

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electrónica y Computación

Diseño y simulación de rendimiento de una antena doblada de grafeno para emplearse sobre un torso humano.

INGE-2862

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presentado por:

José Fernando Briones Bitar

Paul André Plúa Plúa

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto es en agradecimiento profundo a Dios, por ser mi guía constante y por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida con fortaleza, sabiduría y esperanza. A mis padres, Clark y Amanda, por su amor incondicional, su ejemplo incansable y por haberme enseñado que los sueños se alcanzan con esfuerzo y dedicación. A mis hermanos, Geovanny y Renato quienes han sido mi compañía y apoyo en cada paso de este camino. A mis amigos, por estar presentes en los momentos buenos y en los desafíos, por sus palabras de aliento y su compañía constante. En especial, a Nina García y Andrés Romero, cuyo apoyo ha sido un pilar fundamental en la culminación de esta etapa. A cada persona que, de una u otra forma, aportó a este proceso: gracias por creer en mí y caminar conmigo hacia esta meta.

Este proyecto de materia integradora lo dedico a mi familia, mis padres Edgar y Roggina, quienes durante estos años de estudio fueron el principal motor para este reto tan grande y formación para mi vida profesional; a mis hermanos Daniel y Josué, quienes fueron los primeros en darme su ejemplo y apoyo incondicional para superar cada obstáculo. A los compañeros de aula, quienes se convirtieron en amigos, que estuvieron a mi lado y ahora llamarlos colegas es un verdadero honor. A mis profesores y tutores que con su sabiduría lograron formar a un profesional, en especial a Francisco Pardo Segovia y Patricia Chávez quienes dieron forma y un sentido a este proyecto. Y al más importante, Dios, el autor e inspirador de todo esto.

Declaración Expresa

Yo/Nosotros José Fernando Briones Bitar y Paul André Plúa Plúa acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de Mayo del 2025.

Autor 1

Autor 2

Evaluadores

Ph.D. Patricia Ximena Chávez Burbano

Profesor de Materia

Ph.D. Juan Carlos Avilés Castillo

Tutor de proyecto

Resumen

El presente trabajo aborda el diseño y simulación del rendimiento de una antena doblada de grafeno destinada a aplicaciones en tecnologías inalámbricas, específicamente en el ámbito de comunicación WiFi. El objetivo principal consiste en analizar la viabilidad de integrar materiales bidimensionales con propiedades eléctricas superiores en estructuras radiantes flexibles, bajo la hipótesis de que el grafeno, por su elevada conductividad y flexibilidad mecánica, permite optimizar la eficiencia y estabilidad de sistemas de transmisión en entornos cercanos al cuerpo humano. El desarrollo del proyecto se efectuó mediante herramientas avanzadas de simulación electromagnética, en las que se modelaron las características geométricas de la antena, se consideraron parámetros dieléctricos equivalentes a tejidos biológicos y se aplicaron criterios normativos internacionales relacionados con la exposición a radiación electromagnética. Los resultados obtenidos evidenciaron un desempeño estable en la banda de operación seleccionada, con una ganancia favorable, adecuada adaptación de impedancia y valores de SAR dentro de los límites permitidos, lo cual respalda la hipótesis planteada. En conclusión, se determina que la antena doblada de grafeno constituye una alternativa técnica viable y de alto potencial para aplicaciones futuras en sistemas inalámbricos de corto alcance como WiFi.

Palabras clave: Antena flexible, grafeno, simulación electromagnética, WiFi.

Abstract

This work addresses the design and performance simulation of a folded graphene antenna intended for applications in wireless technologies, specifically within the WiFi communication domain. The main objective is to analyze the feasibility of integrating two-dimensional materials with outstanding electrical properties into flexible radiating structures, under the hypothesis that graphene, due to its high conductivity and mechanical adaptability, enhances the efficiency and stability of transmission systems operating in proximity to the human body. The project was developed through advanced electromagnetic simulation tools, in which the antenna's geometric features were modeled, dielectric parameters equivalent to biological tissues were considered, and international regulatory criteria regarding electromagnetic radiation exposure were applied. The obtained results demonstrated stable performance within the selected operating band, with favorable gain, appropriate impedance matching, and specific absorption rate (SAR) values within permissible limits, thus supporting the proposed hypothesis. In conclusion, the folded graphene antenna is determined to be a technically viable and highly promising alternative for future applications in short-range wireless systems such as WiFi.

Keywords: Flexible antenna, graphene, electromagnetic simulation, WiFi.

Índice general

Resumen	I
Abstract.....	II
Índice general	III
Abreviaturas	IV
Simbología.....	V
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VI
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1. Descripción del Problema	4
1.2. Justificación del Problema	6
1.3. Objetivos	7
1.4. Marco teórico.....	8
Capítulo 2.....	12
2. Metodología	13
2.1. Fase I: Revisión y Caracterización Preliminar	14
2.2. Fase II: Diseño y Simulación con Ansys Electronics	15
2.3. Fase III: Evaluación de Desempeño y Viabilidad	17
Capítulo 3.....	18
3. Resultados y análisis	19
3.1. Evaluación sobre material textil: algodón	20
3.2. Comparación general y análisis de desempeño	35
Capítulo 4.....	38
4. Conclusiones y recomendaciones.....	39
4.1. Conclusiones	39
4.2. Recomendaciones	40
Referencias.....	42

Abreviaturas

CIDNA Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología

CPW Coplanar Waveguide

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

HFSS High Frequency Structural Simulator

SAR Specific Absorption Rate

SNR Signal to Noise Ratio

VSWR Voltage Standing Wave Ratio

WiFi Wireless Fidelity

Simbología

dB	Decibelio
GHz	Gigahercios
kg	Kilogramo
m	Metro
MHz	Megahercios
mm	Milímetro
mV	Milivoltio
W	Watts

Índice de figuras

Figura 2.1 Metodología aplicada en el proyecto.....	13
Figura 3.1 Antena tipo parche rectangular plana	20
Figura 3.2 S11 antena rectangular plana en el vacío.....	21
Figura 3.3 Ganancia antena rectangular plana en el vacío.....	22
Figura 3.4 VSWR antena rectangular plana en el vacío	22
Figura 3.5 Eficiencia normalizada antena rectangular plana en el vacío.....	23
Figura 3.6 Patrón de radiación antena rectangular plana en el vacío.....	23
Figura 3.7 Antena rectangular plana sobre torso humano	24
Figura 3.8 S11 de antena rectangular sobre torso humano	25
Figura 3.9 Ganancia antena rectangular plana sobre torso humano	25
Figura 3.10 VSWR de antena rectangular sobre torso humano.....	26
Figura 3.11 Eficiencia antena rectangular plana sobre torso humano	26
Figura 3.12 Antena tipo parche rectangular con curvatura sin torso	27
Figura 3.13 S11 antena rectangular con curvatura en el vacío	28
Figura 3.14 Ganancia antena rectangular con curvatura en el vacío	29
Figura 3.15 Eficiencia normalizada antena rectangular con curvatura en el vacío.....	29
Figura 3.16 Patrón de radiación antena rectangular con curvatura en el vacío	30
Figura 3.17 Antena con curvatura sobre phantom multilayer del torso humano.....	30
Figura 3.18 S11 antena rectangular con curvatura en torso.....	31
Figura 3.19 Ganancia de la antena con curvatura en torso	32
Figura 3.20 VSWR antena rectangular con curvatura en torso.....	32
Figura 3.21 Eficiencia normalizada antena con curvatura en torso	33
Figura 3.22 Patrón de radiación antena con curvatura sobre torso	34
Figura 3.23 SAR de antena rectangular	35

Índice de tablas

Tabla 3.2 Tabla de resultados en algodón.....	36
--	----

Capítulo 1

1. Introducción

El desarrollo de tecnologías portátiles ha cobrado un impulso significativo en los últimos años debido a su potencial de integración en la medicina, el entretenimiento, la industria y la automatización. En este contexto, las prendas inteligentes, aquellas que incorporan dispositivos capaces de comunicarse de forma inalámbrica, se han posicionado como una solución innovadora y multifuncional para diversas aplicaciones. Un componente fundamental para el funcionamiento de estas prendas es la antena, la cual debe ser no solo eficiente en su desempeño electromagnético, sino también flexible, ligera y capaz de operar en condiciones variables.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar una antena flexible que opere eficientemente en la banda de 5 GHz, lo cual es fundamental para aplicaciones WiFi modernas. Además de ofrecer un ancho de banda adecuado, la antena debe ser capaz de mantener su rendimiento cuando se coloca sobre superficies irregulares, como el torso humano (Liu, Salama, & Shamim, 2015). Esta capacidad es esencial para facilitar la expansión y fiabilidad de las tecnologías inalámbricas integradas en textiles, abriendo nuevas posibilidades en sectores como la salud, el deporte, la defensa y la industria manufacturera.

La ausencia de antenas adaptadas limita significativamente el desarrollo tecnológico, dificultando la implementación de soluciones portátiles que requieren comunicación en tiempo real. Por lo tanto, existe una necesidad creciente de soluciones que combinen eficiencia electromagnética con características mecánicas como la flexibilidad, la miniaturización y la resistencia al desgaste por uso continuo. Además, es vital considerar parámetros de diseño como el consumo energético, la durabilidad de la batería, la tasa de transmisión de datos, la fiabilidad del enlace inalámbrico y la inmunidad a interferencias externas.

Las investigaciones actuales apuntan hacia el uso de materiales textiles como sustratos de antenas, ya sea mediante fibras conductoras o tejidos convencionales tratados con materiales altamente conductivos que permiten la implementación de técnicas de nanofabricación (Sazonov & Neuman, 2014; Kiourtzi & Nikita, 2012). Un ejemplo representativo de esta tendencia son los sensores integrados en ropa que permiten el monitoreo remoto de parámetros fisiológicos, generando datos útiles para diagnósticos médicos a distancia.

Para que estas tecnologías funcionen de manera segura y eficaz, es necesario evaluar patrones de radiación y niveles de absorción de energía por parte del cuerpo humano. Además, las propiedades electromagnéticas del textil, como su constante dieléctrica, su capacidad de absorción y su comportamiento frente a la flexión, deben considerarse cuidadosamente durante el diseño. También es importante evaluar el impacto de factores externos, como la humedad y la temperatura, que podrían degradar el rendimiento del sistema (Hall & Hao, 2006; Salonen & Rahmat-Samii, 2007; Hertleer, Rogier, Vallozzi, & Van Langenhove, 2009).

Una antena portátil debe ser construida a partir de materiales conductores de alta eficiencia y dieléctricos de baja pérdida. En este sentido, el grafeno ha emergido como un candidato prometedor gracias a su alta conductividad, resistencia mecánica y flexibilidad. Este material puede utilizarse tanto como elemento radiante principal como en configuraciones híbridas que combinan grafeno con otras estructuras, como antenas de parche con extensiones tipo “stub” (Geim & Novoselov, 2007; Lee, Wei, Kysar, & Hone, 2008). Asimismo, se han explorado tecnologías como las líneas de onda coplanar (CPW), que permiten el diseño de antenas flexibles adaptadas a sustratos textiles, demostrando un buen desempeño en entornos cercanos al cuerpo humano y bajo condiciones de flexión (Mishra, Singh, & Yadav, 2020).

Estudios recientes, como el realizado por Ibáñez Labiano, Sanz-Izquierdo, Batchelor y García-Alloza (2021), han demostrado que es posible sintetizar grafeno multicapa mediante deposición química de vapor (CVD) sobre láminas de níquel de 50 µm de grosor. En este experimento se probaron dos tipos de sustratos: una lámina delgada de microfibra de vidrio recubierta con tela de algodón, lo que ayudó a evitar posibles cortocircuitos. Las simulaciones y pruebas experimentales indicaron que la antena es capaz de operar en el rango de 2.45 a 8 GHz, con una ganancia de 2.83 dBi a 3 GHz, lo que demuestra su viabilidad en aplicaciones de tecnología portátil.

Este proyecto se enmarca en esta línea de investigación emergente, proponiendo el diseño y la evaluación de una antena flexible basada en grafeno, optimizada para operar en la banda de 5 GHz. Se analizará su comportamiento sobre superficies irregulares y su integración en textiles, considerando no solo parámetros técnicos, sino también la viabilidad para futuras implementaciones en productos comerciales. Esta iniciativa responde a una necesidad tecnológica transversal que puede tener un impacto positivo en múltiples sectores del sistema productivo, abriendo la puerta a nuevas aplicaciones de la tecnología vestible.

1.1. Descripción del Problema

El rápido progreso de la innovación de la ropa ha alentado la creación de dispositivos electrónicos entrelazados en telas con usos en salud, defensa, industria, diversión y deportes (Sazonov & Neuman, 2014). En esta área, un problema técnico clave es crear antenas que no solo sean efectivas, sino también adaptables y útiles cuando están unidas a superficies desiguales como el cuerpo humano (Hall & Hao, 2006; Salonen & Rahmat-Samii, 2007). El requisito de una antena funcional en el rango de 5 GHz, con un ancho suficiente para las redes WiFi y un rendimiento

confiable a pesar de los cambios físicos y el contacto cercano con el cuerpo, indica un déficit tecnológico significativo (Liu, Salama, & Shamim, 2015).

Hoy en día, numerosos sistemas de comunicación en ropa inteligente se basan en antenas inflexibles o parcialmente flexibles que no se ajustan a los contornos corporales, lo que lleva a una funcionalidad deficiente, aumenta las pérdidas de señal y genera riesgos asociados a la radiación absorbida por los tejidos humanos (Hertleer et al., 2009). Además, la falta de flexibilidad reduce la vida útil del sistema ante el uso diario y limita la integración armónica del hardware con los textiles, lo cual es fundamental para la comodidad y aceptación del usuario final (Kiourtzi & Nikita, 2012).

Esta iniciativa, creada junto con el Centro Ecuatoriano de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología (CIDNA ESPOL), busca resolver esta problemática mediante el diseño de una antena flexible que opere de manera eficiente en la banda de 5 GHz y que pueda integrarse en prendas de vestir inteligentes. El CIDNA ESPOL es una unidad de investigación especializada en materiales avanzados y nanotecnología aplicada, que impulsa proyectos con impacto directo en la salud, la industria electrónica y las telecomunicaciones en el Ecuador y la región. Su experiencia en el desarrollo de soluciones tecnológicas con base en nanomateriales, como el grafeno, proporciona un marco sólido para llevar a cabo este proyecto con rigor científico y orientación aplicada (Geim & Novoselov, 2007).

El diseño sugerido tiene en cuenta necesidades importantes: debe poseer un patrón de radiación estable, ganancia aceptable, buena adaptación de impedancia y baja tasa de absorción específica (SAR), incluso bajo condiciones de flexión o cercanía con el cuerpo humano (Hall & Hao, 2006; Mishra, Singh, & Yadav, 2020). Asimismo, la antena debe ser compatible con procesos

de fabricación textil y mantenerse operativa en un entorno variable como el que ofrecen las prendas de vestir, considerando restricciones mecánicas, térmicas y electromagnéticas.

Durante el desarrollo, es crucial monitorear y registrar lo siguiente: la eficiencia de radiación, el ancho de banda, la ganancia, el nivel de distorsión del patrón de radiación bajo flexión, y la tasa de absorción en el cuerpo humano. Estos factores se pueden evaluar a través de simulaciones electromagnéticas y experimentos prácticos, lo que hace que el problema sea susceptible de observación, medición y análisis técnico (Ibáñez Labiano et al., 2021).

Resolver este problema es crucial y pertinente, ya que permite la creación de soluciones tecnológicas prácticas para el uso real en áreas económicas clave. En la atención médica, por ejemplo, la incrustación de antenas efectivas en las prendas puede facilitar el seguimiento de pacientes vivos (Kiourtzi & Nikita, 2012). En el campo, puede ayudar a monitorear a los trabajadores en entornos peligrosos o participar con sistemas computarizados. Si no se cumple este requisito, el crecimiento y la expansión de la nueva tecnología que utiliza señales inalámbricas tejidas en telas está restringida (Sazonov & Neuman, 2014).

1.2. Justificación del Problema

El desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica integrados en textiles plantea desafíos técnicos significativos, especialmente en lo que respecta al rendimiento de las antenas cuando están en contacto directo con el cuerpo humano. Las antenas tradicionales, al ser rígidas o poco adaptables, presentan pérdidas considerables de energía, distorsión en sus patrones de radiación y desadaptación de impedancia cuando se someten a flexión o cuando operan en cercanía con tejidos biológicos. Estas condiciones afectan la eficiencia de transmisión, comprometen la fiabilidad del enlace inalámbrico y limitan la vida útil del sistema en aplicaciones portátiles.

El presente proyecto propone una solución a esta problemática mediante el diseño de una antena flexible que opere eficientemente en la banda de 5 GHz, con capacidad para integrarse en textiles inteligentes y mantener un desempeño electromagnético estable bajo condiciones de uso real. Esta tecnología es fundamental en campos como la telemedicina, el monitoreo fisiológico remoto y la defensa, donde una transmisión continua, confiable y de alta calidad es crítica para la toma de decisiones en tiempo real.

Uno de los beneficios añadidos del proyecto es su capacidad para incorporar sistemas de geolocalización, lo que permite rastrear la ubicación del usuario en tiempo real. Esta funcionalidad es particularmente valiosa en contextos como la atención médica de emergencia, el monitoreo de pacientes con enfermedades crónicas o neurodegenerativas, la seguridad de trabajadores en entornos peligrosos o de difícil acceso, y el seguimiento en actividades deportivas. La combinación de comunicación inalámbrica eficiente y georreferenciación amplía las posibilidades de aplicación de las prendas inteligentes, convirtiéndolas en herramientas activas para la prevención, intervención y respuesta rápida.

Asimismo, al estar alineada con las necesidades tecnológicas del país y de la región, esta iniciativa representa una oportunidad estratégica para fortalecer el ecosistema de innovación nacional. Su impacto se proyecta no solo en términos de avance científico, sino también en el bienestar social, al facilitar una atención personalizada, remota y continua, mejorando significativamente la calidad de vida de los usuarios.

1.3. Objetivos

Se presentan los objetivos generales y específicos, que orientan el desarrollo del presente trabajo, en función de su propósito central y alcance previsto.

1.3.1. *Objetivo general*

Diseñar una antena doblada de grafeno para usarse sobre un torso humano.

1.3.2. *Objetivos específicos*

1. Obtener una antena con frecuencia de resonancia cercana a 5GHz, maximizando el ancho de banda.
2. Simular el rendimiento de la antena en términos de pérdida de retorno y la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR).
3. Comparar el desempeño electromagnético de una antena de grafeno plana frente a una antena de grafeno con doblez, mediante simulaciones y mediciones experimentales en la banda de 5 GHz.

1.4. Marco teórico

La tecnología vestible, o *wearable*, ha emergido como una solución integral para múltiples sectores, incluyendo el médico, militar, deportivo e industrial. Esta tecnología implica la integración de dispositivos electrónicos en prendas de vestir para recolectar, transmitir o procesar datos en tiempo real. Según Sazonov y Neuman (2014), los dispositivos vestibles permiten una monitorización continua sin interferir con las actividades diarias del usuario, lo que ha sido especialmente útil en el monitoreo remoto de parámetros fisiológicos.

Para que estos sistemas funcionen, es indispensable la comunicación inalámbrica eficiente, lo cual requiere el diseño e integración de antenas dentro de los tejidos. Este tipo de integración presenta desafíos técnicos, como la necesidad de mantener eficiencia electromagnética pese a la flexión, estiramiento o la cercanía con el cuerpo humano. Las antenas utilizadas en prendas deben

ser ligeras, flexibles, de bajo perfil, y mantener buena adaptación de impedancia incluso bajo deformaciones mecánicas (Hall & Hao, 2006).

En el ámbito de la teoría electromagnética, el diseño de antenas portátiles exige la evaluación de parámetros clave como el coeficiente de reflexión, también conocido como parámetro S_{11} , que indica la cantidad de energía reflejada de vuelta hacia la fuente. Un valor de S_{11} inferior a -10 dB suele considerarse aceptable, pues implica que al menos el 90 % de la energía es radiada o transferida (Balanis, 2016). También se debe analizar la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR), que mide la eficiencia de acoplamiento entre la antena y su línea de transmisión. Un valor de VSWR cercano a 1:1 indica una buena adaptación de impedancia y mínima reflexión.

Otro parámetro fundamental es la ganancia de la antena, que indica la capacidad de concentrar la radiación en una dirección específica. Junto a esto, la eficiencia de radiación, que se ve afectada por las pérdidas resistivas y dieléctricas del material, es esencial para determinar el rendimiento general. En aplicaciones cercanas al cuerpo humano, la absorción de energía debe evaluarse mediante la tasa de absorción específica (SAR), que refleja cuánta energía electromagnética es absorbida por los tejidos biológicos y debe mantenerse por debajo de los límites recomendados para evitar riesgos a la salud (Kiourtzi & Nikita, 2012).

La presencia del cuerpo humano introduce distorsión en el patrón de radiación y puede alterar la impedancia de entrada de la antena, por lo que se vuelve crucial realizar simulaciones que contemplen condiciones reales de uso. Salonen y Rahmat-Samii (2007) destacaron que estos efectos pueden agravarse por factores ambientales como la humedad, la sudoración o la presión ejercida por el movimiento, lo cual debe considerarse en el diseño.

También es necesario tener en cuenta el cociente señal/ruido (SNR, por sus siglas en inglés), que evalúa la calidad de la señal recibida frente al nivel de ruido. Una antena mal diseñada, mal adaptada o con pérdidas elevadas puede degradar el SNR y comprometer la integridad del enlace inalámbrico, lo cual es especialmente crítico en aplicaciones médicas o de defensa, donde se requiere transmisión confiable y continua de datos.

Los materiales del sustrato también influyen notablemente en el comportamiento electromagnético de la antena. Hertleer et al. (2009) estudiaron diversas telas y demostraron que la constante dieléctrica del textil y su estructura física afectan directamente la forma del patrón de radiación, la ganancia y la eficiencia. En respuesta a estas limitaciones, la comunidad científica ha explorado el uso de materiales avanzados como el grafeno.

El grafeno es un material bidimensional compuesto por átomos de carbono dispuestos en una estructura de panal, que ofrece una excelente conductividad eléctrica, flexibilidad mecánica y alta resistencia estructural. Geim y Novoselov (2007) lo describieron como un material con propiedades electrónicas excepcionales, ideal para aplicaciones electrónicas flexibles. Lee et al. (2008) demostraron que el grafeno posee una gran elasticidad y resistencia mecánica, haciéndolo adecuado para integrarse como elemento radiante en antenas que operan bajo condiciones de flexión.

Además, se ha identificado que una configuración eficiente para este tipo de antenas es el uso de líneas de transmisión del tipo coplanar waveguide (CPW), donde la línea de señal y los planos de tierra se encuentran en el mismo plano. Esta estructura es ideal para antenas integradas en textiles, ya que permite diseños planos, facilita la fabricación e integración, y mantiene una buena adaptación de impedancia, incluso bajo deformación (Mishra, Singh, & Yadav, 2020).

En última instancia, en el diseño y simulación de una antena flexible, todos estos parámetros deben ser evaluados mediante herramientas computacionales de electromagnetismo, como HFSS, que permiten observar el comportamiento del campo electromagnético bajo diferentes condiciones de operación, incluyendo la presencia del cuerpo humano. Esta aproximación integral asegura que la antena pueda operar de forma segura, eficiente y confiable en contextos reales, abriendo el camino para el desarrollo de nuevas aplicaciones tecnológicas en salud, monitoreo remoto, geolocalización y comunicación segura.

Capítulo 2

2. Metodología

El presente proyecto se basa en un enfoque metodológico estructurado en tres fases principales: revisión y caracterización preliminar, diseño y simulación con Ansys Electronics, y evaluación de desempeño y viabilidad. Este enfoque integral permite abordar sistemáticamente el diseño y simulación de una antena doblada de grafeno destinada a su uso sobre el cuerpo humano, considerando tanto aspectos teóricos como técnicos y aplicados. La selección de una metodología rigurosa responde a la necesidad de garantizar precisión, reproducibilidad y validez científica en el desarrollo de la solución propuesta. Además, la estructura metodológica facilita el análisis secuencial de cada componente del proceso, permitiendo establecer un vínculo directo entre los objetivos del estudio, la ejecución técnica y la interpretación de los resultados obtenidos.

Figura 2.1

Metodología aplicada en el proyecto



2.1. Fase I: Revisión y Caracterización Preliminar

Esta fase tiene como objetivo proporcionar una base sólida para el desarrollo del estudio mediante la recopilación y análisis de información relevante sobre antenas fabricadas con grafeno y su interacción con entornos biológicos. Se inicia con una revisión sistemática de literatura académica en bases de datos científicas como IEEE Xplore, Scopus y Web of Science. Esta revisión se enfoca en artículos recientes, patentes, reportes técnicos y estudios experimentales relacionados con el diseño de antenas flexibles, el comportamiento del grafeno como material conductor y sus aplicaciones específicas en electromagnetismo.

Uno de los principales criterios de inclusión fue la aplicabilidad de los diseños y configuraciones en contextos donde la interacción con el cuerpo humano es crítica, como dispositivos vestibles o wearables, sensores biomédicos y antenas implantables. También se consideraron estudios sobre la influencia de estructuras geométricas complejas y dobladas en la eficiencia y miniaturización de las antenas (Kim et al., 2017).

El grafeno, como material bidimensional con propiedades electrónicas excepcionales, presenta una alta movilidad de portadores y una conductividad ajustable mediante dopado químico o control eléctrico. Su comportamiento electromagnético en frecuencias del orden de Gigahercios (GHz) lo convierte en un candidato ideal para antenas miniaturizadas, especialmente en contextos donde se requiere flexibilidad mecánica, bajo peso y compatibilidad con tejidos (Novoselov et al., 2012; Geim & Grigorieva, 2013).

También se estudió la estructura del cuerpo humano desde una perspectiva electromagnética, tomando como base los modelos dieléctricos propuestos por Gabriel et al. (1996). Estos modelos proporcionan datos sobre la permitividad relativa, la conductividad y la

densidad de diferentes tipos de tejidos biológicos en diversas frecuencias, siendo esenciales para la simulación precisa de la tasa de absorción específica (SAR) y la interacción de la antena con el entorno biológico.

Adicionalmente, se realizaron visitas a centros de investigación con experiencia en electromagnetismo, en materiales avanzados y dispositivos portátiles. Esta fase permitió identificar vacíos de conocimiento, establecer el estado del arte del tema investigado y definir criterios técnicos para el diseño de la antena.

2.2. Fase II: Diseño y Simulación con Ansys Electronics

Con la información recolectada en la fase previa, se desarrolló el modelo de la antena dobrada de grafeno utilizando el entorno Ansys Electronics Desktop, específicamente sus módulos HFSS (High Frequency Structure Simulator). Esta fase incluyó varias etapas: modelado, definición de parámetros del material, configuración del entorno biológico y simulación electromagnética tridimensional.

El modelado inicial se realizó en HFSS, empleando herramientas de diseño paramétrico y modelado por sólidos. Se propuso una antena tipo cuadrado sobre un sustrato rígido, buscando una estructura compacta, adaptable y optimizada para frecuencias en la banda ISM de 2.4 GHz y 5GHz. La selección de esta banda responde a su amplio uso en aplicaciones industriales y científicas, así como por cumplir con normativas internacionales de compatibilidad electromagnética.

El grafeno se modeló como una capa conductora con espesor nanométrico, incorporando parámetros como su conductividad superficial, efectos de dispersión, y anisotropía en ciertas

frecuencias. Se utilizaron valores de conductividad ajustados en base a estudios recientes (Zhou et al., 2020), que toman en cuenta la variabilidad experimental y las técnicas de síntesis.

El modelo del cuerpo humano se representó mediante una estructura multicapa, compuesto por piel, grasa, músculo y hueso, empleando propiedades dieléctricas extraídas de la base de datos de IT'IS Foundation. Esta representación permitió simular condiciones de uso realistas, con la antena adherida directamente a la piel o separada por una capa delgada de ropa o material protector.

Durante la simulación, se analizaron los siguientes parámetros:

- La frecuencia de resonancia, determinada mediante el análisis del parámetro S11.
- El ancho de banda operativo, definido por el rango de frecuencias con $S11 < -10$ dB.
- La eficiencia de radiación y ganancia, evaluadas en campo lejano.
- La distorsión del patrón de radiación causada por la proximidad del cuerpo humano.
- El valor de SAR máximo en tejidos críticos como la piel y el músculo.

Para mejorar la robustez del análisis, se realizaron estudios paramétricos variando la curvatura de la antena, el espesor del grafeno, la distancia a la piel, y la orientación respecto al eje del cuerpo. Esto permitió identificar configuraciones óptimas para maximizar la eficiencia sin comprometer la seguridad del usuario.

Se utilizaron recursos computacionales de alto rendimiento para la ejecución de las simulaciones, dado que los modelos 3D con materiales dispersivos y geometrías biológicas complejas requieren gran capacidad de procesamiento. El método de elementos finitos (FEM) implementado en HFSS permitió una malla adaptativa y precisa que capturó las variaciones del campo eléctrico y magnético en todas las regiones de interés (Jin, 2015).

2.3. Fase III: Evaluación de Desempeño y Viabilidad

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, se procedió a su análisis comparativo. Esta fase incluyó tanto la validación cruzada de los resultados con modelos teóricos como la comparación con diseños convencionales. La principal métrica de comparación fue la eficiencia total del sistema, considerando tanto las pérdidas dieléctricas como las pérdidas por conducción.

Se elaboraron mapas de distribución de campo eléctrico, SAR y densidad de potencia para visualizar las zonas de mayor interacción con el cuerpo humano. Estos mapas se compararon con límites internacionales establecidos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica No Ionizante (ICNIRP, 2020), garantizando que el diseño propuesto no supere valores de exposición recomendados.

Además, se analizaron aspectos de manufactura y ensamblaje. El grafeno puede ser depositado mediante técnicas de impresión por inyección, litografía o transferencia desde substratos de cobre. También se consideraron aspectos ambientales como la posibilidad de reciclaje, baja toxicidad del grafeno y reducción del impacto ambiental frente a antenas metálicas tradicionales (Farinholt et al., 2019).

Para próximas investigaciones se propone el uso de grafeno dopado, integración con sensores embebidos, exploración de frecuencias más altas (mmWave) y el diseño de redes de antenas adaptativas para monitoreo distribuido. Esta visión a futuro posiciona el proyecto no solo como una solución técnica puntual, sino como una plataforma versátil para múltiples aplicaciones en salud, deporte, defensa y telecomunicaciones.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación, análisis y comparación de un diseño de antena de grafeno, esto es de parche rectangular plano. La figura 2 muestra la estructura de la antena propuesta. Esta antena es del tipo coplanar, esto, el alimentador, el elemento radiante y el plano de tierra se encuentran en un solo plano. La geometría del elemento radiante fue escogida para cumplir objetivos de resonancia especialmente en la banda de 5 GHz que es una banda de interés para aplicaciones de WiFi. Las medidas externas de la antena corresponden a 46 mm x 46 mm. El elemento radiante de grafeno tiene una forma tipo H con dimensiones 28 mm x 40 mm. El alimentador (*feeder*) presenta una anchura creciente para obtener respuestas buscadas de frecuencia de resonancia y ancho de banda, principalmente en la banda de 5 GHz. El espesor del grafeno tanto del elemento radiante y el plano de tierra es de 28 nm. Este diseño facilita su instalación en prendas de vestir (textiles) y asegura flexibilidad.

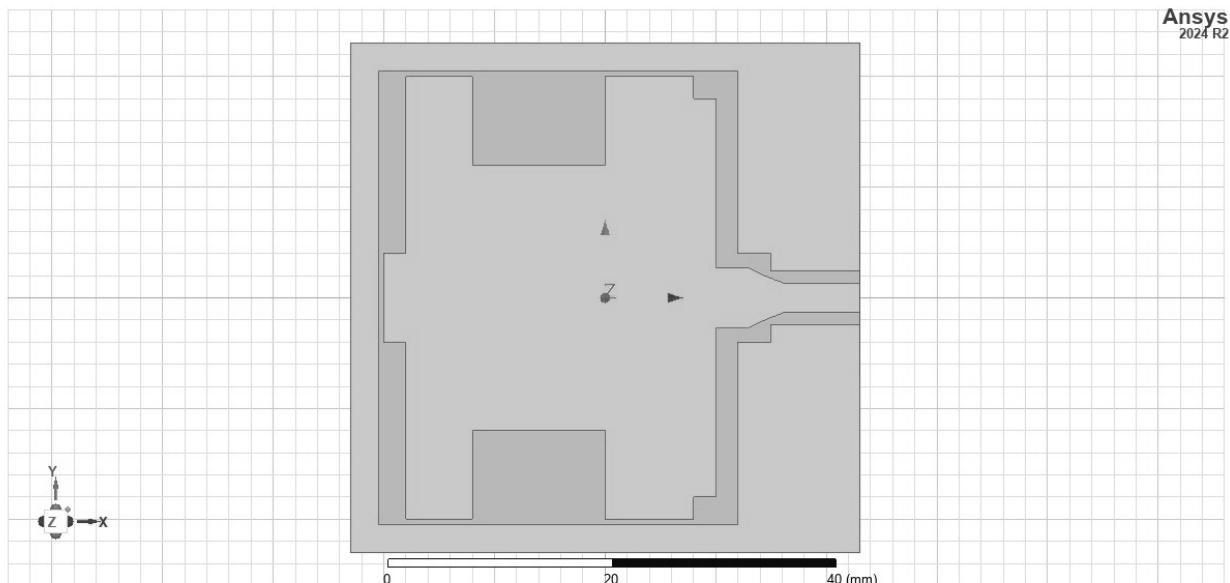
El diseño de la antena se simuló en dos escenarios: Estructura plana y doblada. Para el caso de estructura plana, las condiciones de prueba incluyeron simulaciones sobre un material textil (algodón) en el vacío, esto es sin presencia de un cuerpo humano y sobre un modelo de torso humano (phantom) formado por la combinación de piel, grasa, músculo y hueso con diferentes espesores y características eléctricas. Para el segundo caso, esto es en condiciones de curvatura, se trabajó en simulaciones equivalentes caso plano. Se consideró en los parámetros de simulación un voltaje de alimentación de 100 mV.

Se analizaron los siguientes parámetros claves: coeficiente de reflexión (S_{11}), relación de onda estacionaria (VSWR), ganancia (Gain), patrón de radiación y la tasa de absorción específica

(SAR). Además, se evaluaron parámetros como el ancho de banda, la frecuencia de resonancia y la eficiencia de radiación normalizada.

Figura 3.1

Antena tipo parche rectangular plana



3.1. Evaluación sobre material textil: algodón

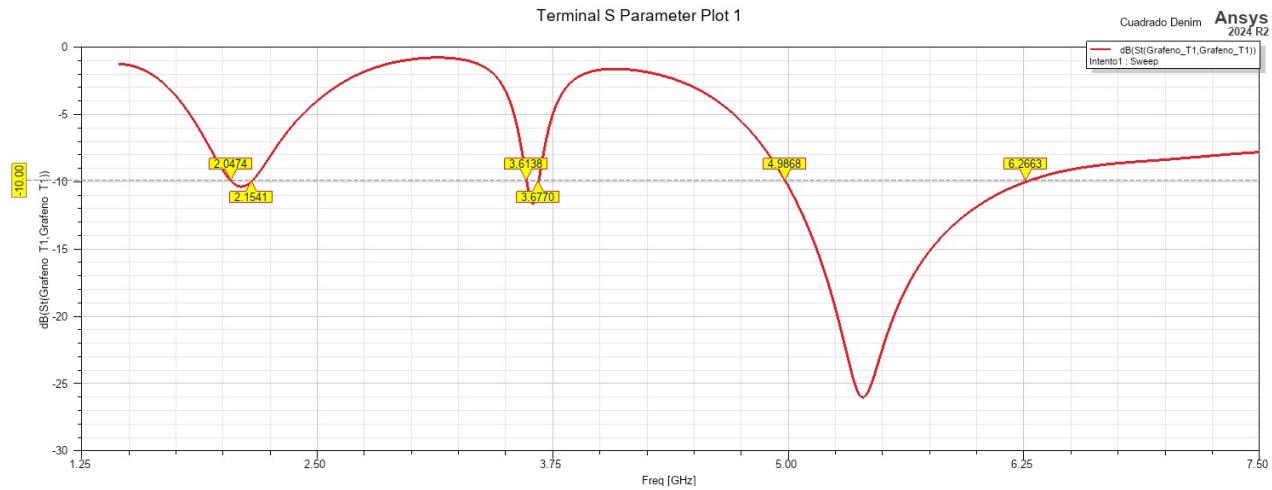
En esta fase se evaluó el comportamiento de la antena rectangular sobre un tipo de tejido comúnmente usado en vestimenta, como el algodón, con el fin de determinar el impacto del textil en el rendimiento. Del análisis se desprende que el tejido algodón ofrece condiciones favorables de operación.

3.1.1. Antena tipo parche rectangular plana (en el vacío)

Las figuras a continuación muestran el rendimiento de la antena rectangular en términos de S11, ganancia, VSWR, eficiencia y patrón de radiación 3D, respectivamente.

Figura 3.2

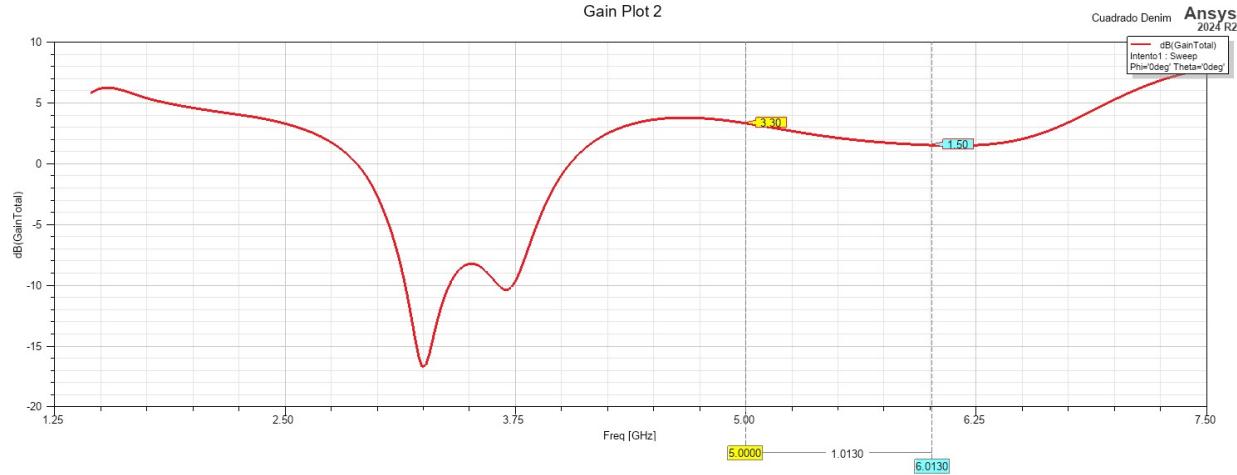
S11 antena rectangular plana en el vacío



La figura 3.2 indica que el valor de S11 se mantiene por debajo de -10 dB en las bandas de 2 GHz, 4 GHz y 5 GHz, lo que indica una adaptación en tres bandas. El ancho de banda en la banda de 5 GHz es mayor de 1 GHz lo que resulta interesante para aplicaciones de WiFi. En las bandas inferiores de 2 y 3.6 GHz, el ancho de banda resulta de uso impráctico.

Figura 3.3

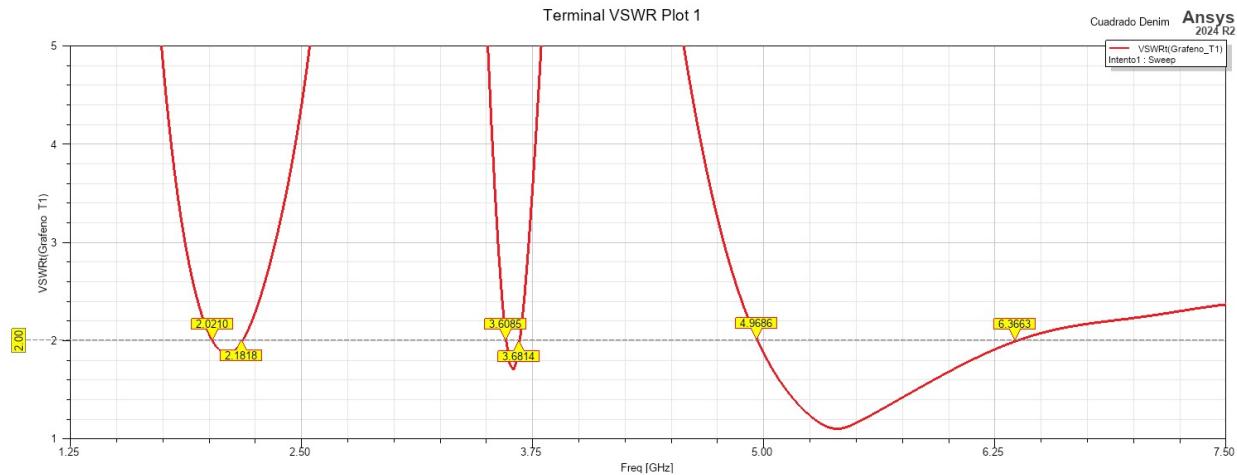
Ganancia antena rectangular plana en el vacío



La figura 3.3 muestra que la ganancia máxima del diseño rectangular plano en condiciones de vacío y sin curvatura, en la banda de 5 GHz varía entre 1.5 y 3.3 dB que resulta razonable en la práctica.

Figura 3.4

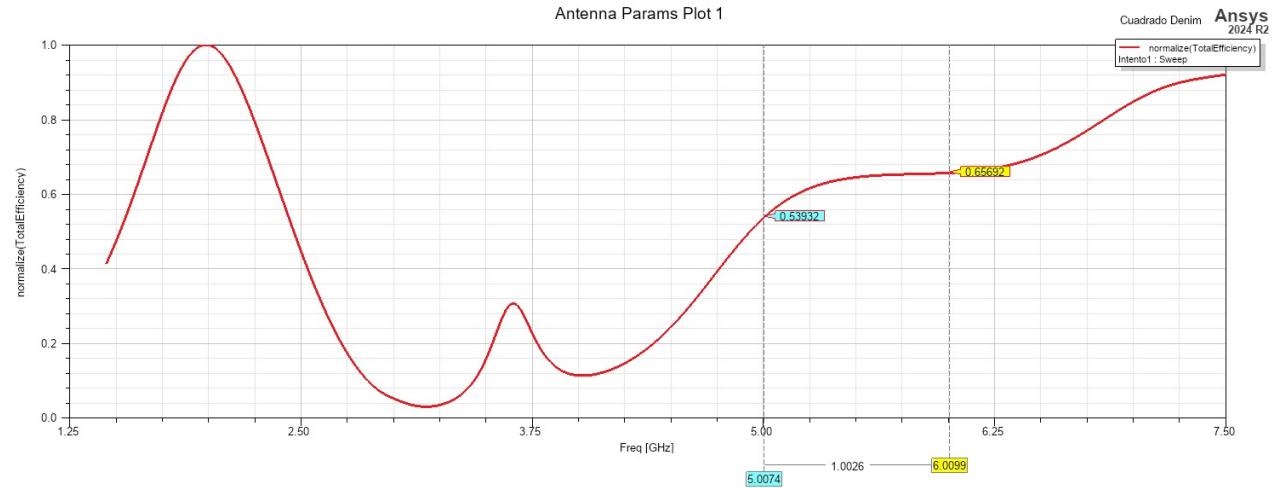
VSWR antena rectangular plana en el vacío



En la figura 3.4 el VSWR se mantuvo inferior a 2 en las bandas de interés, y en algunos casos alcanzó valores cercanos a 1.5, lo que indica una excelente adaptación de impedancia.

Figura 3.5

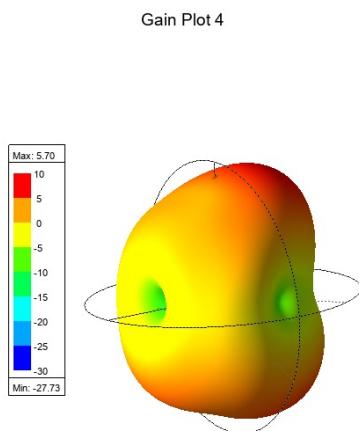
Eficiencia normalizada antena rectangular plana en el vacío



La figura 3.5 muestra que en la banda de 5 GHz, la eficiencia normalizada de la antena usando algodón alcanza 53.9%, pero con valores mucho menores en las bandas más bajas. Esto evidencia que el dieléctrico algodón resulta adecuado para aplicaciones de electrónica vestible con antenas de grafeno.

Figura 3.6

Patrón de radiación antena rectangular plana en el vacío



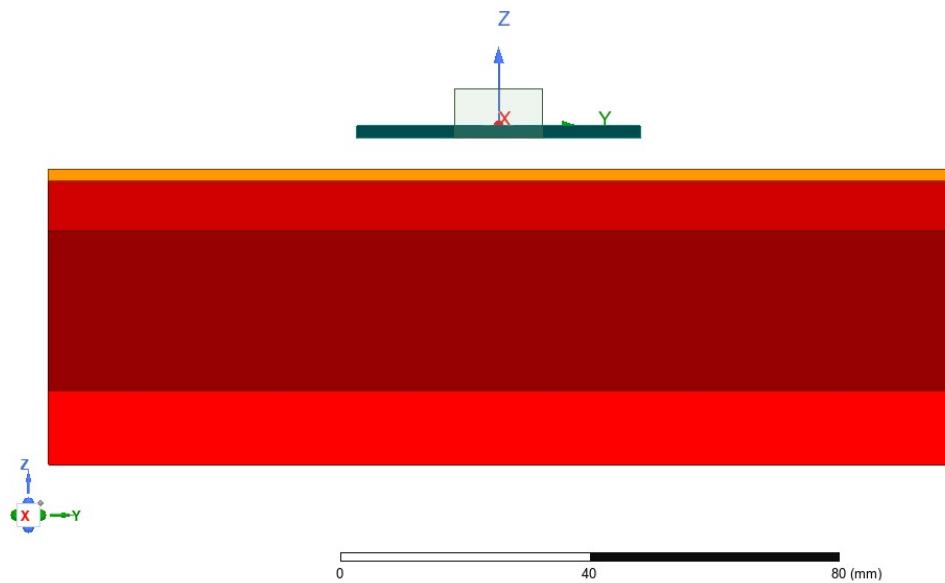
El patrón de radiación 3D, observado en la figura 3.6, muestra una forma cuasi omnidireccional con una mayor ganancia en una cierta dirección, lo cual favorece aplicaciones de mediciones de orden general.

3.1.2. Antena tipo parche rectangular plana (sobre torso)

La antena tipo parche rectangular plana se simuló también sobre un torso para estudiar el efecto de su instalación sobre el cuerpo humano. La figura 3.7 muestra del modelo del torso que tiene un área de 146mm x 146 mm y los siguientes espesores: piel 2 mm, grasa 8 mm, musculo 26 mm, y hueso 12 mm. La antena con el dieléctrico se ubica a 2 mm de la piel.

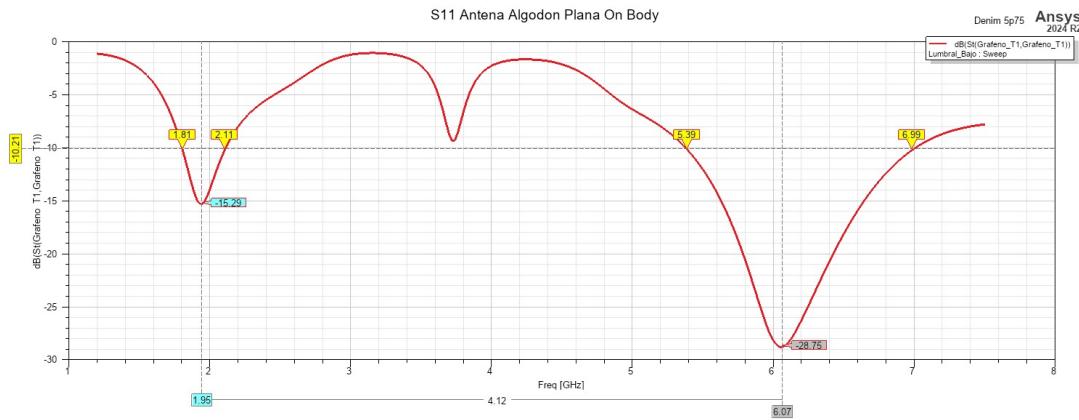
Figura 3.7

Antena rectangular plana sobre torso humano



La figura 3.8 muestra que la respuesta S11 versus frecuencia. La presencia del torso humano, desplaza las frecuencias de resonancia de 2 GHz hacia la izquierda y de 5 GHz hacia la derecha. La respuesta de frecuencia en banda de 4 GHz desaparece. Un mejor comportamiento se observa en la banda de 5 GHz ($S11 \leq -10$ dB).

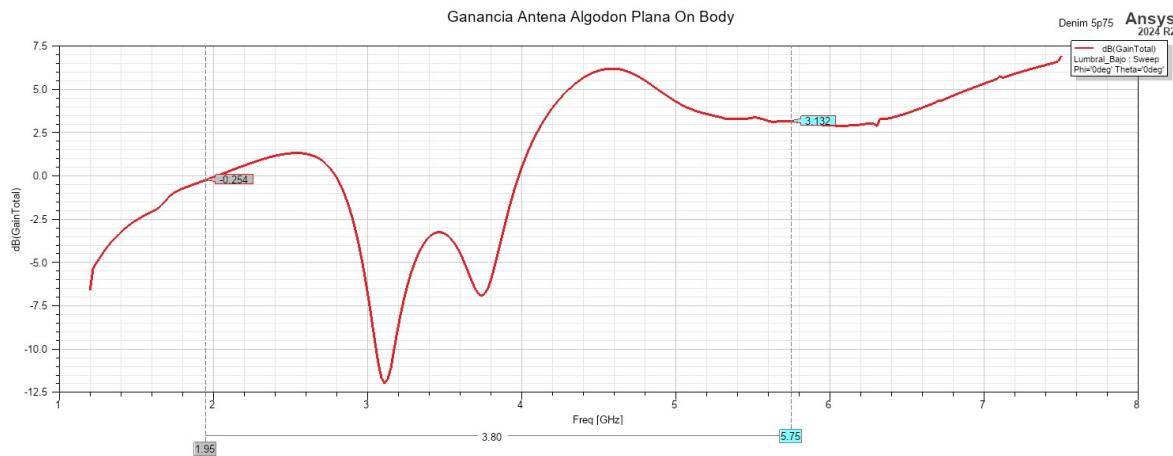
Figura 3.8 S11 de antena rectangular sobre torso humano



La figura 3.9 indica que la ganancia en la banda de 5 GHz varia alrededor de 3.0 y 4.5 dB.

Figura 3.9

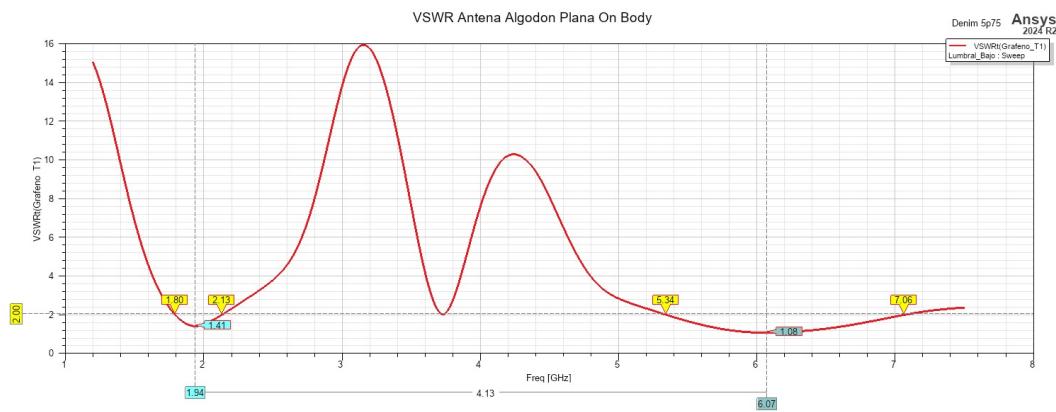
Ganancia antena rectangular plana sobre torso humano



El parámetro VSWR (figura 3.10) fue inferior a 2 en la zona de operación, lo que confirma una buena adaptación de impedancia, igualmente que para el caso de la respuesta S11, se pierde la banda de 4 GHz

Figura 3.10

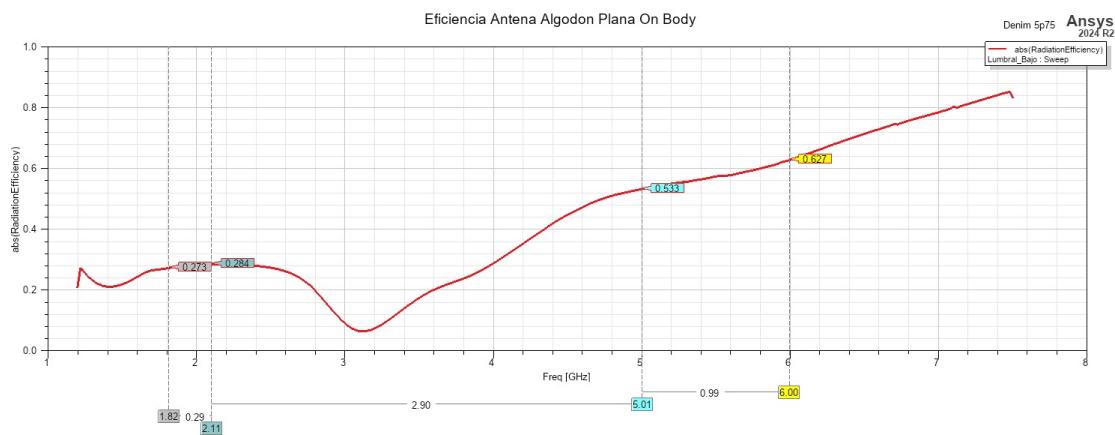
VSWR de antena rectangular sobre torso humano



En la banda de 5 GHz, la eficiencia normalizada para algodón (figura 3.11) varía entre 53.3% y 62.7%, lo cual resulta dentro de los resultados normales para este tipo de antenas.

Figura 3.11

Eficiencia antena rectangular plana sobre torso humano

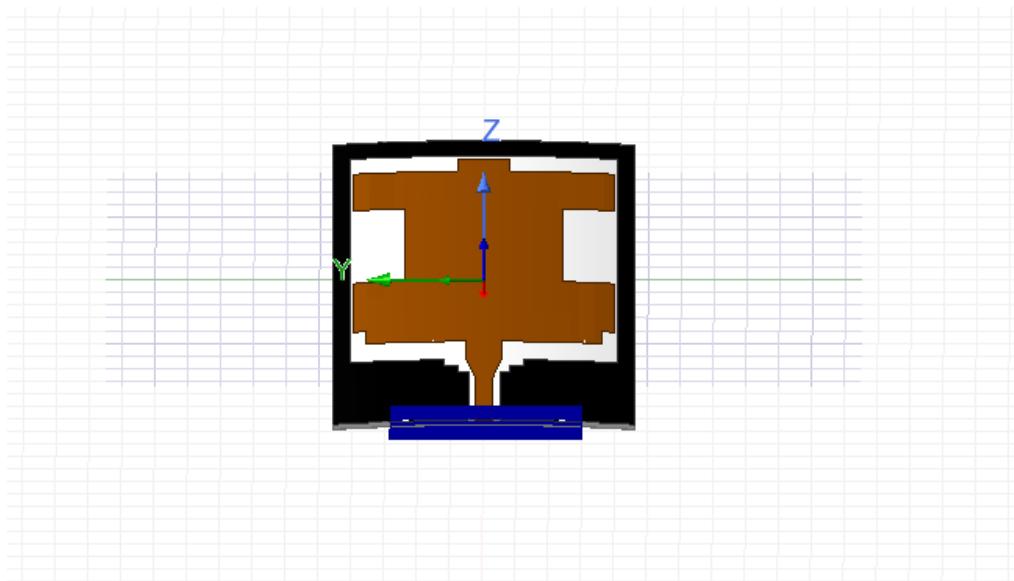


3.1.3. Antena tipo parche rectangular con curvatura (en el vacío)

Se evaluó la antena en condiciones de curvatura para simular su adaptación a la morfología del cuerpo. Las pruebas, como en el caso anterior, se dividieron en dos, en el vacío y sobre el torso.

Figura 3.12

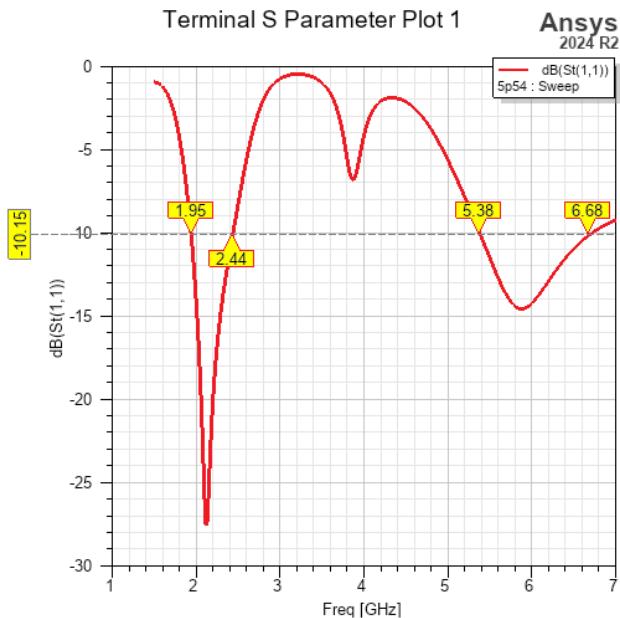
Antena tipo parche rectangular con curvatura sin torso



Al curvar la antena, con un radio de curvatura 147 mm, sobre los tejidos sin contacto con el torso humano, se observó un cambio en la distribución del campo eléctrico, con cierto desplazamiento de la frecuencia de resonancia, especialmente en las bandas más altas (5 GHz).

Figura 3.13

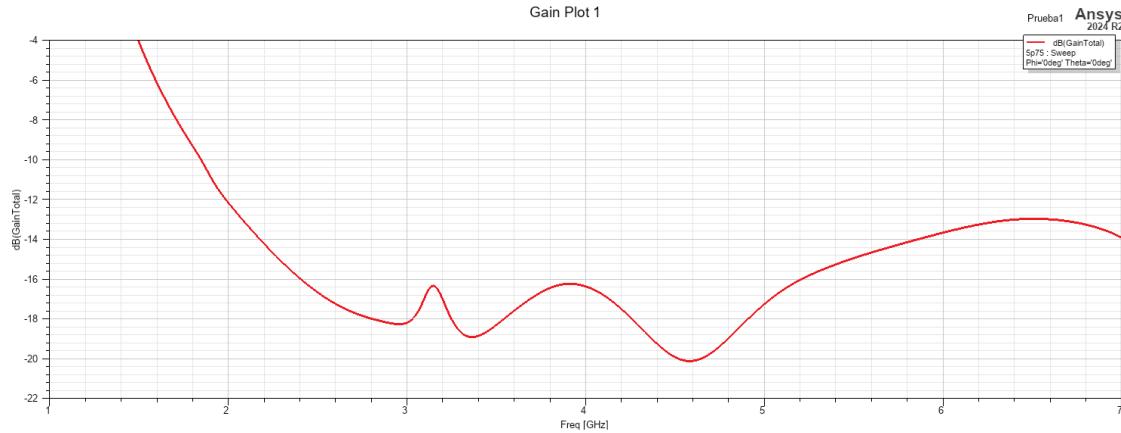
S11 antena rectangular con curvatura en el vacío



La antena tipo parche con curvatura en el vacío presenta un comportamiento dual-banda, con una resonancia principal en 2.44 GHz, donde alcanza un valor de S11 cercano a -28 dB, lo que evidencia una excelente adaptación de impedancia y una mínima reflexión. Adicionalmente, se observa una segunda resonancia en el rango de 5.2–5.4 GHz, con un mínimo alrededor de 5.38 GHz cercano al umbral de -10 dB, lo cual indica una adaptación aceptable, aunque menos profunda que en la banda de 2.4 GHz.

Figura 3.14

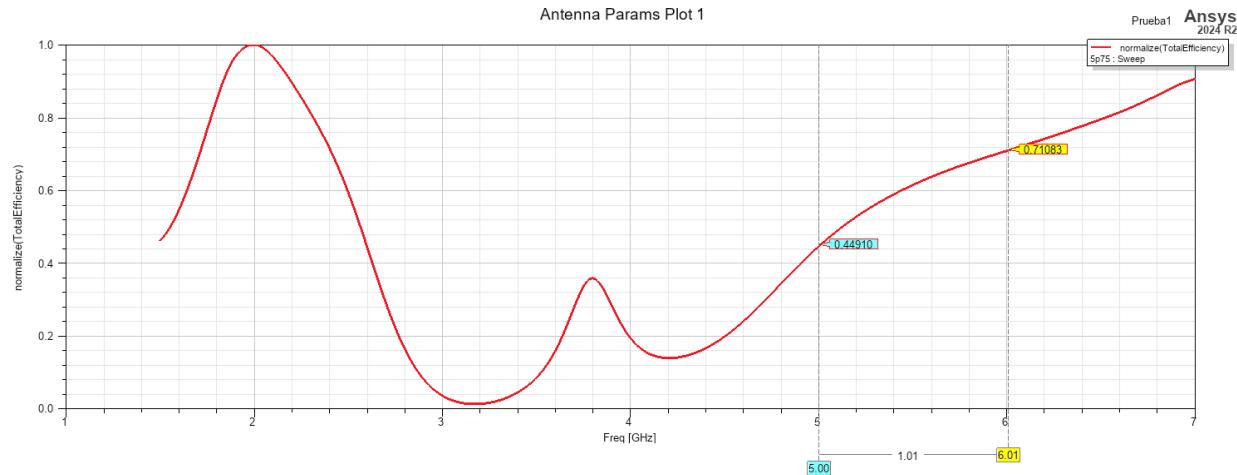
Ganancia antena rectangular con curvatura en el vacío



La ganancia cae drásticamente, alcanzando valores cercanos a -20 dB de 4 GHz a 5 GHz debido a que al doblar la antena se altera la distribución de corriente, surgen modos no deseados y se produce dispersión de los campos en el material.

Figura 3.15

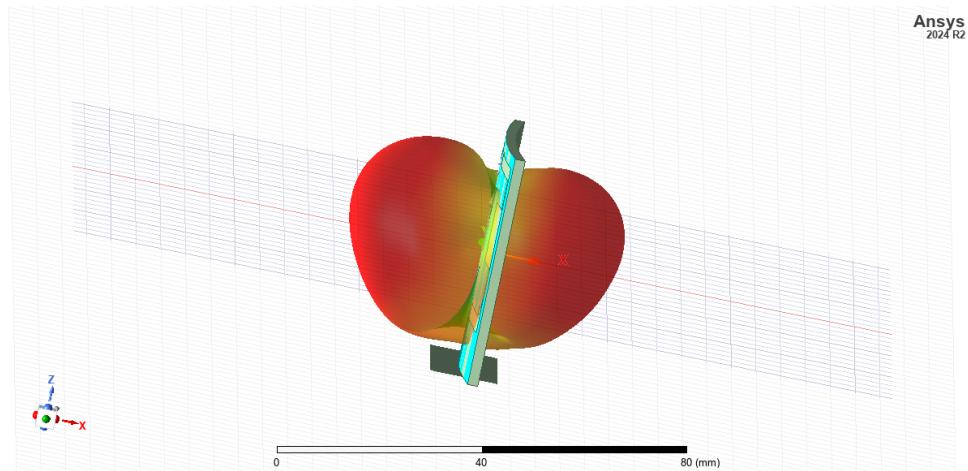
Eficiencia normalizada antena rectangular con curvatura en el vacío



La eficiencia de la antena con curvatura se mantiene alta llegando a valores desde 44.9% hasta 71% en las banda deseada de 5 GHz, pero disminuyendo en las bandas inferiores.

Figura 3.16

Patrón de radiación antena rectangular con curvatura en el vacío

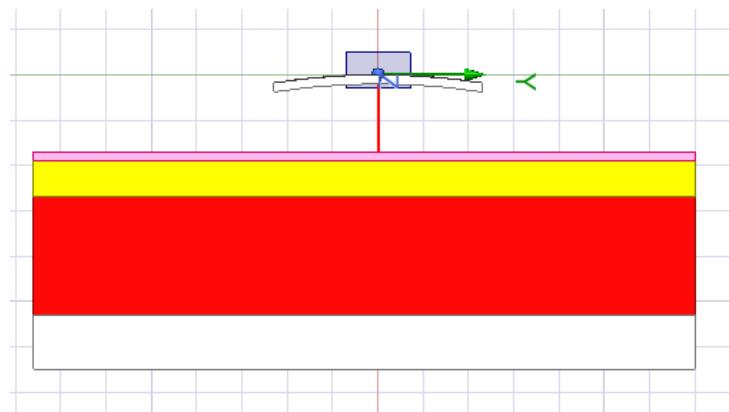


Por motivos de la curvatura de la antena, se pierde el patrón original de irradiación de la antena plana, la cual mostraba moderada ganancia en ciertas direcciones.

3.1.4. Antena tipo parche rectangular con curvatura (sobre torso)

Figura 3.17

Antena con curvatura sobre phantom multilayer del torso humano

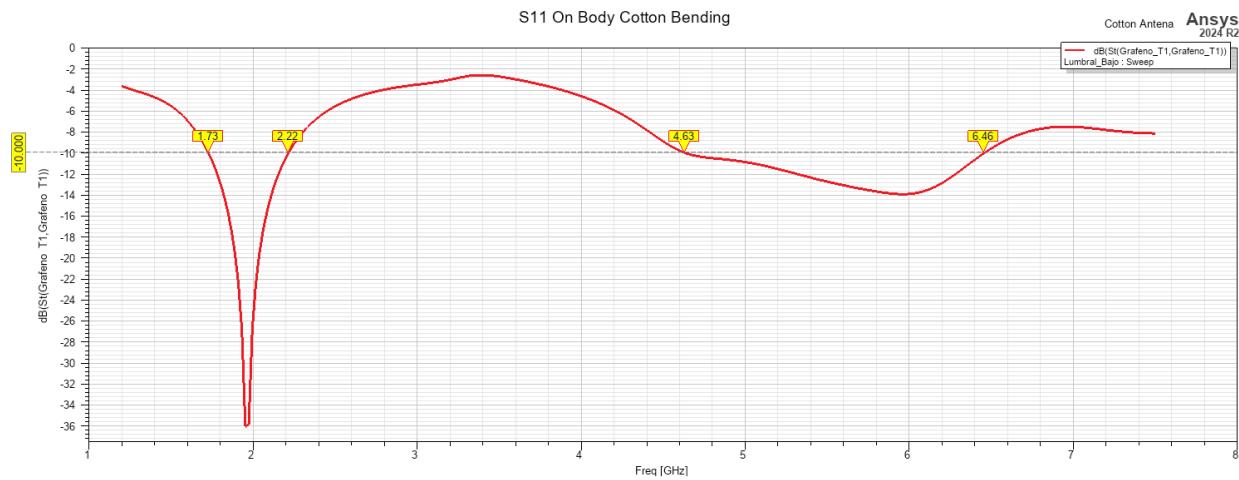


En forma general, la antena rectangular curvada en presencia del torso humano mantiene su resonancia dentro de las bandas de interés. En particular, la frecuencia de resonancia en la

banda de 2 GHz se desplaza hacia la izquierda mientras que en la banda de 5 GHz se desplaza hacia la derecha (Tabla 1).

Figura 3.18

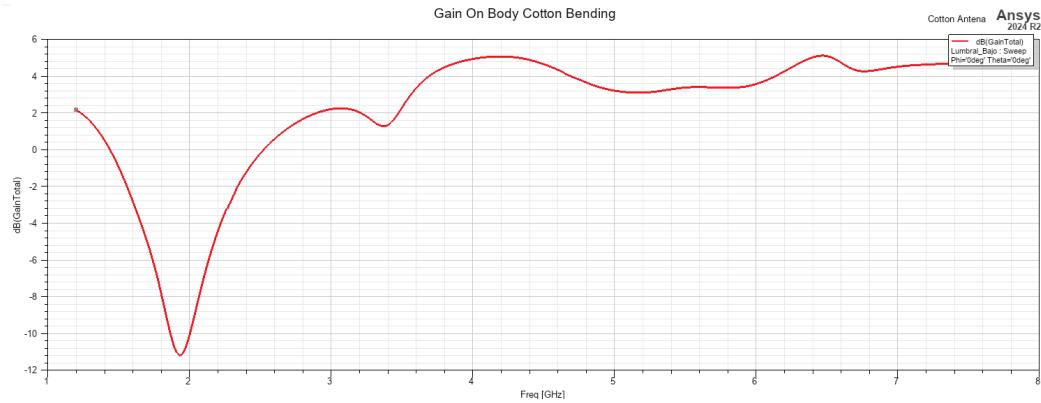
S11 antena rectangular con curvatura en torso



La figura 3.18 muestra que la antena rectangular con curvatura sobre un torso humano tiene una resonancia principal en 1.97 GHz, con un valor de S11 cercano a -35 dB, lo que indica una adaptación sobresaliente y una mínima reflexión. Se observa otra respuesta en la banda de 5.4 GHz, con un nivel aproximado de -12 dB, lo cual representa una adaptación aceptable para aplicaciones en la banda de 5 GHz. Estas observaciones sugieren que, bajo condiciones de curvatura y proximidad al cuerpo humano, la antena mantiene un buen desempeño en la banda de 2 GHz y una operatividad funcional en la banda de 5 GHz, aunque con una eficiencia ligeramente reducida en comparación con la antena plana.

Figura 3.19

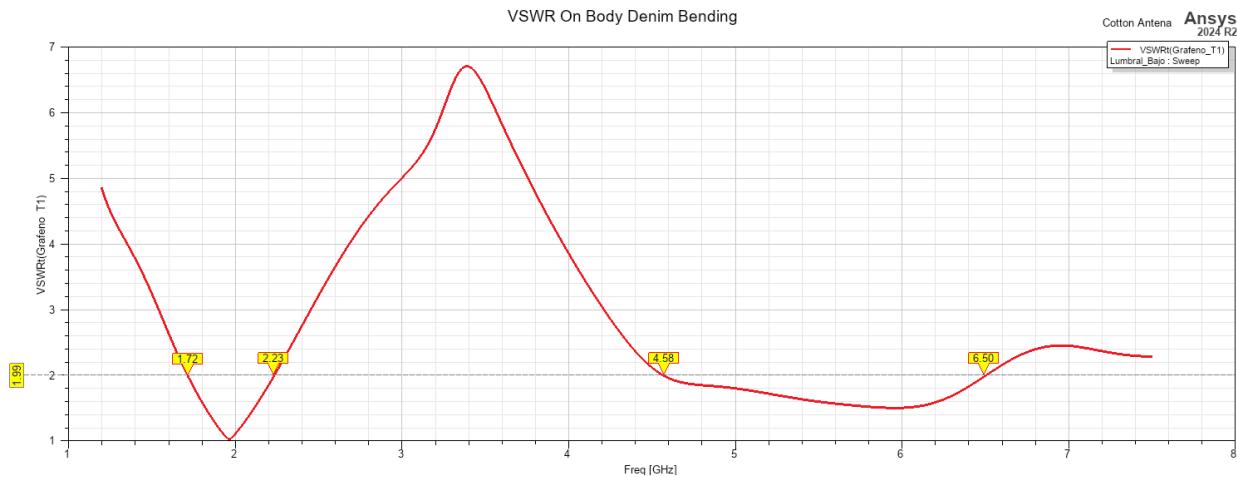
Ganancia de la antena con curvatura en torso



La figura 3.19 indica que la ganancia varía debido a la absorción del cuerpo, observándose una reducción significativa en condiciones de presencia del torso. La ganancia aumenta a valores por encima de 3.3 dB en el rango de 5 a 6 GHz.

Figura 3.20

VSWR antena rectangular con curvatura en torso

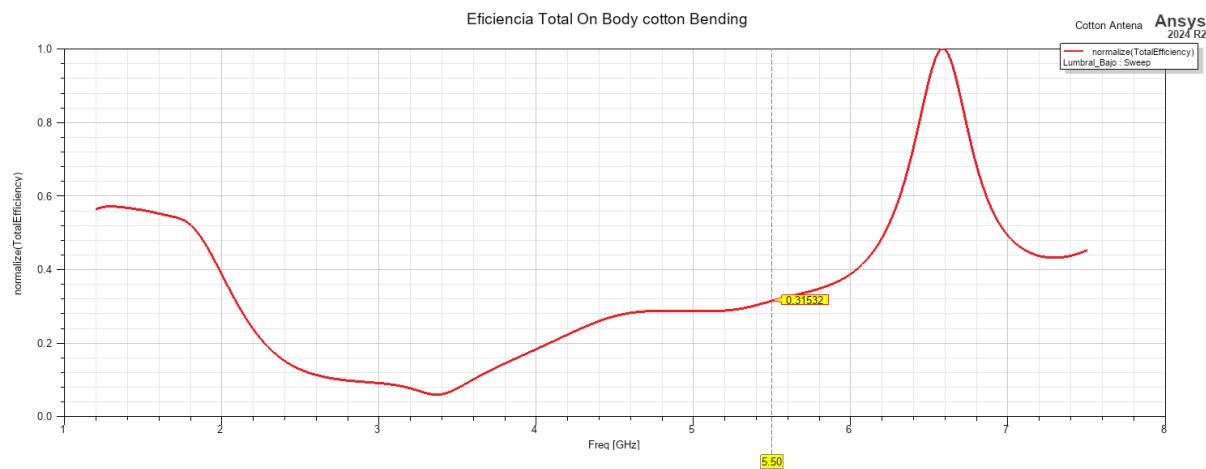


La figura 3.20 revela un VSWR cercano a 1.1 en 1.97 GHz, lo que indica una excelente adaptación de impedancia y un acoplamiento muy eficiente en esa frecuencia. Asimismo, se observa un segundo valle alrededor de 4.95 GHz, donde el VSWR se approxima a 1.9,

manteniéndose dentro del rango aceptable de operación (<2). Finalmente, en 6.5 GHz el VSWR alcanza un valor cercano a 2, lo que refleja una adaptación funcional pero menos eficiente que en las resonancias anteriores.

Figura 3.21

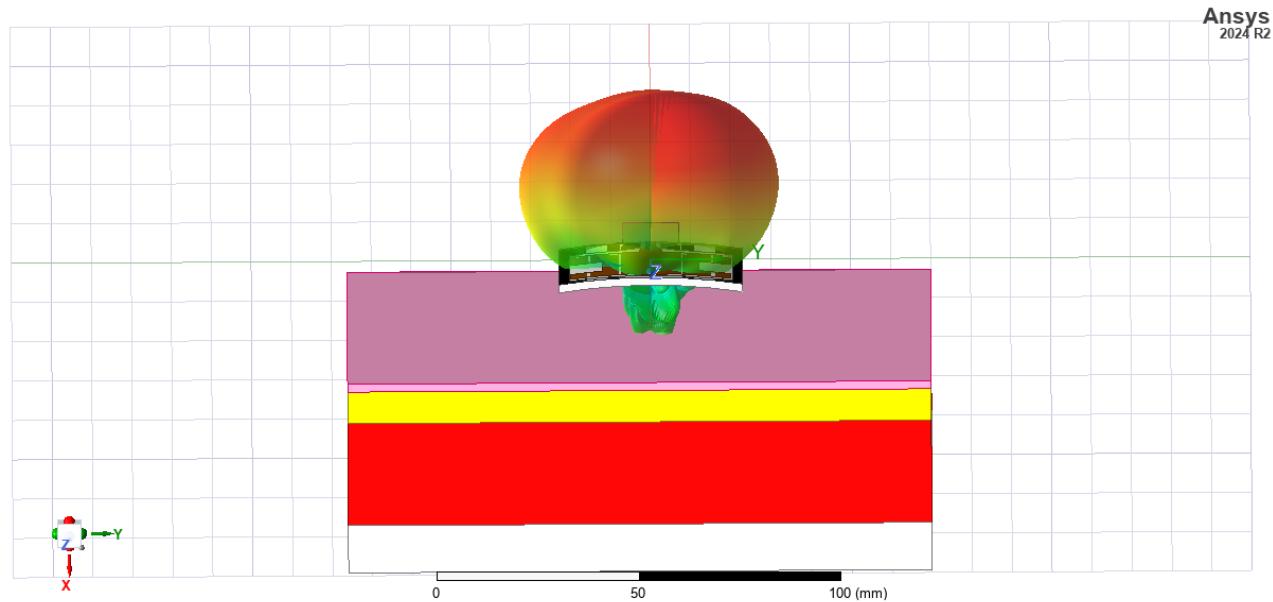
Eficiencia normalizada antena con curvatura en torso



Las simulaciones muestran (Figura 3.21) un descenso en la eficiencia de radiación, con mayor impacto en la banda de 2 GHz. Para la antena con curvatura en presencia del torso, la eficiencia baja hasta un 30% en la banda de 5 GHz, no obstante, se mantiene con un ancho de banda suficiente para una operación funcional.

Figura 3.22

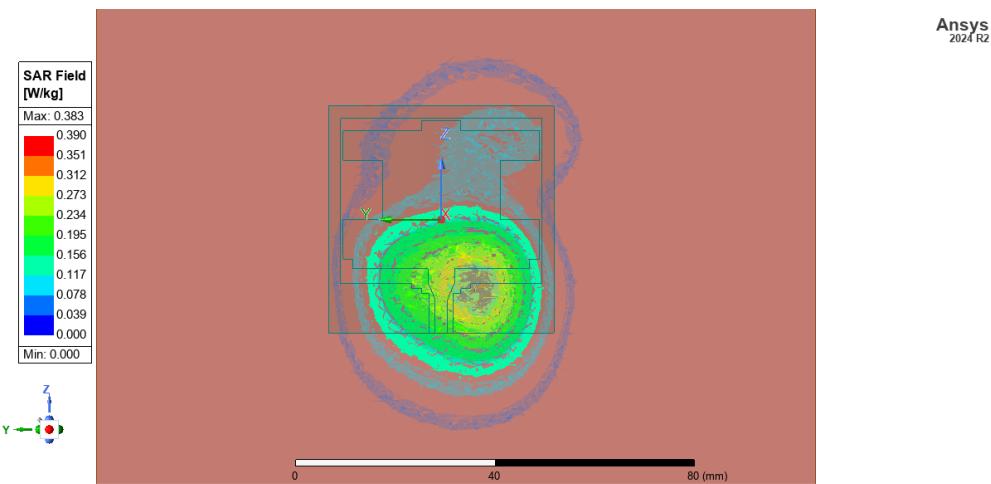
Patrón de radiación antena con curvatura sobre torso



El patrón de radiación de la antena (Figura 3.22) indica mayor ganancia y directividad hacia fuera del torso humano, presentando lóbulos secundarios poco significativos en dirección opuesta. Esto refuerza la conclusión de que el torso tiene un impacto en el rendimiento de las antenas vestibles.

Figura 3.23

SAR de antena rectangular



La Figura 3.23 indica que el SAR se mantiene muy por debajo del límite normativo de 1.6 W/kg (Federal Communications Commission, EEUU), aunque se registraron picos cercanos a 0.383 W/kg en 5 GHz indicando la necesidad de un diseño cuidadoso del espaciado y del material de separación. Los resultados de las simulaciones confirman que la antena propuesta no presenta riesgos para la salud del usuario.

3.2. Comparación general y análisis de desempeño

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1*Tabla de resultados en algodón*

Antena rectangular			
En el vacío plana			
	2 GHz	4 GHz	5 GHz
Ancho de banda (MHz)	106.7	63.2	1397.7
Frecuencia de resonancia (MHz)	2100.75	3645.4	5500
Ganancia (dB)	4.21	-15	3.30
Eficiencia de radiación normalizada (min, max)	60.71%, 79.67%	10.32%, 15.71%	53.93%, 65.69%
Sobre el torso plana			
Ancho de banda (MHz)	300		1600
Frecuencia de resonancia (MHz)	1950		6070
Ganancia (dB)	-0.254		3.132
Eficiencia de radiación normalizada (min, max)	27.3%, 28.4%		53.3%, 62.7%
En el vacío con curvatura			
Ancho de banda (MHz)	490		1300
Frecuencia de resonancia (MHz)	2195		6030
Ganancia (dB)	-16.1		-14.24
Eficiencia de radiación normalizada (min, max)	47.96%, 67.75%		44.91%, 71.083%
Sobre el torso con curvatura			
Ancho de banda (MHz)	490		1850
Frecuencia de resonancia (MHz)	1975		5545
Ganancia (dB)	-11.07		3.12
Eficiencia de radiación normalizada (min, max)	41.48%, 50.64%		31.5%, 39.98%

A partir de los resultados obtenidos, se pueden establecer las siguientes observaciones:

El diseño tipo parche rectangular coplanar muestra un rendimiento adecuado en todos los escenarios simulados, destacándose la eficiencia de radiación y flexibilidad en su instalación sobre el cuerpo humano. La antena propuesta ha probado su capacidad para operar eficazmente incluso con una geometría doblada o con curvatura y una ubicación cercana al cuerpo humano.

El dieléctrico (textil) algodón demostró ser un material favorable como elemento de integración en la antena produciendo estabilidad en la frecuencia de resonancia y ganancia, siendo viable para su uso en electrónica vestible.

La presencia del torso disminuye moderadamente la eficiencia, pero no compromete la funcionalidad de la antena si se emplea un dieléctrico apropiado como el algodón. La simulación del diseño rectangular muestra una buena tolerancia a la deformación mecánica, que resulta adecuado para aplicaciones sobre textiles que muchas veces incluyen torsiones o dobleces de la prenda de vestir.

En resumen, las simulaciones han permitido identificar las condiciones de operación, así como los materiales y configuraciones que favorecen un buen rendimiento electromagnético.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo se sintetizan los hallazgos más relevantes obtenidos a partir de las simulaciones y análisis realizados sobre la configuración propuesta de antena de grafeno: el diseño rectangular recto y con curvatura. Los resultados obtenidos en el capítulo anterior, considerando distintos escenarios de operación (en vacío, sobre un sustrato de algodón, sobre un modelo de torso humano y bajo condiciones de curvatura), permiten identificar el comportamiento electromagnético de cada propuesta, así como sus ventajas y limitaciones.

4.1. Conclusiones

Los resultados de las simulaciones mostraron que tanto la antena rectangular plana como la antena con curvatura pueden operar principalmente en la banda de 5 GHz, manteniendo un ancho de banda suficientemente amplio para aplicaciones inalámbricas. La antena plana alcanzó un comportamiento más estable, con frecuencias de resonancia alrededor de 5.5–6.0 GHz y un mayor ancho de banda (hasta 1600 MHz en condiciones sobre torso), mientras que la antena con curvatura presentó resonancias en 5.3–5.5 GHz con un ancho de banda máximo de 1850 MHz, lo que confirma que ambas configuraciones cumplen con condiciones de resonancia en la banda de interés, teniendo la versión curvada un mayor ancho de banda en la banda de 5 GHz.

El análisis de los parámetros de pérdida de retorno (S_{11}) y la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR) evidenció que las dos antenas presentan una adaptación adecuada a la impedancia de referencia. La antena plana mostró un desempeño más estable, alcanzando valores de S_{11} inferiores a -10 dB en las bandas de 2 y 5 GHz, con VSWR consistentemente menor a 2,

lo que indica bajas pérdidas por reflexión. En el caso de la antena con curvatura, aunque se observaron valores de S11 menores en la banda de 5 GHz (-12 dB), el VSWR permaneció cercano a 1.9 en dicha banda, confirmando que la antena se mantiene dentro de márgenes de operación aceptables.

La comparación entre la antena plana y la antena con curvatura permitió identificar diferencias claras en el desempeño electromagnético. La antena plana con un sustrato de algodón ubicada en el vacío mostró mejores niveles de ganancia y eficiencia de radiación en la banda de 5 GHz respecto de la antena curvada. Esta última antena, si bien sufrió una disminución de eficiencia debido a la deformación y presencia del torso, demostró un mayor ancho de banda, lo que la hace más tolerante a condiciones de uso en movimiento o flexión, que son comunes en aplicaciones vestibles.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda que en futuros trabajos se optimice la longitud efectiva del alimentador del elemento radiante tomando como referencia la longitud de onda correspondiente a la frecuencia central de operación con el fin de mejorar la adaptación de impedancia y la estabilidad del patrón de radiación. De la misma manera, se recomienda establecer un número mínimo de pasos en la herramienta de simulación que permita garantizar la precisión de los resultados sin comprometer de manera significativa el tiempo de simulación, optimizando así la relación entre exactitud y eficiencia computacional.

En cuanto a la geometría, se sugiere implementar la antena en forma rectangular con modificaciones en sus lados ya que esta configuración demostró un rendimiento estable en términos de radiación y ganancia, tanto en condiciones off-torso y on-torso. Además, es pertinente ampliar los estudios a escenarios dinámicos (uso real) en los que el cuerpo humano se encuentre en movimiento, evaluando posibles variaciones de parámetros clave como S11, VSWR y ganancia.

Por otro lado, se recomienda llevar a cabo la fabricación física de la antena y su posterior caracterización experimental, con el fin de contrastar y validar los resultados obtenidos mediante simulación. Este proceso debería considerar la influencia de factores ambientales como la temperatura y la humedad, que podrían afectar el rendimiento del material de grafeno. Finalmente, sería de interés explorar el diseño para aplicaciones en bandas duales o multibanda, lo cual ampliaría el espectro de uso de la antena, permitiendo su integración en sistemas de comunicación como WiFi 6E o redes 5G, incrementando así su versatilidad y aplicabilidad.

Referencias

- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Hall, P. S., & Hao, Y. (2006). *Antennas and propagation for body-centric wireless communications*. IET. <https://doi.org/10.1049/PBEW054E>
- Hertleer, C., Rogier, H., Vallozzi, L., & Van Langenhove, L. (2009). Integration of antennas in textiles for wireless communication. *AUTEX Research Journal*, 9(2), 54–58.
- Ibáñez Labiano, P., Sanz-Izquierdo, B., Batchelor, J. C., & García-Alloza, A. (2021). Design and characterization of a graphene-based wearable antenna for UWB applications. *IEEE Access*, 9, 30517–30526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060012>
- Kiourti, A., & Nikita, K. S. (2012). A review of in-body biotelemetry devices: Implantables, ingestibles, and injectables. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(6), 1497–1509. <https://doi.org/10.1109/TBME.2012.2189883>
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385–388. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>

Liu, W., Salama, K. N., & Shamim, A. (2015). Flexible and compact UWB antenna with conformal characteristics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(5), 2247–2254. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2408091>

Mishra, R. K., Singh, A. K., & Yadav, P. (2020). Flexible CPW-fed wearable antennas: Design techniques and material considerations. *IEEE Access*, 8, 121763–121780. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006846>

Salonen, P., & Rahmat-Samii, Y. (2007). Textile antennas: Effects of antenna bending on input matching and impedance bandwidth. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 22(11), 18–22. <https://doi.org/10.1109/MAES.2007.4455149>

Sazonov, E., & Neuman, M. R. (Eds.). (2014). *Wearable sensors: Fundamentals, implementation and applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-04373-4>

Farinholt, K., Dang, W., & Lu, N. (2019). Flexible and stretchable antennas for bio-integrated electronics. *Advanced Healthcare Materials*, 8(1), 1801395. <https://doi.org/10.1002/adhm.201801395>

Gabriel, S., Lau, R. W., & Gabriel, C. (1996). The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in Medicine and Biology*, 41(11), 2271. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/003>

Geim, A. K., & Grigorieva, I. V. (2013). Van der Waals heterostructures. *Nature*, 499(7459), 419–425. <https://doi.org/10.1038/nature12385>

ICNIRP. (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>

Jin, J. (2015). *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons.

Kim, Y., Kim, G., Lee, J., & Kim, S. (2017). Folded monopole antenna with wearable graphene conductors. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 2416–2419. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2710920>

Novoselov, K. S., Falko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G., & Kim, K. (2012). A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192–200. <https://doi.org/10.1038/nature11458>

Zhou, H., Xie, Q., Huang, Y., Yin, Z., & Zhang, H. (2020). Recent developments in flexible and stretchable antennas for bio-integrated electronics. *Materials Today*, 33, 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.08.001>