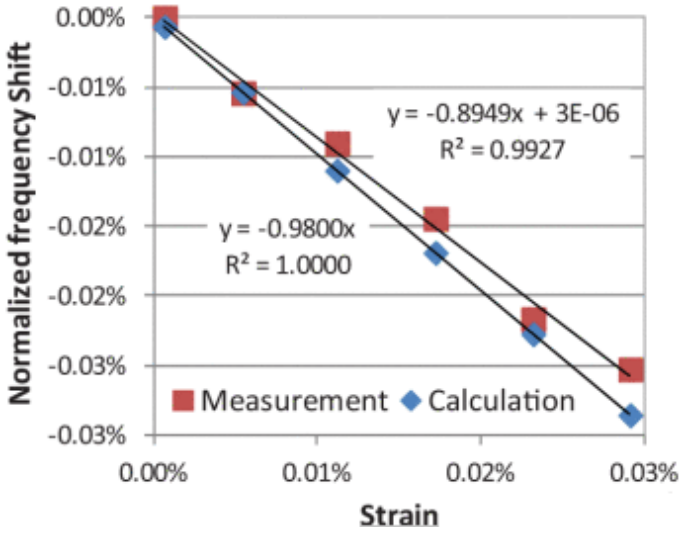


Figura 6. Comparación entre las mediciones y los cálculos teóricos

Los datos medidos muestran una excelente linealidad con sensibilidad a la deformación de 4.98 kHz por microdeformación para una frecuencia resonante original de 5.5421 GHz en condiciones de deformación cero. Además, se puede observar que las mediciones y los cálculos teóricos muestran una precisión

suficiente como para ser un sistema válido calibrando previamente de forma adecuada la sensibilidad y la deformación.

2.1.2.2 Ejemplo de antena-sensor flexible de parche microstrip en sustrato textil para la detección de temperatura

En el estudio experimental de referencia [6] se explora la idea de utilizar una antena de tela como sensor pasivo de temperatura. El principio de operación es, tal como ya se ha explicado en puntos anteriores, estudiar el cambio en la frecuencia de resonancia. En este caso, los cambios se producen como consecuencia de las modificaciones en la constante dieléctrica del sustrato que produce la variación de la temperatura. La expresión 4 muestra la dependencia entre la frecuencia de resonancia y la constante dieléctrica.

El diseño de la antena se realiza con la intención de que opere a una frecuencia de 2.45 GHz. Como sustrato se emplea algodón con constante dieléctrica (ε_r) de 1.6, tangente de pérdidas (tan δ) de 0.02 y un espesor (h) de 3 mm. Las partes conductoras se fabrican con cinta de cobre (σ = 5.8E + 07 S/m).

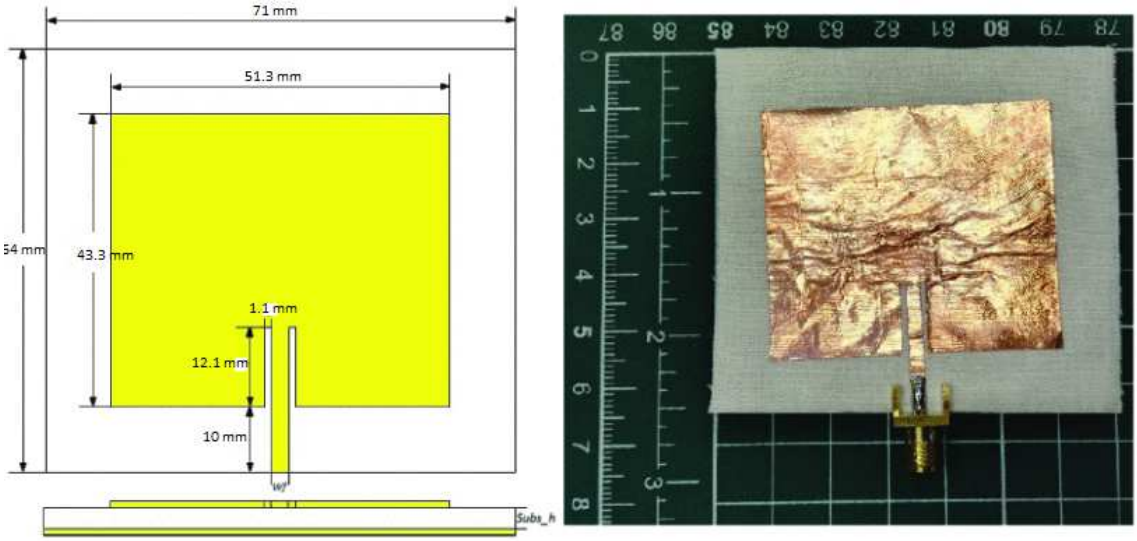


Figura 7. Esquema e imagen real de la antena-sensor

En la simulación que se realizó, se presenta el resultado obtenido a través del estudio del parámetro S_{11}, en función de la frecuencia, reseñando también los cambios en el valor de la constante dieléctrica.

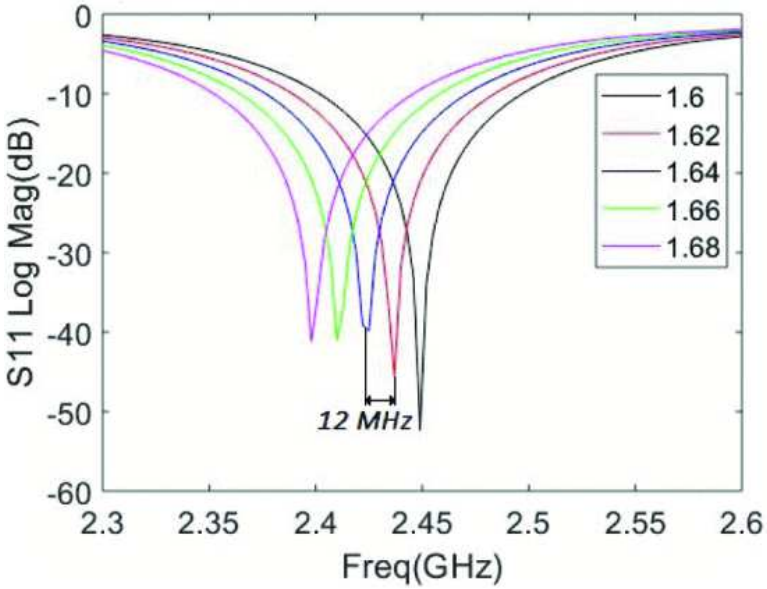


Figura 8. Desplazamiento de frecuencia de resonancia en función del aumento del valor de la constante dieléctrica [6]

En la figura 8 se observa como la frecuencia de resonancia disminuye a medida que aumenta la constante dieléctrica desde 1.6 hasta 1.68. Este aumento está provocado por el incremento de temperatura tal como se muestra en la figura 9.

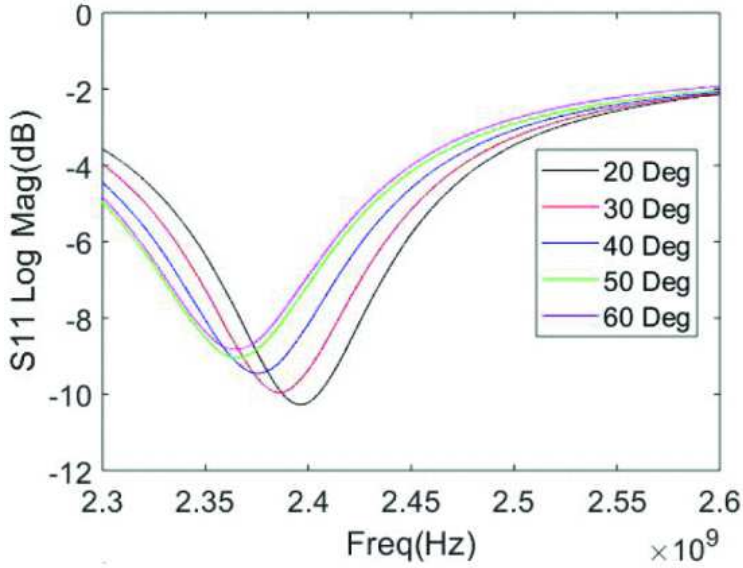


Figura 9. Desplazamiento de la frecuencia de resonancia en función del aumento de temperatura [6]

En definitiva, con un barrido de valores de la constante dieléctrica de 1.6 a 1.68 en pasos de 0.02 se comprueba que se corresponde a incrementos de 10 °C,

entre 20 °C y 60 °C. Cada una de estas subidas de temperatura da lugar a una disminución de unos 10 MHz en la frecuencia de resonancia de la antena.

2.1.2.3 Ejemplo de antena-sensor de parche microstrip en sustrato epoxi FR4 para la medición del pH en soluciones líquidas

El principio de funcionamiento de la antena-sensor del trabajo experimental de referencia [7] es el mismo que se ha venido analizando en los ejemplos anteriores. El parámetro de la antena-sensor que vuelve a cobrar protagonismo es la constante dieléctrica. La interacción que se produce entre esta y las gotas de las distintas soluciones provoca este cambio en la constante dieléctrica, que tiene como consecuencia la variación en la frecuencia de resonancia.

La respuesta de la antena-sensor se estudia en base a los cambios en la frecuencia relativa producida por las diferentes soluciones mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\left| f_{referencia} - f_{solución} \right|}{f_{referencia}} \quad (9)$$

La antena se diseña en una sola capa con forma rectangular. De esta forma se logra un modelo preciso y con bajo coste de fabricación. Como sustrato se emplea epoxi FR4 (60 x 50 mm), con constante dieléctrica (ε_r) de 4.205 ± 0.135, tangente de pérdidas (tan δ) de 0.016 y un espesor (h) de 1.6 mm. En la parte superior del sustrato se implementa un parche de cobre (38 x 29.5 mm). La alimentación es a través de una línea de transmisión (11 x 19 mm). La frecuencia de resonancia del sistema original es de 3.87 GHz.

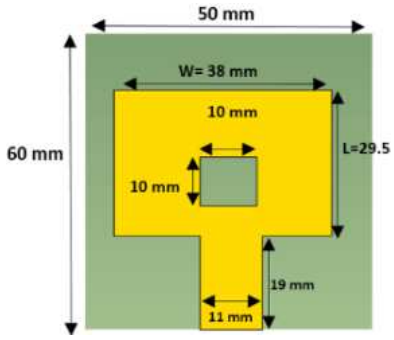


Figura 10. Esquema de la antena sensor [7]

Para realizar las mediciones se dejarán caer gotas de 0.2 mL de las distintas soluciones en donde se indica en la siguiente figura:

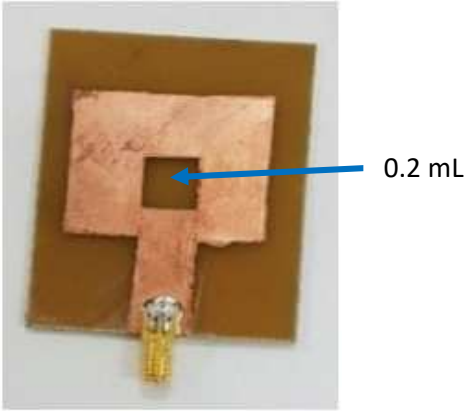


Figura 11. Imagen real de la antena-sensor [7]

El resultado siguiente se obtiene a través del estudio del parámetro S_{11}, en función de la frecuencia, para las cinco soluciones con diferentes valores de pH.

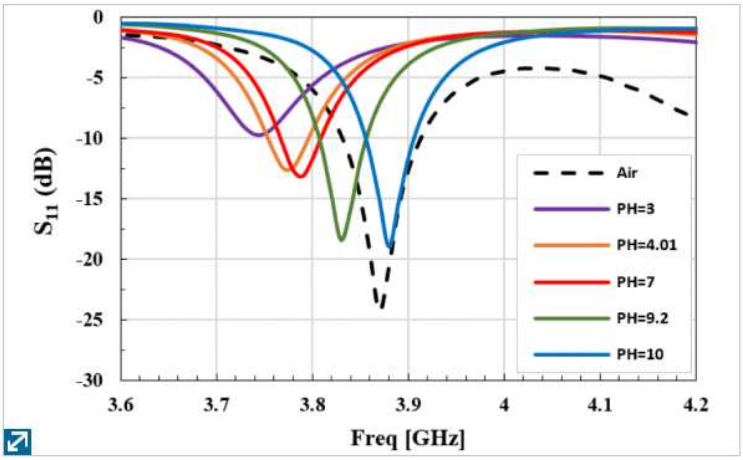


Figura 12. Comparativa de los resultados obtenidos para 5 soluciones [7]

En la gráfica se puede observar el desplazamiento de la frecuencia de resonancia en función del aumento del valor del pH. Debe recordarse que inicialmente tenía un valor de 3.87 GHz (aire). Para la solución con un pH igual a 3, la frecuencia de resonancia disminuye a 3.75 GHz. El valor de frecuencia más alto es de 3.88 GHz para un pH de 10. A través de este resultado y otras mediciones como la amplitud de S_{11} se logra una constante de calibración como parámetro. De esta forma, se pudo obtener un factor de ajuste de R^2 del 92,16%. En conclusión, debido a las buenas prestaciones del sistema se puede considerar como una alternativa de sensor útil para el monitoreo del pH.

2.1.3 Otros ejemplos de antenas-sensor

En diversos trabajos experimentales se han utilizado otros tipos de antenas y sustratos para la detección de distintas variables. Por ejemplo, se han diseñado antenas-sensor de tipo dipolo en sustrato de papel para la detección del ángulo de flexión de los dedos de la mano [8]. La antena se adjunta al dedo, que al doblarlo provoca una deformación que varía la distancia dimensional entre los polos. Esta variación espacial provoca que a través del parámetro S_{11} se puedan medir los cambios en la frecuencia de resonancia para identificar el ángulo de flexión. La justificación matemática de que se produzca este fenómeno se puede notar en la expresión 10, donde se aprecia que la frecuencia de resonancia (fr) depende de la longitud total (L) del dipolo.

$$f_r = \frac{c}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (10)$$

Este sistema de bajo coste podría ser útil en aplicaciones de entretenimiento, realidad virtual, robótica y atención médica.

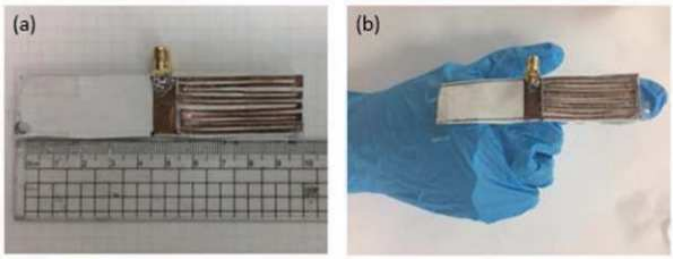


Figura 13. Imágenes reales de la antena-sensor [8]

A continuación, se procede a reseñar, más detenidamente, un trabajo experimental en el que se diseñó una antena-sensor basada en un resonador de anillo abierto para medir la flexión [9].

2.1.3.1 Antena-sensor flexible basada en un resonador de anillo abierto en sustrato textil

En este trabajo se diseña una antena-sensor como un resonador de anillo abierto (ORR) sobre sustrato de algodón. Además, se utiliza una línea microstrip para la excitación del puerto. Siguiendo con lo que se ha explicado en puntos anteriores,

la detección de la flexión se logra a través de las modificaciones en la frecuencia de resonancia de la antena, permitiendo así el uso de esta como sistema sensor.

Para el diseño de la antena se utiliza como plano de tierra cobre de espesor constante de 70 μm. De esta forma, se tiene un metal perfectamente conductor cuya frecuencia de resonancia es de 1.3 GHz. Como sustrato textil se emplea el algodón con constante dieléctrica (ε_r) de 1.9, tangente de pérdidas (tan δ) de 0.053 y un espesor (h) de 0.43 mm. En el proceso de fabricación, la antena se borda con hilo conductor compuesto por un 99% de nylon chapado en plata pura. Las dimensiones de la antena son las que se muestran en la siguiente figura.

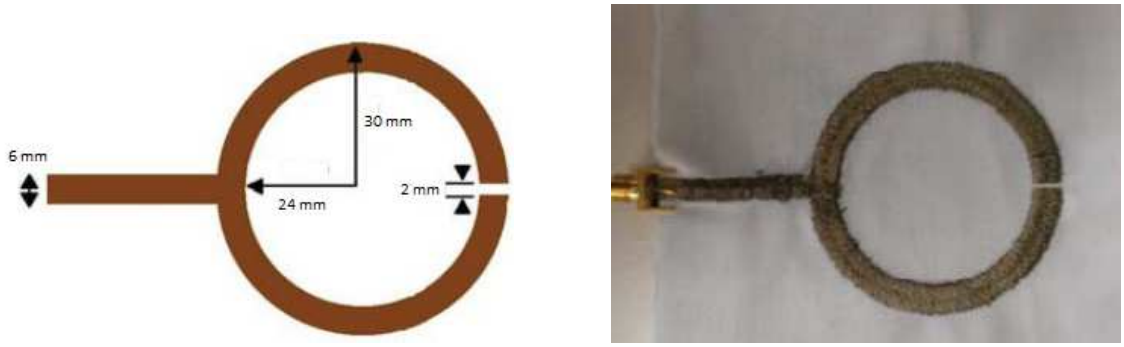


Figura 14. Antena-sensor: Esquema e imagen real [9]

El resultado siguiente se obtiene a través de la medición del parámetro S_{11}.

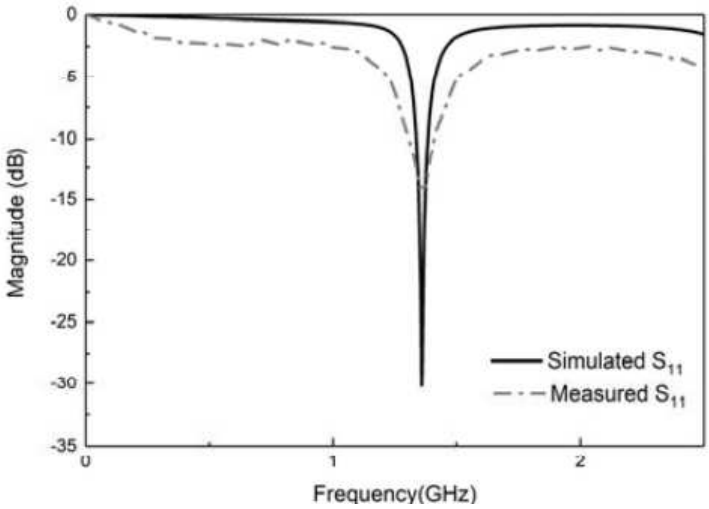


Figura 15. Comparativa de los cálculos teóricos y la simulación [9]

En el resultado mostrado en la figura 15 se confirma que la frecuencia de resonancia es de 1.3 GHz. Las pérdidas del hilo y del sustrato provocan que los cálculos teóricos no coincidan exactamente con lo obtenido. En la siguiente simulación se mide el parámetro S_{11} para unos radios de flexión de 45, 75 y 90 mm.

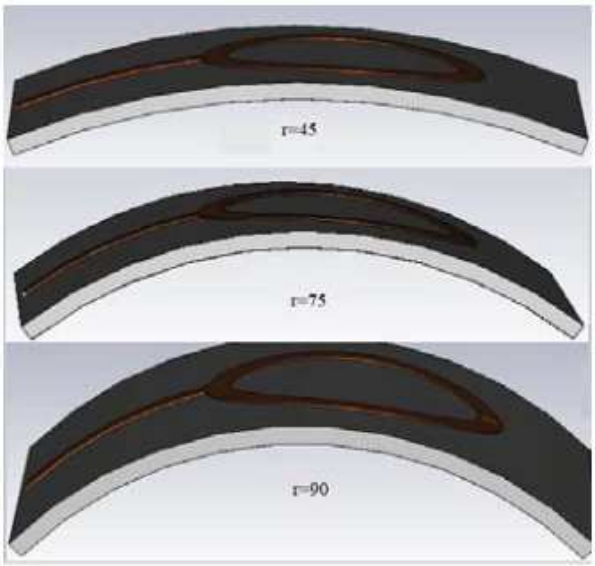


Figura 16. Radios de flexión [9]

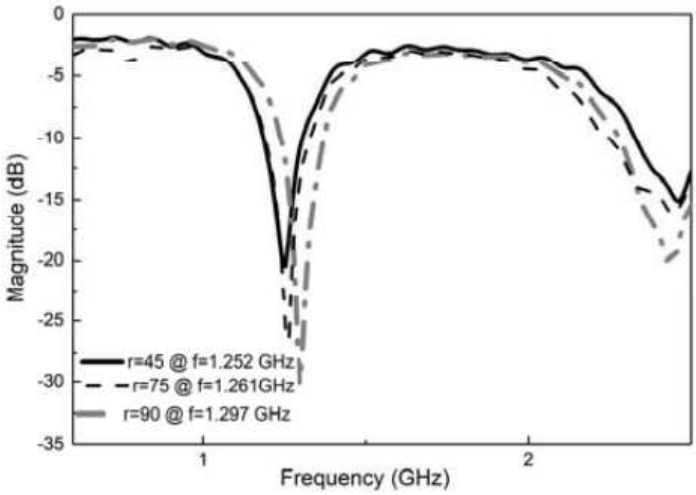


Figura 17. Comparativa de los resultados obtenidos para diferentes radios de flexión [9]

En el resultado mostrado en la figura 17 se puede observar que para los diferentes radios de flexión la frecuencia de resonancia varía entre 1.297 GHz, 1.261 GHz y 1.252 GHz.

En la siguiente figura se presenta gráficamente la variación de la frecuencia de resonancia en función de los diferentes radios de flexión.

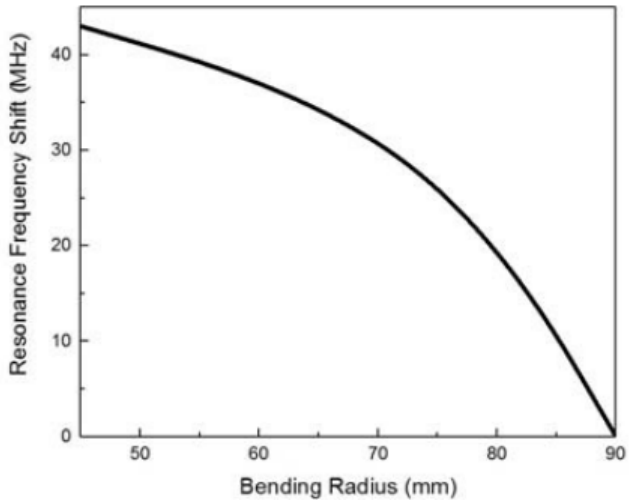


Figura 18. Frecuencia de resonancia para los diferentes ángulos de flexión [9]

En la gráfica de la figura 18 se aprecia como la variación del valor de la frecuencia de resonancia es más acusado cuando la flexión oscila entre 90 y 70 mm. Es decir, para flexiones entre 70 y 45 mm la sensibilidad es menor, pero sigue siendo medible y útil para lograr el objetivo de sensado de la flexión.

2.2 Electrónica impresa

La electrónica impresa es un proceso que combina tecnología de fabricación e impresión electrónica para producir circuitos electrónicos en varios sustratos. Esta técnica presenta múltiples ventajas como flexibilidad, delgadez, ligereza, capacidad de uso, rentabilidad y respeto al medio ambiente. En los últimos años, ha habido grandes avances en este campo debido a las técnicas de impresión con tecnologías de nanomateriales. El interés de la electrónica impresa es manifiesto para la fabricación de elementos como el de este proyecto, una antena-sensor sobre sustrato flexible. Además, todos estos sistemas se utilizan para producir otras piezas como células solares, etiquetas RFID, aparatos

deportivos y de salud, sensores impresos, textiles inteligentes, componentes electrónicos, baterías, transistores, cableado, etc. [10].

Existe una amplia gama de técnicas para la electrónica impresa tal como se muestra en la figura 19. Sin embargo, se reseñarán únicamente las dos técnicas más utilizadas actualmente en el campo de la investigación, la serigrafía y la inyección de tinta *(Inkjet printing).*

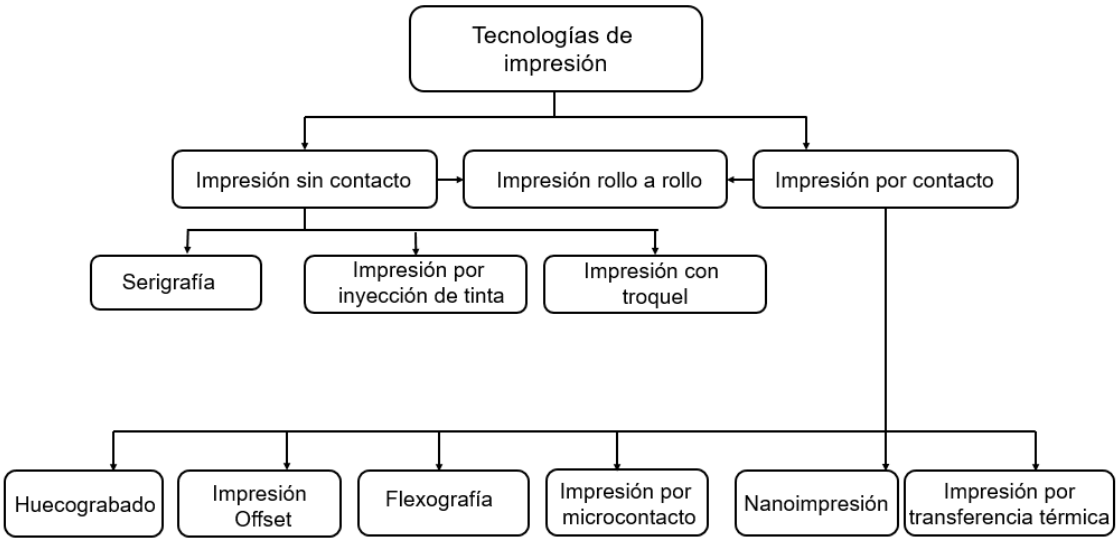


Figura 19. Clasificación de las técnicas de impresión [11]

2.2.1 Serigrafía

La serigrafía (*screen printing*) es la tecnología más popular y madura para la electrónica impresa. Se ha utilizado en la industria electrónica desde hace bastante tiempo para imprimir interconexiones metálicas en placas de circuito impreso. Es una opción más rápida y versátil que otras técnicas de impresión. Sus características son simplicidad, accesibilidad, velocidad y adaptabilidad al proceso de fabricación.

Esta técnica consiste en transferir la tinta a través de una malla de seda templada en un marco de madera. Se debe bloquear el paso de la tinta previamente en las áreas donde no habrá imagen con una emulsión. De esta forma la tinta solo se filtrará en las zonas que se requiere para crear el diseño. Este sistema de impresión es ideal para producción a nivel industrial, ya que se pueden realizar múltiples copias y se obtiene un producto final de buena calidad a bajo coste.

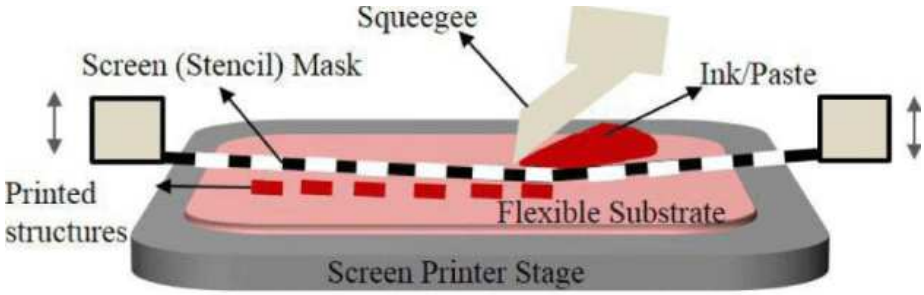


Figura 20. Proceso de la serigrafía [10]

En el mercado existen muchas alternativas para adquirir máquinas de serigrafía para la electrónica impresa. Por un lado, se ofertan dispositivos manuales como el que se muestra en la siguiente figura.

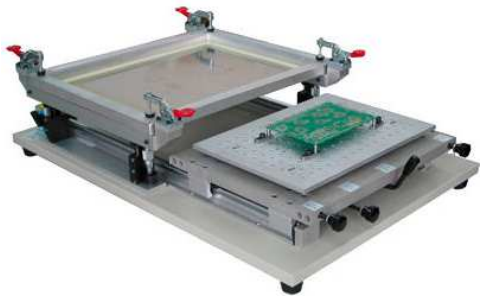


Figura 21. QSY-3401 de Madell Tecnhology Corporation [12]

Por otro lado, hay una gran oferta de dispositivos automáticos como los que se muestran a continuación:

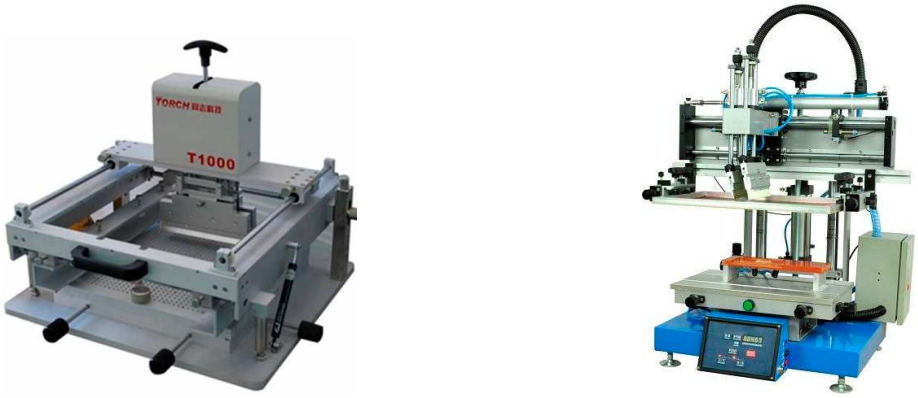


Figura 22. Impresoras BeiJing TORCH T1000 [13] y Easy Print MSP-2030T [14]

2.2.2 Impresión por inyección de tinta

La tecnología de impresión por inyección de tinta (*inkjet printing*) ha ido evolucionando desde 1970 hasta convertirse en un método de fabricación popular en el área de microondas. Es un proceso aditivo que no produce subproductos nocivos como los ácidos que suelen utilizarse para eliminar los metales de la cara superior del sustrato. Además, es una técnica rentable que permite la deposición precisa de micromateriales y nanomateriales en una disposición funcional sin patrones y sin contacto [15]. Al ser un método adecuado para el diseño de una antena-sensor en sustratos flexibles será el que se tendrá en cuenta en el diseño posterior a nivel de *layout.*

Tal como se indicó en un proyecto anterior [16], existen dos técnicas de impresión diferenciadas:

- Inyección de tinta continua: una bomba de alta presión dirige la tinta desde un depósito a una boquilla microscópica a través de un cuerpo de pistola.
- Inyección bajo demanda:
  - Térmica: los cartuchos de tinta cuentan con varias cámaras con calentadores. Mediante una corriente eléctrica, estos calentadores provocan la evaporización de la tinta que aumenta la presión en la cámara. Este aumento es el que induce que se expulse una gota de tinta. La corriente se va aplicando según se requiera, pudiendo ser continua para producir un chorro de tinta continuo.
  - Controlada mediante material piezoeléctrico: en este caso se utiliza un material piezoeléctrico en las cámaras en el lugar del calentador. Además, en este caso se debe aplicar un voltaje para que la cámara se contraiga por la presión que provoca el aumento de tamaño del material. De esta forma, se vierten las gotas de tinta sobre el sustrato a través de la boquilla, tal como se muestra en la figura 23. Esta última técnica es la más utilizada actualmente.

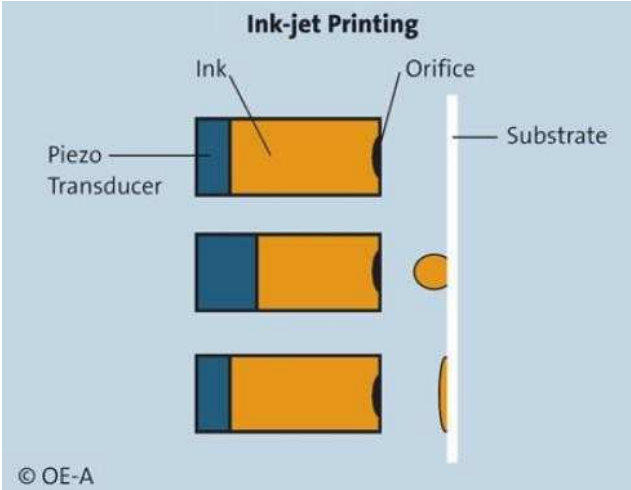


Figura 23. Inyección bajo demanda (material piezoeléctrico) [10]

Como ejemplo de una máquina muy utilizada para imprimir por inyección de tinta bajo demanda (material piezoeléctrico) se puede nombrar la Dimatix Materials Printer DMP-2850 de la marca Fujifilm.

Figura 24. Dimatix Materials Printer DMP-2850

2.2.3 Tintas de impresión electrónica

En la electrónica impresa, a parte de las diferentes técnicas de impresión, se deben tener en cuenta las diferentes tintas que se pueden utilizar. Las tintas utilizadas para la impresión suelen estar fabricadas con nanopartículas de cobre, oro o plata, debido a su alta conductividad eléctrica, junto a algún tipo de polímero conductor (PEDOT, PPS, PANI, etc.). Además, también se utilizan nanotubos de carbono de pared simple y pared múltiple, grafeno, partículas cerámicas y biomateriales. Para obtener la viscosidad y la tensión superficial deseadas, la composición de las tintas puede requerir materiales adicionales tales como el mencionado disolvente orgánico.

En el documento de referencia [17] se analizan seis tipos de tintas de tres fabricantes distintos (NovaCentrix, Methode Electronics Inc. y InkTec). Por un lado, se analizan 3 tintas fabricadas con nanopartículas de plata (JS-B25P, 9102 y TEC -IJ-030), dos con nanotubos de carbono (JR-700LV y 3800) y otra con nanopartículas de óxido de cobre (ICI-003). Las siguientes figuras muestran una comparación de las distintas características que presentan.

Inkjet ink	JS-B25P	ICI-003	JR-700LV
Functional nanoparticles	Silver	Copper oxide	Carbon
Substrate	Photo paper	Photo paper	Plastics, glass, metals
Particle Size (µm)	0.075	85 - 115	N/A
Minimal thermal cure (°C)	25	N/A	100
Sheet resistance (Ω/□)	0.060 - 0.070	0.14	Varies
Volume resistivity (µΩ.cm)	N/A	4.3	Varies
Viscosity (mPa.s)	3.0 – 5.0	1.0 – 6.5	N/A
Surface tension (mN/m)	28 - 32	N/A	Varies

Figura 25. Características de las tintas de NovaCentrix [17]

Inkjet ink	9102 (Methode Electronics Inc.)	TEC-IJ-030 (InkTec)	3800 (Methode Electronics Inc.)
Functional nanoparticles	Silver	Silver	Carbon
Substrate	Paper, plastics	Glass	Plastics, glass, paper
Particle Size (µm)	N/A	0.015	N/A
Minimal thermal cure (°C)	25	100	25
Sheet resistance (Ω/□)	0.025	0.019	5k-20k
Volume resistivity (µΩ.cm)	N/A	2.88	Varies
Viscosity (mPa.s)	3.5	3 – 15	6 – 12
Surface tension (mN/m)	32	27 – 32	25 – 55

Figura 26. Características de las tintas de Methode Electronics Inc. y InkTec [17]

Las tintas de nanopartículas de plata son las más utilizadas, aparte de ser las tintas más estudiadas e investigadas. La plata presenta ventajas como resistencia a la oxidación, alta conductividad eléctrica, y propiedades antibacterianas y plasmónicas. Estas propiedades las hacen apropiadas para impresión de aplicaciones de nanoelectrónica y diseño de sensores.

Por otro lado, las tintas de nanopartículas de óxido de cobre son también muy buenas conductoras, muy adecuadas para impresión de todo tipo de productos electrónicos, dispositivos semiconductores, células fotovoltaicas y parches RFID (identificación por radiofrecuencia). Además, existe la tinta de óxido de cobre reducible que es un material más rentable que el cobre puro. Sin embargo, el uso de este material en las tintas exige un sistema de curado fotónico que muchas veces lo convierte en una solución que no es rentable.

Para finalizar, las tintas de nanotubos de carbono presentan un gran potencial en muchas aplicaciones como la electrónica flexible, electrodos transparentes,

sensores electrónicos, etc. Estas tintas combinan unas propiedades extraordinarias con un coste bajo.

2.3 Propiedades eléctricas y mecánicas de los sustratos flexibles empleados en la industria

Los sustratos que se utilizan para la impresión electrónica requieren contar con algunas características importantes como: flexibilidad, resistencia, adherencia, delgadez, ligereza, eficiencia y métodos de producción respetuosos con el medio ambiente. Para cumplir con estas expectativas se puede optar entre alguno de los diferentes sustratos con sus diferentes propiedades. En la siguiente tabla se muestran un comparativa de algunos de los más utilizados:

Material	Grosor (µm)	Densidad (g/cm²)	Trans-parencia (%)	T_{max} (°C)	Otras características
PET	16–100	1.4	90	120	Claro, económico, moderada absorción de humedad
PEN	12–250	1.4	87	155	Claro, económico, moderada absorción de humedad
PI	12–125	1.4	–	300	Color naranja, caro, alta absorción de humedad
Papel	100	0.6–1.0	–	130	Biodegradable, económico
Cristal	50–700	2.5	90	400	Claro, caro, frágil, pesado

Figura 27. Características de diferentes sustratos flexibles [10]

Para caracterizar los sustratos empleados en los circuitos impresos es necesario tener en cuenta la tinta conductora que se va a emplear. Las tintas conductoras están formadas por una matriz polimérica, conductores, disolventes y aditivos. Las partículas de plata se suelen usar como este material conductor. En definitiva, los parámetros del proceso que más afectan a la conductividad y las propiedades mecánicas del producto final son: la composición y el área de la sección transversal de la capa de tinta, la estructura de la superficie del material del sustrato, su temperatura y su tiempo de curado.

2.3.1 Reseña de los resultados de un estudio experimental

Para conocer algunos sustratos flexibles más a fondo se va a utilizar como guía un trabajo experimental [18]. En este experimento se investigan las propiedades eléctricas, la adhesión, la flexión, y la resistencia a la tracción de diseños fabricados con diversas tintas y diversos sustratos. Debido a que las propiedades de las tintas no son el objeto de este proyecto, simplemente se denominarán como A, B y C, sin reseñar sus características. Además, se debe tener en cuenta que la técnica de impresión electrónica que se utiliza es la de serigrafía.

En cuanto a los sustratos flexibles que se utilizan son los siguientes: papel (masa cuadrada de 80 g / m ^{2} y espesor de 100 µm), poliamida (PI, espesor de 125 µm), tereftalato de polietileno (PET, espesor de 75 µm), tela (a) (espesor de 365 µm) y cloruro de polivinilo (PVC, espesor de 300 µm). En la prueba de adhesión se utiliza un tejido adicional (tela b, espesor de 190 µm) con el objetivo de comparar la adhesión de la tinta conductora en diferentes tejidos. Por otro lado, las condiciones de curado en las mediciones son las siguientes:

Measurements	Ink	Curing temperature (°C)	Curing time (min)	Substrates
Adhesion	A, B, C	120	30	PI, PET, PVC, paper, fabric
Sheet resistance	A, B	120	30	PI, PET, PVC, paper, fabric
	A, B	20	30	Paper
	A, B	60	30	Paper
	A, B	120	30, 60	Paper
	A, B	180	5, 30	Paper
Bending test	A	120	30	PET
	B	150	20	PET
Tensile test	A, B, C	120	30	PVC

Figura 28. Condiciones de curado de los sustratos [18]

El resultado del espesor promedio de los conductores es el siguiente:

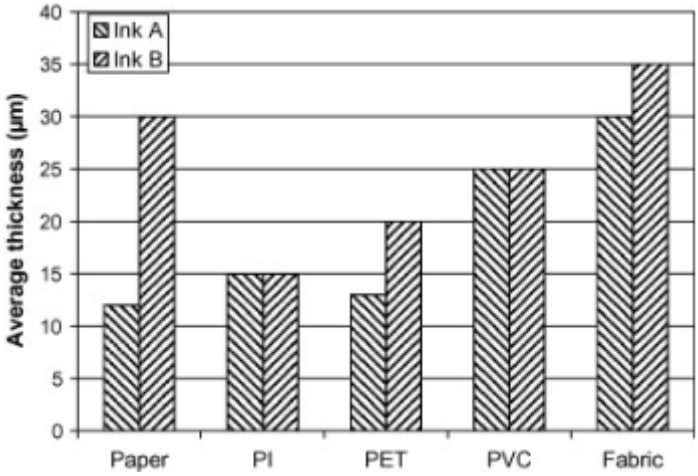


Figura 29. Espesor promedio de los conductores [18]

Se puede apreciar que el sustrato influye notablemente en este parámetro, mientras que la diferencia en la tinta solo se nota cuando se trata de papel. Esto es debido a que su porosidad aumentó la absorción de las tintas, lo que provocó una gran variación en el grosor de sus capas.

La viscosidad de la tinta también afecta a la cantidad que se transfiere al sustrato. La variación de espesor es de aproximadamente ± 3 µm con sustratos lisos como PI y PET, y de ± 5 µm en sustratos más porosos como el papel o la tela. A continuación, veamos cómo afecta la temperatura de curado a la resistencia de la lámina para el caso en que se utiliza sustrato de papel:

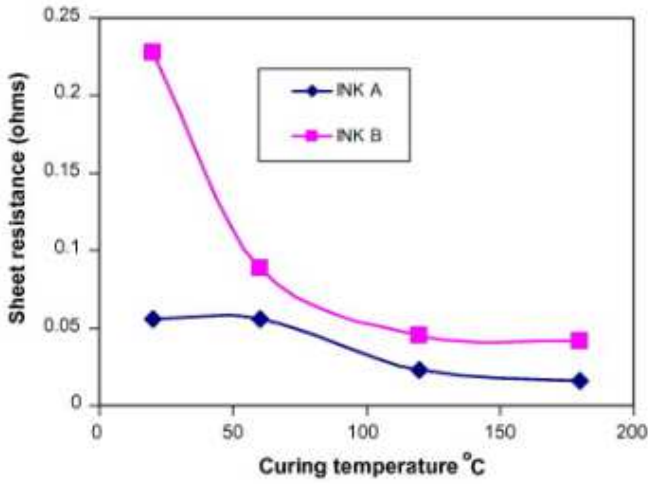


Figura 30. Valores de la resistencia de la lámina [18]

La gráfica anterior muestra los resultados para diferentes temperaturas de curado con dos tintas diferentes en sustrato de papel. Ahora se añade el factor tiempo en la comparativa.

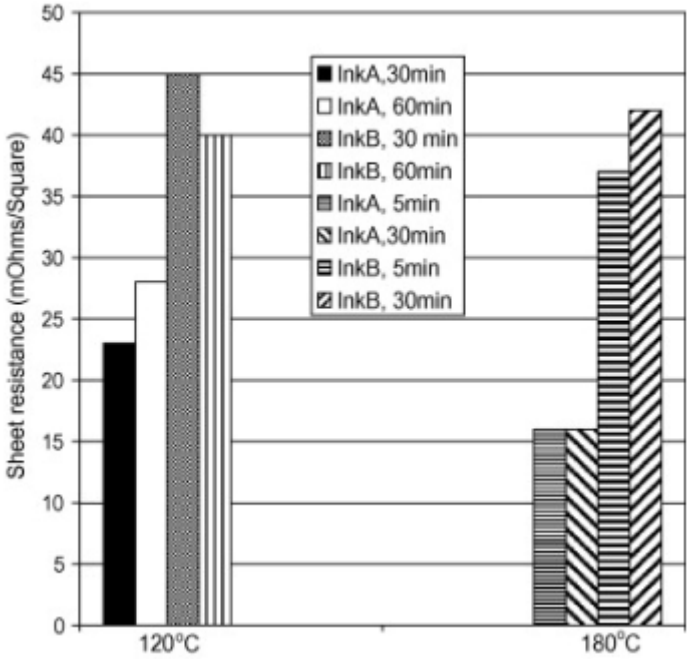


Figura 31. Valores de la resistencia de la lámina para diferentes temperaturas y tiempos de curado para dos tintas diferentes en sustrato de papel [18]

También se experimenta el cambio en la resistencia de los patrones conductores con distintos sustratos:

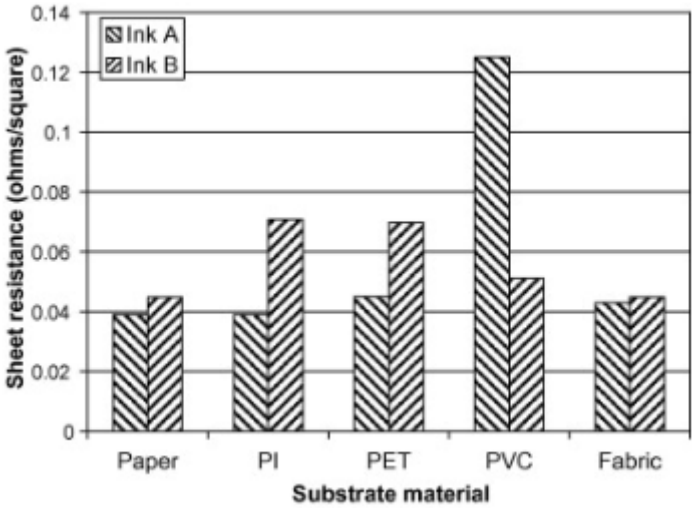


Figura 32. Valores de la resistencia de la lámina con dos tintas diferentes en distintos sustratos [18]

En cuanto a las pruebas de adhesión, cada tinta tiene preestablecido un nivel de adhesión en cada uno de los sustratos plásticos. Por otro lado, fue deficiente en todos los casos en la tela (a) (PA 50% / algodón 50%). La adhesión de las tintas (A) y (B) en la tela (b) fue razonablemente buena. En el sustrato de papel no se pudo medir debido a que se rompió durante la prueba.

3. Parámetros principales del presente proyecto

3.1 Parámetros del sustrato flexible

En el diseño de componentes electrónicos en sustratos flexibles, para aplicaciones de radiofrecuencia, se deben tener en cuenta dos parámetros principales del sustrato: la permitividad eléctrica y la tangente de pérdidas. Además, también se debe prestar especial atención al grosor del sustrato empleado. El aumento del grosor produce una mejor eficiencia de radiación de la antena, mayores pérdidas en el dieléctrico y un aumento de las ondas de superficie.

En el presente proyecto, en un primer paso, se simularán diseños conocidos en diferentes sustratos. Posteriormente, se elaborará el diseño final sobre sustrato de algodón, puesto que es un material adecuado para las altas frecuencias de operación que se pretenden alcanzar. Además, es compatible con *inkjet printing,* la técnica de fabricación de referencia para un posible diseño real.

3.1.1 Permitividad eléctrica

Es el parámetro físico que describe la influencia que produce un campo eléctrico sobre un material. Es decir, caracteriza la respuesta del material al polarizarse bajo la acción de un campo eléctrico. Se le conoce también como constante dieléctrica, si se trabaja con materiales dieléctricos (aislantes) homogéneos. Una baja constante dieléctrica se asocia a mejores eficiencias de radiación, mayor ancho de bando, menos pérdidas en el dieléctrico y disminución de las ondas de superficie. La permitividad en el vacío (ε_0) es la constante de referencia, de modo que en el resto de materiales se suele expresar la permitividad relativa (ε_r) en función de esta.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (11)$$

donde ε es la permitividad absoluta del material y ε_o=8.8541·10^{-12} F/m

3.1.1 Tangente de pérdidas

Este parámetro juega un factor crucial para determinar la atenuación cuando se trabaja a frecuencias muy altas, por encima de 1 GHz. Esto es porque cuantifica la pérdida de la señal debida a la disipación de energía electromagnética del sustrato. La tangente de pérdidas (tan δ) es un parámetro adimensional y se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (12)$$

donde σ es la conductividad, ω la frecuencia angular y ε la permitividad absoluta.

3.2 Rango de frecuencias y variable a detectar

El espectro de las ondas electromagnéticas utilizadas en las comunicaciones radioeléctricas se divide en diferentes bandas. Cada una de ellas se caracteriza por sus propiedades de propagación y por el empleo que se les da.

Typical Frequencies	
AM broadcast band	535–1605 kHz
Short wave radio band	3–30 MHz
FM broadcast band	88–108 MHz
VHF TV (2–4)	54–72 MHz
VHF TV (5–6)	76–88 MHz
UHF TV (7–13)	174–216 MHz
UHF TV (14–83)	470–890 MHz
US cellular telephone	824–849 MHz
	869–894 MHz
European GSM cellular	880–915 MHz
	925–960 MHz
GPS	1575.42 MHz
	1227.60 MHz
Microwave ovens	2.45 GHz
US DBS	11.7–12.5 GHz
US ISM bands	902–928 MHz
	2.400–2.484 GHz
	5.725–5.850 GHz
US UWB radio	3.1–10.6 GHz

Approximate Band Designations	
Medium frequency	300 kHz–3 MHz
High frequency (HF)	3 MHz–30 MHz
Very high frequency (VHF)	30 MHz–300 MHz
Ultra high frequency (UHF)	300 MHz–3 GHz
L band	1–2 GHz
S band	2–4 GHz
C band	4–8 GHz
X band	8–12 GHz
Ku band	12–18 GHz
K band	18–26 GHz
Ka band	26–40 GHz
U band	40–60 GHz
V band	50–75 GHz
E band	60–90 GHz
W band	75–110 GHz
F band	90–140 GHz

Figura 33. División del espectro electromagnético [19]

Una vez analizados lo diferentes ejemplos de antenas-sensor se ha decidido que las simulaciones y diseños iniciales conocidos se trabajen en las bandas de frecuencia L, S y C. Posteriormente, se abordará el diseño propio con la intención de operar en la banda de 5.8 GHz. Esta decisión se toma con la idea de que la antena-sensor pudiera utilizarse en aplicaciones WBAN de detección de temperatura corporal. El reto será comprobar si la antena sería sensible a modificaciones tan pequeñas de la constante dieléctrica. Esto es debido a que la temperatura corporal sufre variaciones de pocos grados, a diferencia de una de las antenas vistas en puntos anteriores donde se analizaron pasos de 10 ºC.

3.3 Selección del tipo de antena y topología a diseñar

Tras el estudio del estado de la técnica, se ha decidido que en el presente proyecto se simulen y diseñen antenas tipo parche microstrip. Este tipo de antenas planas presentan numerosas ventajas como son una buena adaptación en bandas no muy anchas y diagramas de radiación estables en frecuencia. Además, se pueden destacar las siguientes características: bajo coste, facilidad de fabricación, peso y volumen reducido, se adaptan a ubicaciones tanto planas como curvas, y son aptas para la fabricación con tecnología de electrónica impresa *inkjet printing*. Por ello, se emplean en múltiples aplicaciones de comunicaciones inalámbricas como: telefonía móvil, televisión, aplicaciones biomédicas, sensores, radares, etc. Por contra, son antenas con ancho de banda reducido, poca potencia, baja eficiencia y ganancia, y diagramas poco directivos.

Tal como se explicó en el punto 2.1.2, su estructura está formada por un plano de masa, un sustrato dieléctrico y un parche metálico de dimensiones comparables a la longitud de onda. La alimentación de la antena tipo parche puede realizarse a través de una línea de transmisión o con un cable coaxial. Por otra parte, también se puede alimentar sin contacto mediante acoplamiento por apertura o por proximidad. Sin embargo, en este proyecto se utilizará el método de alimentación por línea de transmisión, puesto que facilita su fabricación y adaptación de la antena. Como desventaja cabe señalar que no se puede optimizar la antena, la alimentación y la radiación de la línea por separado.

Por último, las antenas tipo parche microstrip pueden diseñarse con diferentes formas. Las más comunes son la siguientes:

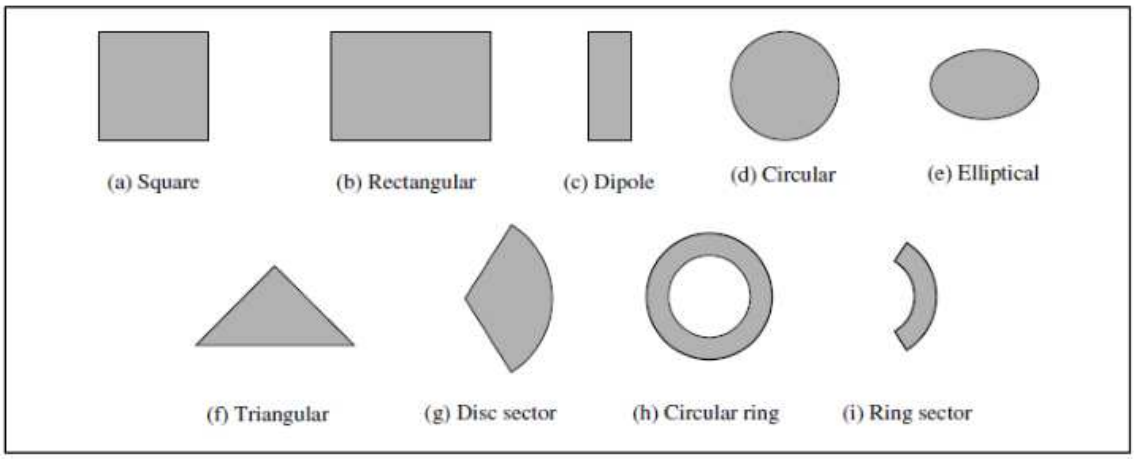


Figura 34. Geometrías más comunes de los elementos radiantes en antena de parche [20]

3.4 Descripción de los parámetros de antena

3.4.1 Impedancia de antena

Una antena es un dispositivo de un puerto y, por lo tanto, presenta una impedancia de entrada que es la relación entre la tensión y la corriente presente en este puerto de entrada. La impedancia de entrada (Z_{in}) consta de una parte real (R(f)) y una parte imaginaria (X(f)), ambas dependientes de la frecuencia.

$$Z_{in} = R(f) + jX(f) \quad (13)$$

La antena es resonante a una frecuencia determinada si X(f) es igual a cero. Una antena presenta generalmente muchas resonancias, denominados “modos”. A su vez, R(f) se puede descomponer en la resistencia de radiación (R_r), que se define como la resistencia que dispararía la potencia que radia la antena, y en la resistencia de pérdidas óhmicas (R_Ω), que representa las pérdidas de potencia que se disipan en la antena en forma de calor.

$$R(f) = R_r(f) + R_\Omega(f) \quad (14)$$

Para que la transferencia de potencia del generador a la antena sea máxima (mínima potencia reflejada), se requiere una buena adaptación de impedancias.

Los parámetros con los que se miden la desadaptación son el coeficiente de reflexión Γ, que relaciona la amplitud de la onda reflejada y de la onda transmitida, y la relación de onda estacionaria ROE.

$$\rho = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \qquad \rho(dB) \in (-\infty, 0] \quad (15)$$

$$ROE = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \qquad ROE \in [1, \infty) \quad (16)$$

donde Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión a la que se conecte la antena.

3.4.2 Eficiencia de radiación y de antena

La eficiencia de radiación (η_r) se define como la relación entre la resistencia de radiación (R_r) y la suma de esta resistencia de radiación y la de pérdidas óhmicas (R_Ω). También puede definirse a partir de la relación entre la potencia radiada (P_r) y la potencia entregada a la antena ($P_r + P_\Omega$).

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_r + P_\Omega} = \frac{I^2 R_r}{I^2 R_r + I^2 R_\Omega} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (17)$$

Por otro lado, el concepto de la eficiencia total (η_t) es el resultado de multiplicar la eficiencia de radiación por el coeficiente de desadaptación de impedancias ($1-|S_{11}|^2$).

$$\eta_t = \eta_r \left(1 - |\rho|^2\right) \quad (18)$$

3.4.3 Diagrama de radiación

Es la representación gráfica de las características de radiación de las antenas en función de las diferentes direcciones del espacio a una distancia fija. Es decir, es una transcripción de la distribución espacial de la radiación electromagnética emitida o recibida por la antena El diagrama de radiación cobra relevancia en la zona de campo lejano, es decir, en la zona donde la forma del diagrama es invariante en función de la distancia.

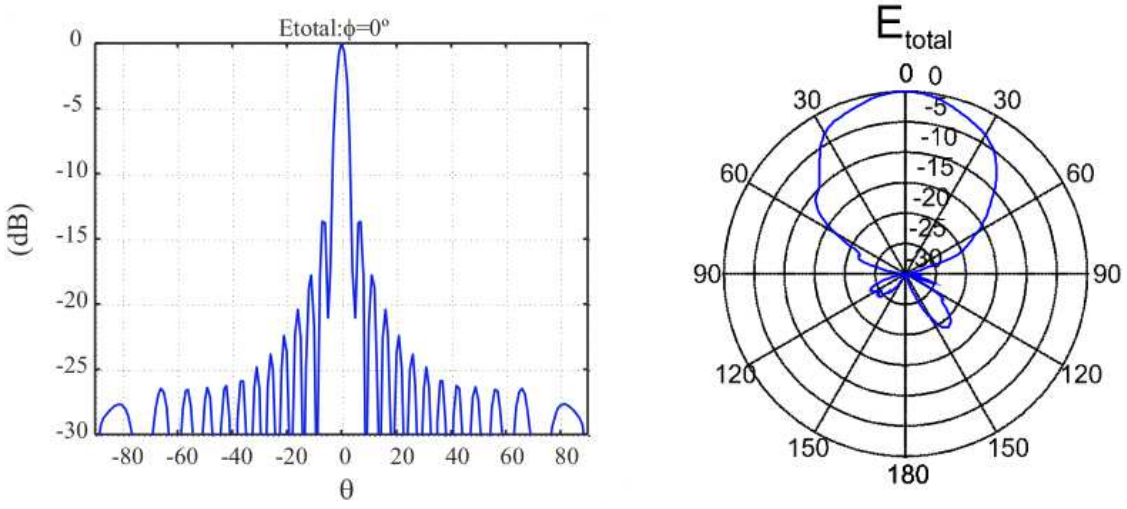


Figura 35. Ejemplo de diagrama de radiación en coordenadas cartesianas y polares [21]

Para la representación gráfica se suelen utilizar coordenadas polares ubicando la antena en el origen de coordenadas y tomando como referencia el valor máximo de radiación. Las formas de representación pueden ser tridimensionales o bidimensionales, en escala lineal o logarítmica. Se suelen utilizar dos planos para definir un diagrama de radiación, los más utilizados son los planos paralelo y perpendicular al plano de polarización de la antena.

Los diagramas son isotrópicos cuando la radiación es idéntica en todas las direcciones del espacio, son omnidireccionales cuando es idéntica en todas las direcciones de un plano, son bidireccionales cuando radia en dos direcciones principales y son directivos cuando hay una sola dirección donde hay más radiación.

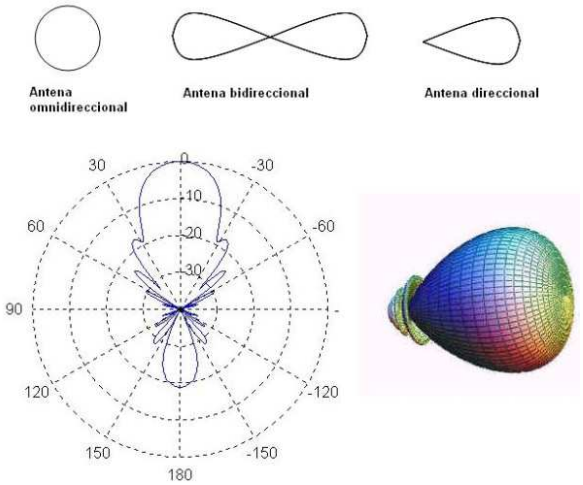


Figura 36. Representación de diagramas de radiación

Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son:

- Dirección de apuntamiento: es la de máxima radiación. Directividad y ganancia.
- Lóbulo principal: es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.
- Lóbulos secundarios: son el resto de máximos relativos de valor inferior al principal.
- Ancho de haz: es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma un valor de 3 dB por debajo del máximo. Es decir, la dirección en la que la potencia radiada se reduce a la mitad.
- Relación de lóbulo principal a secundario (SLL): es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.
- Relación delante-atrás (FBR): es el cociente en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.

3.4.4 Directividad y ganancia

Es la relación entre la potencia de radiación de una antena en la dirección del máximo y la potencia de radiación que radiaría una antena isotrópica con la misma potencia total. Se dice que una antena es muy directiva si es capaz de concentrar la potencia que radia, o recibe, en una sola dirección. La directividad se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$D(\theta,\varphi)=\frac{\wp(\theta,\varphi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \quad (19)$$

donde $\wp(\theta,\varphi)$ es la densidad de potencia de la antena en cuestión y el factor $4\pi r^2$ la de la antena isotrópica.

Por otro lado, la ganancia se define de una forma similar a la directividad, pero en función de la potencia entregada a la antena, en vez de la radiada. De esta forma, se puede establecer una relación entre directividad y ganancia a través de la eficiencia de radiación:

$$D(\theta,\varphi) = D(\theta,\varphi)\cdot\eta_r \quad (20)$$

3.4.5 Polarización

La polarización en una determinada dirección viene definida por la trayectoria de propagación del vector campo (eléctrico o magnético) a una cierta distancia de la antena al variar el tiempo. Esta polarización puede ser lineal (vertical o horizontal), circular o elíptica.

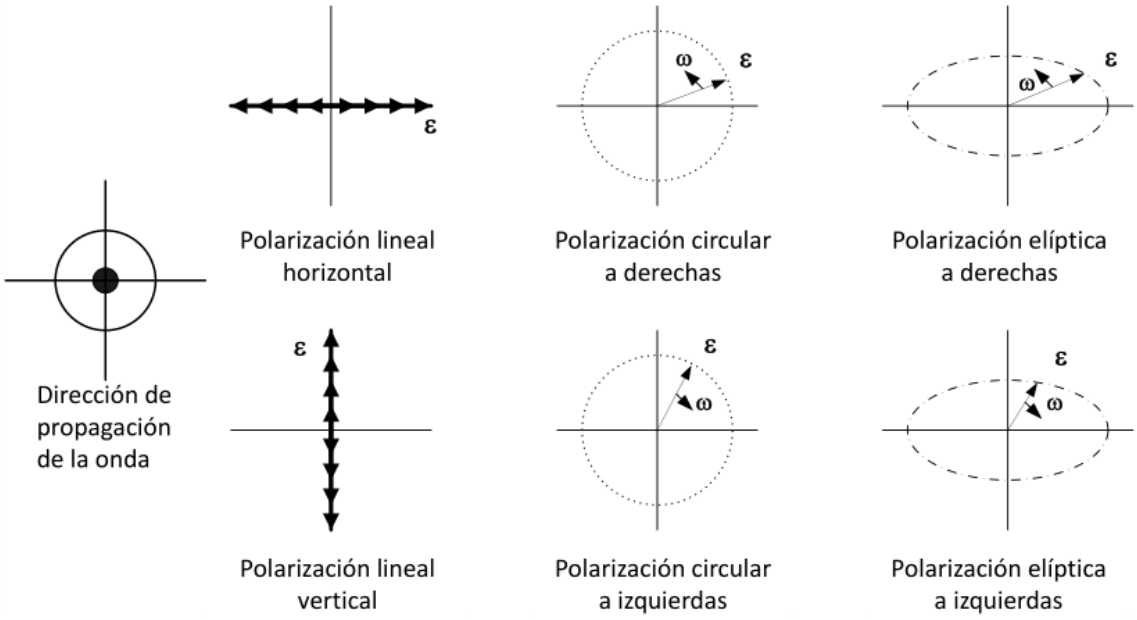


Figura 37. Polarización lineal, circular y elíptica [21]

El sentido de giro de campo eléctrico, tanto en polarización circular como elíptica, es hacia la derecha cuando la onda se aleja del observador, el campo rota en el sentido de las agujas del reloj, y hacia la izquierda si el sentido es contrario [21]

3.4.6 Ancho de banda

El término de ancho de banda se refiere al rango de frecuencias sobre el cual la operación de la antena es satisfactoria. Los anchos de banda asociados a las especificaciones de cada parámetro pueden ser diferentes, pero suele existir alguno que es el más limitante. Entre las definiciones de ancho de banda

relacionadas con el parámetro al que se hace referencia podemos destacar las siguientes:

- Ancho de banda de impedancia: se define como el margen frecuencial en el que la antena está adaptada con una relación de onda estacionaria (ROE) menor a un valor prefijado S.

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{\frac{f_2 + f_1}{2}} \cdot 100 \quad (21)$$

donde f_2 y f_1 son las frecuencias que delimitan el ancho en que ROE≤S.

- Ancho de banda de ganancia: se define como el margen de frecuencias en el que la ganancia de la antena no decae de un cierto valor respecto el máximo. También se le conoce como el ancho de banda a −3 dB.

3.5 Impacto del cuerpo humano en las prestaciones de la antena

Las antenas-sensor se erigen como alternativa para el monitoreo de parámetros relacionados con el cuidado de la salud en comunicaciones WBAN. En este tipo de aplicaciones, la proximidad del cuerpo humano influye en las prestaciones de la antena debido a la absorción, el retardo, la distorsión y la atenuación de señales. La absorción electromagnética que produce, provoca desplazamientos en las frecuencias de operación, distorsión en el patrón de radiación y cambios en la impedancia.

En estudios de referencia [22] se ha demostrado que la frecuencia de operación disminuye a medida que la antena se va acercando al cuerpo humano. Esto se debe a que los tejidos biológicos tienen una permitividad mayor que la del aire. Por tanto, esta cercanía (o contacto) con el cuerpo, produce un aumento de la constante dieléctrica, que tal como se vio en los puntos 2.1.2.2 o 2.1.2.3, provoca un descenso en la frecuencia de resonancia de la antena.

Las propiedades eléctricas más reseñables del cuerpo humano que impactan en las prestaciones de una antena-sensor son la permitividad y la conductividad [23]. A continuación, se muestra el valor de estos parámetros, en función de la frecuencia, para diferentes tejidos humanos.

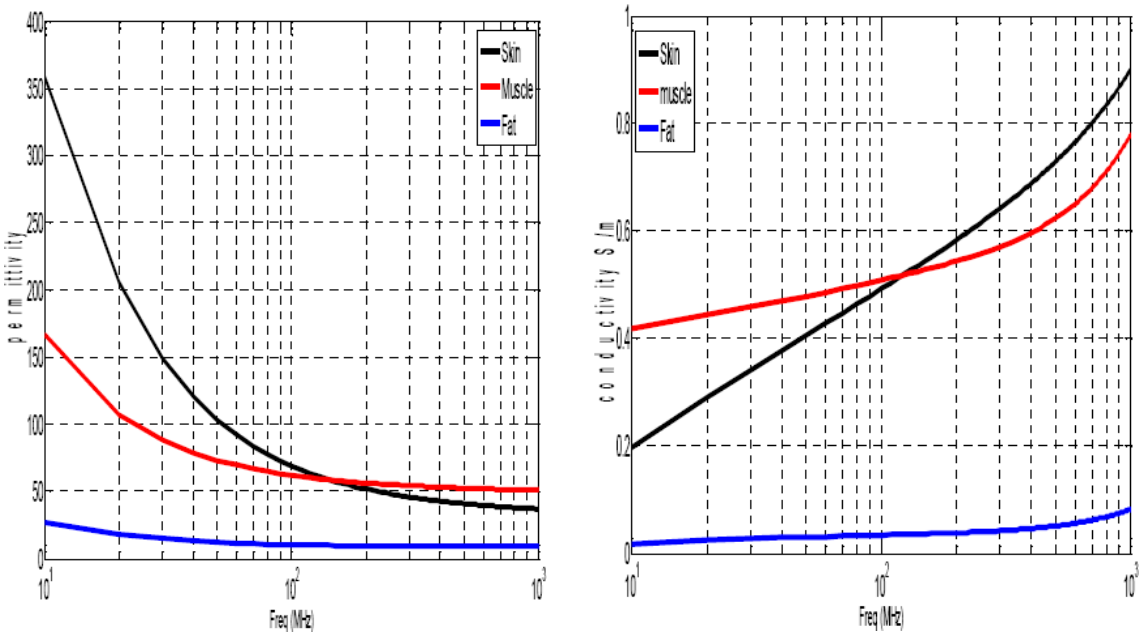


Figura 38. Permitividad (izquierda) y conductividad (derecha) de los diferentes tejidos humanos [23]

En la figura 38 se puede apreciar que se producen grandes diferencias en las características dieléctricas de los tejidos debido al contenido de líquido de cada uno. La permitividad relativa y conductividad de la grasa es menor que la de los músculos y de la piel. La grasa se erige como un mal conductor, mientras que piel y músculos son intermedios en su conductividad, que aumenta a mayores frecuencias. Además, en estos últimos, la permitividad es importante a frecuencias más bajas y luego disminuye cuando las pérdidas por histéresis se vuelven significativas.

En este proyecto se pretende trabajar con diseños de antenas a frecuencias más altas (bandas L, S y C) que las reseñadas en las figuras anteriores. Pese a que el comportamiento mantiene la misma tendencia, se procede a mostrar los mismos parámetros, pero centrado en bandas más altas del espectro radioeléctrico.

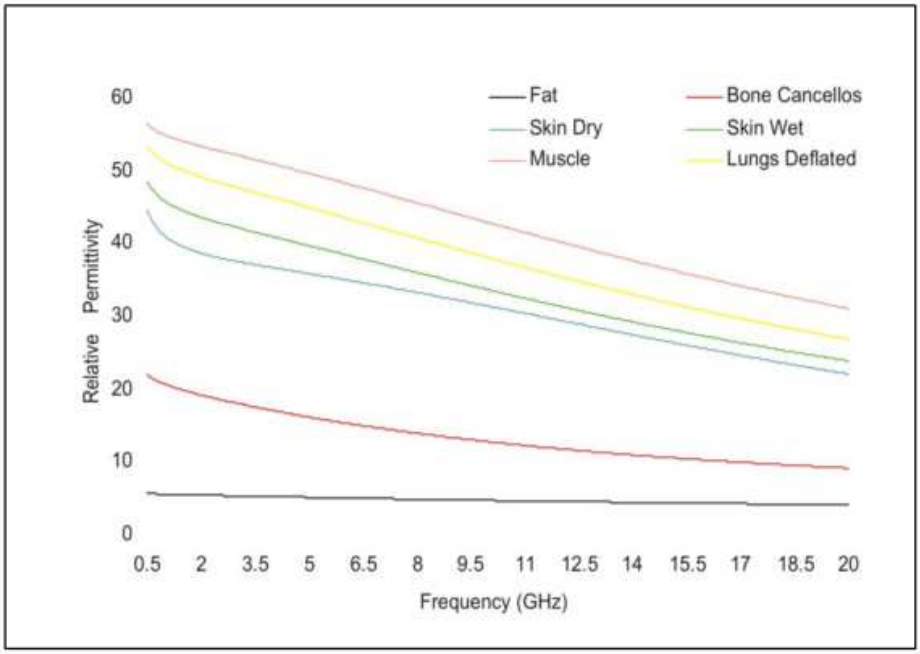


Figura 39. Permitividad relativa para el rango de frecuencias 0.5-20 GHz [20]

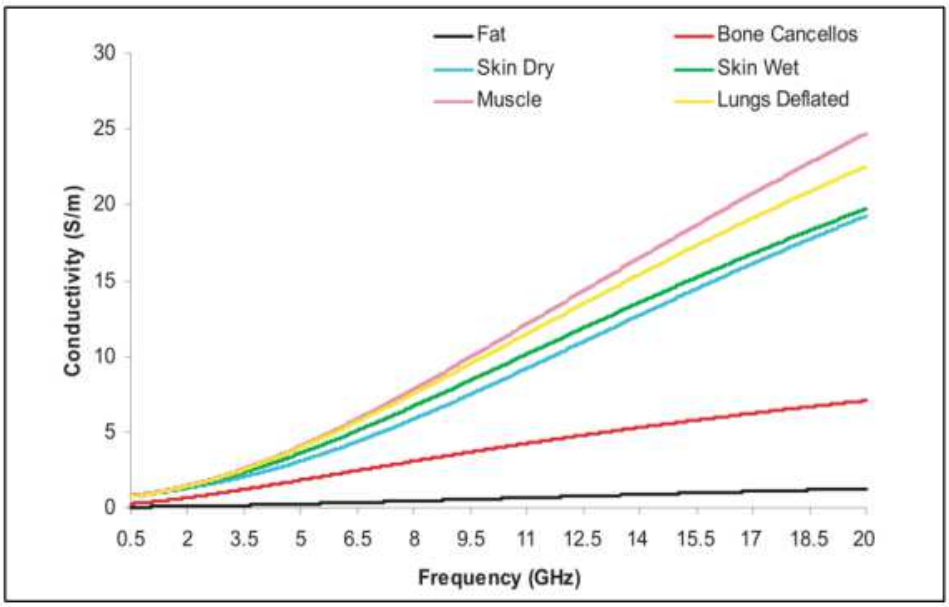


Figura 40. Conductividad para el rango de frecuencias 0.5-20 GHz [20]

Las figuras anteriores denotan que en la piel y músculos a medida que aumenta la frecuencia, la permitividad disminuye y la conductividad se incrementa. En cuanto a la grasa, los dos parámetros se mantienen en valores muy bajos para todas las frecuencias.

Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la atenuación que producen los tejidos humanos, sobre todo para aplicaciones donde las ondas deben propagarse a través de él.

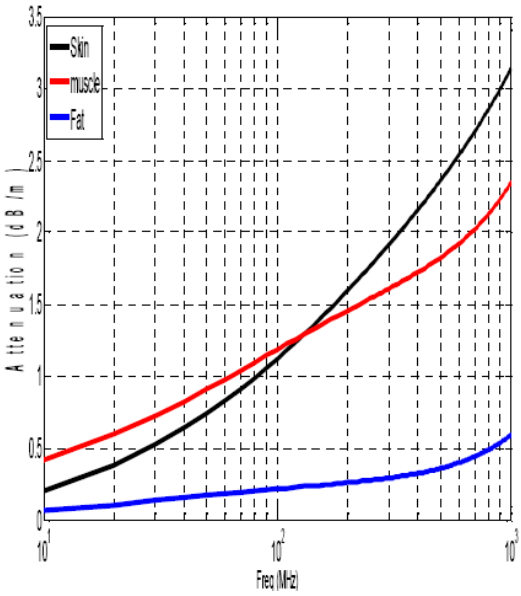


Figura 41. Atenuación de los diferentes tejidos humanos [23]

La figura 41 muestra que la atenuación es más acusada en la piel para frecuencias del orden de los 10^2 y 10^3 MHz.

Por otro lado, en comunicaciones radioeléctricas donde se ve implicado el cuerpo humano no se puede olvidar la tasa de absorción específica (SAR). Este parámetro se define como una medida de la potencia máxima con la que un campo electromagnético de radiofrecuencia es absorbido por el tejido vivo. También se puede referir a la absorción de otras formas de energía por el tejido, incluyendo ultrasonido. La Unión Europea fija como límite 2 W/kg promediado en 10 gramos de tejido o 0.08 W/kg promediado en toda la masa corporal.

3.7 Características técnicas de *inkjet printing* para una posible fabricación del diseño

La tecnología de impresión por inyección de tinta (*inkjet printing*) ofrece la capacidad única de depositar con precisión nanopartículas a temperatura ambiente. Esto resulta una ventaja cuando se trabaja con sustratos flexibles, puesto que permite aprovechar mejor sus propiedades semiconductoras. Las tintas basadas en nanotubos de carbono han mostrado un rendimiento superior frente a otros materiales, aunque en los procesos de fabricación habituales requieren temperaturas por encima de los 500ºC. Por contra, los sustratos flexibles más utilizados para la impresión electrónica solo pueden tolerar temperaturas de hasta 400ºC como máximo. Por tanto, para compatibilizar los sustratos flexibles con tintas innovadoras como la de nanotubos de carbono, *inkjet printing* deviene como el método de referencia en el campo científico. Además, esta técnica ofrece una muy buena definición en la deposición de la tinta [24].

Entre las características técnicas que definen la tecnología de impresión por inyección de tinta se pueden destacar: la viscosidad dinámica (η), la tensión superficial (γ), la densidad (ρ), el punto de ebullición y el pH. Los valores recomendados para estos parámetros son: η de 3 a 10 mPa·s, γ de entre 25 a 45 mN/m, ρ debe ser superior a 1 g/cm ^{3}, el punto de ebullición debe ser superior a 100ºC y el pH de estar entre 4 y 9. Además, debido que la generación de gotas líquidas de tinta es un proceso complejo, se necesitan también las siguientes constantes físicas adimensionales [17]:

- Reynolds *(Re):* se define como la relación entre las fuerzas de inercia y la fuerza de fricción.

$$Re = \frac{\upsilon \rho \alpha}{\eta} \quad (22)$$

  donde υ es la velocidad de gota y α es una longitud característica dependiente del diámetro de la boquilla de los cabezales de impresión.

- Weber *(We):* se define como la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de tensión superficial.

$$We = \frac{\upsilon^2 \rho \alpha}{\gamma} \quad (23)$$

- Ohnesorge *(Oh):* relaciona las fuerzas viscosas y las fuerzas de tensión superficial.

$$Oh = \frac{We}{Re} = \frac{\eta}{(\gamma \rho \alpha)^2} \quad (24)$$

- En muchas investigaciones también se define el parámetro adimensional Z, que se define como el inverso de *Oh.*

$$Z = \frac{1}{Oh} \quad (25)$$

4. Análisis de diseños de antenas-sensor conocidas sobre sustratos flexibles

En este capítulo, a modo de entrenamiento, se reproducirán y simularán algunos de los ejemplos que se han estudiado en el estado del arte. Antes de esto, se presentará una breve reseña acerca del *software* que se utilizará en las simulaciones.

4.1 Advanced Design System (ADS)

Advanced Design System (ADS) es un sistema de *software* de automatización de diseño electrónico y simulación producido por Keysight EEsof EDA, una división de Keysight Technologies. Proporciona un entorno de diseño integrado que permite realizar numerosas simulaciones avanzadas en el dominio de la frecuencia y el tiempo. El programa dispone de dos espacios de trabajo principales:

- El esquemático, en donde se pueden crear circuitos mediante los distintos componentes existentes en sus extensas librerías. Sobre estos diseños se pueden realizar diferentes estudios, simulaciones y caracterizaciones mediante sus numerosas herramientas de análisis. En este espacio también se pueden importar fragmentos de diseños para evaluarlos.

- El Layout, en este espacio de diseño se pueden crear diferentes tipos de materiales y combinarlos para crear elementos como una antena. A continuación, mediante la aplicación Momentum o con FEM, se puede realizar el análisis electromagnético y de radiación. Esta será la ventana de trabajo que se utilizará en el presente proyecto aprovechando sus potentes herramientas y aplicaciones de diseño y simulación. Por otro lado, es importante reseñar que ambos espacios están interconectados, permitiendo que se puedan utilizar elementos creados en una ventana en diseños de la otra.

4.2 Análisis de la primera antena-sensor conocida

4.2.1 Presentación del primer diseño conocido

En primer lugar, se trabajará con la antena-sensor flexible de parche microstrip en sustrato de Kapton para la detección de estrés mecánico, reseñada en el punto 2.1.2.1. En el estudio de referencia [5], sus parámetros principales de diseño no se detallan por completo, aunque sí se reflejan los siguientes

- Dimensiones del parche de cobre: W=12.6 mm y L=15 mm.
- Frecuencia de operación: 5.5421 GHz.

Se deberá completar el resto en base a la información obtenida en la literatura científica, la cual se ha ido consultando a lo largo del presente proyecto.

- Grosor del sustrato de Kapton (h): 0.11 mm.
- Constante dieléctrica (ε_r): 3.6
- Tangente de pérdidas (tan δ): 0.002
- Para los coeficientes de Poisson, tanto del cobre como de Kapton, es razonable considerar un valor de 0.34.

En cuanto a las medidas de la antena, añadiendo las que faltan, serán las siguientes:

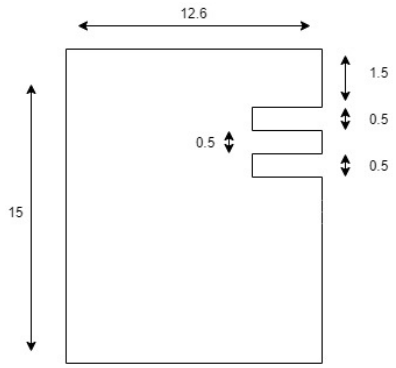


Figura 42. Medidas antena-sensor (mm)

Ante la necesidad de asumir diferentes parámetros relevantes, se debe tener en cuenta que no se podrán reproducir los resultados de forma exacta. De todas formas, el objetivo es que, en base a este diseño conocido, se puedan analizar las variaciones que se producen en la frecuencia de operación a consecuencia del estrés mecánico.

4.2.2 Diseño con ADS

Aprovechando la aplicación Layout Command Line Editor de ADS, se puede operar en la ventana de trabajo Layout mediante comandos simples.

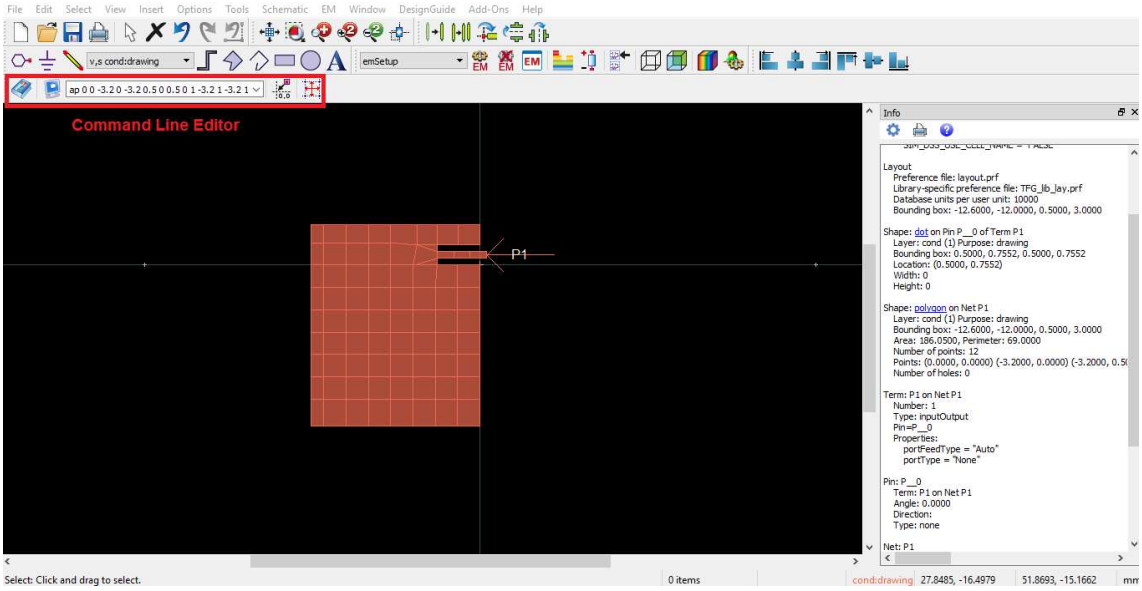


Figura 43. Antena generada mediante comandos en la ventana Layout de ADS

La antena se ha generado mediante los siguientes comandos:

- ap 0 0 -3.2 0 -3.2 0.5 0 0.5 0 1 -3.2 1 -3.2 1.5 0 1.5 0 3 -12.6 3 -12.6 -12 0 -12 0

El comando “ap” traza el dibujo enlazando los puntos (x, y) desde el origen (0,0).

- dx 0.5

El comando “dx” aumenta el costado seleccionado en la dirección del eje X.

El sustrato se ha definido como se observa a continuación:

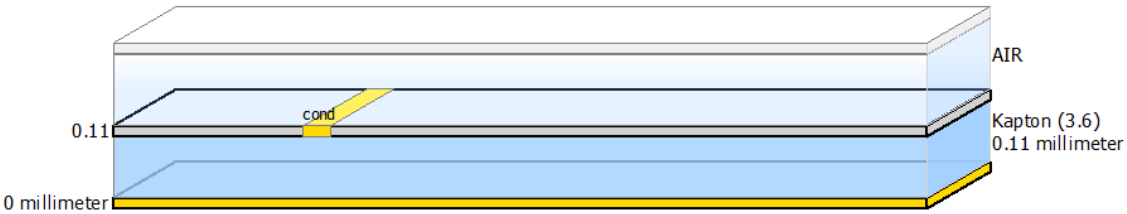


Figura 44. Sustrato de Kapton con ε_r =3.6 y tanδ=0.002

En el siguiente punto, donde se trabajarán las simulaciones, se explicará como el sustrato sufre variaciones debido al estrés mecánico aplicado.

4.2.3 Simulaciones y resultados

A continuación, se presentan los resultados de una primera simulación con la aplicación Momentum de ADS.

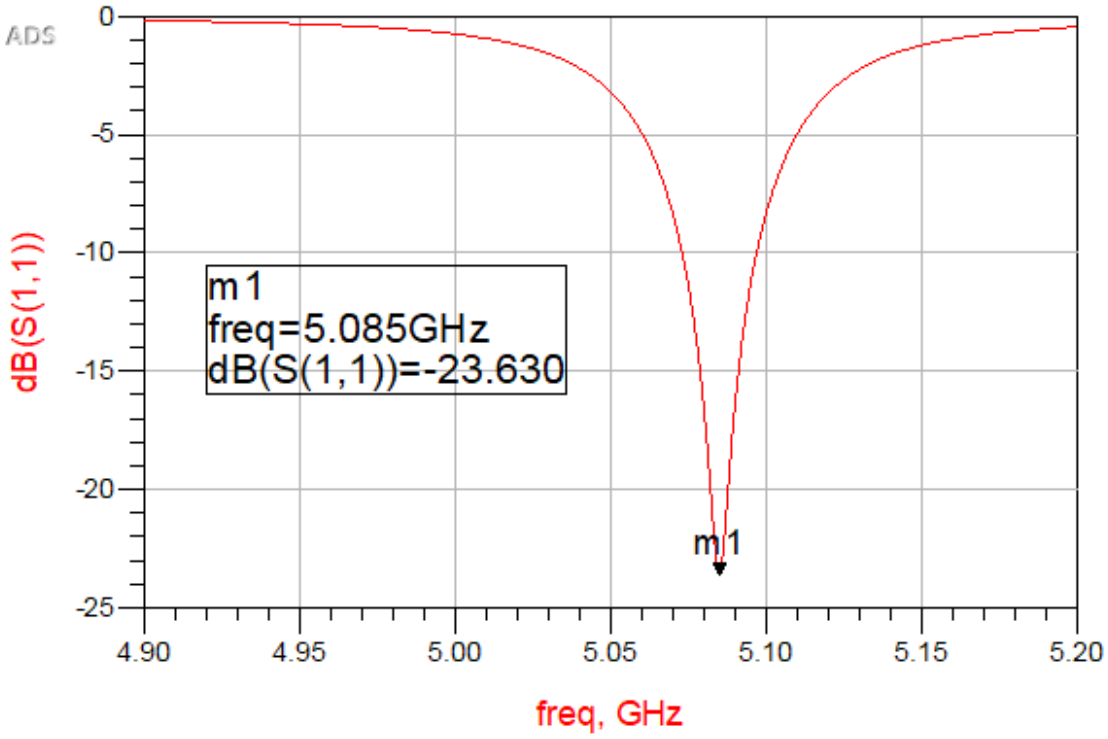


Figura 45. Gráfica del parámetro S_{11} obtenida en la simulación

En la figura 45 se puede apreciar que la frecuencia de operación es de 5.085 GHz, cercana al valor real de 5.54 GHz. Las pérdidas de retorno muestran un valor de −23.63 dB, resultando ser un valor óptimo, puesto que implica que no hay reflexión en la frecuencia de resonancia.

Se debe recordar que las antenas-sensor del presente proyecto basan su capacidad de detección en el estudio de los cambios producidos en la frecuencia de resonancia. En este caso, los cambios se producen como consecuencia de la deformación del sustrato que provoca el estrés mecánico. Asumiendo que se aplica una tensión mecánica ("estiramiento") en la dirección de L, se puede calcular matemáticamente la deformación producida en la antena flexible mediante las ecuaciones que se estudiaron en el punto 2.1.2.1.

$$L=(1+t)L_0 \qquad W=(1-\mu_P t)W_0 \qquad h=(1-\mu_S t)h_0 \qquad (26)$$

Tras analizar las expresiones, se deduce que la tensión mecánica aplicada en la dirección L provoca que el largo de la antena aumente, que el ancho disminuya y que el grosor del sustrato también se reduzca.

Tensión	L [mm]	W [mm]	h [mm]
0 %	15	12.75	0.11
0.0058 %	15.087	12.575	0.1098
0.0173 %	15.1725	12.55	0.1094
0.0231 %	15.2595	12.5259	0.1091
0.0288 %	15.432	12.4766	0.1089

Figura 46. Tabla de deformaciones producidas por la aplicación de tensión mecánica en la dirección L

Gracias a la aplicación Command Line Editor de ADS, podremos modificar el tamaño de la antena fácilmente. Por ejemplo, para aumentar L por la tensión mecánica de 0.0058 %, basta que seleccionemos el costado que se quiera modificar y ejecutemos el comando dy −0.087 (aumento de 0.087 milímetros en la dirección negativa del eje de coordenadas).

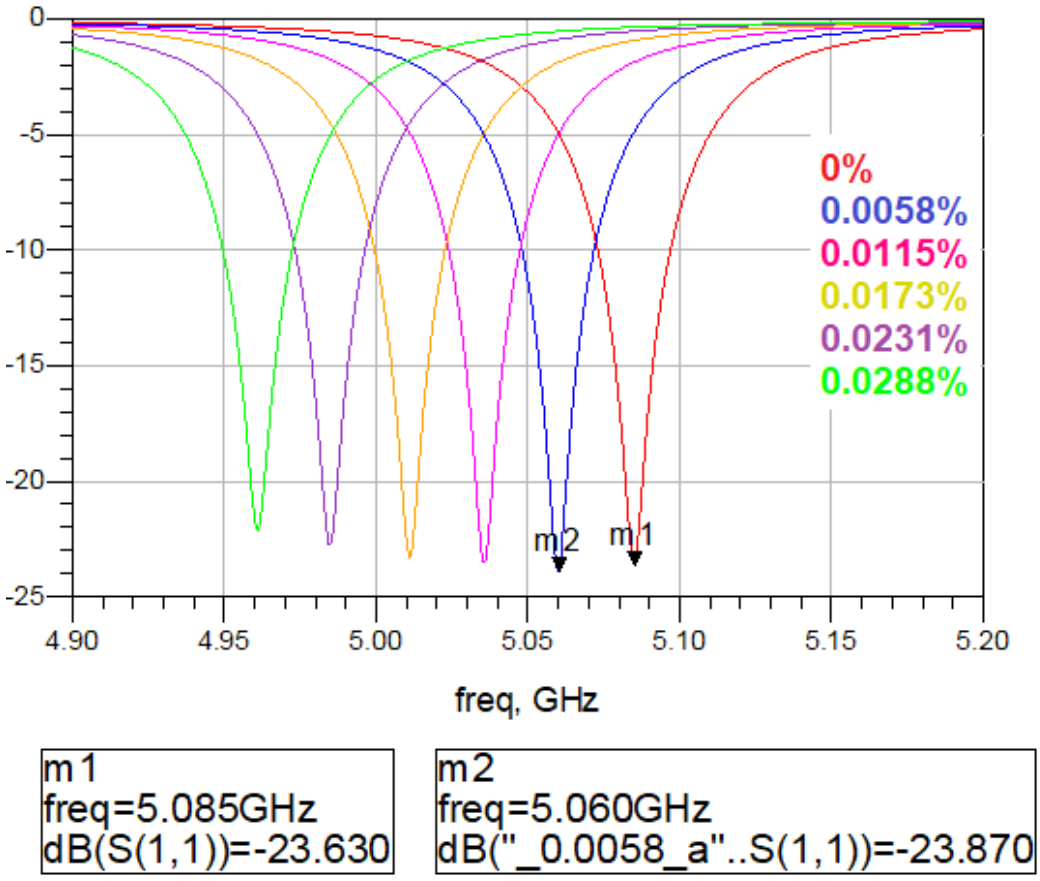


Figura 47. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la tensión mecánica

En la figura 47 se presenta el valor de las pérdidas de retorno para la simulación de la antena tras las deformaciones indicadas en la figura 46. Se puede apreciar que la frecuencia de operación disminuye a medida que se va aplicando una tensión mecánica mayor. Se ha marcado con m2 el valor que existe para la menor de las deformaciones, de un 0.0058 %, arrojando un valor de 5.060 GHz. Es decir, 25 MHz menos que la frecuencia original de la antena. La tabla siguiente indica los resultados:

Tensión mecánica	0%	0.0058%	0.0115%	0.0173%	0.0231%	0.0288%
Frecuencia de operación	5.085 GHz	5.060 GHz	5.036 GHz	5.011 GHz	4.985 GHz	4.961 GHz

Figura 48. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación

4.2.4 Conclusiones

En definitiva, se ha observado una reducción del orden de los 25 MHz para cada aumento de un 0.0057% de tensión mecánica. Estos resultados no se corresponden con los que se obtuvieron en la experiencia real del estudio de referencia. Teniendo en cuenta que se ha reproducido el sistema sin contar con numerosos datos indispensables de diseño, era razonable que sucediera esto. Sin embargo, se ha logrado el objetivo de notar los cambios en la frecuencia de operación de una antena flexible cuando se ve sometida a deformaciones por estrés mecánico. Por otro lado, para ser más rigurosos, también se debería tener en cuenta en qué grado afecta la deformación a cada costado en vez de reducir el tamaño de únicamente de dos de ellos como se ha hecho en este caso.

4.3 Análisis de la segunda antena-sensor conocida

4.3.1 Presentación del segundo diseño conocido

En segundo lugar, se trabajará con la antena-sensor flexible de parche microstrip en sustrato textil para la detección de temperatura, reseñada en el punto 2.1.2.2. En este caso, sí se cuenta con todos los parámetros principales de diseño, que son los siguientes:

- Dimensiones del parche de cobre: W=51.3 x L=43.3 mm.
- Grosor del sustrato de algodón (h): 3 mm
- Constante dieléctrica (ε_r): 1.6.
- Tangente de pérdidas (tan δ): 0.02
- Frecuencia de operación: 2.45 GHz.

4.3.2 Diseño con ADS

Aprovechando de nuevo la aplicación Layout Command Line Editor de ADS, se reproduce fácilmente la antena.

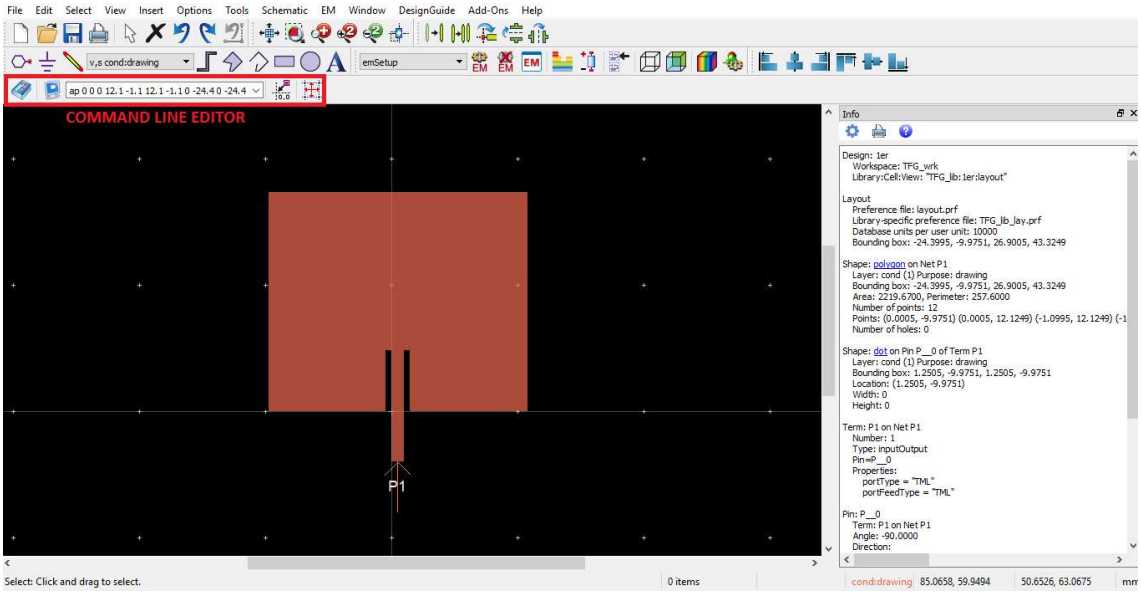


Figura 49. Antena generada mediante comandos en la ventana Layout de ADS

Se han utilizado los siguientes comandos:

ap 0 0 0 12.1 -1.1 12.1 -1.1 0 -24.4 0 -24.4 43.3 26.9 43.3 26.9 0 3.6 0 3.6 12.1 2.5 12.1 2.5 0 0 0
dy -10

El sustrato se ha definido tal como se observa a continuación:

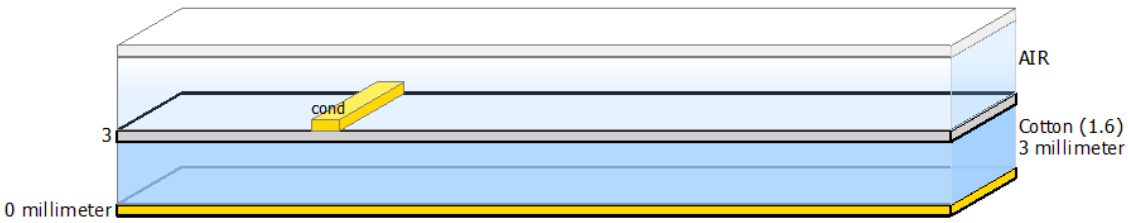


Figura 50. Sustrato de algodón con ε_r =1.6 y tanδ=0.02

Además, el diseño final se puede visualizar en tres dimensiones:

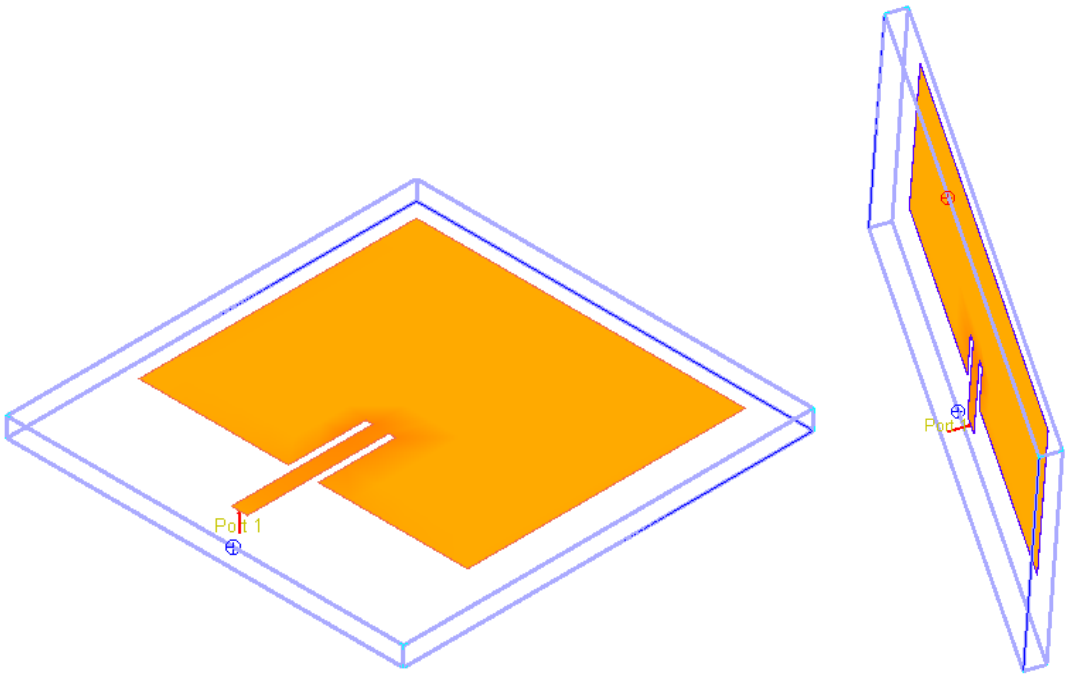


Figura 51. Visualización de diferentes perspectivas de la antena-sensor en tres dimensiones

4.3.3 Simulaciones y resultados

Se debe tener en cuenta que, al igual que la anterior, esta antena-sensor basa su capacidad de detección en el estudio de los cambios en la frecuencia de resonancia. Sin embargo, en este caso estos cambios se producen como consecuencia de la modificación del valor de la constante dieléctrica del sustrato que provoca el aumento de la temperatura. Se parte de un valor de ε_r=1.6 que varía tal como se muestra en la figura 52.

Constante dieléctrica (ε_r)	Temperatura
1.6	20 ℃
1.62	30 ℃
1.64	40 ℃
1.66	50 ℃
1.68	60 ℃

Figura 52. Variación de la constante dieléctrica del sustrato de algodón en función de la temperatura

A continuación, se presentan los resultados de la simulación con la aplicación Momentum de ADS.

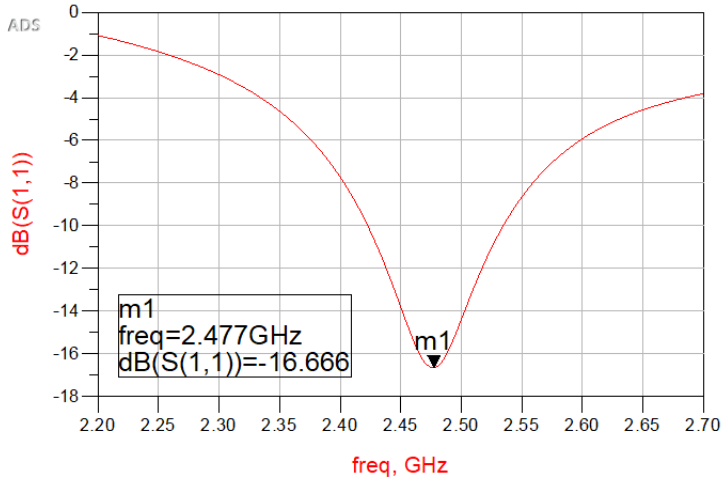


Figura 53. Gráfica del parámetro S_{11} obtenida en la simulación

En la figura 53 se puede apreciar que la frecuencia de operación es de 2.48 GHz, muy cercana al valor de la antena real. Las pérdidas de retorno muestran un valor de −16.67 dB, muy inferior al que se midió que fue de unos −50 dB. Sin embargo, es un valor óptimo que implica que no hay reflexión en la frecuencia de resonancia, aunque la adaptación sea peor que la original.

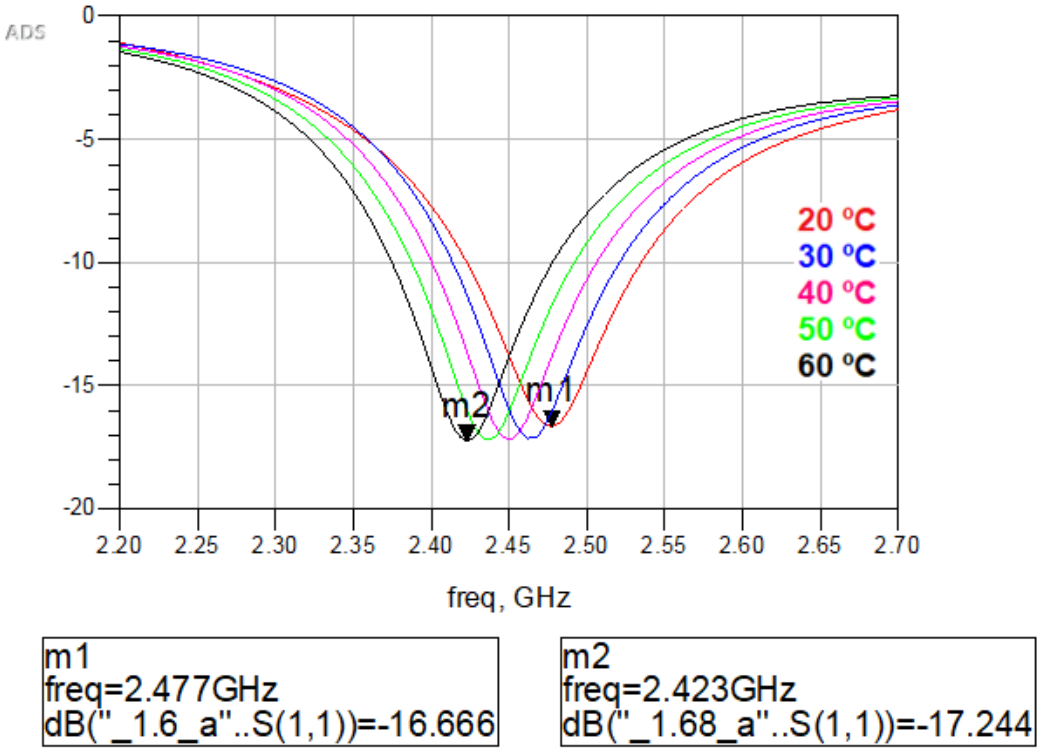


Figura 54. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura

En la figura 54 se observa como la frecuencia de resonancia va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura. Se ha resaltado el valor de la frecuencia de operación inicial de la antena y el que se obtiene para la temperatura más elevada, de 60 ℃. Como se puede observar, el primero es de 2.477 GHz y el segundo de 2.423 GHz. Es decir, se produce una reducción total de 54 MHz. La tabla siguiente indica los resultados:

Temperatura	20 ℃ (inicial)	30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃
Frecuencia de operación	2.477 GHz	2.466 GHz	2.450 GHz	2.438 GHz	2.423 GHz

Figura 55. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación en pasos de 10 ℃

4.3.4 Conclusiones

En resumen, se ha notado una disminución de la frecuencia de operación que oscila entre los 11 y 17 MHz para cada aumento de 10 ℃ de temperatura. Estos resultados son muy similares a los que se obtuvieron en el experimento real, donde se calculó una reducción del orden de los 10 MHz. En este caso, sí se ha reproducido la experiencia con mejor desenlace, ya que se ha contado con todos los parámetros de diseño relevantes. Además, se ha logrado el objetivo de llevar a cabo un estudio exitoso de los cambios que se producirían en la frecuencia de operación de una antena cuando la temperatura del sustrato sufre una variación. Se debe tener en cuenta que, tanto aquí como en el estudio de referencia, se han omitido los efectos que tendrían los cambios de temperatura tan acusados sobre las dimensiones de la antena. De todas formas, las simulaciones denotan que podría tratarse de una antena-sensor válida para un sistema con capacidad pasiva de detección de la temperatura.

5. Diseño de una antena-sensor sobre sustrato flexible

5.1 Presentación y análisis numérico

En este capítulo se realizará un diseño propio de antena-sensor para la detección de temperatura en el cuerpo humano. A continuación, para poner a prueba su capacidad como sensor, se realizará el estudio de los cambios producidos en la frecuencia de resonancia a consecuencia de la variación de la temperatura. Se debe recordar que, de nuevo, la alteración en la constante dieléctrica del sustrato será la clave de estos saltos en la frecuencia de operación. La tipología de antena diseñada será la de parche microstrip rectangular alimentada por una línea de transmisión, puesto que presenta varias ventajas que ya se comentaron en el punto 3.3. Los parámetros iniciales son los siguientes:

- Frecuencia de operación: fr=5.8 GHz.
- Impedancia característica: Z_0=50 Ω.
- Material del parche: cobre.
- Material del sustrato: algodón.

En referencia al sustrato, se ha tenido en cuenta que, al utilizar el mismo tanto para la antena como para la línea de alimentación, existe un compromiso en la elección del tipo y del grosor. Una buena línea microstrip demanda un sustrato de ε_r alta y de poco grosor. Por contra, una antena requiere de una ε_r baja y un mayor grosor, entre otras cosas para aumentar el ancho de banda y la eficiencia de radiación.

- Parámetros del sustrato: ε_r= 2 y tanδ=0.02.
- Grosor del sustrato: h=0.73148 mm.

El grosor se ha obtenido tras ajustar 0.02 veces la longitud de onda en el vacío, que es una relación recomendada en la literatura científica [25] .

A continuación, se detallan los cálculos realizados para obtener el diseño mediante el método de línea de transmisión. En primer lugar, la anchura del parche se obtiene mediante la expresión 27.

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_r} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \quad (27)$$

donde c es la velocidad de la luz. Para obtener la longitud real del parche se emplea la expresión 28, donde se considera una longitud efectiva L_{eff} mayor, debido al efecto de los *fringing fields*.

$$L = L_{eff} - 2\Delta l = \frac{c}{2 \cdot fr \cdot \sqrt{\varepsilon_{reff}}} - 2\Delta l \quad (28)$$

donde ε_{reff} es la constante dieléctrica efectiva que se obtiene de la expresión 29 y Δl de la expresión 30.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (29)$$

$$\Delta l = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\varepsilon_{erff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (30)$$

En cuanto a la longitud de la línea de transmisión, para que sea adecuada, se calcula mediante la expresión 31.

$$l = \frac{\lambda_g}{4} \quad (31)$$

donde λ_g es la longitud de onda guiada que se define en la expresión 32.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \quad (32)$$

Tras realizar los cálculos, se obtienen los siguientes parámetros de diseño:

- Dimensiones del parche de cobre: W=21.116 mm y L=18.398 mm.
- Longitud de la línea de transmisión: l=6.5985 mm.

El ancho de la línea de trasmisión se ha ido probando en varias simulaciones posteriores y se ha fijado en 1.7 mm.

5.2 Diseño y perfeccionamiento

Tras implementar el diseño en ADS con los parámetros indicados en el punto anterior, se realiza una primera simulación de control del parámetro S_{11}.

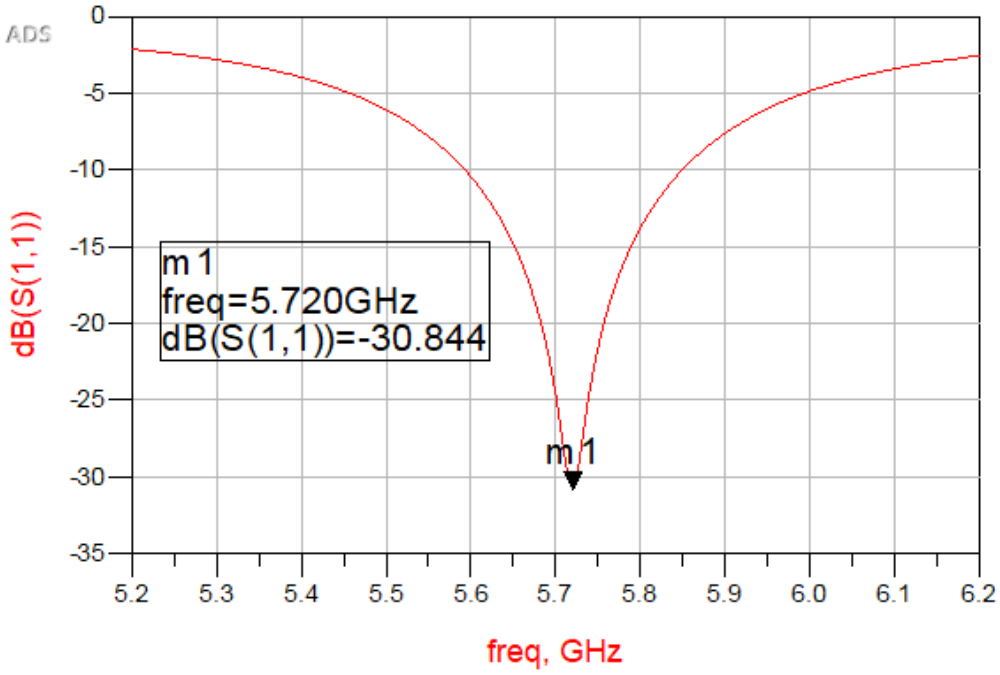


Figura 56. Simulación de control del parámetro S_{11}

En la figura 56 se observa que la frecuencia de resonancia es de 5.72 GHz, pese a que es cercana a los 5.8 GHz que se pretenden para que sea compatible con aplicaciones WBAN a esta frecuencia, no cumple con las expectativas iniciales. En consecuencia, se procede a mejorar el diseño a través de un nuevo análisis numérico mediante el factor *q* [25].

$$q = \frac{L \cdot 2}{n \cdot \lambda_{d(5.72)}} \quad (33)$$

donde $\lambda_{d(5.711)}$ es la longitud de onda en el dieléctrico para f=5.72 GHz. Una vez se ha calculado *q*, se obtiene la nueva longitud del parche L_{new} mediante la expresión 34.

$$L_{new} = \frac{q \cdot \lambda_{d(5.8)}}{2} \quad (34)$$

donde $\lambda_{d(5.8)}$ es la longitud de onda en el dieléctrico para f=5.8 GHz, que es la frecuencia que se pretende alcanzar.

Al realizar otra simulación del parámetro S_{11}, tras los ajustes con el factor *q*, se mejora el resultado, pero sin lograr que sea el esperado. Finalmente, con un segundo refinamiento mediante este mismo método, se logra el valor de S_{11} esperado en la simulación para una longitud del parche de L=18.11 mm.

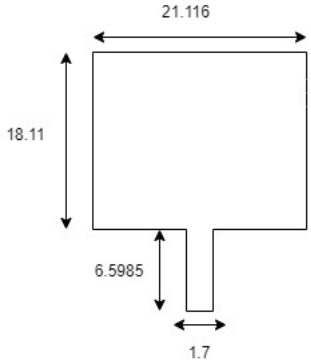


Figura 57. Dimensiones mejoradas de la antena-sensor (mm)

El sustrato se ha definido tal como se observa a continuación:

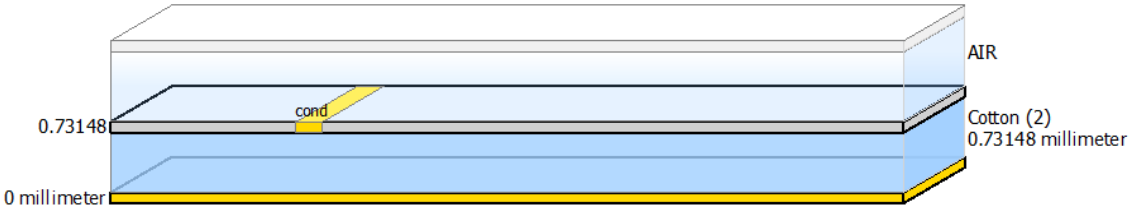


Figura 58. Sustrato de algodón con ε_r =1.6 y tanδ=0.02

En la figura 59 se puede visualizar una imagen 3D del diseño final.

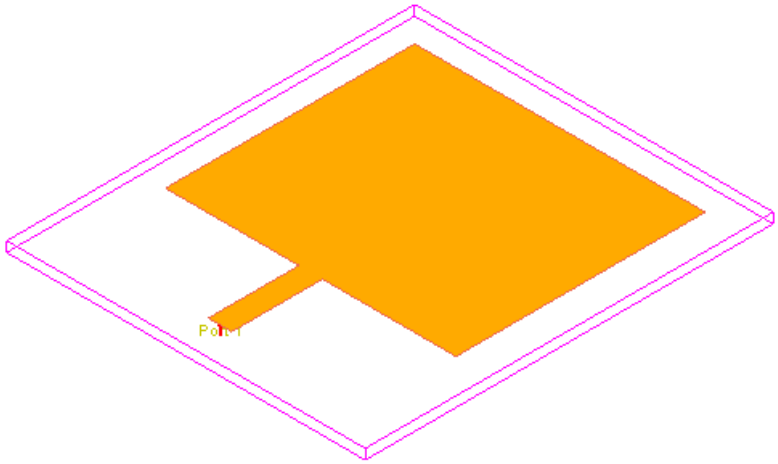


Figura 59. Visualización de la antena-sensor en tres dimensiones

5.3 Simulaciones para el análisis de los parámetros de antena

A continuación, se presentan los resultados de la simulación con la aplicación Momentum de ADS.

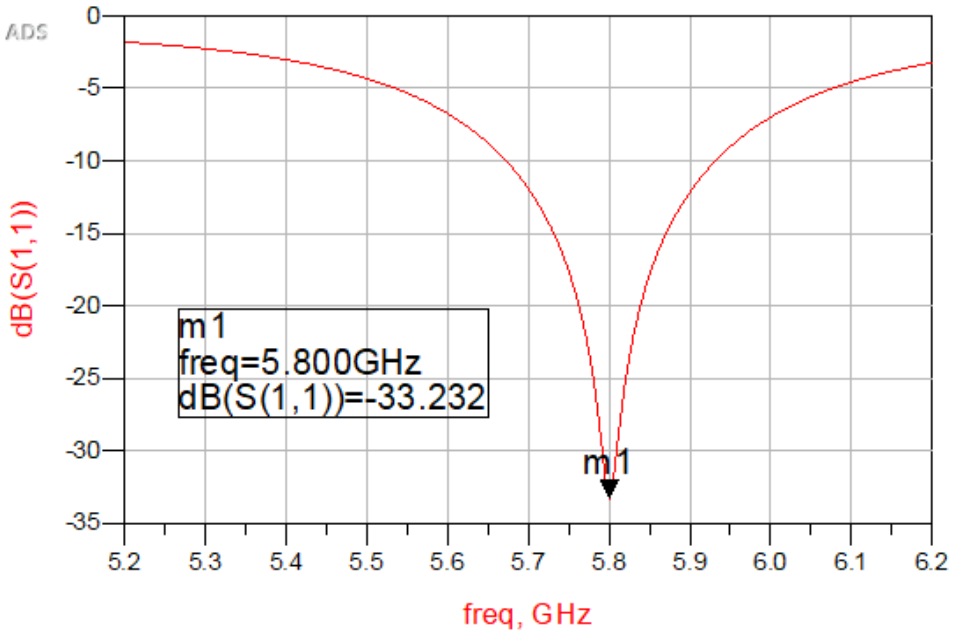


Figura 60. Gráfica del parámetro S11 obtenida en la simulación

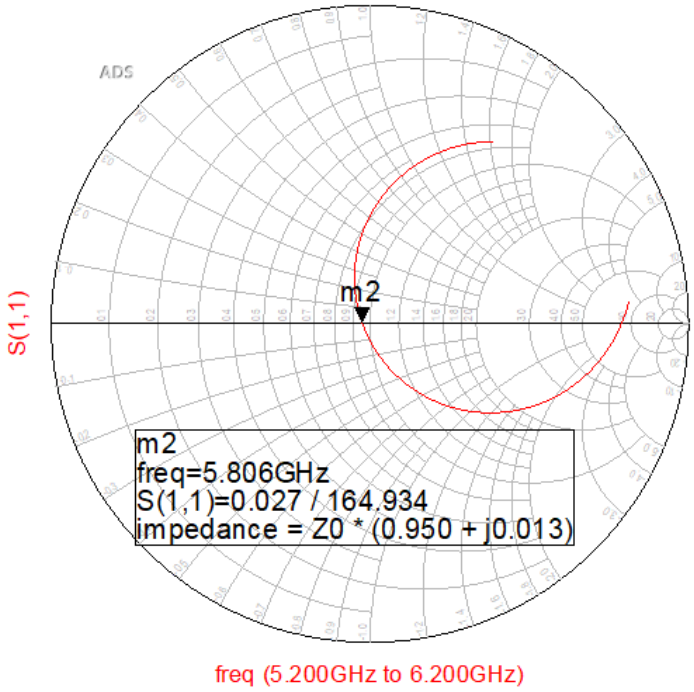


Figura 61. Impedancia de entrada con Carta de Smith obtenida en la simulación

En la figura 60 se puede apreciar que con los ajustes del factor *q* se ha logrado que la frecuencia de operación sea de 5.8 GHz. Las pérdidas de retorno muestran un valor de −33.232 dB, demostrando que no hay reflexiones en esta frecuencia y que hay una buena adaptación. El ancho de banda es de unos 258 MHz a −10 dB. Por su parte, la figura 61 corrobora que la adaptación de impedancias es buena, puesto que en el valor de la impedancia de entrada la reactancia es prácticamente cero. Por tanto, la transferencia de potencia entre el generador y la antena será máxima.

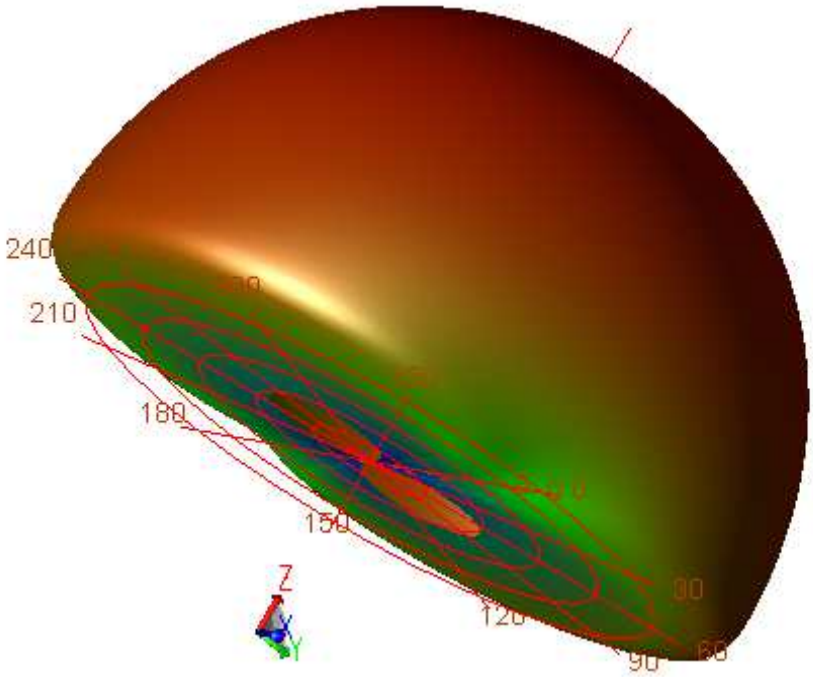


Figura 62. Diagrama de radiación en tres dimensiones

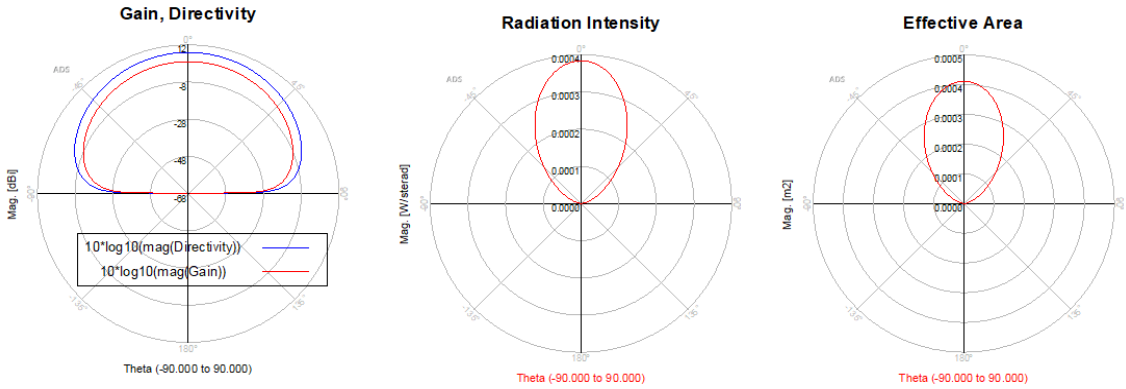


Figura 63. Diagramas bidimensionales de ganancia, radiación y área efectiva (plano ZX)

Frequency (GHz)	5.8
Input power (Watts)	0.00249881
Radiated power (Watts)	0.00080371
Directivity(dBi)	7.81911
Gain (dBi)	2.89277
Radiation efficiency (%)	32.1637

Figura 64. Resumen de parámetros de antena

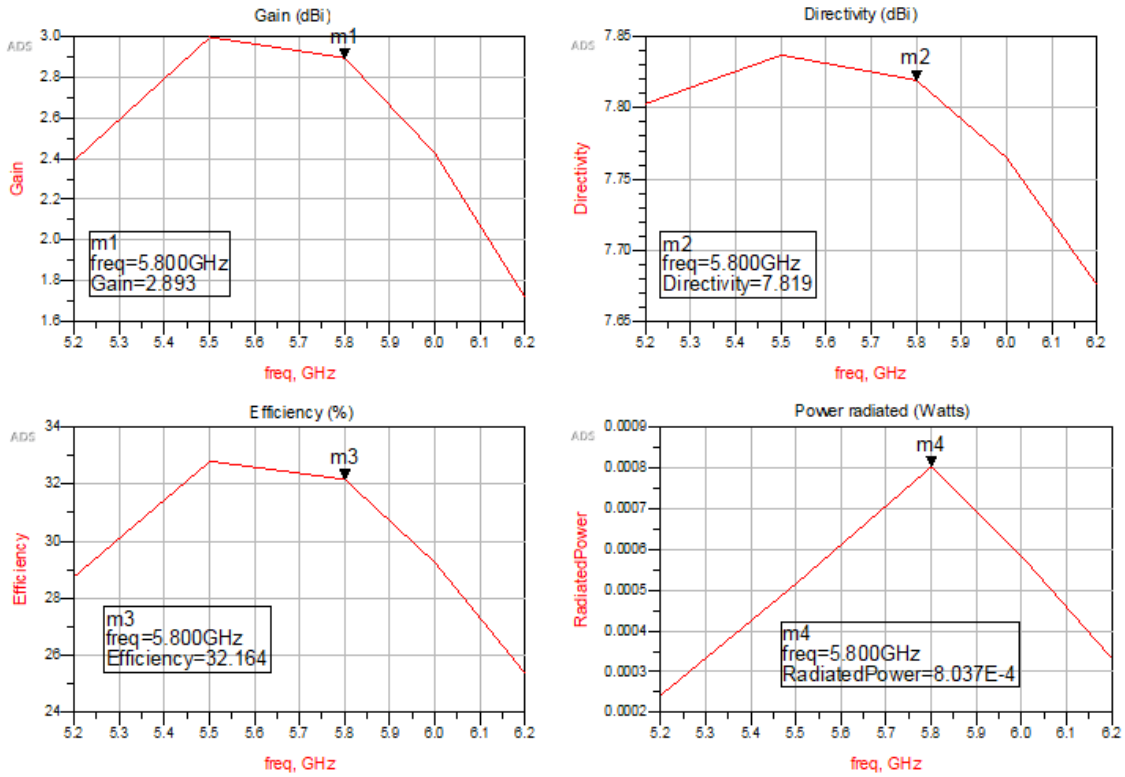


Figura 65. Representación gráfica de los parámetros de antena

La herramienta Far Field de ADS permite realizar la simulación electromagnética de los parámetros de antena. El diagrama de radiación 3D de la figura 62 denota que no existe radiación por debajo del parche, en la dirección -Z, algo muy importante si tenemos en cuenta que se pretende utilizar la antena sobre el cuerpo humano. En la figura 63 se distinguen los diagramas de ganancia, radiación y área efectiva en dos dimensiones en el plano ZX. En caso de que el plano de tierra de la antena no fuera idealmente infinito podrían existir lóbulos de radiación en la parte posterior. Sin embargo, estos lóbulos serían tan pequeños,

en relación al lóbulo principal, que podrían despreciarse. Para terminar, en la figura 64 se presentan los parámetros principales de antena y en la 65 su comportamiento en el rango de estudio de 5.2 a 6.2 GHz. A la frecuencia de operación, la ganancia es de 2.89 dBi, un valor bajo pero aceptable, ya es sabido que la poca ganancia es uno los inconvenientes de esta tipología de antenas. La directividad es de 7.8 dBi y la eficiencia de radiación del 32.16 %.

5.4 Rendimiento de la antena-sensor en el espacio libre

5.4.1 Simulaciones y resultados

Esta antena-sensor basará su capacidad de detección en el mismo principio que la del punto 4.3. Es decir, en el estudio de los cambios de la frecuencia de resonancia a causa de que la temperatura modifica la constante dieléctrica del sustrato. La diferencia es que se le va a exigir una sensibilidad mayor, puesto que las variaciones de temperatura del cuerpo son en un rango de unos pocos grados. En primer lugar, se va a comprobar la eficacia del sistema para aumentos de temperatura en pasos de 5 ℃. Se parte de un valor de ε_r=2 que varía tal como se muestra en la figura 66.

Constante dieléctrica (ε_r)	Aumento de temperatura
2	---
2.01	++5 ℃
2.02	++10 ℃
2.03	++15 ℃
2.04	++20 ℃

Figura 66. Variación de la constante dieléctrica en función de aumentos de temperatura en pasos de 5 ℃

En la figura 67 se observa como la frecuencia de resonancia va disminuyendo a medida que aumenta la temperatura en pasos de 5 ℃. Se ha resaltado el valor de la frecuencia de operación inicial de la antena y el que se obtiene para el aumento mayor de 20 ℃. Como se puede observar, el primero es de 5.816 GHz y el segundo de 5.763 GHz. Es decir, se produce una reducción total de 53 MHz.

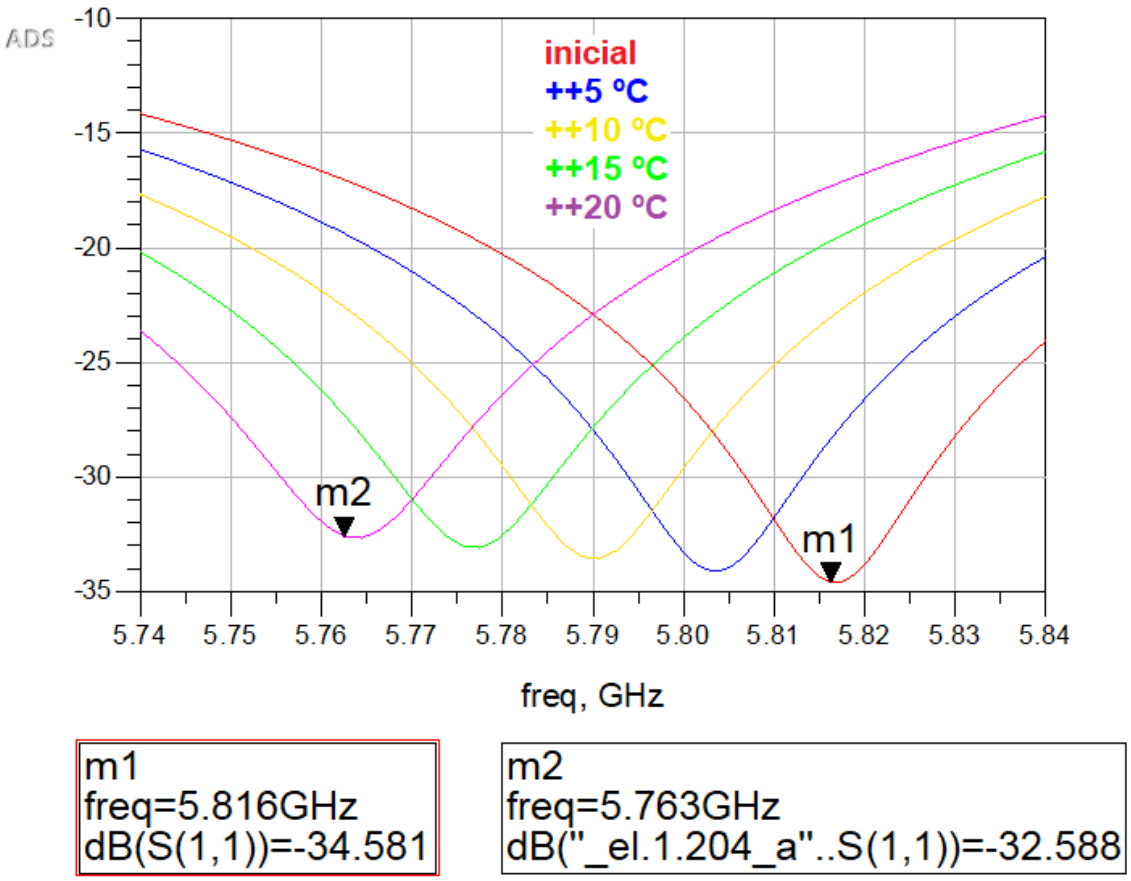


Figura 67. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura en pasos de 5 ℃

La tabla siguiente indica los resultados obtenidos en la simulación:

Temperatura	inicial	++5 ℃	++10 ℃	++15 ℃	++20 ℃
Frecuencia de operación	5.816 GHz	5.804 GHz	5.791 GHz	5.777 GHz	2.763 GHz

Figura 68. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación (pasos de 5 ℃)

En segundo lugar, se va comprobar si el sistema también sería eficaz para detectar pequeños aumentos de temperatura. En este caso, los pasos van a ser de tan solo 1 ℃, más acorde a los cambios térmicos que se pueden dar en un cuerpo humano. Se vuelve a partir de un valor de ε_r=2 que varía tal como se muestra en la figura 69.

Constante dieléctrica (ε_r)	Aumento de temperatura
2	---
2.002	++1 ℃
2.004	++2 ℃
2.006	++3 ℃
2.008	++4 ℃
2.01	++5 ℃

Figura 69. Variación de la constante dieléctrica en función de aumentos de temperatura en pasos de 1 ℃

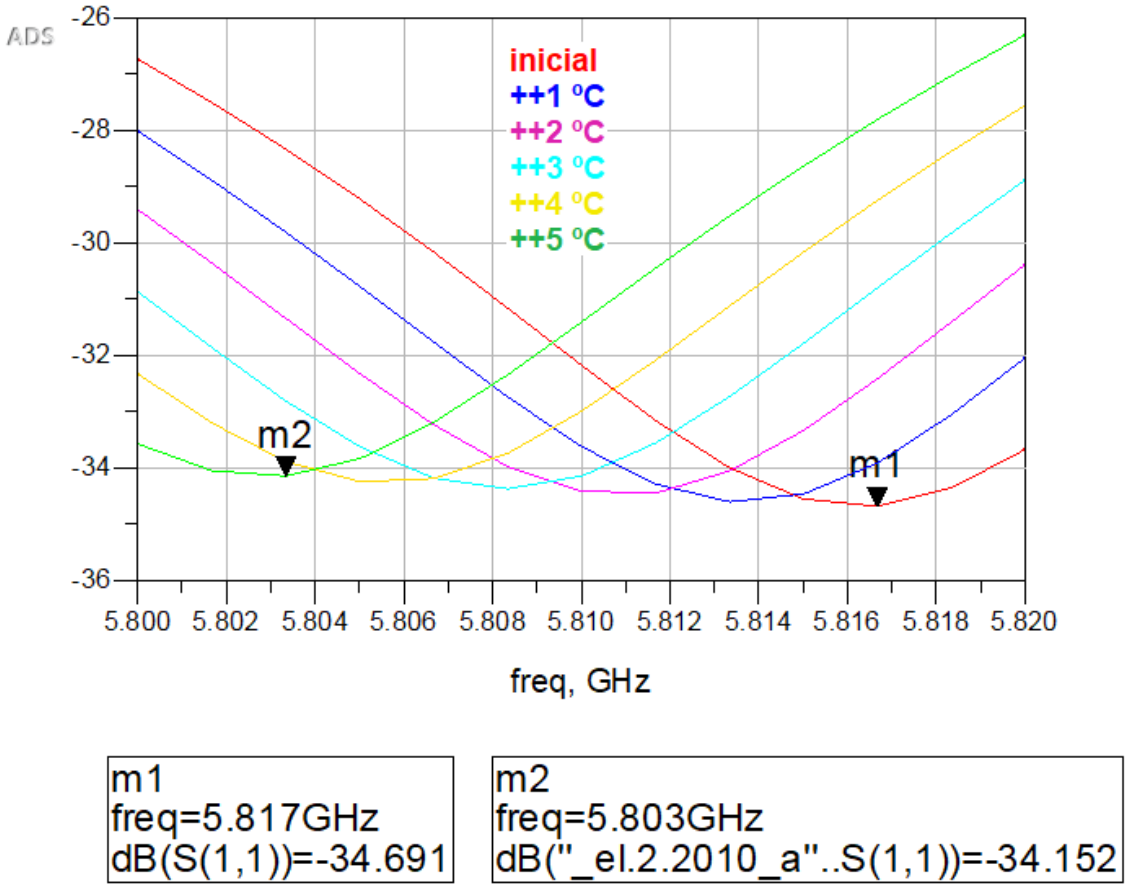


Figura 70. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura en pasos de 1ºC

La figura 70 denota que la antena también es sensible a los aumentos de temperatura en pasos de 1 ℃. Se ha resaltado el valor de la frecuencia de operación inicial de la antena y la que se obtiene para el mayor aumento que es de 5 ℃. Como se puede observar, el primero es de 5.817 GHz y el segundo de 5.803 GHz. La precisión se ve más comprometida, ya que los cambios de frecuencia son poco notorios en el orden de magnitud de los gigahercios.

La tabla siguiente indica los resultados obtenidos en la simulación:

Temperatura	inicial	++1 ℃	++2 ℃	++3 ℃	++4 ℃	++5 ℃
Frecuencia de operación	5.817 GHz	5.813 GHz	5.810 GHz	5.808 GHz	5.805 GHz	5.803 GHz

Figura 71. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación en (pasos de 1ºC)

5.4.2 Conclusiones

La antena-sensor ha demostrado su buena capacidad para detectar los cambios de temperatura. En este caso, se ha analizado en el espacio libre, despreciando el impacto que pudiera producir su ubicación sobre el cuerpo humano. Las simulaciones realizadas para aumentos en pasos de 5 ℃ han mostrado que la frecuencia de resonancia se reduce entre 12 y 14 MHz. Por su parte, cuando se le ha exigido mayor sensibilidad, en pasos de 1 ℃, también se han obtenido resultados aceptables. En este segundo caso, la frecuencia de operación se ha reducido entre 2 y 4 MHz. El estrecho rango de cambios de temperatura del cuerpo humano provoca variaciones muy pequeñas de la constante dieléctrica. Por tanto, aunque la antena-sensor podría ser válida para la detección de temperatura, cabe la duda de que pudiera hacerlo para pasos tan sutiles en aplicaciones de WBAN.

5.5 Rendimiento de la antena-sensor sobre fantasma corporal

Debido a que se pretende que la antena-sensor se utilice para detectar la temperatura corporal en aplicaciones de WBAN, es necesario estudiar el impacto al ubicarla en el cuerpo humano. Para ello, se reproducirá un fantasma en ADS con las propiedades eléctricas corporales. En las figuras 39 y 40 del punto 3.5, se pueden consultar el valor aproximado de la constante dieléctrica y la conductividad para los diferentes tejidos biológicos a 5.8 GHz.

- Piel (seca): ε_r= 37, σ= 3.7 S/m, tanδ=0.31 y h=1 mm.

- Grasa: ε_r= 5, σ=0.3 S/m, tanδ=0.186 y h=3 mm.
- Músculo: ε_r= 50, σ=5.1 S/m, tanδ=0.316 y h=10 mm.

El valor de la tangente de pérdidas se ha calculado directamente con la expresión 12 del punto 3.1.1.

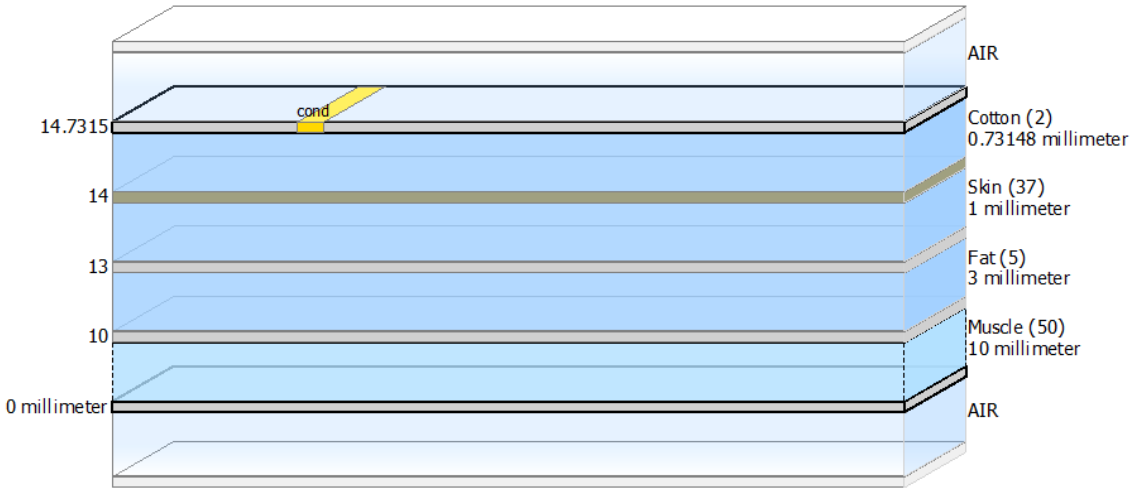


Figura 72. Sustrato de algodón sobre fantasma corporal (piel, grasa y músculo) [26]

5.5.1 Análisis de parámetros

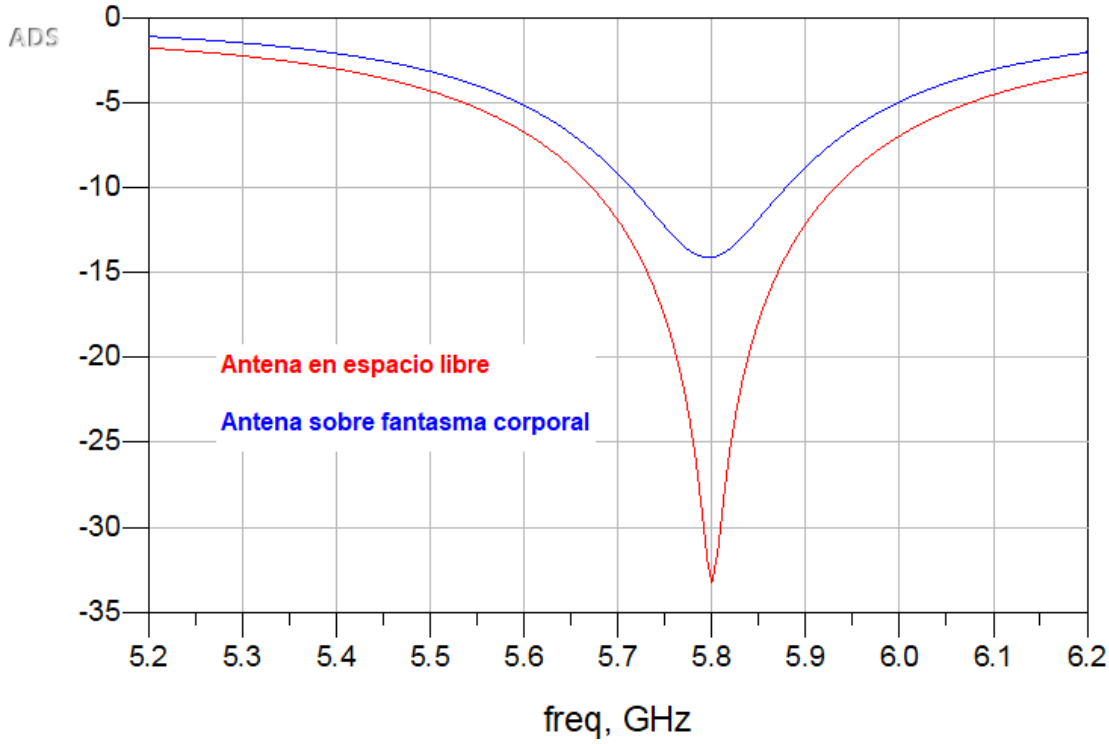


Figura 73. Gráfica del parámetro S11 en el espacio libre y sobre fantasma corporal

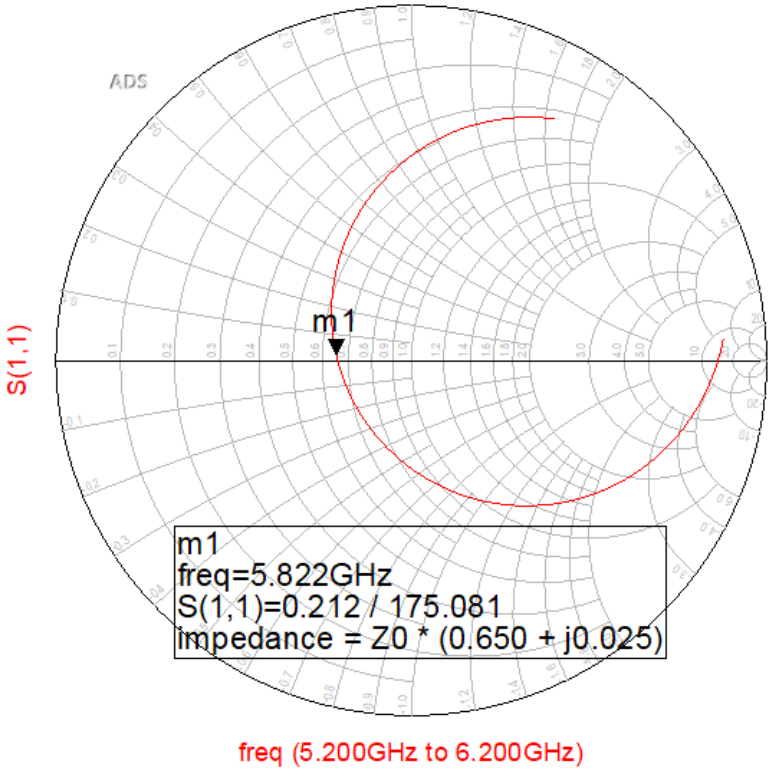


Figura 74. Impedancia de entrada con Carta de Smith obtenida sobre fantasma corporal

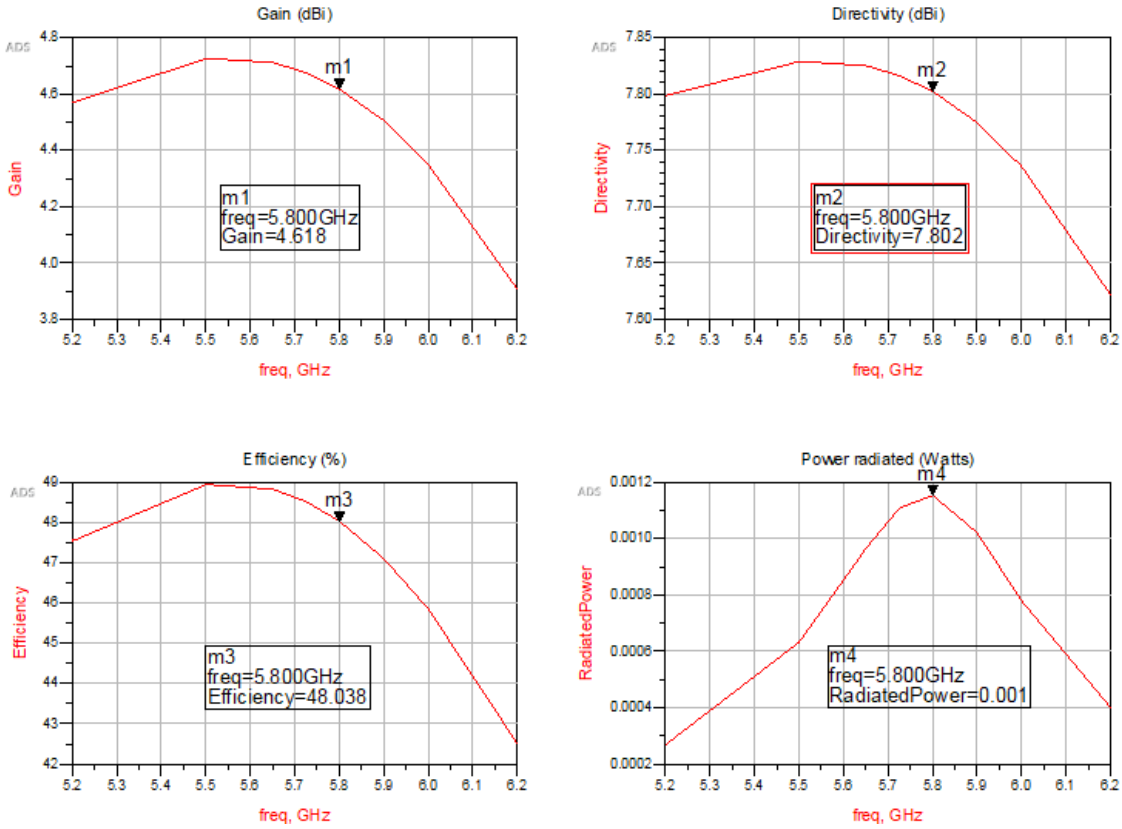


Figura 75. Representación gráfica de los parámetros de antena sobre fantasma corporal

Frequency (GHz)	5.8
Input power (Watts)	0.00240292
Radiated power (Watts)	0.0011543
Directivity(dBi)	7.80241
Gain (dBi)	4.61822
Radiation efficiency (%)	48.0376
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.000553798

Figura 76. Resumen de parámetros de antena sobre fantasma corporal

En la figura 73 se puede apreciar que la frecuencia de resonancia no sufre ninguna variación destacable y se mantiene en aproximadamente 5.8 GHz. Las pérdidas de retorno se quedan en tan solo en −14.1 dB, aunque sigue siendo un valor óptimo de funcionamiento. El ancho de banda a −10 dB disminuye hasta los 172 MHz. En la figura 74 se confirma que la adaptación de la impedancia de entrada sigue siendo buena, con un valor de reactancia casi nulo. En cuanto a las figuras 75 y 76, muestran que la directividad no se ve afectada, mientras que la eficiencia y ganancia han aumentado.

5.5.2 Simulaciones y resultados

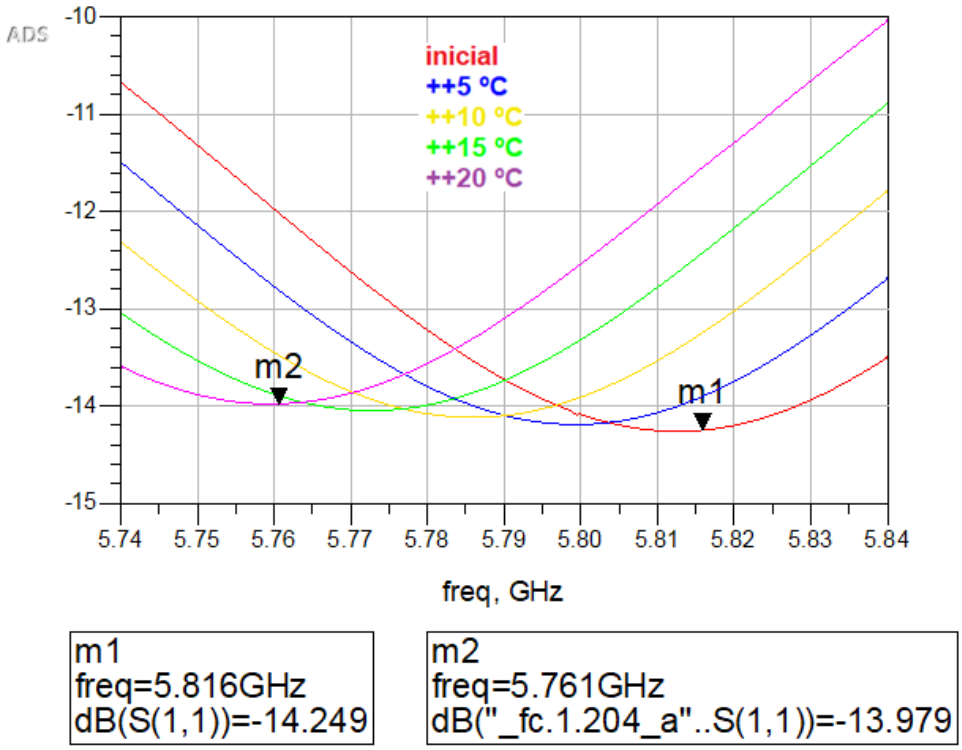


Figura 77. Parámetro S_{11} en función de la temperatura en (pasos de 5 ℃) sobre fantasma corporal

La tabla siguiente indica los resultados obtenidos en la simulación:

Temperatura	inicial	++5 ℃	++10 ℃	++15 ℃	++20 ℃
Frecuencia de operación	5.816 GHz	5.800 GHz	5.787 GHz	5.774 GHz	2.759 GHz

Figura 78. Resultados en la simulación para pasos de 5 ℃ sobre fantasma corporal

5.5.3 Conclusiones

En la figura 77 los resultados de la simulación verifican que la antena mantiene su capacidad de detectar los cambios de temperatura cuando se coloca sobre el cuerpo humano. Las modificaciones en la frecuencia de resonancia son del mismo orden que en el espacio libre. Si se comparan ambas simulaciones, para cambios de temperatura en pasos de 5 ℃, se hace notar que los picos del coeficiente de reflexión son menos agudos en esta última. Esto es consecuencia de que el fantasma corporal ha tenido un impacto negativo en el factor de calidad (Q) de la antena. En consecuencia, no se ha simulado el rendimiento para cambios de temperatura en pasos de 1 ℃, donde es necesario acotar demasiado el rango de frecuencias de estudio para observar las variaciones. Cabe añadir que este experimento no se puede considerar del todo satisfactorio, puesto que tal como se expuso en el punto 3.5, se esperaba que la frecuencia de resonancia original se desplazase levemente por el impacto del cuerpo humano.

6. Optimización de la antena-sensor mediante rediseño paramétrico

6.1 Presentación y rediseño

En el capítulo 5 se ha hecho patente la necesidad de mejorar la sensibilidad de la antena-sensor para poder detectar el estrecho rango de cambios de temperatura que se producen en el cuerpo humano. Por tanto, en este punto, se procederá a realizar un rediseño de la antena para operar a la frecuencia de 38 GHz, que sería compatible con posibles aplicaciones WBAN desplegadas sobre 5G. El motivo de elegir una frecuencia tan elevada es que el sistema será mucho más sensible a las pequeñas variaciones de la constante dieléctrica, puesto que su longitud eléctrica es mucho más corta.

Siguiendo el análisis numérico reseñado en el punto 5.1, se obtienen los siguientes parámetros de diseño:

- Dimensiones del parche de cobre: W=3.223 mm y L=2.7345 mm.
- Longitud de la línea de transmisión: l=1.4331 mm y ancho de 0.27 mm.
- Frecuencia de operación: fr=38 GHz.
- Impedancia característica: Z_0=50 Ω.
- Parámetros del sustrato: algodón con ε_r= 2, tanδ=0.02 y h=0.1579 mm.

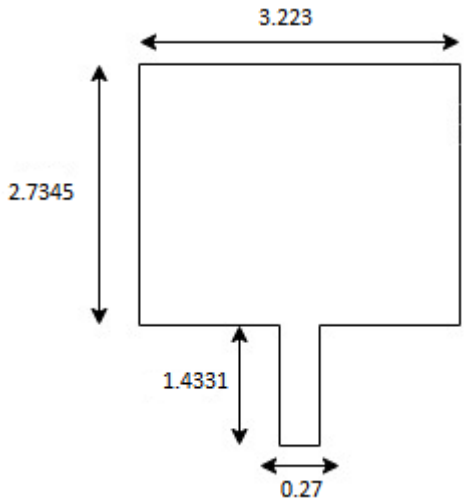


Figura 79. Dimensiones de la antena-sensor rediseñada (mm)

6.2 Simulaciones para el análisis de los parámetros de la antena rediseñada

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones.

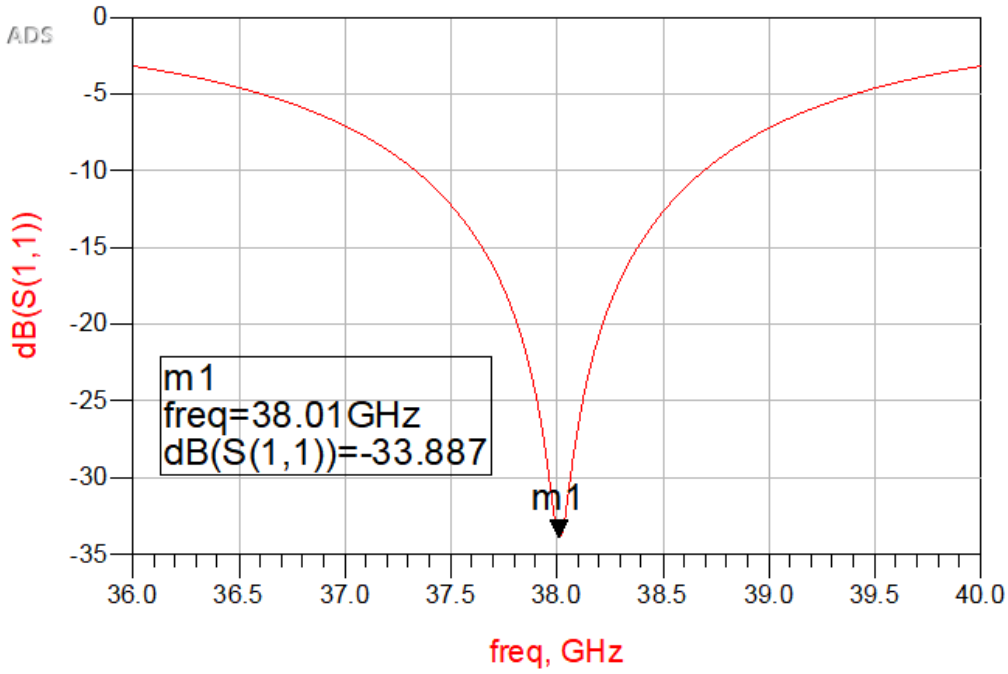


Figura 80. Gráfica del parámetro S11 obtenida en la simulación

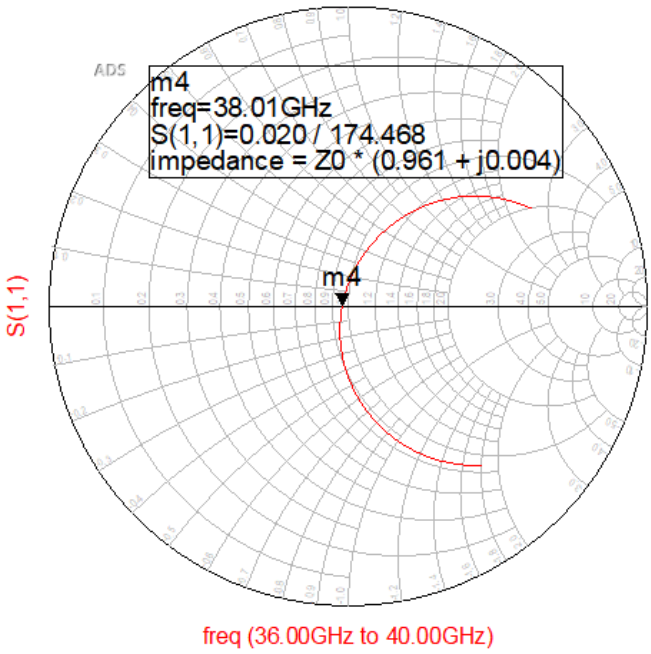


Figura 81. Impedancia de entrada con Carta de Smith obtenida en la simulación

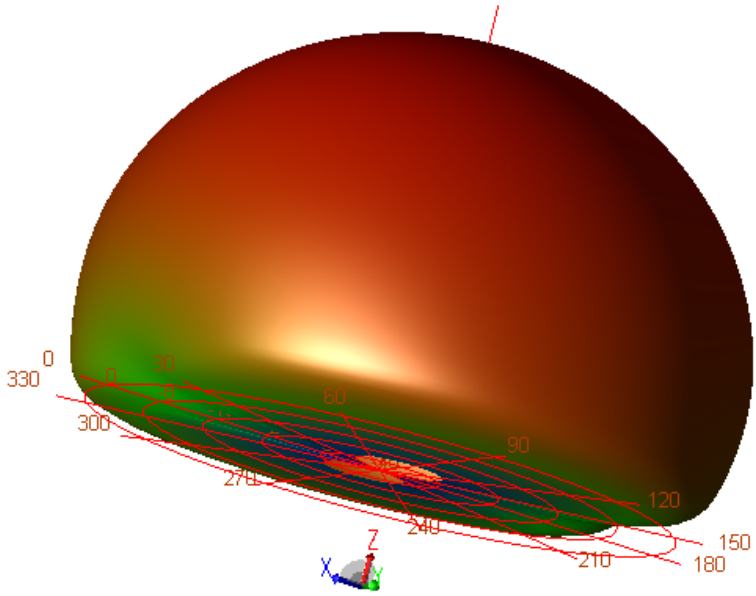


Figura 82. Diagrama de radiación en tres dimensiones

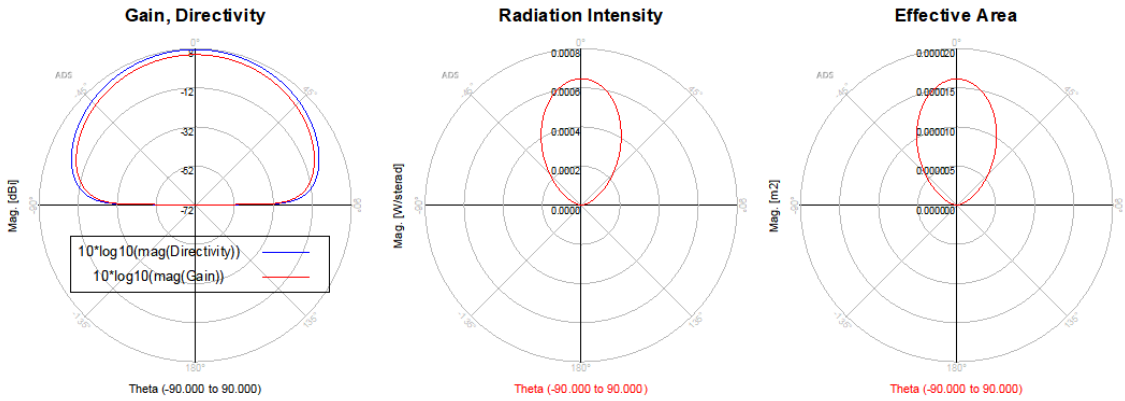


Figura 83. Diagramas bidimensionales de ganancia, radiación y área efectiva (plano ZX)

Frequency (GHz)	38
Input power (Watts)	0.00249889
Radiated power (Watts)	0.00136437
Directivity(dBi)	7.79011
Gain (dBi)	5.16198
Radiation efficiency (%)	54.5992

Figura 84. Resumen de parámetros de antena

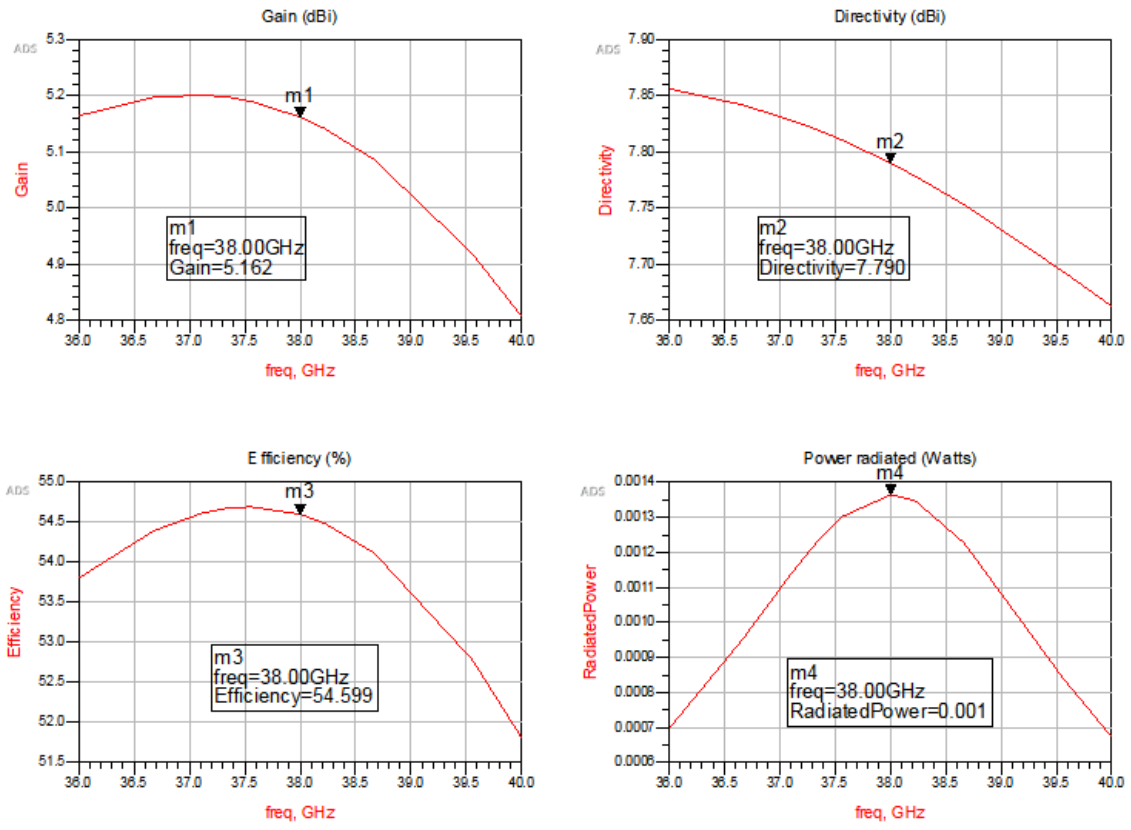


Figura 85. Representación gráfica de los parámetros de antena

La figura 80 muestra que a la frecuencia de operación de 38 GHz las pérdidas de retorno son de −33.89 dB y el ancho de banda a −10 dB es de 1.36 GHz. Luego, en la figura 81 se aprecia como en la impedancia de entrada la reactancia es prácticamente cero. Por su parte, en las figuras 82 y 83 se observa como los diagramas de ganancia, radiación y área efectiva son muy parecidos a los del diseño inicial que trabajaba en la frecuencia de 5.8 GHz. Por otro lado, en la figura 84 se presentan los parámetros principales de antena y en la 85 su comportamiento en el rango de estudio de 36 a 40 GHz. A la frecuencia de operación, la ganancia es de 5.16 dBi, la directividad de 7.8 dBi y la eficiencia de radiación de 54.6 %.

6.3 Rendimiento de la antena-sensor rediseñada

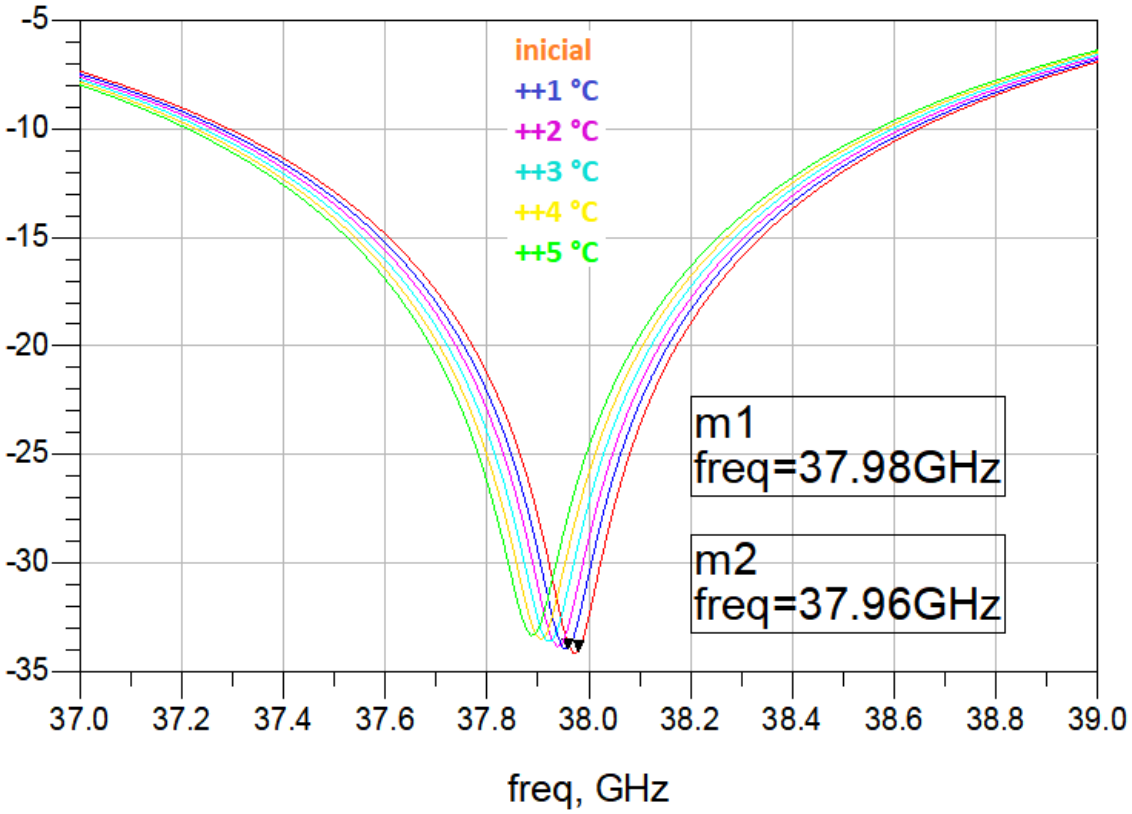


Figura 86. Cambios en el valor del parámetro S_{11} en función de la temperatura en pasos de 1 ℃

En la figura 86 se observa que la antena es sensible a los aumentos de temperatura en pasos de 1 ℃. Se ha resaltado el valor de la frecuencia de operación inicial de la antena y la que se obtiene para el primer aumento de 1 ℃. Tal como se aprecia, el primero es de 37.98 GHz y el segundo de 37.96 GHz. A continuación, en la tabla de la figura 87 se detalla el resultado obtenido.

Temperatura	inicial	++1 ℃	++2 ℃	++3 ℃	++4 ℃	++5 ℃
Frecuencia de operación	37.98 GHz	37.96 GHz	37.94 GHz	37.92 GHz	37.90 GHz	37.88 GHz

Figura 87. Resultados de la variación en la frecuencia de resonancia en la simulación en pasos de 1 ℃

6.4 Conclusiones y comparativa

Debido a que se pretende que la antena-sensor sea válida para la detección de temperatura corporal, en este capítulo se ha puesto a prueba su sensibilidad directamente para pasos de 1 ℃. Por otro lado, no se ha comprobado su eficacia sobre el fantasma corporal, puesto que en el punto 5.5 ya se verificó que el rendimiento del sistema en términos de sensibilidad no se veía afectado por este modelo.

En referencia a los resultados obtenidos en la antena-sensor optimizada, se ha comprobado que los aumentos de temperatura de 1 ℃ conllevan una reducción de la frecuencia de resonancia de 20 MHz. Este resultado mejora al que se obtuvo con la anterior antena que operaba a 5.8 GHz, donde la disminución oscilaba entre 2 y 4 MHz. Por tanto, se hace evidente que se ha perfeccionado la sensibilidad de la antena, resultando así ser una mejor opción para la detección de pequeñas variaciones de temperatura como las que ocurren en el cuerpo humano.

Por otro lado, a la frecuencia de operación la ganancia también es superior a la del diseño de 5.8 GHz, puesto que aumenta hasta los 5.16 dBi. Por su parte, la directividad se mantiene en 7.8 dBi y la eficiencia de radiación también se incrementa hasta el 54.6 %.

En definitiva, se ha logrado optimizar la antena-sensor mejorando su sensibilidad, su ganancia y su eficiencia de radiación. A continuación, se comparan las prestaciones de ambos diseños en la figura 88 de la siguiente página.

	Primer diseño propio	Diseño propio optimizado
Tipo de antena	Parche microstrip rectangular	Parche microstrip rectangular
Dimensiones parche	W=21.116 mm L=18.11 mm	W=3.223 mm L=2.7345 mm
Dimensiones línea transmisión	l=6.5985 mm ancho=1.7 mm	l=1.4331 mm ancho=0.27 mm
Sustrato	algodón: εr= 2, tanδ=0.02 y h=0.73148 mm	algodón: εr= 2, tanδ=0.02 y h=0.1579 mm
Frecuencia resonancia	5.8 GHz	38 GHz
Coeficiente de reflexión	−33.232 dB	−33.887 dB
Sensibilidad	entre 2 y 4 MHz para aumentos de 1 ℃	20 MHz para aumentos de 1 ℃
Ancho de banda a −10 dB	258 MHz	1.36 GHz
Ganancia	2.89 dBi	5.16 dBi
Directividad	7.8 dBi	7.8 dBi
Eficiencia de radiación	32.16 %	54.6 %

Figura 88. Tabla comparativa del primer diseño propio y el diseño optimizado

7. Conclusiones

7.1 Descripción

El recorrido que se ha realizado en este Trabajo de Final de Grado ha hecho posible que se adquieran notables conocimientos en el ámbito de las antenas que operan a la frecuencia de las microondas. Más concretamente, se ha podido comprender a fondo las antenas-sensor que devienen como una alternativa a los sistemas inalámbricos de detección de variables compuestos por un sensor que para transmitir necesita una antena acoplada.

La experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto ha resultado en la comprensión de que las antenas-sensor presentan ciertas ventajas que justifican el interés que han suscitado en la comunidad científica. Entre sus virtudes más destacables, se puede reseñar la menor complejidad de los circuitos implicados, su mayor facilidad de diseño y construcción, y su independencia del uso de baterías. Todo esto es gracias a que, tal como se ha comprobado, se puede utilizar una antena como sensor de una forma muy simple. Para ello, lo primero que se necesita es realizar un estudio de las variaciones que provocará la variable a detectar en la frecuencia de resonancia. Posteriormente, y una vez realizado este análisis previo, se puede conocer cuál ha sido el cambio que se produce en la variable de interés con una simple medición de la frecuencia de resonancia. En referencia a las antenas-sensor para detección de temperatura diseñadas, ha quedado demostrado que una forma de mejorar la sensibilidad es reduciendo las dimensiones de la antena para aumentar la frecuencia de resonancia. De esta forma, las pequeñas modificaciones que se producen en la constante dieléctrica provocan un desplazamiento más notorio en esta frecuencia de operación.

Por otro lado, en este proyecto se ha hecho notar que las ventajas de las antenas-sensor vienen también de la mano de los sustratos flexibles, como el papel o los textiles, que permiten obtener soluciones a coste muy bajo. Además, en la etapa de estudio del estado del arte ha quedado de manifiesto que las

técnicas de impresión electrónica facilitan enormemente la construcción de los modelos de antena estudiados. Por último, también es importante resaltar que las etapas con mayor contenido práctico del proyecto, donde se ha trabajado con el ADS, han resultado cruciales para aprender a manejar este potente *software* profesional de diseño y simulación.

En definitiva, se han logrado mayores conocimientos teóricos y prácticos en el área de los sistemas de alta frecuencia y se ha conseguido completar los objetivos que se plantearon al inicio. Asimismo, se ha seguido, con relativa fidelidad, la planificación de tareas que se estableció inicialmente sin que haya habido ningún incidente o modificación a destacar.

7.2 Líneas de trabajo futuras

Las líneas de trabajo futuras deberían enfocarse, principalmente, en la fabricación real de la antena. De esta forma, se podrían contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones, tanto los referidos a sus parámetros de antena como a las mediciones de su sensibilidad. Además, para utilizar un prototipo real de antena que funcione como sensor resulta indispensable realizar un estudio minucioso en laboratorio y en un entorno real. Esto es debido a que, como ha quedado patente, se debe conocer con precisión los cambios reales en su frecuencia de resonancia que provocan las variaciones en los valores de la variable de interés.

Por otro lado, teniendo en cuenta que la antena-sensor se ha diseñado para ubicarse sobre el cuerpo humano, resulta necesario estudiar el impacto que puede producir sobre el mismo. Se debe recordar que, si bien se ha intentado analizar la influencia del cuerpo en las prestaciones de la antena, ha quedado pendiente estudiar el efecto a la inversa. Por tanto, se deberían realizar las pruebas SAR para comprobar que no existe ninguna radiación por debajo del plano de masa de la antena que sobrepase los límites establecidos en la normativa de la Unión Europea.

Para terminar, se debe tener en cuenta que el diseño final es una antena-sensor que opera a una frecuencia muy alta de 38 GHz. Por consiguiente, trabajar en este rango tan elevado presente varios inconvenientes que no se han abordado en este proyecto. Por ende, se hace necesario encarar estos desafíos para para resolver cuestiones como las pérdidas que podría sufrir el dieléctrico.

Glosario

Advanced Design System (ADS) *m* Sistema de *software* de automatización de diseño electrónico y simulación producido por Keysight EEsof EDA.

antena de parche microstrip *f* Antena de tipo parche alimentada mediante una línea microstrip que está compuesta por un plano de masa, un sustrato dieléctrico y un parche metálico.

antena-sensor *f* Antena que funciona como sensor, al mismo tiempo que lo hace como transmisor inalámbrico.

frecuencia de resonancia *f* En una antena, frecuencia donde las reactancias capacitivas e inductivas se cancelan entre sí. En este punto, la antena parece puramente resistiva y su radiación es máxima. También se le conoce como frecuencia de operación o frecuencia de trabajo.

inkjet printing *m* Tecnología de impresión por inyección de tinta, técnica de impresión electrónica ampliamente utilizada en la fabricación de circuitos de microondas.

sustrato flexible *m* En el ámbito de la electrónica, sólido plano flexible donde se integran los componentes del circuito.

Bibliografía

1. H. Saghlatoon, R. Mirzavand, M. M. Honari y P. Mousavi. Sensor Antenna Transmitter System for Material Detection in Wireless-Sensor-Node Applications. *IEEE Sensors Journal.* [En línea] 1 de noviembre de 2018. https://ieeexplore.ieee.org/document/8451887.

2. Mingsheng Ma, Hareem Khan, Wei Shan, Yichao Wang, Jian Zhen Ou, Zhifu Liu, Kourosh Kalantar-zadeh y Yongxiang Li. A novel wireless gas sensor based on LTCC technology. [En línea] febrero de 2017. https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.073.

3. GARCÍA CANTÓN, Jesús. *Sensors químics sense fils tipus LC basats en estructures capacitives d'efecte camp.* [En línea] Barcelona : Tesis doctoral presentada en la Universitat Autònoma de Barcelona (UAM), 2010. https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=HMjXH8SlS%2Fg%3D.

4. ANDÚJAR LINARES, Aurora y ANGUERA PROS, Jaume. *Antenas planas: ranuras y antenas microstrip.* [En línea] Barcelona : UOC, (s/f). http://materials.cv.uoc.edu.biblioteca-uoc.idm.oclc.org/daisy/Materials/PID_00258371/pdf/PID_00258371.pdf.

5. Huang, H. Flexible Wireless Antenna Sensor: A Review. *IEEE Sensors Journal.* [En línea] octubre de 2013. https://ieeexplore.ieee.org/document/6419748.

6. I. I. Labiano and A. Alomainy. Fabric Antenna for Temperature Sensing over ISM Frequency Band. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting.* [En línea] 2019. https://ieeexplore.ieee.org/document/8888610.

7. A. Bouchalkha and R. Karli. Planar Microstrip Antenna Sensor for pH Measurements. *2019 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA).* [En línea] 2019. https://ieeexplore.ieee.org/document/8959701.

8. C. Su and H. Wu. An Antenna Sensor to Identify Finger Postures. *2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE).* [En línea] 2019. https://ieeexplore.ieee.org/document/8942774.

9. B. Moradi, R. Fernández-García and I. Gil. Textile wearable antenna sensors based on open ring resonators. *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018).* [En línea] 2018. https://ieeexplore.ieee.org/document/8568826.

10. ESCOBEDO ARAQUE, Pablo. *Printed sensor systems on flexible substrate.* [En línea] Granada : Tesis doctoral presentada en la Universidad de Granada, 2018. http://hdl.handle.net/10481/53813.

11. S. Khan, L. Lorenzelli y R. S. Dahiya. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal.* [En línea] junio de 2015. https://ieeexplore.ieee.org/document/6974982.

12. *Madell Tecnhology Corporation.* [En línea] [Citado el: 03 de 04 de 2020.] http://www.madelltech.com/QSY3401.html.

13. *BeiJing TORCH.* [En línea] [Citado el: 03 de 04 de 2020.] http://es.torchsmt.com/Impresora-manual-de-la-pantalla-de-la-alta-precisi%26oacute%3Bn-T1000-pd63900.html.

14. *Easy Print.* [En línea] [Citado el: 03 de 04 de 2020.] https://www.printermaker.com/Mini-Flat-Screen-Printing-Machine-with-T-solt-Worktable-p.html.

15. S. Kim, R. Vyas, A. Georgiadis, A. Collado and M. M. Tentzeris. Inkjet-printed RF energy harvesting and wireless power trasmission devices on paper substrate. *2013 European Microwave Conference.* [En línea] 2013. https://ieeexplore.ieee.org/document/6686824.

16. ANTA FÉLIX, Ángel. *Diseño de antenas RFID en sustrato de papel.* [En linea] Barcelona : Trabajo final de grado: UOC, 2020. http://hdl.handle.net/10609/107126.

17. B. M. Nikolova, G. T. Nikolov, E. E. Gieva and I. N. Ruskova. Functional Inks for Inkjet Printed Sensors. *2018 IX National Conference with International*

Participation (ELECTRONICA). [En línea] 2018. https://ieeexplore.ieee.org/document/8439600.

18. S.Merilampi, T.Laine-Ma y P.Ruuskanen. The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates. [En línea] julio de 2009. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2009.04.004.

19. M. POZAR, DAVID. *Microwave Engineering.* s.l. : John Wiley & Sons Inc., 2011. ISBN 978-0-470-63155-3.

20. EL BOUCHTI, Mohamed. *Diseño y Medición de una Antena Wearable.* [En linea] Barcelona : Trabajo final de grado: UPC, 2016. http://hdl.handle.net/2117/106668.

21. ANGUERA, Jaume y PÉREZ, Antonio. *Teoría de antenas.* Universidad Ramón Llull : Ingeniería La Salle (Estudios Semipresenciales), 2008.

22. M. M. U. Rashid, L. C. Paul, A. Bouazizi, R. Sen, B. Podder and A. K. Sarkar. Effect of human body on an 800 MHz inset fed rectangular microstrip patch antenna characteristics. *2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE).* [En línea] 2017. https://ieeexplore.ieee.org/document/7913000.

23. A. Bouazizi, G. Zaibi, M. Samet and A. Kachouri. Parametric study on the dielectric properties of biological tissues. *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA).* [En línea] 2015. https://ieeexplore.ieee.org/document/7505138.

24. al., J. G. Hester et. Additively Manufactured Nanotechnology and Origami-Enabled Flexible Microwave Electronics. *Proceedings of the IEEE,.* [En línea] abril de 2015. https://ieeexplore.ieee.org/document/7110429.

25. JIMÉNEZ MARTÍN, Jose Luis; RODRÍGUEZ MARTÍN, José María y GONZÁLEZ POSADAS, Vicente. Procedimiento de Diseño y Realización de Antenas de Parche en Tecnología Microstrip. *Revista IAC del Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid.* [En línea] 26 de noviembre de 2011. http://polired.upm.es/index.php/iac/article/view/1762/1774.

26. Xiaoyou Lin, B. Seet and F. Joseph. Fabric antenna with body temperature sensing for BAN applications over 5G wireless systems. *2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST).* [En línea] 2015. https://ieeexplore.ieee.org/document/7438467.