



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**ANÁLISIS DE LA ANTENA RFID EMPLEANDO DIFERENTES  
SUSTRATOS TEXTILES EN LA BANDA ISM**

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

**AUTORES:**

ANTHONY FABRICIO ZUMBA SALTOS

SANDRA KARINA MALDONADO PILLAJO

**TUTOR:**

JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO

Quito-Ecuador

2022

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Anthony Fabricio Zumba Saltos** con documento de identificación N° 1719026153 y **Sandra Karina Maldonado Pillajo** con documento de identificación N° 1727361253; 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, 06 de Septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Anthony Fabricio Zumba Saltos  
1719026153



---

Sandra Karina Maldonado Pillajo  
1727361253

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

Nosotros, **Anthony Fabricio Zumba Saltos** con documento de identificación No. 1719026153 y **Sandra Karina Maldonado Pillajo** con documento de identificación No. 1727361253, 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: “Análisis de la antena RFID empleando diferentes sustratos textiles en la banda ISM ”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros 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, 06 de Septiembre del año 2022

Atentamente,

---

Anthony Fabricio Zumba Saltos  
1719026153

---

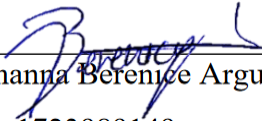
Sandra Karina Maldonado Pillajo  
1727361253

## 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: ANÁLISIS DE LA ANTENA RFID EMPLEANDO DIFERENTES SUSTRATOS TEXTILES EN LA BANDA ISM, realizado por **Anthony Fabricio Zumba Saltos** con documento de identificación N° 1719026153 y por **Sandra Karina Maldonado Pillajo** con documento de identificación N° 1727361253, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 06 de Septiembre del año 2022

Atentamente

  
Ing. Johanna Berenice Arguero Tello, Msc

1723989149

# ANÁLISIS DE LA ANTENA RFID EMPLEANDO DIFERENTES SUSTRATOS TEXTILES EN LA BANDA ISM

Anthony Fabricio  
Zumba Saltos  
Ingeniería en  
Telecomunicaciones  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
azumbas1@est.ups.edu.ec

Sandra Karina  
Maldonado Pillajo  
Ingeniería en  
Telecomunicaciones  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
smaldonad@est.ups.edu.ec

Johanna Berenice Arguero  
Tello  
Ingeniería en  
Telecomunicaciones  
Universidad Politécnica  
Salesiana  
Quito, Ecuador  
jarguero@ups.edu.ec

**Resumen-** Mediante modelación electromagnética en Ansys HFSS se analizó una antena RFID con diferentes sustratos textiles como mezclilla-algodón y poliéster-algodón sintonizada a la frecuencia 4 GHz de la banda ISM (2.4 – 5.8 GHz). Se analizó los parámetros de desempeño como el coeficiente de reflexión, VSWR y ganancia. Para el sustrato de mezclilla de algodón donde se obtuvo un valor S11 es -14.44 [dB] y un VSWR de 1.46 mientras que para el sustrato de poliéster de algodón alcanzó un S11 de -41.39 [dB] y VSWR de 1.04. Donde los resultados demuestran que el sustrato poliéster de algodón presenta una mayor ganancia 6.2 [dB] siendo este material idóneo para ser usado en las antenas RFID plasmando una disminución en la complejidad de los circuitos involucrados, en un proceso que facilite de mejor manera el diseño, fabricación, flexibilidad y robustez de la antena.

**Palabras claves:** antenas UHF, ANSYS HFSS, coeficiente de reflexión, etiquetas RFID, ISM, sustratos textiles.

**Abstract-** Using electromagnetic modeling in Ansys HFSS, an RFID antenna with different textile substrates

such as denim-cotton and polyester-cotton tuned to the 4 GHz frequency of the ISM band (2.4 – 5.8 GHz) was analyzed. Performance parameters such as reflection coefficient, VSWR and gain were analyzed. For the cotton denim substrate where an S11 value was obtained is -14.44 [dB] and a VSWR of 1.46 while for the cotton polyester substrate it reached an S11 of -41.39 [dB] and VSWR of 1.04. Where the results show that the cotton polyester substrate has a higher gain 6.2 [dB] this material being suitable to be used in RFID antennas, reflecting a decrease in the complexity of the circuits involved, in a process that better facilitates the design, manufacture, flexibility and robustness of the antenna.

**Keywords:** UHF antennas, ANSYS HFSS, reflection coefficient, RFID tags, ISM, textile substrates.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el internet de las cosas (Internet of Things, IoT), basado en sensores, computación móvil, tecnologías y plataformas de servidores en la nube, están en continuo desarrollo. Donde la posibilidad de conectar

todo tipo de elementos cotidianos a internet, así como los métodos de comunicación inalámbrica juega un papel importante en este concepto [1]. El enfoque de IoT, asociado con tecnologías portátiles, a menudo requiere el uso de nodos inalámbricos que pueden basarse en sensores con una interfaz de identificación por radiofrecuencia (RFID), siendo una tecnología inalámbrica aplicada en tiempo real referente a la localización, identificación y seguimiento de objetos mediante señales de radiofrecuencia [1]-[3].

Uno de los desafíos más importantes al diseñar etiquetas RFID es la relación tamaño-rendimiento de la antena y la interacción no deseada con los cuerpos circundantes [4]. Por lo tanto, el desarrollo de etiquetas montables en plataformas con diferentes formas y materiales dificulta la consecución de patrones de radiación direccional, grandes rangos de lectura y baja sensibilidad en términos de banda de frecuencia y ganancia.

En la actualidad, la demanda de productos RFID de bajos costes, flexibles, seguros y resistentes están creciendo rápidamente [5]. Por tal motivo, la instauración de circuitos de microondas basados en sustratos flexibles a un menor precio, resultan ser objetos de numerosos estudios. Los sustratos flexibles se consideran interesantes, dado que son compatibles, livianos, de gran elasticidad, altamente disponibles y de fácil acceso para producir en masa.

En [6] diseñan una antena RFID en sustrato de papel, donde se observa una reducción más de la mitad el tamaño de la antena empleada, manteniendo un valor óptimo de operación referente al coeficiente de reflexión en  $-32,5$  dB con una ganancia de  $1,19$  dBi y la eficiencia de radiación de  $86\%$  concertando el buen acople con este material. Mientras que en [7] diseñan una antena tipo sensor, utilizando varios materiales flexibles,

como el algodón. El prototipo de la antena se desarrolla en la operabilidad de una frecuencia de trabajo próxima a los  $2.45$  GHz, empleando el sustrato de algodón, la antena del sensor diseñada en sincronización con los parámetros de resonancia en cierta frecuencia, demostró una forma de aumentar la sensibilidad reduciendo el tamaño de la antena. De esta forma una variación en el cambio en la constante dieléctrica provoca un desplazamiento frecuencia de funcionamiento.

Las antenas RFID con sustratos textiles por su flexibilidad, comodidad, robustez son capaces de incorporarse al usuario sin interferir en sus actividades o movimientos para la identificación, monitoreo y control. Es así, que con la propuesta mencionada se puede integrar fácilmente dentro de los escenarios de la medicina, industria de IoT.

Esta investigación está centralizada en analizar el rendimiento y comportamiento de una antena RFID de bajo costo y con un alto rendimiento, montada en diferentes sustratos textiles (mezclilla-algodón y poliéster-algodón) en la banda ISM ( $2.4 - 5.8$  GHz) produciendo antenas ligeras, compactas y discretas, de forma que su adaptabilidad dentro de los entornos industriales, médicos que operan en la banda ISM

Las antenas RFID con sustratos textiles por su flexibilidad, comodidad, robustez son capaces de incorporarse al usuario sin interferir en sus actividades o movimientos para la identificación, monitoreo y control. Es así, que con la propuesta mencionada se puede integrar fácilmente dentro de los escenarios de la medicina, industria de IoT.

En sección II se presenta el diseño, y la configuración para la antena RFID. En la sección III se realiza el análisis comparativo de los diferentes sustratos textiles y finalmente se presentan las conclusiones

## 2. CONFIGURACIÓN

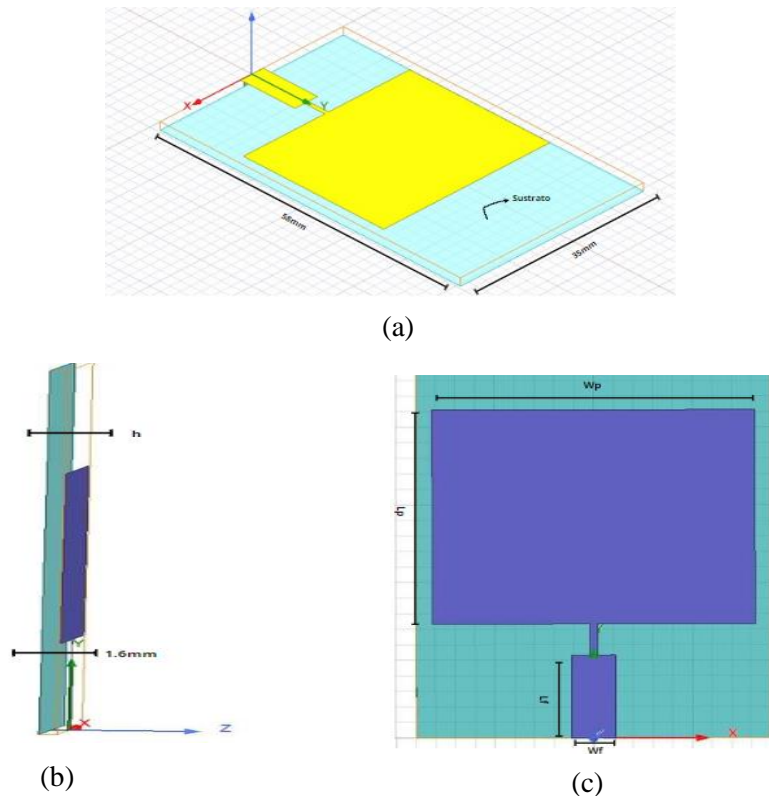


Figura 1. Diseño propuesto de la antena RFID. (a) Vista general (b) Vista lateral (c) Vista superior

En la figura 1 (a) y (b), se muestra el diseño de la antena de etiqueta RFID propuesta por un parche rectangular de cobre que se imprime en dos diferentes sustratos mezclilla-algodón y poliéster-algodón, utilizando un espesor de (h) 1.6 mm para ambos sustratos, una permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) de 1.74 y 1.79 respectivamente y una tangente de pérdida ( $\tan \delta$ ) de 0.002 para el caso de mezclilla-algodón y 0.003 para poliéster-algodón [8]. En la figura 1 (c), para el diseño de la antena, se calcularon las dimensiones utilizando las ecuaciones (3)-(9), para una frecuencia central de 4GHz

Sin embargo, al tener diferente permitividad eléctrica de los sustratos, existe una variación en las dimensiones de la antena, como se distingue en la siguiente tabla.

Tabla 1. Valores de parámetros de los sustratos y parámetros dimensionales del diseño de la antena implementada.

Material	Mezclilla- algodón	Poliéster- algodón
Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )	1.742	1.794
Tangente de pérdida ( $\tan \delta$ )	0.002	0.003
Espesor del sustrato (h) mm	1.6	1.6
Longitud del parche ( $L_p$ ) mm	27.54	26.80
Ancho del parche ( $W_p$ ) mm	32.65	39.50
Longitud de alimentación ( $L_f$ ) mm	14.68	14.29

## 2.1 Sustrato

Un parámetro importante para el diseño de la antena es la elección de los sustratos; ya que, influye significativamente el aumento del grosor del sustrato, genera una eficiencia de radiación favorable en la antena, además de la incidencia superior en los valores de pérdida del dieléctrico y las cifras crecientes como resultado de las ondas de superficie. Se utilizó mezclilla -algodón y poliéster-algodón como sustratos para la antena propuesta, ya que son materiales que pueden proporcionar flexibilidad, robustez y seguridad a la etiqueta. De estos sustratos se tomó en cuenta la permitividad eléctrica y la tangente de pérdida.

En general, los textiles tienen una constante dieléctrica muy baja, lo que reduce las pérdidas por ondas de superficie y en lo que respecta al ancho de banda, evidencia una elevación en dicha métrica para con la impedancia de la antena. Sin embargo, los textiles se ven afectados por la humedad las moléculas de agua del ambiente, lo que afecta su forma y propiedades electromagnéticas, que tienden a aumentar el valor de la constante dieléctrica [9].

Los dieléctricos sólidos tienen constantes dieléctricas medias. Algunos son notablemente más flexibles y duraderos, absorben más o menos humedad y tienen diferentes propiedades de aislamiento, como renombrados se tiene materiales inorgánicos como la cerámica, el vidrio, resinas, mica, textiles y fibras [10].

La permitividad eléctrica o constante dieléctrica es el parámetro físico que describe la influencia que produce un campo eléctrico sobre un material [11]. La permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) se suele expresar en función de la permitividad en el vacío ( $\epsilon_0$ ) la cual es una constante igual a  $8.8541 \cdot 10^{-12}$  F/m y la permitividad absoluta del material ( $\epsilon$ ), se puede calcular mediante la ecuación (1).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Una baja constante dieléctrica se asocia a mejores eficiencias de radiación, mayor ancho de banda, menos pérdidas en el dieléctrico y disminución de las ondas de superficie [12].

Un factor decisivo para estipular la atenuación cuando se opera a frecuencias por encima de 1 GHz, es la tangente de pérdidas ( $\tan\delta$ ), denotada como una medida adimensional que se puede deducir con la ecuación (2):

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad (2)$$

La conductividad está representada por la simbología de  $\sigma$ , a su vez la frecuencia angular presentada como  $\omega$  y el símbolo  $\epsilon$  denominado como la permitividad absoluta.

Mediante el método de línea de transmisión, se detallan los cálculos realizados para obtener el diseño de la antena [13]. El parche requiere de un valor de anchura ( $W$ ) determinada por la ecuación (3):

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r}} \quad (3)$$

Aquí,  $c$  se define como la velocidad de la luz,  $\epsilon_r$  la permitividad eléctrica del sustrato y  $f_r$  como frecuencia central. En la obtención real de la longitud del parche se maneja la ecuación (4) considerando una longitud efectiva mayor  $L_{eff}$ .

$$L = L_{eff} - 2\Delta l = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ff}}} - 2\Delta l \quad (4)$$

Donde las ecuaciones (5) y (6) permiten obtener el valor de la constante dieléctrica efectiva  $\epsilon_{ff}$  y del incremento  $\Delta l$



$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (6)$$

Para calcular las dimensiones como la anchura y longitud de la línea de transmisión. Se emplean las ecuaciones (7) y (8) tomando una impedancia de  $50\Omega$  para el acople con el parche.

La longitud de la alimentación de inserción  $L_f$ :

$$L_f = \frac{v_0}{4f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (7)$$

El ancho de la alimentación  $W_f$ :

$$H' = \frac{50\sqrt{2(\epsilon_{reff} + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}\right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi}\right) + 0.1594 \quad (8)$$

$$W_f = h \left( \frac{\exp(H')}{8} - \frac{1}{4\exp(H')} \right)^{-1} \quad (9)$$

El diseño tiene en cuenta el rango máximo de lectura a la que un dispositivo RFID puede detectar las señales que se reflejan por la etiqueta. Este también depende de la orientación, debido a que es afectado por la polaridad, el material al que está adherida la etiqueta y el medio de transmisión de la señal.

En consecuencia, con la ecuación de Friis (10 y 11) se puede calcular el retorno del enlace lector-etiqueta:

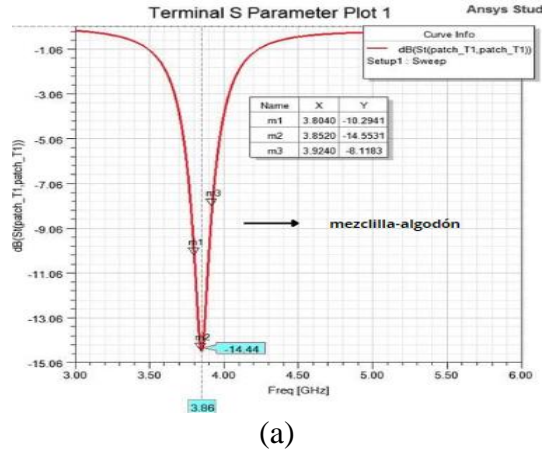
$$R_{forward} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{P_{TX} G_{reader} G_{tag}}{P_{min,rdr}}} \quad (10)$$

$$R_{return} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{TX} T_b G_{rader}^2 G_{tag}^2}{P_{min,rdr}}} \quad (11)$$

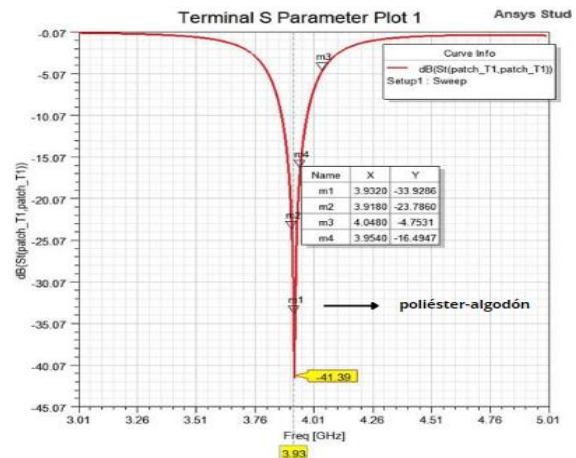
El símbolo  $\lambda$  representa la longitud de onda,  $P_{TX}$  y  $G_{reader}$  indican la potencia y ganancia transmitida por el lector,  $P_{min,tag}$  y  $P_{min,rdr}$  se consideran las potencias mínimas por lector y etiqueta, finalizando con  $T_b$  estimada como la cifra de pérdidas de retorno.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

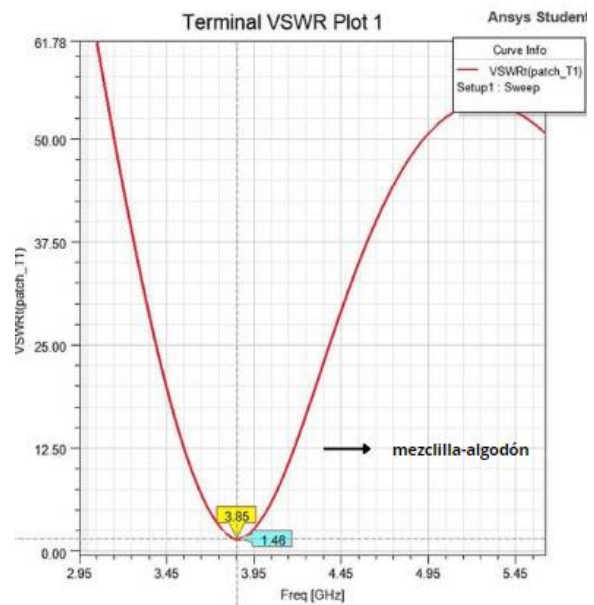
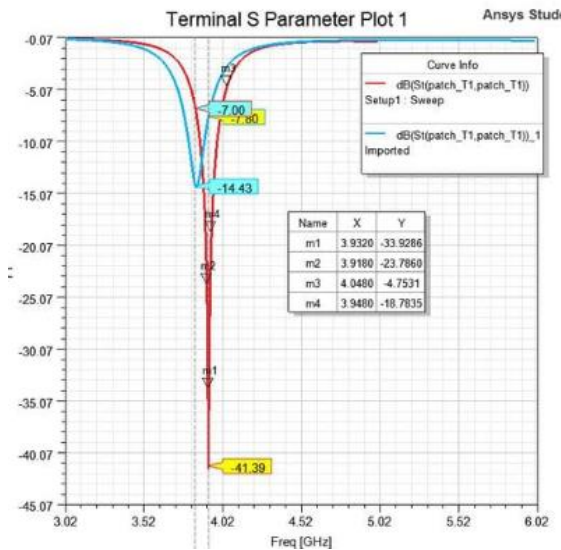
El análisis de antenas RFID se hizo mediante el uso de modelos electromagnéticos y herramientas de simulación electromagnética (HFSS). Se presentan, los detalles de los resultados de diseño, simulación y medición de la antena RFID propuesta sobre los diferentes sustratos.



(a)



(b)

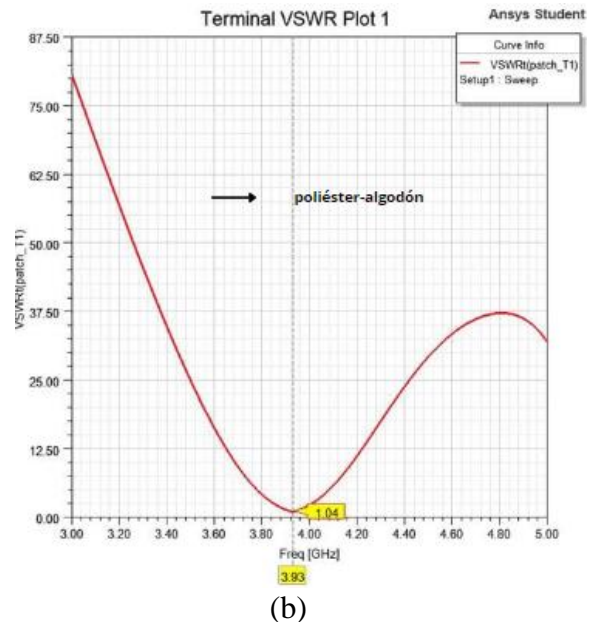


(c) **Figura 2. Gráfica del parámetro S de la antena en diferentes sustratos; (a) sustrato mezclilla-algodón (b) poliéster-algodón y (c) comparativa de las dos**

La figura 2 (a) presenta las pérdidas por retorno de la antena obtenidas mediante el análisis electromagnético los cuales están en la banda de frecuencias de 3.80 a 3.90 GHz para pérdidas de retorno inferiores a los -10 dB, con un BW de 100 MHz, siendo la mayor operación a una frecuencia de 3.86 GHz dando como pérdidas de retorno de -14.44 dB.

Mientras que en la figura 2 (b) para el sustrato poliéster-algodón, indica una superioridad en los resultados, ya que se observa un BW de 110 MHz para la banda de frecuencias de 3.87 a 3.98 GHz. Siendo 3.93 GHz la frecuencia de mayor operación con pérdidas de retorno de -41.39 dB.

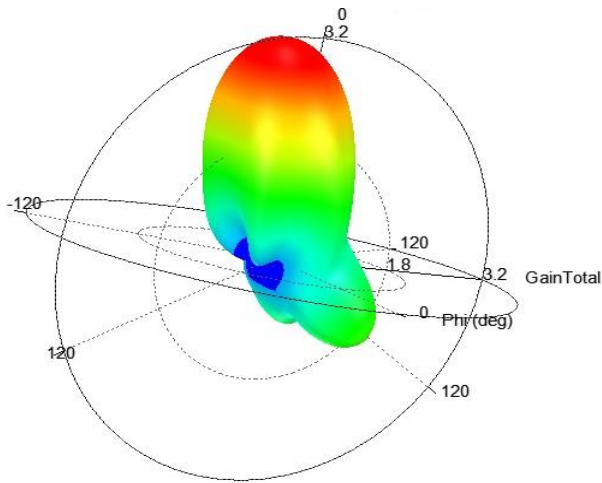
En la figura 2 (c) implica que las antenas en sustrato de mezclilla-algodón va a tener un óptimo desempeño en la frecuencia de 3.86 GHz a diferencia de la antena de sustrato poliéster-algodón cuyo mejor desempeño está en la frecuencia 3.93 GHz



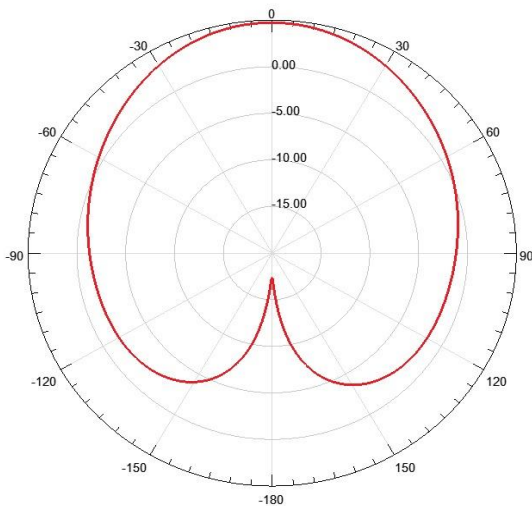
**Figura 3. Gráfica VSWR vs frecuencia de la antena en los dos sustratos; (a) mezclilla-algodón, (b) poliéster-algodón.**

La figura 3 (a) y (b) muestran las gráficas de la relación de onda estacionaria de voltaje (VSWR) correspondiente al diseño de antena sobre los diferentes sustratos se observa que para el sustrato mezclilla-algodón el valor de  $VSWR \leq 2$  de 1.46 en la frecuencia 3.85 GHz; mientras que para el sustrato poliéster-algodón, el valor de  $VSWR \leq 2$  de 1.04 en la frecuencia de 3.93 GHz.

Estos valores de relación de onda estacionaria son aceptables indican una buena adaptación con el sistema.



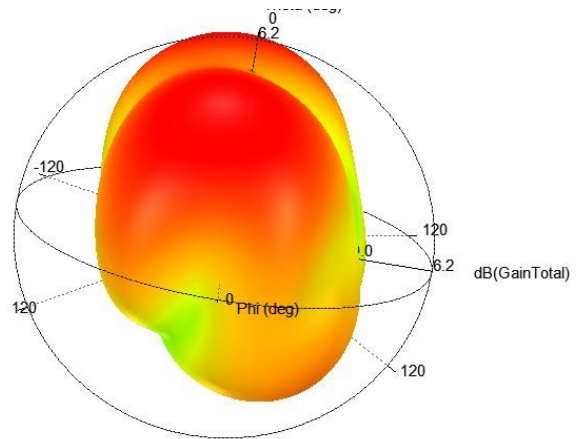
(a)



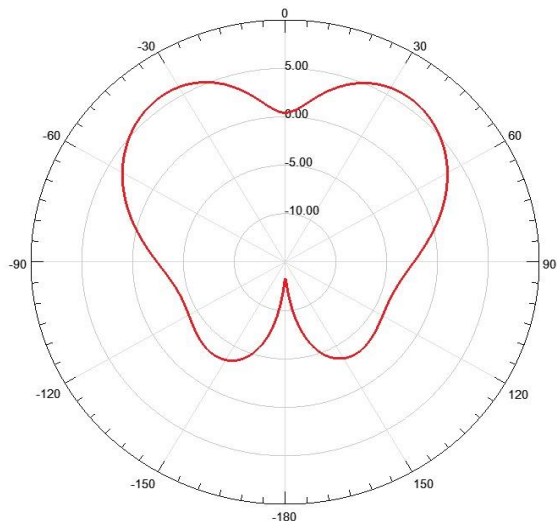
(b)

**Figura 4. Ganancia de la antena sobre el sustrato; (a) mezclilla-algodón 3D, (b) mezclilla-algodón 2D**

En la figura 4 (a) y (b) se presenta la ganancia versus la posición angular en el plano 2D y 3D de la antena en el sustrato mezclilla-algodón con una ganancia máxima de 3.2 dB y directividad de 3.7 dB



(a)



(b)

**Figura 5. Ganancia de la antena sobre el sustrato; (a) poliéster-algodón 3D, (b) poliéster-algodón 2D**

Mientras que para el poliéster-algodón figura 5 (a) y (b) se observa un patrón de radiación sectorial, con una ganancia es 6.2 dB y su directividad de 6,7 dB, esto indica que el uso de poliéster-algodón como sustrato para la antena diseñada tiene mayor ganancia que el sustrato mezclilla-algodón.

Al comparar los parámetros de desempeño de las antenas con los dos sustratos propuestos donde se muestra que el sustrato de poliéster-algodón alcanza un patrón de radiación sectorial con mayor ganancia, con bajas pérdidas. La tabla 2 muestra una comparación entre los sustratos

considerando los parámetros de rendimiento donde se evidencia un mejor rendimiento la antena con el sustrato de poliéster-algodón.

Tabla 2. Valores generales obtenidos de la antena

Material	Mezclilla- algodón	Poliéster- algodón
S11 [dB]	-14.44	-41.39
VSWR	1.46	1.04
Ganancia [dB]	3.2	6.2
Directividad [dB]	3.7	6.7

#### 4. CONCLUSIÓN

Los resultados indican una superioridad en los parámetros de desempeño de la antena con sustrato de poliéster-algodón, presentando un S11 de -41.39 dB, con un ancho de banda de 110 MHz. Un VSWR  $\leq 2$  de 1.04 indicando el apropiado acople de la impedancia entra la línea de transmisión y la antena. El patrón de radiación para la antena propuesta en su máxima dirección angular alcanzó una ganancia de 6.2 dB reduciendo pérdidas mínimas dentro de la frecuencia de 4 GHz. La simulación ha reflejado resultados muy particulares que muestran que la antena propuesta es un buen candidato para aplicaciones RFID, brindando robustez y flexibilidad.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] G. Tomaszewski, P. Jankowski-Miśkiewicz, J. Potencki, A. Pietrikova, and P. Lukacs, "Inkjet-printed HF antenna made on PET substrate," *Microelectronics Reliability*, vol. 129, p. 114473, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.MICROREL.2021.114473
- [2] C. Luo, I. Gil, and R. Fernández-García, "Experimental comparison of three electro-textile interfaces for textile UHF-RFID tags on clothes," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 146, p. 154137, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.AEUE.2022.154137.
- [3] L. Catarinucci, D. De Donno, R. Colella, F. Ricciato, and L. Tarricone, "A cost-effective SDR platform for performance characterization of RFID tags," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, pp. 903-911, 2017.
- [4] J. Blanco Orera, "Diseño y evaluación de prestaciones de antenas impresas de bajo perfil para sistemas GNSS," Universidad de Zaragoza, 2019.
- [5] B. Zhang et al., "Passive UHF RFID tags made with graphene assembly film-based antennas," *Carbon N Y*, vol. 178, pp. 803–809, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CARBON.2021.02.096.
- [6] Á. Félix, "Diseño de antenas RFID en sustratos de papel," Universidad Oberta de Catalunya, 2020. Accessed: May 09, 2022. [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/107126/7/aantafTFG0120memoria.pdf>
- [7] N. Pérez, and G. G. Ignacio, "Diseño de una antena-sensor en sustratos textiles," Universidad Oberta de Catalunya, 2020.
- [8] J. R. Flores Cuadras, "Investigación, análisis y diseño de antenas vestibles con aplicaciones en el internet de las cosas," CICESE, Baja California, 2018.
- [9] C. Hertleer, L. Van Langenhove, H. Rogier, L. Vallozzi, L. Van Langenhove, and H. Rogier, "A Textile Antenna for Fire Fighter Garments," *Autex 2007*, pp. 1–6, 2007.

- [10] F. Chetouane, “An Overview on RFID Technology Instruction and Application,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 382–387, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.IFACOL.2015.06.111.
- [11] J. Céspedes, “Un tag retro-directivo UHF RFID en un sustrato de papel,” Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2018. Accessed: May 09, 2022.
- [12] K. V. S. Rao, P. v. Nikitin, and S. F. Lam, “Antenna design for UHF RFID tags: A review and a practical application,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 12, pp. 3870–3876, Dec. 2005, doi: 10.1109/TAP.2005.859919.
- [13] T. Althobaiti, A. Sharif, J. Ouyang, N. Ramzan, and Q. H. Abbasi, “Planar Pyramid Shaped UHF RFID Tag Antenna with Polarisation Diversity for IoT Applications Using Characteristics Mode Analysis,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 103684–103696, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999256.