



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE UNA ANTENA MICROSTRIP CON SUSTRATO FLEXIBLE DENTRO DE LA BANDA ISM

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Telecomunicaciones

AUTORES: RICHARD JOSUE ESPINOSA CHAVARREA
RHANDY MIJUEL SUNTAXI GUALUTUÑA

TUTOR: JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO

Quito-Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Richard Josue Espinosa Chavarrea con documento de identificación N° 1725127805 y Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña con documento de identificación N° 1727495820; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de febrero del año 2024

Atentamente,



Richard Josue Espinosa Chavarrea
1725127805



Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña
1727495820

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Richard Josue Espinosa Chavarrea con documento de identificación N° 1725127805 y Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña con documento de identificación N° 1727495820, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Evaluación de Parámetros de rendimiento de una Antena Microstrip con un sustrato flexible dentro de la banda ISM”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del año 2024

Atentamente,



Richard Josue Espinosa Chavarrea
1725127805



Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña
1727495820

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Johanna Berenice Arguero Tello con documento de identificación N° 1723989149, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE UNA ANTENA MICROSTRIP CON SUSTRATO FLEXIBLE DENTRO DE LA BANDA ISM, Richard Josue Espinosa Chavarrea con documento de identificación No. 1725127805 y Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña con documento de identificación No. 1727495820, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad PolitécnicaSalesiana.

Quito, 26 de febrero del año 2024

Atentamente,



Ing. Johanna Berenice Arguero Tello MSc.

1723989149

DEDICATORIA

Con profundo amor y gratitud, deseo dedicar este proyecto de investigación a mis queridos padres, Ángel Espinosa y Carmen Chavarrea. Su inquebrantable amor y apoyo han sido mi mayor fuente de inspiración a lo largo de esta travesía académica. Agradezco infinitamente por su constante respaldo, consejos sabios y por ser pilares fundamentales en mi camino hacia la culminación de mis estudios. A mis amados hermanos, les reconozco su apoyo incondicional en cada paso de mi carrera. También, extendiendo mi agradecimiento a toda mi familia, cuyo aliento y presencia han sido parte integral de este logro.

Richard Josue Espinosa Chavarrea

A mis padres Elisa Gualutuña y Luis Suntaxi por inculcarme valores y conocimientos que han hecho de ellos una persona super fuerte. A mis hermanos Adrian Suntaxi y Celeste Suntaxi por estar siempre conmigo sea aconsejándome o apoyándome en todo lo que he realizado hasta el día de hoy. Todos mis logros siempre serán por cada uno de ustedes que a pesar de todos los problemas que he pasado en el transcurso de mi vida nunca soltaron mi mano y siempre estuvieron para mí. También, extendiendo mi agradecimiento a toda mi familia que siempre estuvieron apoyando a mis padres en las peores situaciones y gracias a ustedes puedo decir que mi camino recién empieza y que ustedes fueron el pilar fundamental para este logro.

Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a Dios por su constante guía y bendiciones que han iluminado cada paso tanto en nuestra trayectoria profesional como en nuestra vida personal.

A nuestros queridos padres, les debemos un profundo reconocimiento por su inquebrantable apoyo y amor incondicional, elementos fundamentales que han allanado los caminos más difíciles y han contribuido significativamente al éxito de esta etapa tan importante en nuestras vidas.

Agradecemos también a nuestros compañeros, con quienes compartimos momentos de aprendizaje, colaboración y amistad. Su apoyo y aliento fueron esenciales para mantenernos motivados en los momentos más desafiantes.

Asimismo, deseamos expresar nuestro reconocimiento a cada uno de los docentes del programa de Telecomunicaciones, quienes, ya sea de forma directa o indirecta, han sido parte integral de nuestra formación profesional. Su generosa compartición de conocimientos y sabiduría ha enriquecido enormemente nuestra experiencia educativa.

Richard Josue Espinosa Chavarrea

Rhandy Mijael Suntaxi Gualutuña

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RENDIMIENTO DE UNA ANTENA MICROSTRIP CON SUSTRATO FLEXIBLE DENTRO DE LA BANDA ISM

PERFORMANCE EVALUATION OF A MICROSTRIP ANTENNA WITH FLEXIBLE SUBSTRATE IN THE ISM BAND

Berenice Arguero-Tello¹, Josue Espinosa-Chavarrea², Rhandy Suntaxi-Gualutuña³

Resumen

En el siguiente artículo se realizó un análisis comparativo de los parámetros de rendimiento de dos antenas microstrip con parche rectangular con diferentes sustratos: como el sustrato el Flame Retardant tipo 4 (FR4) sobre el cual se depositó el parche de cobre y por otro lado un sustrato flexible el Polietileno Tereftalato (PET) para una frecuencia de 2.4GHz, con una alimentación directa conformada de la línea microstrip de 50 ohm, mediante simulación numérica. A pesar de las modificaciones en los parámetros, tales como la permitividad en el material del sustrato y la reducción en su espesor, se logró una mejora del 1.49% en el ancho de banda del material propuesto PET, alcanzando 67.80MHz. Los resultados incluyen un VSWR de 1.011, el parámetro de dispersión S11 de -45.06dB, y una ganancia de 6.93dB a una frecuencia de resonancia de 2.4GHz, cumpliendo los requerimientos de diseño establecidos.

Palabras Clave: microstrip, sustrato flexible, S11, VSWR, FR4, IoT, PET.

Abstract

This article presents a comparative analysis between two microstrip patch antennas with rectangular copper patches and different dielectric substrates: Flame Retardant type 4 (FR4) and Polyethylene Terephthalate (PET). Both antennas operate at 2.4GHz frequency and are fed by a 50 ohm microstrip line. Despite modifications in parameters such as permittivity and thickness reduction of the PET substrate, an improvement of 1.49% bandwidth was achieved with the PET antenna, reaching 67.80MHz. The PET antenna delivered a Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) of 1.011, scattering parameter (S11) of -45.06dB, and gain of 6.93dBi at the target 2.4GHz resonance frequency, fulfilling the stipulated design requirements. This investigation shows PET substrates allow enhanced bandwidth, efficiency and gain on microstrip antennas for wireless communications, in comparison to standard FR4 substrates.

Keywords: microstrip, substrate flexible, S11, VSWR, FR4, IoT, PET.

1. Introducción

En la era digital actual, las conexiones inalámbricas se han vuelto ubicuas y desempeñan un papel esencial en la vida cotidiana. La constante evolución de las comunicaciones inalámbricas, junto con la creciente necesidad de dispositivos wearables y flexibles[1] ha generado nuevos desafíos en el diseño de sistemas ante los cuales, las antenas microstrip flexibles han surgido como una atractiva solución innovadora[2]. Estas antenas son esenciales para posibilitar la conectividad de una amplia gama de dispositivos en el modelo en desarrollo del Internet de las Cosas (IoT), donde la operación en la banda ISM de 2.4GHz es especialmente relevante al ser utilizada por tecnologías como Wi-Fi y Bluetooth[3]. Lo que ha motivado a un activo desarrollo y la investigación intensiva en antenas microstrip flexibles funcionando en esta banda de frecuencias.

Como se evidencia en [4], la antena diseñada con el sustrato FR4 exhibe un rendimiento destacado en la frecuencia de 2.4 GHz, alcanzando una ganancia máxima de 4.01 dBi y una directividad de hasta 7.14 dB. Esta comparación se llevó a cabo considerando otras frecuencias relevantes como 2.3 GHz y 2.5 GHz, y los resultados indican que la antena diseñada con FR4 supera a las alternativas evaluadas, siendo particularmente adecuada para aplicaciones de IoT. Dada su relevancia para la investigación, este rendimiento se considera como un punto de referencia en la comparativa.

Por otro lado, los resultados en [5] demostraron que la antena basada en PET exhibió el mejor desempeño en términos de desviación de frecuencia bajo condiciones de curvatura, con sólo un 0,99% de cambio desde su estado plano con un radio de curvatura de 14mm. Además, a una frecuencia de 2.45 GHz, el PET exhibió un coeficiente de reflexión de S_{11} de -35 dB, indicando un rendimiento favorable. Este comportamiento positivo se mantuvo en un rango más amplio de frecuencias, específicamente entre 2.2 y 2.5 GHz. Este análisis exitoso de curvatura de antenas flexibles basadas en polímeros demostró su confiabilidad en términos de flexibilidad a través de diversas etapas de curvatura.

Estas antenas flexibles ofrecen una combinación única de los beneficios inherentes de las antenas microstrip, como rendimiento eficaz y su perfil delgado

[6], junto con la flexibilidad que permite su integración en una variedad de aplicaciones donde la adaptabilidad son fundamentales [7] [8]. El propósito de este artículo es el diseño y caracterización de una antena microstrip flexible para operar en la banda ISM de 2.4GHz, con un análisis detallado de los parámetros de rendimiento, tales como VSWR, coeficiente de reflexión y patrón de radiación.

2. Materiales y Métodos

2.1. Desarrollo de una antena microstrip con configuración de parche rectangular.

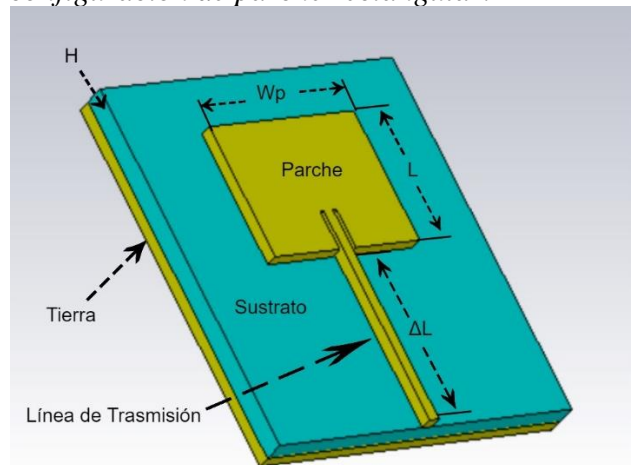


Figura 1: Estructura de la antena microstrip tipo parche rectangular.

En la figura 1 se presenta el modelo de antena tradicional, compuesto por un parche rectangular, una línea de trasmisión, un sustrato dieléctrico y un plano de tierra. La antena tradicional se emplea como sustrato el material Flame Retardant tipo 4 (FR4), mientras que para la segunda antena se utiliza polietileno terftalato (PET) con una permitividad relativa de 3,5[9] como dieléctrico flexible. El material conductor utilizado tanto para el parche radiante como para la línea de alimentación microstrip es cobre. Además, se implementaron dos ranuras o inserciones tipo C con la finalidad de mejorar su rendimiento debido a que incrementa el ancho de banda como se menciona en [10].

La elección de estos materiales se llevó a cabo después de ajustar cada componente para optimizar su rendimiento en la frecuencia objetivo, asegurando así la adecuación a los parámetros de dispersión establecidos en la investigación. Este enfoque facilitó la obtención

de resultados acordes con los objetivos planteados en el estudio[11].

Parámetros de la Antena 2,4 GHz	Sustrato		
	Optimizado Solida (mm)	Matemático Flexible (mm)	Optimizado Flexible (mm)
Ancho del parche (W_p)	37,558	41,70	41
Longitud del parche (L_p)	29,182	33,32	32,899
Ancho del plano de Tierra (W_g)	75,116	83,33	83
Longitud del plano de Tierra (L_g)	58,364	66,64	60
Ancho de la línea de alimentación (W_f)	2,821	1,174	2,62
Longitud de la línea de alimentación (L_f)	29,182	43,29	43
Espaciado de Insercion (S_g)	0,8	1,28039	1
Longitud de inserción (S_i)	8,85	9,97	9,6
Espesor (H)	1,5	0,5	0,5
Espesor del cobre MT	0,035	0,035	0,035
Coefficiente de extensión (K)	5,59	6,46	6,46

Tabla 1. Dimensiones para las antenas PET y FR4

La Tabla 1 presenta los parámetros geométricos optimizados correspondientes a cada configuración de diseño de la antena con sus respectivos sustratos FR4 y PET, buscando que funcionen a la frecuencia de 2.4 GHz. Las dimensiones presentadas son el resultado de un proceso iterativo de ajuste sobre los valores iniciales predichos mediante fórmulas matemáticas. Estos modelos optimizados lograron los mejores resultados en cuanto a los parámetros S_{11} y VSWR. Las variaciones finales en las dimensiones respecto a los valores teóricos iniciales se deben a la complejidad de los fenómenos involucrados en el comportamiento electromagnético de las antenas [7] [2].

Se emplearon las ecuaciones 1,2,3,4 que abordaron diferentes parámetros, tales como la longitud del parche (L), el largo del sustrato (L_p), el ancho del parche (W_p), el espesor del sustrato (h), la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{reff}), la longitud efectiva (L_g), la extensión de longitud (ΔL), el largo de la tierra (L_g) y la tierra (W_g) [12].

Dimensiones del ancho y longitud del parche:

$$W_p = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$L_p = L_e - 2\Delta L \quad (2)$$

Donde, f_r es la frecuencia, v_0 es velocidad de la luz y ϵ_r permitividad relativa del material del sustrato dichas variables para calcular el ancho del parche (1), mientras que para la longitud del parche L_e es la longitud efectiva del elemento conductor y ΔL es el incremento de la longitud (2).

Dimensiones de las inserciones:

$$S_g = \frac{v_0 * f_r * 4.65x10^{-18}}{\sqrt{2\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

$$S_i = \frac{L}{\pi} * \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z_0}{Z_{in}}} \right) \quad (4)$$

Donde, f_r es la frecuencia resonante, v_0 es velocidad de la luz y ϵ_{reff} la constante dieléctrica efectiva dichas variables para el espaciado de la inserción (5), mientras que para la longitud de la inserción (4) Z_0 es la impedancia característica y Z_{in} impedancia de entrada [12].

3. Resultados y Discusión

En la fase inicial del estudio, se procedió a evaluar los parámetros de la antena flexible mediante un proceso de optimización con el objetivo de lograr un acoplamiento adecuado para los propósitos de la investigación. Se empezó simulando la antena con material flexible PET a una frecuencia de 2.4 GHz, pertinente para aplicaciones de IoT. La elección de esta frecuencia fue estratégica para permitir una comparación significativa con una antena de sustrato sólido FR4.

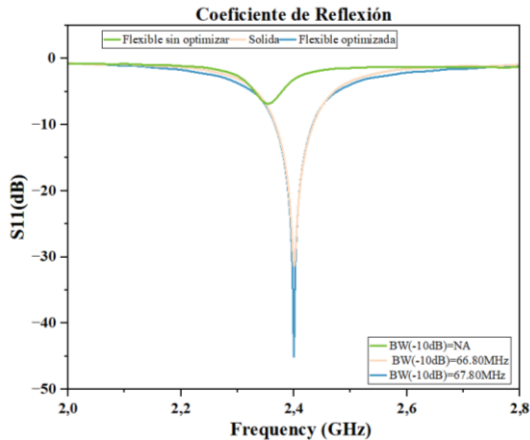


Figura 2: Comparación de resultados del coeficiente de reflexión en la frecuencia de resonancia de 2.4 GHz.

En la Figura 2 se muestra el parámetro de reflexión S_{11} en relación con la frecuencia para cada antena, incluyendo el S_{11} de la antena PET no optimizada para fines de comparación. A una frecuencia de 2.4 GHz, la antena FR4 exhibe un S_{11} de -31.35 dB con un ancho de banda de 66.80 MHz. En contraste, la antena de PET, considerando la variación en su constante dieléctrica y dimensiones tras un proceso de optimización, presenta un S_{11} de -45.06 dB y un ancho de banda de 67.80 MHz en la misma frecuencia. Esto refleja una mejora del 1.49% con respecto a la antena de FR4. Cabe destacar que la antena PET sin optimizar no cumplía con los requisitos apropiados para el estudio, pero gracias a la optimización, se logró una mejora significativa que permitió la utilización efectiva de ambas antenas en aplicaciones (IoT).

En la Figura 3 se representa la curva VSWR en función de la frecuencia. La antena con sustrato de FR4 muestra un VSWR de 1.0566, indicando una adaptación eficaz con una baja cantidad de energía reflejada, cercano a la relación ideal de 1:1. Por otro lado, la antena con sustrato de PET presenta un VSWR de 1.0112, mejorando un 4.49% con respecto a la antena de sustrato rígido. Es importante destacar que la antena PET no optimizada no satisface el estándar de adaptación 1:1 propuesto, manifestando aproximadamente un 37% de la potencia incidente reflejada. Este valor supera el rango ideal, sugiriendo una adaptación menos eficiente y una mayor pérdida de potencia en comparación con la antena optimizada de sustrato PET.

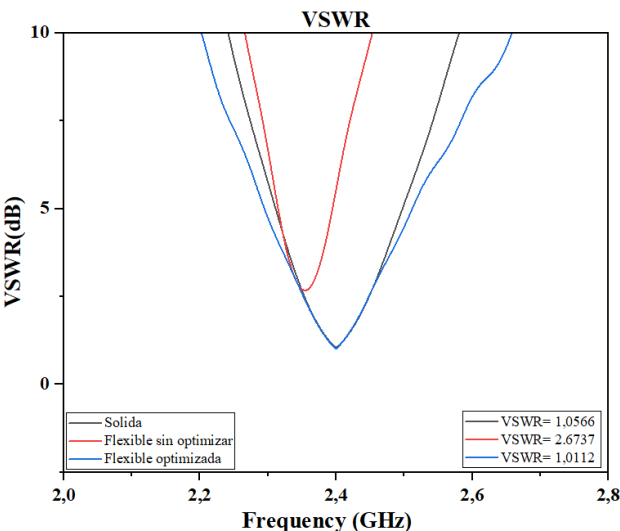


Figura 3. Curva de VSWR vs frecuencia a 2.4 GHz

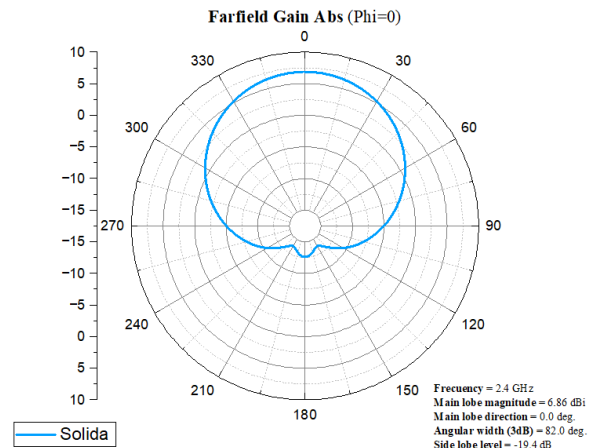


Figura 4: Patrón de radiación de la antena sólida microstrip en la frecuencia de operación de 2.4 GHz.

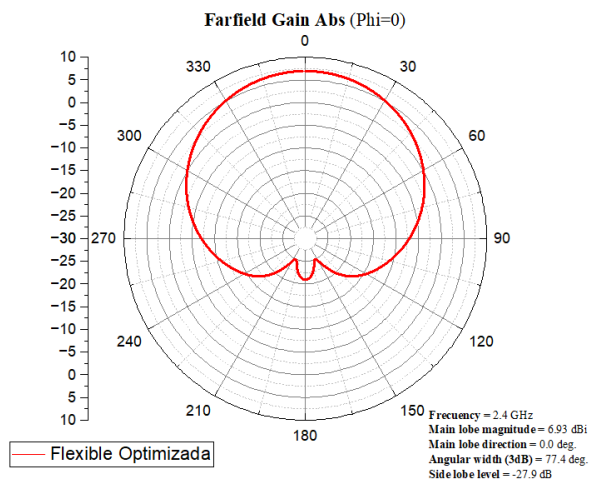


Figura 5: Patrón de radiación de la antena flexible microstrip en la frecuencia de operación de 2.4 GHz.

En la Figura 4 y 5, se examinan los patrones de radiación de las antenas en el contexto de este estudio. La antena con sustrato FR4 se obtuvo una ganancia de 6.86 dB con un HPBW (Half Power BeamWidth) de 82°, mientras que la antena con sustrato PET presenta una ganancia superior de 6.93 dB y un HPBW de 77.4°, siendo un 1.02% mayor que la antena FR4 brindando una mayor cobertura. No obstante, la antena PET no optimizada, a pesar de presentar una ganancia mejorada, se excluye del análisis debido a su deficiente coeficiente de reflexión y un VSWR elevado, factores que comprometen su eficiencia y adaptación al sistema.

Este estudio demuestra que el PET es un sustrato dieléctrico prometedor para el diseño de antenas flexibles de parche microstrip destinadas a aplicaciones IoT operando en 2.4GHz. La antena sobre PET mejoró el ancho de banda y parámetros como ganancia, VSWR y S11 en comparación al sustrato FR4 convencional. Además, la flexibilidad mecánica y reducido espesor del PET permitirán adaptar las antenas a diversas superficies y objetos del entorno IoT. Así mismo, el PET posee buena estabilidad térmica, es ligero y de bajo costo. Por ello, el reemplazo de FR4 por PET como dieléctrico de antenas microstrip abre variadas oportunidades para desarrollar dispositivos de comunicación inalámbrica eficientes e integrables en el ámbito IoT.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que emplear el PET como material de sustrato flexible en el diseño de la antena proporciona mejoras significativas en comparación con el FR4. La mejora del 1.49% en el ancho de banda, junto con un VSWR de 1.011, un parámetro de dispersión S11 de -45.06dB y una ganancia de 6.93dBi a 2.4GHz, respaldan la eficacia del PET en este contexto. A pesar de las modificaciones en los parámetros, como la permitividad y el espesor reducido, el PET exhibe una mayor adaptabilidad al entorno gracias a su flexibilidad y medidas reducidas.

De los resultados obtenidos, el PET podría ser una opción más favorable para el diseño de antenas destinadas al Internet de las cosas (IoT) operando a una frecuencia de 2.4GHz. En resumen, los resultados indican que el PET no solo supera al FR4 en términos de rendimiento de la antena, sino que también presenta ventajas adicionales en cuanto a su adaptabilidad y aplicabilidad en entornos específicos como los requeridos para dispositivos IoT.

Referencias

- [1] S. Vived Sánchez, I. Gil, G. Germán, and C. Rodríguez, “Diseño de antenas wearable de banda estrecha,” 2023.
- [2] D. U. Siglo En Curso, *Colección: Coediciones Actualidad y Perspectivas para un desarrollo sustentable TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN FRENTE A LOS DESAFÍOS*. [Online]. Available: <https://www.uniagustiniana.edu.co/>
- [3] K. Nallely, O. Nuñez, R. Stack, and M. Arteaga, “Diseño, Modelado y Caracterización de Arreglo de Antenas Microstrip para Aplicaciones del Internet de las Cosas.”
- [4] O. Islam and S. A. Shikha, “IoT application using a unique rectangular 2.4GHz microstrip patch antenna.”
- [5] M. Usman, A. Khan, R. Raad, F. Tubbal, and P. I. Theoharis, “The Impact of Bending on Radiation Characteristics of Polymer-Based Flexible Antennas for General IoT Applications,” 2021, doi: 10.3390/app.
- [6] S. Chauhan, A. Kothari, and H. Ugale, “Simulation and Implementation of Circular Microstrip Patch Antenna Center of Excellence, Combedded Systems: Hybridization of Communications and Embedded Systems under NPIU (TEOIP-1.2.1), Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India View project Rough set Based UANN based pattern classifier View project Simulation and Implementation of Circular Microstrip Patch

- Antenna,” 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/351385321>
- [7] E. DE Ingeniería En Electrónica, T. Y. Redes, and C. Y. Microondas En La Fie-epoch, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SET DE BALUNS DE ALTAS FRECUENCIAS UTILIZANDO TECNOLOGÍAS MICROSTRIP Y MMIC PARA EL LABORATORIO DE,” 2019.
- [8] A. T. Castro and S. K. Sharma, “Inkjet-printed wideband circularly polarized microstrip patch array antenna on a PET film flexible substrate material,” *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, vol. 17, no. 1, pp. 176–179, Jan. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2017.2779440.
- [9] E. B. Jaramillo, L. Muñoz, A. Ossa, and M. P. Romo, “Comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas Mechanical behavior of polyethylene terephthalate (PET) and geotechnical applications,” 2014.
- [10] M. S. Ibrahim, “Dual-Band Microstrip Antenna for the Fifth Generation Indoor / Outdoor Wireless Applications.”
- [11] M. Usman, A. Khan, R. Raad, F. Tubbal, and P. I. Theoharis, “The Impact of Bending on Radiation Characteristics of Polymer-Based Flexible Antennas for General IoT Applications,” 2021, doi: 10.3390/app.
- [12] C. A. Balanis, “*ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*,” 2005. [Online]. Available: <https://ia800501.us.archive.org/30/items/AntennaTheoryAnalysisAndDesign3rdEd/Antenna%20Theory%20Analysis%20and%20Design%203rd%20ed.pdf>