

Antena Textil para Aplicaciones de Internet de las Cosas Analizada con la Teoría de Modos Característicos

Textile Antenna for Internet of Things Applications Analyzed with Theory of Characteristics Modes.

Carlos Ramiro Peñafiel-Ojeda ¹[0000-0003-0362-3628], Andrés Ortiz-Cruz ¹[0009-0001-6750-9173],
Gabriela Tubón-Usca ²[0000-0003-3821-4752]

¹ Universidad Nacional de Chimborazo. Facultad de Ingeniería. Carrera de Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Telecomunicaciones, Informática, Industria y Construcción (TEIIC). Av. Antonio José de Sucre Km 1 ½ vía a Guano, 060110, Riobamba-Chimborazo. Ecuador.

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias, Carrera de Química, Grupo de Investigación en Materiales Avanzados GIMA; Panamericana Sur km 1 ½, 060155, Riobamba-Chimborazo. Ecuador.

¹{carlospenafiel, andres.ortiz}@unach.edu.ec, ²gabriela.tubon@esPOCH.edu.ec

CITA EN APA:

Peñafiel-Ojeda, C. R., Ortiz-Cruz, A., & Tubón-Usca, G. (2023). Antena Textil para Aplicaciones de Internet de las Cosas Analizada con la Teoría de Modos Característicos. *Tesla Revista Científica*, 3(2), e180.
<https://doi.org/10.55204/trc.v3i2.e180>

Recibido: 2023-03-08
Revisado: 2023-03-15 al 2022-04-05
Corregido: 2023-04-18
Aceptado: 2023-04-24
Publicado: 2023-05-01

TESLA
Revista Científica
ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

Resumen. En este artículo se ha presentado el diseño de una nueva antena textil usada para aplicaciones de IoT. La antena propuesta está diseñada por dos elementos resonantes esbozados sobre un material de tela mezclilla con un $\epsilon_r = 1.78$. Para describir el comportamiento y encontrar la zona óptima para alimentar la estructura se ha utilizado la Teoría de Modos Característicos, la antena está alimentada por proximidad de forma capacitiva a través de dos líneas de transmisión, la alimentación posteriormente se transforma en un divisor de potencia que genera una buena adaptación de impedancia ($S_{11} < -10$ dB) que va desde 2 GHz a 3,6 GHz con una directividad máxima de alrededor de 4,84 dBi y un diagrama de radiación bidireccional estable en todo el rango de frecuencias, que en presencia del cuerpo humano se transforma en un diagrama unidireccional. Finalmente, la estructura ha sido fabricada y los resultados del coeficiente de reflexión obtenidos son muy similares a aquellos de la simulación.

Palabras Clave: Antena textil, Internet de las Cosas, Tecnología 5G, Teoría de Modos Característicos.

Abstract: In this article, the design of a new textile antenna used for IoT applications has been presented. The proposed antenna has been designed by two resonant elements outlined over on a denim fabric material with an $\epsilon_r = 1.78$. In order to describe the behavior, and find the optimum zone to excite the structure, the Theory of Characteristic Modes has been used. The antenna is fed by proximity in a capacitive way through two transmission lines, later the feed was transformed into a power divider that produces good impedance matching ($S_{11} < -10$ dB) from 2 GHz to 3.6 GHz with a maximum directivity around 4.84 dBi, and a stable bidirectional radiation pattern over the entire frequency range, which in the presence of the human body is transformed into unidirectional radiation pattern. Finally, the structure has been fabricated and the reflection coefficient results obtained are very similar with the simulation.

Keywords: Textile Antenna, Internet of Things, 5G Technology, Theory of Characteristics Modes

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la tecnología vestible ha tomado gran relevancia por su portabilidad, funcionalidad y uso en redes inalámbricas de corto alcance como redes inalámbricas de área personal (WPAN) y corporal (WBAN) (Soh & Vandebosch, 2016). Si bien las aplicaciones de la tecnología vestible se centran más en el área de la medicina, otros campos como el entretenimiento, industria, moda, deporte, seguridad, etc. han visto una oportunidad para implementar esta tecnología. Uno de los aspectos más importantes para el desarrollo de la tecnología vestible se centra en el diseño de antenas; las cuáles deberán ser discretas, livianas, flexibles y de tamaño reducido, para que puedan incorporarse fácilmente en prendas de vestir o en otros accesorios vestibles (Kaur & Chawla, 2022).

Los nuevos sistemas de comunicaciones de quinta generación 5G trabajan en diferentes rangos de frecuencia, los de banda baja a frecuencias inferiores a 1 GHz, la banda media de 1 GHz a 2.6 GHz y de 3.5 GHz a 6 GHz y finalmente los de banda alta de 24 GHz a 40 GHz (Khatri, 2018); siendo la banda media la más usada para las aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) en el campo de la biomedicina. Debido a que los sistemas trabajan en dos rangos de frecuencias, las antenas textiles deberían cumplir con la característica de un gran ancho de banda, esto con la finalidad de asegurar su funcionamiento independientemente de la aplicación.

Aunque las antenas textiles son muy apreciadas por sus ventajas (Vallozzi et al., 2016), su proceso de diseño, manufactura y limitantes en materiales conductores que se adhieran al textil de manera correcta, hacen que la evolución de esta clase de antenas sea lenta. En las antenas textiles se emplean diferentes fibras tejidas como sustratos, por lo tanto, es necesario conocer sus propiedades electromagnéticas (ϵ_r , $\tan(\delta)$) para el diseño eficiente de antenas. Sin embargo, cada textil tiene sus propios valores de dieléctricos y deben ser medidos mediante un proceso metódico de caracterización del material (Santiso Bellón, 2012). Los sustratos textiles más utilizados para antenas textiles son: seda, fieltro, nylon, poliéster, etc. (Yan et al., 2014, Memon et al., 2021)

Para el desarrollo de las antenas textiles se debe tener en cuenta algunos factores para el diseño y desarrollo, por ejemplo los tejidos del cuerpo humano interfieren en el funcionamiento de la antena y en su forma de propagación, además cuando la antena textil absorbe humedad se verá afectado su parámetro de scattering (Vallozzi et al., 2016).

En consecuencia, una antena textil tiene que ser robusta ya que sin importar las circunstancias externas debe seguir trabajando sin reducir considerablemente su rendimiento. Cuando se menciona que una antena textil debe ser discreta, se busca la manera que la antena no sea visible o, en su defecto, la forma de esta sea agradable (Monti et al., 2019). Dentro de las antenas textiles, las antenas tipo logotipo han tomado un gran interés por ser un campo de vanguardia que puede ser aplicada a la moda, marketing, entre otros (Atanasova et al., 2022). Sin embargo, cada vez se presentan mayores desafíos debido a que cada logotipo tiene sus propias características (Monti et al., 2014). En la literatura se presentan algunas antenas tipo logotipo que utilizan sellos de empresas de tecnología, de moda o logos institucionales. En (Monti et

al., 2014) se muestran antenas con la forma de la empresa APPLE y LACOSTE, (Monti et al., 2016) utiliza el sello de ropa LEVI'S, en (Tak & Choi, 2015) la forma utilizada para el elemento radiante de la antena es de la casa de moda Louis Vuitton y la antena presentada en (Atanasova et al., 2022) tiene la forma del logo de la Universidad búlgara Neofit Rilski.

Por lo expuesto, el objetivo principal en este artículo científico es diseñar e implementar de forma óptima una antena textil que tiene un aspecto de logotipo genérico, y, para comprender su funcionamiento y proporcionar un método de alimentación óptimo se ha utilizado la Teoría de Modos Característicos.

Para lograr el cumplimiento del objetivo planteado, se ha propuesto un estudio del estado del arte (Introducción), seguido de la Metodología, donde se describe el diseño de la antena, análisis de su comportamiento, forma de alimentación y proceso de fabricación; a continuación, se detalla la discusión de los resultados medidos y obtenidos mediante simulación. Finalmente, la última sección describe las conclusiones de este trabajo de investigación.

2. METODOLOGÍA O MATERIALES Y METODOS

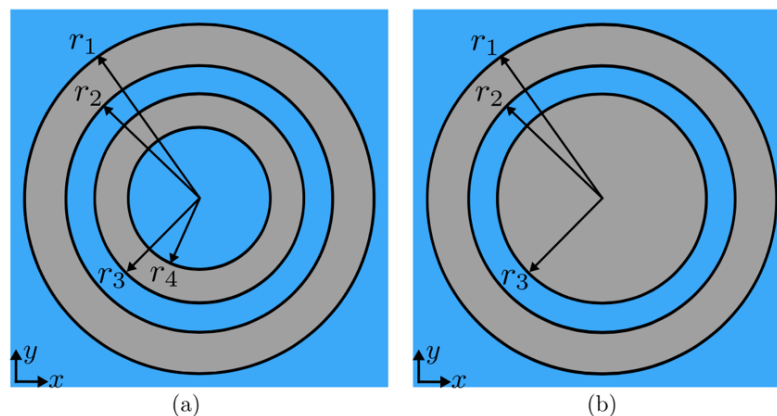
El desarrollo de este trabajo ha sido llevado a cabo a partir de un estudio exploratorio-adaptativo, se ha tomado como punto de referencia el estudio de algunas estructuras arbitrarias simples, que han sido analizadas con la Teoría de Modos Característicos (Peñafiel Ojeda, 2021). Una vez obtenida la estructura propuesta optimizada, se realizó un análisis paramétrico en la forma de alimentación, mediante un análisis de onda completa para lograr obtener las mejores prestaciones posibles.

2.1 Diseño de la Propuesta

En la mayor cantidad de logotipos institucionales su imagen corporativa está compuesta por dos elementos, uno en forma circular como elemento principal en la parte externa, y otro adicional que tiene una forma arbitraria en la parte interna. Por lo tanto, la antena propuesta que se presenta en este artículo parte del diseño de un anillo metálico como estructura principal, integrado a otro anillo en la parte interna, de modo que, el segundo elemento ha sido variado hasta tener la forma de un disco tal como se aprecia en la Figura 1.

Figura 1:

Vista frontal de las estructuras propuestas optimizadas. (a) Usando disco interno y (b) usando anillo interno



Con la variación de anillo a disco se puede generalizar el estudio si el elemento interno adquiere una forma arbitraria. La estructura ha sido diseñada sobre un sustrato que emula un material mezclilla, este tiene una constante dieléctrica $\epsilon_r = 1.78$ y una altura de $h = 0.5$ mm. Las dimensiones optimizadas luego de un análisis paramétrico de la estructura propuesta son: $r_1 = 25$ mm, $r_2 = 19$ mm, $r_3 = 15$ mm y $r_4 = 10$ mm, siendo básicamente dos resonadores a una longitud de onda para las frecuencias de resonancia. Para describir el funcionamiento y demostrar que la estructura realmente resuena a una longitud de onda, la estructura propuesta será sometida a un análisis usando la TCM.

2.2 Análisis modal de la estructura propuesta

En los últimos años, la Teoría de Modos Característicos TCM ha tenido un incremento considerable como herramienta para el diseño de antenas debido a que brinda información importante de una estructura arbitraria en ausencia de una excitación (Peñañiel Ojeda, 2021). La TCM representa la solución de la matriz de impedancias a partir de la Ecuación Integral del Campo Eléctrico (EFIE), generando una descomposición de corrientes que cumplen las condiciones de contorno y que son ortogonales entre sí (Garbacz & Turpin, 1971), [Harrington & Mautz, 1971]. Existen 3 formas de interpretar físicamente los modos: los autovalores λ_n , la significancia modal MS_n y los ángulos característicos α_n . Cuando el valor del ángulo característico es cercano a los 180° se dice que el modo es un buen radiador, mientras que cuando el ángulo característico es cercano a los 90° o 270° el modo almacena energía sea eléctrica o magnética, el ancho de banda modal estará descrito por el rango de frecuencias que se encuentran entre los 135° y 225° del ángulo característico (Peñañiel Ojeda, 2021).

Los ángulos característicos, diagramas de radiación modal y las corrientes características de los primeros modos de las estructuras propuestas se han representado en la Figura 2. La estructura que tiene un anillo en la parte interna describe claramente 2 resonancias bien marcadas, la primera a la frecuencia de 2.6 GHz y la segunda a 4.49 GHz, pudiéndose notar que cada una de estas resonancias están ligadas directamente a las dimensiones físicas de cada uno de los elementos que componen la estructura, es decir, el anillo externo genera la primera resonancia y la segunda viene dada por el elemento interno.

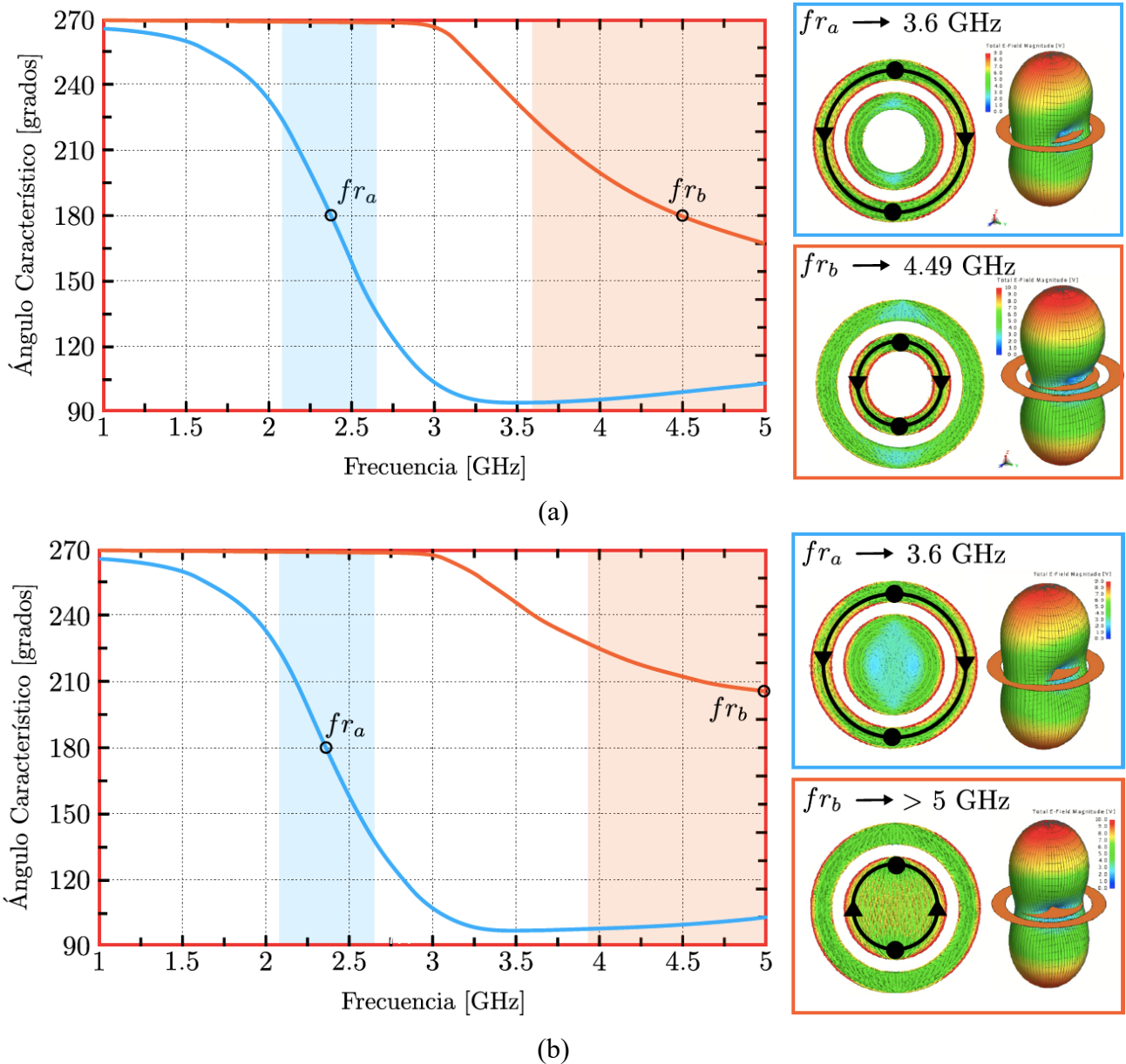
Por otro lado, al tener un disco en la parte interna (ver Figura 1 (b)), la frecuencia de resonancia del disco ha sido desplazada a una frecuencia más alta con respecto a la frecuencia del anillo. En la literatura y estudios previos (Peñañiel Ojeda, 2021, Cabedo Fabrès, 2008), se describen que los modos característicos de un disco tienen un ancho de banda mucho más amplio que la de un anillo, los ángulos característicos en el rango de frecuencias representan una variación muy suave cercana a los 180° , tal como se aprecia en la segunda resonancia de la Figura 2(b).

Es importante resaltar que a través de la distribución de corrientes características se puede demostrar que cada uno de los elementos que componen la estructura son resonantes cuando el perímetro total es igual a una longitud de onda a la frecuencia de resonancia, es decir están en resonancia para el modo fundamental J_1 , y resulta sencillo describirlo porque claramente se aprecia que existe un par de nulos en la distribución de las corrientes de la estructura (ver Figura 2(b)). Una ventaja importante que se obtiene con este tipo de

configuración, es que para ambas frecuencias de resonancia se puede conseguir diagramas de radiación estables, bidireccionales y que radian en dirección broadside.

Sin embargo, el hecho de haber realizado un estudio usando la TCM y haber obtenido esta información importante no es suficiente para que la estructura funcione como una antena, el reto está en usar esta información para ubicar de forma óptima el/los puntos de alimentación reales y conseguir así las características que se han obtenido en esta sección.

Figura 2: Ángulos característicos de las estructuras propuestas, diagramas modales y corrientes características para el modo J_1 . (a) Usando un anillo interno y (b) usando un disco interno.



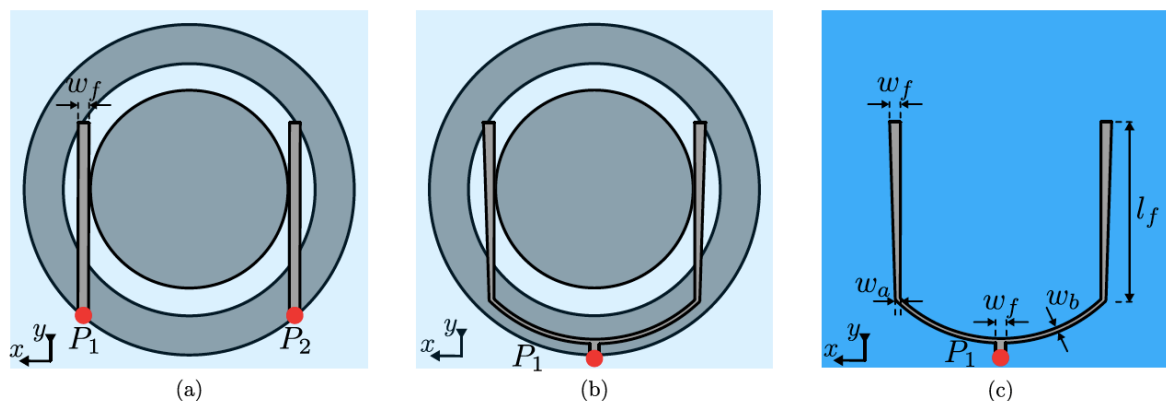
2.3 Alimentación de la estructura propuesta

Los modos característicos pares ($J_0, J_2, J_4, \dots, J_{2n}$) o impares ($J_1, J_3, J_5, \dots, J_{2n+1}$) en una estructura arbitraria, pueden ser forzados para que entren en resonancia según la forma en la que se alimenta la estructura. Existen dos formas muy conocidas de alimentación, la primera es usando un elemento capacitivo y la segunda un elemento inductivo. Para excitar de forma capacitiva, el elemento se deberá ubicar en los

lugares en donde las corrientes modales son nulas, mientras que para excitar la estructura de forma inductiva se deberá colocar en la zona donde las corrientes tienen la máxima intensidad (Peñafiel-Ojeda et al., 2017).

Figura 3:

Formas de alimentación de la estructura propuesta. (a) Múltiple alimentación (b) y (c) usando un divisor de potencia con variación progresiva en impedancia.



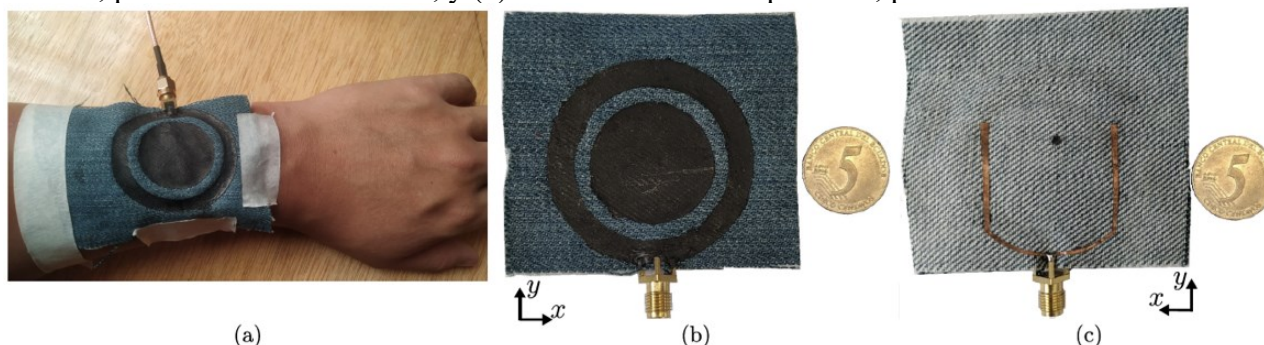
Si se realiza una modificación en la forma de alimentación, se puede forzar la excitación del modo J1 a través de un elemento capacitivo colocado en la zona de máxima intensidad de las corrientes, para ello se ha insertado dos líneas de transmisión de forma tangencial entre la ranura generada por las dos estructuras tal como se aprecia en la Figura 3(a). Sin embargo, los dos puntos de alimentación resultarían ser incómodos para el usuario cuando la antena sea implementada sobre el textil, por lo tanto, los dos puntos de alimentación pueden ser conectados directamente a un divisor de potencia según como muestra en la Figura 3 (b) y (c), los parámetros optimizados de las líneas de transmisión del divisor de potencia para conseguir el mejor ancho de banda son: $w_f = 1.7$ mm, $w_a = 0.8$ mm, $w_b = 0.49$ mm, $l_f = 26.45$ mm.

2.4 Manufactura de la estructura propuesta

Para realizar el proceso de fabricación de la antena propuesta se ha optado por el método de serigrafía para los dos elementos resonantes, y el uso de cintas conductoras de cobre para el divisor de potencia tal como se ve en la Figura 4 (b) y (c). El material conductor usado para la serigrafía fue la tinta conductiva de Bare Conductive, el diseño ha sido esbozado sobre un material de mezclilla comercial (tela jean) con una permitividad eléctrica de $\epsilon_r = 1.78$. Para soldar el punto de alimentación se ha utilizado estaño en crema, así, con una pistola de aire caliente se puede tener control de la temperatura, y así evitar que el material dieléctrico se incinere.

Figura 4:

Antena propuesta fabricada. (a) Caracterización en presencia del cuerpo (b) Vista de los elementos resonantes, parte frontal de la antena, y (c) vista del divisor de potencia, parte trasera de la antena.



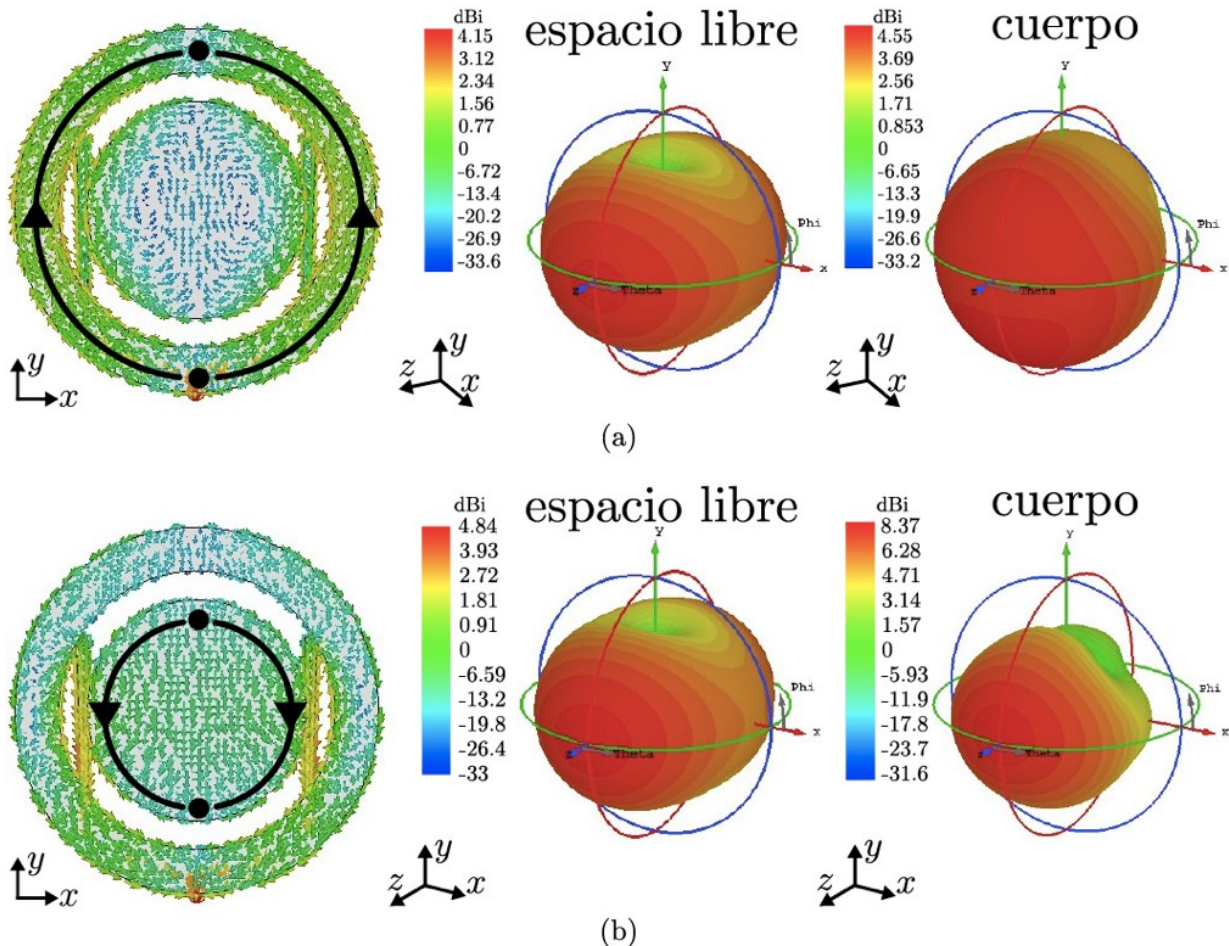
Finalmente, para realizar la caracterización de la antena propuesta se empleó un analizador de redes vectoriales “Libre VNA” bajo dos escenarios, en ausencia y presencia del cuerpo humano. Los resultados del proceso del diseño y fabricación de la antena propuesta se presenta en la siguiente sección.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características de la logo textil antena propuesta en este artículo, han sido descritas a través de un análisis de onda completa usando el simulador CST Studio Suite. En la Figura 5, se presenta una gráfica comparativa de los resultados del coeficiente de reflexión S11 de la antena textil con forma de logo, propuesta en ausencia del cuerpo humano, los resultados de la simulación presentan un gran ancho de banda (53 %) con dos resonancias muy claras, y con valores inferiores a los -10 dB que van desde los 2.2 GHz hasta los 3.8 GHz; mientras que, en los resultados medidos se puede ver un ligero incremento en el ancho de banda de un 5% del valor simulado, con un desplazamiento hacia una frecuencia menor de la segunda resonancia, esta variación está ligada a la exactitud y eficacia en el proceso de fabricación.

Figura 6:

Ángulos característicos de las estructuras propuestas, diagramas modales y corrientes características para el modo J_{11} . (a) Usando anillo interno y (b) usando disco interno.



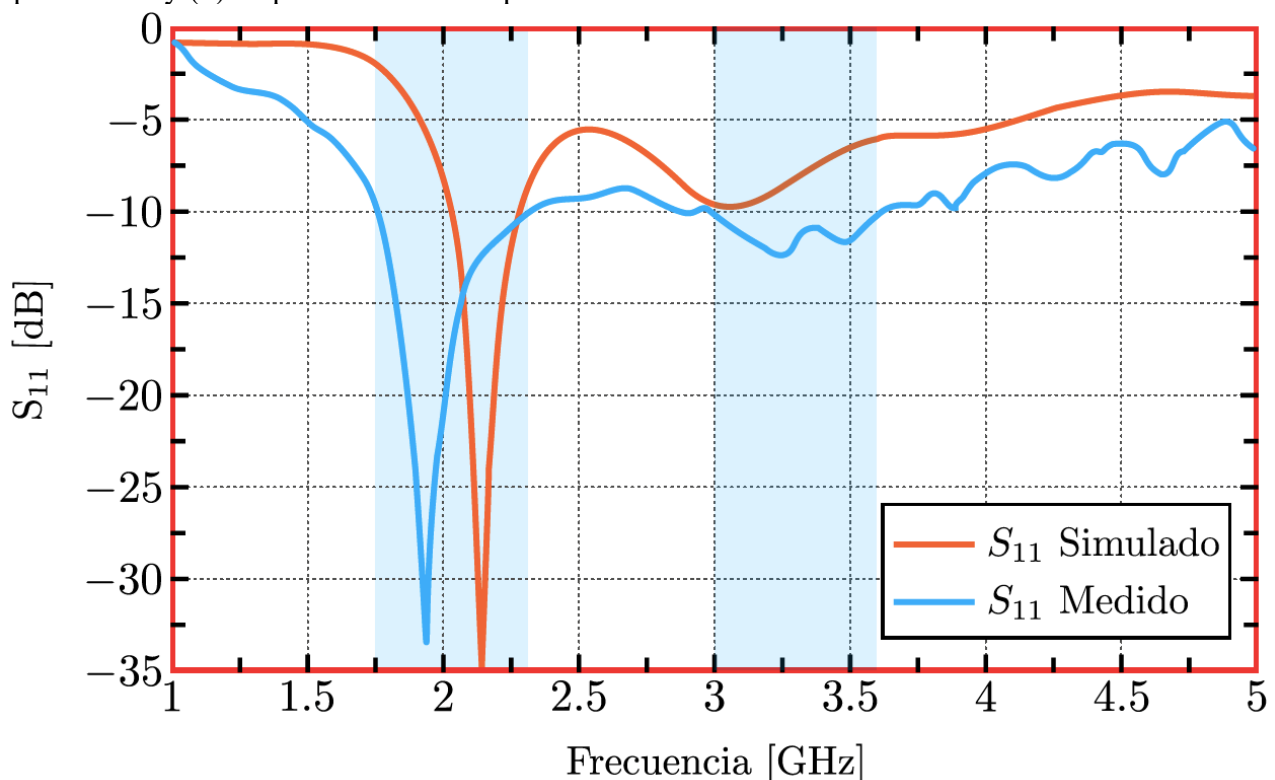
En la Figura 6, se ha representado los diagramas de radiación y las corrientes totales de la antena propuesta, en presencia y ausencia del cuerpo humano, para las resonancias de 2.45 GHz y 3.5 GHz respectivamente. Las corrientes totales de la antena son muy parecidas a las corrientes modales que se mostraron previamente en la Figura 2 (b), con un diagrama de radiación bidireccional en la dirección broadside con una directividad aproximada de 4.5 dBi. Sin embargo, cuando la antena está en presencia del

cuerpo humano, los diagramas de radiación se modifican cambiando la forma de radiación bidireccional a un diagrama unidireccional. Adicionalmente, se aprecia que para la segunda resonancia de 3.5 GHz se ha incrementado la directividad a 8.37 dBi.

Por otro lado, en la Figura 7 se representa una gráfica comparativa de los resultados simulados y medidos en presencia del cuerpo humano, para ambos casos se tiene una respuesta muy similar pero con una variación en frecuencia hacia una frecuencia menor. Sin embargo, si se toma como referencia los resultados de la Figura 5, se ve claramente que el ancho de banda se ha reducido, en la simulación la segunda resonancia se ha desadaptdo completamente; no obstante, en las medidas se aprecia que se genera dos resonancias, convirtiéndola en una antena multibanda. El primer rango de frecuencias a la que trabaja la antena será desde 1.8 GHz a 2.35 GHz, y el segundo rango será de 3 GHz a 3.6 GHz.

Figura 7:

Análisis comparativo de los resultados simulados y medidos de la antena propuesta. (a) En ausencia del cuerpo humano y (b) en presencia del cuerpo humano.



Finalmente, con los resultados obtenidos se ha podido demostrar el funcionamiento de la antena propuesta mediante una alimentación eficiente. Es importante resaltar, que el método de fabricación adoptado ha demostrado alta fiabilidad en los resultados, con lo que se puede proponer como una alternativa para manufactura de logo antenas textiles.

4. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y fabricado una antena logo textil empleando dos elementos resonantes excitados por un par de líneas de transmisión colocadas en la parte trasera de la estructura, a través de un divisor de potencia, y se ha optimizado para obtener el mejor rendimiento posible. El ancho de banda de la antena propuesta depende de las dos resonancias que se han generado por cada uno de los elementos, provocando un patrón de radiación óptimo que no se ve afectado a medida que se varía en frecuencia. Sin embargo, el

ancho de banda disminuye cuando está en presencia del cuerpo humano. Los resultados simulados y medidos son muy similares, lo que ha permitido demostrar su correcto funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Profesores Miguel Ferrando Bataller y Marta Cabedo Fabrès de la Universitat Politècnica de Valencia, por su colaboración y asesoría para el desarrollo de este artículo.

FINANCIACIÓN

Los autores han recibido financiación para el desarrollo de la presente investigación a través del proyecto Institucional de la Universidad Nacional de Chimborazo denominado “IMPLEMENTACIÓN DE ANTENAS FLEXIBLES PARA SISTEMAS DE INTERNET DE LAS COSAS DEDICADAS AL MONITOREO DE SEÑALES BIOMÉDICAS ” RESOLUCIÓN No 12- CIV-1-2-2023.-.

CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

| | C. Peñañiel | A. Ortiz | G. Tubón |
|---|-------------|----------|----------|
| Participar activamente en: | | | |
| Conceptualización | X | | X |
| Análisis formal | X | | X |
| Adquisición de fondos | X | | |
| Investigación | X | X | X |
| Metodología | X | X | X |
| Administración del proyecto | X | | |
| Recursos | X | X | X |
| Redacción –borrador original | X | | X |
| Redacción –revisión y edición | X | | X |
| La discusión de los resultados | X | X | X |
| Revisión y aprobación de la versión final del trabajo. | X | X | X |

RECONOCIMIENTO A REVISORES:

La revista reconoce el tiempo y esfuerzo del editor Juan Carlos Santillán Lima, y de revisores anónimos que dedicaron su tiempo y esfuerzo en la evaluación y mejoramiento del presente artículo.

REFERENCIAS

- Atanasova, G. L., Atanasov, B. N. & Atanasov, N. T. (2022). Fully textile dual-band logo antenna for IoT wearable devices. *Sensors*, 22(12), 4516.
- Cabedo Fabrès, M. (2008). Systematic design of antennas using the theory of characteristic modes. *PhD thesis*, Universitat Politècnica de València
- Garbacz, R. & Turpin, R. (1971). A generalized expansion for radiated and scattered fields. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 19(3), 348–358.
- Harrington, R. & Mautz, J. (1971). Theory of characteristic modes for conducting bodies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 19(5), 622–628.

- Kaur, H. & Chawla, P. (2022). Performance analysis of novel wearable textile antenna design for medical and wireless applications. *Wireless Personal Communications*, 124(2), 1475–1491.
- Khatri, P. (2018). Dimensioning the anyhaul network for 5G. Impact of 5G on IP transport networks, *Nokia*.
- Memon, A. W., de Paula, I. L., Malengier, B., Vasile, S., Van Torre, P. & Van Langenhove, L. (2021). Breathable textile rectangular ring microstrip patch antenna at 2.45 GHz for wearable applications. *Sensors*, 21(5), 1635.
- Monti, G., Corchia, L., De Benedetto, E. & Tarricone, L. (2016). Wearable logo-antenna for gps-gsm-based tracking systems. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 10(12), 1332–1338.
- Monti, G., Corchia, L., Paiano, E., De Pascali, G., Tarricone, L., Tomassoni, C. & Sorrentino, R. Textile wearable antenna for firefighters positioning. In *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, pp. 1–4. IEEE.
- Monti, G., Corchia, L. & Tarricone, L. Textile logo antennas. In *Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)*, pp. 1–5. IEEE.
- Peñafiel-Ojeda, C. R., Cabedo-Fabrés, M., Antonino-Daviu, E. & Ferrando-Bataller, M. Design of an unidirectional UWB cavity backed antenna. In *2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO)*, pp. 28–30. IEEE.
- Peñafiel Ojeda, C. R. (2021). Design of Multi-feed UWB Antennas using the Theory of Characteristic Modes. *PhD thesis*, Universitat Politècnica de València.
- Santiso Bellón, J. (2012). Diseño de una antena multimodo sobre substrato textil para aplicaciones corporales. *PhD thesis*, Universitat Politècnica de València.
- Soh, P. J. & Vandenbosch, G. A. (2016). Textile antennas for body area networks: design strategies and evaluation methods. *Electromagnetics of Body Area Networks: Antennas, Propagation, and RF Systems*, pp. 1–25.
- Tak, J. & Choi, J. (2015). An all-textile louis vuitton logo antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1211–1214.
- Vallozzi, L., Hertleer, C. & Rogier, H. (2016). Latest developments in the field of textile antennas. In *Smart textiles and their applications*, pp. 599–626. Elsevier.
- Yan, S., Soh, P. J. & Vandenbosch, G. A. (2014). Low-profile dual-band textile antenna with artificial magnetic conductor plane. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(12), 6487–6490.