

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA DISEÑAR, FABRICAR Y EVALUAR ANTENAS DE PARCHE DE MICROCINTA CON GEOMETRÍA RECTANGULAR

DESIGN METHODOLOGY TO DESIGN, MANUFACTURE AND EVALUATE MICROSTRIP PATCH ANTENNAS WITH RECTANGULAR GEOMETRY

Ronal Varela Sánchez

Universidad de Guadalajara, México
ronal.varela@alumnos.udg.mx

Carlos Alberto Bonilla Barragán

Universidad de Guadalajara, México
alberto.bonilla@academicos.udg.mx

Iván Rodrigo Padilla Cantoya

Universidad de Guadalajara, México
ivan.padilla@academicos.udg.mx

Marco Antonio Gurrola Navarro

Universidad de Guadalajara, México
marco.gurrola@academicos.udg.mx

Recepción: 7/febrero/2024

Aceptación: 17/mayo/2024

Resumen

Actualmente, en sistemas donde se requiere el uso de microondas, como lo son, la tecnología aeroespacial, las comunicaciones móviles, el internet de las cosas (IoT), la cosecha de energía de radiofrecuencia y la tecnología militar, entre otros, se requiere del uso de antenas que sean compactas, ligeras y de bajo costo. Las antenas de parche de microcinta cuentan con estas características, además, pueden diseñarse para trabajar en múltiples bandas de manera simultánea, para lograr alta selectividad en su frecuencia central de operación (deseable en sistemas de seguridad), para lograr un buen porcentaje de acoplamiento (para el aprovechamiento de bajas potencias de recepción o transmisión), o para alcanzar un amplio ancho de banda (deseable para cosecha de energía). El presente trabajo tiene como objetivo mostrar una metodología para el diseño de este tipo de antenas.

En él se exponen consideraciones como lo son el tipo de sustrato, la geometría y la red adaptadora de impedancias, consideraciones que son fundamentales para la correcta implementación de estas antenas. A manera de ejemplo, esta metodología se aplicó en el diseño, simulación y fabricación de una antena de parche con geometría rectangular de microcinta con sustrato FR4, con una frecuencia central de operación de 2.4 GHz (servicio de Wifi), un parámetro S_{11} (parámetro relacionado con la ganancia) por lo menos de -20 dB, y un ancho de banda igual o superior a los 80 MHz. Tras su fabricación, la caracterización en laboratorio de la antena muestra que ésta cumple satisfactoriamente con estos requerimientos.

Palabras Clave: Adaptador de impedancias para radiofrecuencia, antenas de parche de microcinta, diseño de antenas para microondas, líneas de transmisión.

Abstract

Currently, in systems where the use of microwaves is required, such as aerospace technology, mobile communications, the Internet of Things (IoT), radio frequency energy harvesting and military technology, among others, the use of antennas that are compact, lightweight, and low cost. Microstrip patch antennas have these characteristics; in addition, they can be designed to work in multiple bands simultaneously, to achieve high selectivity in their central operating frequency (desirable in security systems), to achieve a good level of matching (for the use of low reception or transmission powers), and to achieve a wide bandwidth (desirable for energy harvesting). The objective of this work is to show a methodology for the design of this type of antennas. It exposes considerations such as the type of substrate, the geometry and the impedance matching network, considerations that are fundamental for the correct implementation of these antennas. As an example, this methodology was applied in the design, simulation, and manufacture of a patch antenna with rectangular microstrip geometry with FR4 substrate, with a central operating frequency of 2.4 GHz, (Wifi service) a S_{11} parameter (gain related parameter) at least -20 dB, and a bandwidth equal to or greater than 80 MHz. After manufacturing, the laboratory characterization of the antenna shows that it satisfactorily meets these requirements.

Keywords: *Impedance match for radio frequency, Microstrip patch antennas, Microwave antennas design, Transmission Line.*

1. Introducción

Con el avance actual de las comunicaciones inalámbricas es preciso diseñar antenas para que sean cada vez más compactas, ligeras, baratas, de fácil fabricación y que operen simultáneamente a varias frecuencias [Pozar, 2011] [Xie et al, 2013]. Las antenas de parche de microcinta (del inglés *microstrip patch antennas*) son un tipo de antenas que se ajustan a este tipo de requerimientos.

La IEEE define una antena como un medio para irradiar o recibir ondas de radio [Balanis, 2016]. Esto implica que la antena es un transductor que convierte la corriente y el voltaje de una línea de transmisión en ondas electromagnéticas que se pueden propagar en el espacio, o bien, que convierte una onda electromagnética en voltajes y corrientes en una línea de transmisión.

La antena de parche de microcinta es un conductor, regularmente de cobre, sobre un sustrato con un espesor determinado, y con un valor de permitividad relativa que puede ser atractivo para usarse junto con circuitos de microondas. Dichas características podrían llevar a un bajo nivel de pérdidas por radiación y a una facilidad de adaptación con otros circuitos [Singh et al, 2015].

Las antenas de parche se han analizado en diversas geometrías entre las cuales las más destacadas son la cuadrada y la rectangular, por su fácil análisis, fabricación, características de radiación y por su baja polarización cruzada [Matin et al, 2010] [Wnuk, 2021].

Las antenas pueden tener distintas formas de proporcionarles corriente eléctrica: mediante una línea de transmisión de microcinta; con una terminal coaxial; a través de un acoplamiento por apertura; o con alimentación por proximidad [Pozar, 2011].

La tecnología de microcinta ha vuelto a ser tema de investigación debido a que la tendencia de las nuevas tecnologías es a buscar que los sistemas sean más pequeños, ligeros, adaptables y que ofrezcan una mayor cobertura de conectividad, es decir, que puedan operar a una mayor cantidad de bandas de frecuencia. En este tipo de tecnologías los investigadores se han propuesto trabajar con sustratos que

sean flexibles pero que conserven propiedades dieléctricas para circuitos de microondas [Bui et al, 2016].

También lo que se busca cuando se trabaja con este tipo de tecnologías, es que se puedan llevar a sustratos de semiconductor, como los usados para la fabricación de microchips. La intención es que en una misma oblea de silicio (o algún otro material semiconductor), se puedan integrar los circuitos de radiofrecuencia, en este caso, las antenas, para que todo el sistema esté dentro de un encapsulado. Esta tecnología se conoce como circuitos monolíticos integrados para microondas (MMIC).

Importancia de la red adaptadora de impedancias

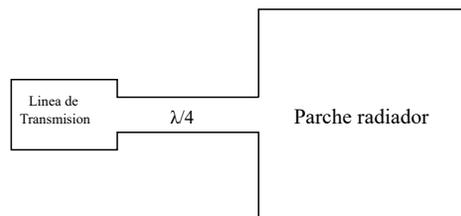
Una característica deseable de las antenas es que sus pérdidas sean mínimas, es decir que el aprovechamiento de la energía captada o radiada se acerque al 100%. Para lograr un nivel de eficiencia adecuado para transmitir o recibir la mayor cantidad de potencia desde una fuente de corriente (ya sea una onda electromagnética o un circuito transceptor) se requiere que la antena se encuentre conectada con el resto del sistema mediante un circuito de acoplamiento correctamente diseñado. Este circuito de acoplamiento, también llamado red adaptadora de impedancias, se encuentra entre la línea de transmisión (que conduce la energía generada por el circuito transmisor) y la antena.

De igual forma, se requiere una red adaptadora de impedancias bien diseñada para transferir los voltajes y corrientes de una onda electromagnética que incide en la antena hacia la línea de transmisión para que dichos voltajes y corrientes lleguen casi sin pérdidas al circuito receptor.

En las antenas de parche de microcinta existen distintas técnicas para lograr una adaptación de impedancias [Sharma, 2017]. Entre las más destacadas se encuentra la de inserción. Esta técnica consiste en hacer un par de ranuras en el parche junto a la línea de transmisión con la finalidad de disminuir la impedancia de entrada, que tiene que ser igual a la impedancia característica de la línea de transmisión, que usualmente es de 50Ω [Shanmugapriya, 2015]. Otra técnica es la red de adaptación de impedancias mediante una línea de transmisión de cuarto de longitud de onda,

conocida como $\lambda/4$. En este caso la antena se puede acoplar con una línea de transmisión de impedancia característica de 50Ω mediante el uso de una línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda con impedancia característica Z_1 [Pozar, 2011]. Existen diversas investigaciones que hacen referencia al análisis eléctrico de una antena de parche cuando se le agrega una red adaptadora de impedancias de $\lambda/4$, mostrando y sosteniendo que los resultados son aceptables en cuanto a rendimiento y pérdidas por retorno, como se muestra en [Emtalk, 2010]. En otras técnicas de diseño de circuitos adaptadores de impedancia, se propone agregar resonadores de impedancias escalonados en corto circuito, o resonadores de cuarto de longitud de onda en cortocircuito en configuración denominada uniforme [Alkanhal, 2009].

El presente trabajo se basa en consideraciones de diseño y ecuaciones presentes en los cuatro trabajos previos [Pozar, 2011] [Balanis, 2016] [Shanmugapriya, 2015] y [Emtalk, 2010], pero se combinan para la geometría específica de a) antena b) red adaptadora de impedancia y c) línea de transmisión que se muestra en la figura 1. La geometría de la antena es rectangular, esto con la intención de que el análisis matemático respecto a las dimensiones sea sencillo. La línea de transmisión es de microcinta, ya que estas líneas de transmisión se construyen de la misma forma que una antena de parche de microcinta, es decir, dos conductores separados por un medio dieléctrico, donde uno de los conductores es para la geometría de la línea de transmisión y el conductor opuesto corresponde al plano de tierra. La red adaptadora de impedancias es de geometría rectangular, ya que este tipo de red, como ya se mencionó, es una línea de transmisión, pero en este caso de cuarto de longitud de onda.

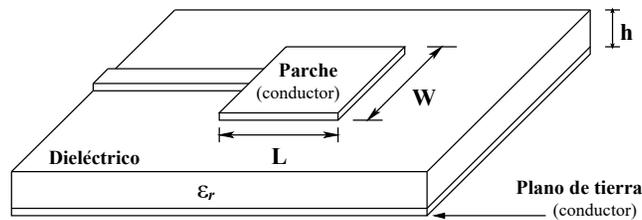


Fuente: Elaboración propia

Figura 1 Composición de un sistema completo de antena.

2. Métodos

Las antenas de parche de microcinta poseen diversas ventajas respecto a las antenas convencionales de microondas, una de ellas es que son capaces de operar en una amplia gama de frecuencias, que va de los 100 MHz a los 100 GHz [Hinostraza et al, 2020]. Una antena de parche de microcinta es un conductor impreso sobre un sustrato que a su vez se encuentra sobre un plano de tierra conductor como se muestra en la figura 2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2 Antena de microcinta de parche.

Los materiales para sustrato disponibles en el mercado cuentan con un valor de permitividad dieléctrica usualmente entre $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. El tamaño del parche varía de acuerdo con este valor. Las características físicas de la antena de microcinta, como lo son el largo L , el ancho W , su constante de permitividad relativa ϵ_r y el espesor del sustrato h , están directamente relacionadas con sus características eléctricas. Las dimensiones de la antena dependen directamente de la longitud de onda, que en este caso corresponden a frecuencias de microondas [Shanmugapriya, 2015]. La longitud de onda está directamente relacionada con la frecuencia de resonancia (frecuencia central de operación), ecuación 1 [Anguera et al, 2008].

$$\lambda_o = \frac{c}{f_c} \quad (1)$$

Donde λ_o es la longitud de onda de la señal en el vacío, c la velocidad de la luz en el vacío y f_c la frecuencia central de operación.

Algunos cálculos de las dimensiones de la antena dependen de la longitud de onda relacionada con el medio dieléctrico donde se propaga (λ_r), la cual se determina por

ecuación 2 [Anguera et al, 2008]. Esto se debe a que la longitud de la onda disminuye cuando ésta ingresa a un sustrato con una permitividad $\epsilon_r > 1$.

$$\lambda_r = \frac{c}{f_c} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Un sustrato con permitividad relativa grande le permite tener menos espesor. Aunque esto ayuda a reducir las dimensiones de la antena, incrementa las pérdidas debido a que las ondas viajan como ondas superficiales a través del medio dieléctrico, de manera que, cuando son sustratos delgados, las ondas no pueden ser radiadas por el parche al espacio, afectando de forma directa al ancho de banda, el cual se vuelve más estrecho [Matin et al, 2010]. El caso contrario sucede con sustratos de permitividad relativa más baja, es decir, permiten espesores más gruesos, afectando de manera mínima la eficiencia de la antena y su ancho de banda.

En la metodología de diseño de antenas de parche rectangulares propuesta, se consideran la permitividad relativa del sustrato, ϵ_r , la frecuencia de resonancia o frecuencia central de operación, f_c , y el espesor del sustrato, h .

Para obtener un ancho de parche que sea eficiente a la frecuencia de operación, éste se determina por ecuación 3 [Pozar, 2011].

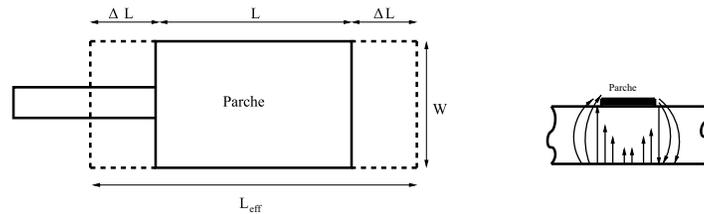
$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_o \epsilon_o}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (mm) \quad (3)$$

Donde $\mu_o = 4\pi \times 10^{-4}$ H/mm es la permeabilidad en el vacío, mientras que $\epsilon_o = 8.8542 \times 10^{-9}$ F/mm, es la permitividad en el vacío. Los valores de permitividad y permeabilidad en el vacío, originalmente se encuentran en metros, pero en este trabajo, todas las cantidades se dejan en milímetros, según la práctica usual en este tipo de diseños.

Para el cálculo de las dimensiones del largo del parche, es necesario hacer uso de la permitividad efectiva del sustrato ϵ_{eff} , que determina la velocidad de propagación en el sustrato, la cual se calcula mediante ecuación 4 [Pozar, 2011]:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Con los datos del ancho W y permitividad efectiva ϵ_{eff} , se puede determinar la longitud efectiva L_{eff} . Se requiere calcular la longitud efectiva debido al efecto de borde (*fringing*), esto es, que el parche responde eléctricamente como si fuera más largo que sus propias dimensiones físicas, debido a que las líneas de campo se curvan en los bordes del largo L del parche, ya que éstas viajan como ondas superficiales en el medio dieléctrico como se muestra en la figura 3.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3 Efecto de borde y aproximación de las líneas de campo.

La longitud efectiva L_{eff} es la suma de la longitud L del parche más una aproximación ΔL por cada borde del parche. Una aproximación de ΔL está dada por ecuación 5 [Pozar, 2011].

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}. \quad (5)$$

De tal forma, que la longitud efectiva se calcula mediante ecuación 6 [Pozar, 2011].

$$L_{eff} = L + 2\Delta L. \quad (6)$$

Por lo que el largo físico del parche se determina por ecuación 7 [Pozar, 2011].

$$L = 2f_r \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \sqrt{\mu_o \epsilon_o}} - 2\Delta L \text{ (mm)}. \quad (7)$$

El valor de impedancia de la antena, que se compone de una parte resistiva y una reactiva, depende del punto en el parche desde donde se mida. El punto de medición también determina si este valor es puramente real o es complejo. Debido a que se decidió que el suministro de corriente para el parche será a través de una línea de transmisión, se elige el punto de impedancia a la mitad del ancho del parche para que la impedancia no fuera compleja y de esta manera facilitar los cálculos

manuales. La impedancia en ese punto se puede calcular mediante ecuación 8 [Pozar, 2011].

$$Z_c = \frac{90\varepsilon_r^2}{\varepsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W}\right)^2 \Omega. \quad (8)$$

La impedancia Z_c , aunque su valor es real, lo más probable es que difiera del valor que usaremos para la línea de transmisión, a un valor comercial de $Z_o = 50 \Omega$, por lo que se requiere acoplar estas dos impedancias mediante una red adaptadora. En este caso se elige la red denominada “transformador de cuarto de longitud de onda”, comúnmente abreviada como “ $\lambda/4$ ”, debido a que trabaja con impedancias reales. La impedancia que debe tener la sección de $\lambda/4$ considerando las impedancias Z_c y Z_o está determinada por ecuación 9 [Pozar, 2011].

$$Z_T = \sqrt{Z_o Z_c}. \quad (9)$$

Lo primero que se debe tener en cuenta al diseñar este acoplador, es el ancho de esta sección de acoplamiento, el cual está determinado por ecuación 10 [Balanis, 2016].

$$W_{\lambda/4} = \left(\frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \{ \ln(B - 1) + 0.39 - 0.61/\varepsilon_r \} \right] \right) h \text{ (mm)} \quad (10)$$

Donde para determinar B , se utiliza ecuación 11 [Balanis, 2016].

$$B = \frac{377\pi}{2Z_o\sqrt{\varepsilon_r}}. \quad (11)$$

Ahora, lo siguiente a calcular es la permitividad efectiva para el ancho de la línea, ε_{eff} , determinada por ecuación 12 [Balanis, 2016].

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{12(h)}{W_{\lambda/4}}}}, \quad (12)$$

Y con este valor es posible calcular el largo de la línea de transmisión adaptadora de impedancias mediante ecuación 13 [Balanis, 2016].

$$L_{\lambda/4} = \frac{\lambda_o}{4\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \text{ (mm)}. \quad (13)$$

Ahora, se determina el largo de la línea de transmisión de la antena, mediante la ecuación 14 [Shanmugapriya, 2015].

$$L_T = \frac{\lambda_o}{4\sqrt{\epsilon_{eff}}} \text{ (mm)}. \quad (14)$$

Hasta este momento se ha trabajado en 5 de los 6 parámetros que hacen referencia al diseño de una antena de parche de microcinta con alimentación por la línea de transmisión y una red adaptadora de impedancias de $\lambda/4$. Estos parámetros son el Largo (L) y ancho (W) del parche radiador, el largo ($L_{\lambda/4}$) y ancho ($W_{\lambda/4}$) de la red adaptadora de impedancias y el largo de la línea de transmisión (L_T). Para el sexto parámetro, que es el ancho de la línea de transmisión (W_T), basados en la experiencia obtenida en la simulación y la fabricación del presente trabajo, se propone que el ancho de la línea de transmisión sea del doble del ancho del adaptador de $\lambda/4$. Esto debido a que, durante la etapa de simulación, para la frecuencia de interés de 2.4 GHz, usando esa medida para el ancho de la línea de transmisión, se obtuvieron resultados que se consideran adecuados para operar en sistemas de radiofrecuencia.

Para el simulador, se usa un software que es capaz de realizar pruebas de campos electromagnéticos. Dentro de este tipo de pruebas existen distintos métodos computacionales sobre los cuales se realizan pruebas de análisis de campos, como por ejemplo el Método de Elementos Finitos (FEM). También existe el Método de Momentos (MOM) y el Método de Radiofrecuencia (RF). Cada uno hace uso de distintos métodos numéricos, sin embargo, independientemente del método que se use, los resultados idealmente deberían ser similares o lo más cercanos posibles. La fabricación de la antena se realizó con una máquina de desbastado con brocas con control CNC, en una placa FR4 del fabricante Laminsated Plastics Distributors & Fabricators.

Para poder realizar las pruebas de laboratorio se le agrega a la línea de transmisión un conector SMA en ángulo de 90° , del fabricante Samtec Inc., con características "Connector SMA Jack R/A 50 ohm PCB". Este conector es adecuado, ya que al igual que los elementos de la antena, debe de tener una impedancia de 50Ω , para que todo el sistema esté acoplado.

Para realizar las pruebas de laboratorio se utilizó un analizador de redes vectoriales VNA, por sus siglas en inglés, Agilent 8714ES. En este caso se seleccionó un intervalo de 1 GHz a 3 GHz, ya que ésta última es la frecuencia máxima de operación de este instrumento. En la figura 4 se muestra la antena conectada al equipo de medición VNA para realizar las pruebas y comprobar que la antena tiene un comportamiento similar al de la simulación.



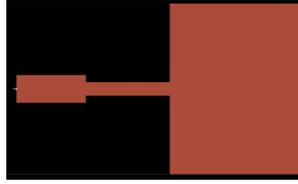
Fuente: Elaboración propia

Figura 4 Equipo VNA y antena durante la medición de laboratorio.

3. Resultados

El procedimiento para realizar el diseño de la antena es calcular primeramente el ancho y el largo del parche radiador. Dichas dimensiones se determinan mediante ecuación 3 y ecuación 7; para este diseño se utilizó un sustrato FR4 con una permitividad relativa de $\epsilon_r = 4.34$, un espesor de $h = 1.6$ mm y a una frecuencia central de operación de $f_c = 2.4$ GHz.

De los valores numéricos obtenidos, y con ayuda de un simulador de campos electromagnéticos, se ajustó manualmente las dimensiones del parche hasta quedar conformes con los resultados. Cabe señalar que las fórmulas arriba presentadas constituyen un método de cálculo manual para obtener sólo una aproximación inicial de las dimensiones de los componentes del arreglo. Posteriormente se calcularon las dimensiones de la red adaptadora de impedancias de $\lambda/4$, haciendo uso de ecuación 10 y ecuación 13. Finalmente se calculan las dimensiones para la línea de transmisión, las cuales están determinadas por ecuación 14 y el ancho propuesto. En la figura 5 se muestra el diseño que se simuló mediante el Método de Momentos en el intervalo de frecuencias de 1 hasta 5 GHz, para observar el comportamiento de la antena en un intervalo amplio de frecuencias.

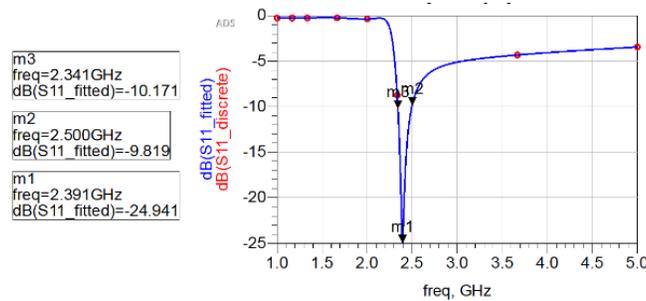


Fuente: Elaboración propia

Figura 5 Diseño de la antena para realizar simulaciones.

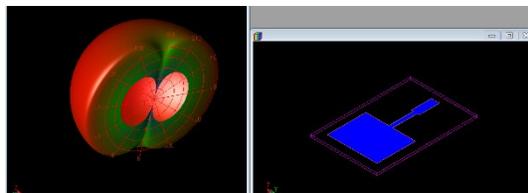
Después se capturó el diseño para realizar la simulación del parámetro S_{11} , y así encontrar valores como el coeficiente de reflexión Γ (S_{11}), la frecuencia de resonancia f_c , el patrón de radiación y el ancho de banda BW . Cabe mencionar que el parámetro S_{11} está relacionado con la ganancia en la antena.

En la figura 6 se muestran los resultados de la simulación para la antena, la cual manifiesta una frecuencia de resonancia de $f_c = 2.391$ GHz, un $S_{11} = -24.941$ dB y, además, un ancho de banda $BW = 161$ MHz. Adicionalmente en la figura 7 se muestra el patrón de radiación de la antena en 3D.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6 Parámetro S_{11} en simulación para la antena propuesta.

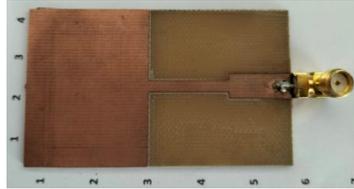


Fuente: Elaboración propia

Figura 7 Patrón de radiación en 3D simulado de la antena a 2.4 GHz.

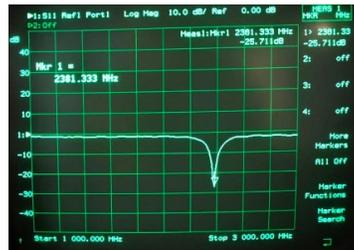
Estando conformes con los resultados en simulación se procedió a la fabricación de la antena y a su caracterización en laboratorio. La figura 8 muestra la antena

fabricada en una placa de circuito con sustrato FR4. Los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio con el equipo VNA son los siguientes: $f_c = 2381.333 \text{ MHz}$, $S_{11} = -25.711 \text{ dB}$, $BW = 80 \text{ MHz}$, como se muestra en la figura 9.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8 Antena de parche de microcinta fabricada.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9 Parámetro S_{11} obtenido en pruebas de laboratorio.

4. Discusión

La metodología presentada fue aplicada exitosamente para diseñar, simular, fabricar y posteriormente caracterizar una antena de parche de microcinta. Este proceso de diseño mostró resultados que podrían ser adecuados para aplicaciones donde se requiera el uso de microondas. La caracterización de la antena muestra una frecuencia central de operación que se aproxima bastante a los requerimientos establecidos inicialmente, mientras que el parámetro medido de $S_{11}(-25.711 \text{ dB})$ se traduce en un porcentaje de acoplamiento del 99.73%. En tanto que el ancho de banda alcanzado cubre el requerido para operar en la banda comercial del Wifi, que es la banda de interés. La antena fabricada mostró un porcentaje de error en la frecuencia de resonancia de tan sólo el 0.42% respecto al mostrado en simulación. En el ancho de banda fue un poco mayor el porcentaje de error, esto puede ser debido a las condiciones físicas de la placa donde se implementó el diseño. En algunas ocasiones los datos como lo son, el espesor del dieléctrico (h), el valor de

la permitividad relativa (ϵ_r) y los espesores del cobre conductor, difieren de los mostrados por el fabricante, recordando que el ancho de banda justamente depende de las condiciones del dieléctrico. Sin embargo, a pesar de este inconveniente, el ancho de banda es considerado como bueno para ciertas aplicaciones. En la tabla 1 se muestra una comparación entre los requerimientos iniciales, los resultados obtenidos en simulación y en pruebas de laboratorio.

Tabla 1 Comparación de resultados.

Parámetro	Requerimientos	Simulación	Pruebas de laboratorio	Diferencias
f_c	2.4 GHz	2.391 GHz	2.381 GHz	error de 0.8 %
S_{11}	-20 dB	-24.941 dB	-25.711 dB	mejora de 5.7 dB
BW	80 MHz	161 MHz	80 MHz	sin diferencia

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos, creemos que siguiendo la metodología de diseño aquí presentada se podrían realizar antenas que operen a otras frecuencias comerciales, como lo son el GSM (900 y 1900 MHz) o la siguiente sección del servicio de Wifi (5 GHz).

5. Conclusiones

Lo expuesto anteriormente permite concluir, que para la frecuencia de interés de 2.4 GHz es viable implementar la metodología de diseño presentada para una antena de parche de microcinta. Esta metodología considera el orden del diseño de cada uno de los factores que componen el sistema completo para la antena, es decir, el parche radiador, el acoplador de $\lambda/4$, y una línea de transmisión de microcinta.

El sustrato FR4 se ajustó perfectamente a los requerimientos de que la antena sea compacta, delgada y de bajo costo. Si bien existen sustratos que podrían disminuir las dimensiones de la antena, éstos son más complicados de encontrar en el mercado y su costo es elevado respecto al FR4.

La geometría rectangular mostró resultados favorables respecto a otro tipo de geometrías, además de que las ecuaciones implementadas fueron de matemática sencilla, a diferencia de geometrías que implican un análisis matemático de mayor grado de dificultad, como lo son la geometría circular o la esvástica [Hinostroza et

al, 2021] [Singh at al, 2015]. En la tabla 2 se muestran algunos resultados obtenidos con distintas geometrías para el diseño de antenas de parche de microcinta. Como se puede observar, para las tres geometrías propuestas en [Vargas at al, 2018] [Pineda at al, 2019] [Hinostroza at al, 2020], algunos parámetros como la frecuencia central de operación y el ancho de banda no lograron acercarse a los requerimientos de diseño, ya que, en general, cuando se realiza el diseño de una antena para circuitos de microondas, se requiere que la frecuencia central de operación f_c , sea lo más cercano posible a la requerida, el parámetro S_{11} supere los -10 dB y el ancho de banda sea suficiente para operar en la banda de frecuencia de interés.

Tabla 2 Comparación de distintas geometrías para antenas de microcinta.

Geometría	Requerimientos	Simulación	Pruebas de laboratorio
Fractal tipo E	$f_c = 2.4$ GHz	2.463 GHz	2.624 GHz
	$S_{11} = -10$ dB	-50 dB	-17 dB
	$BW = 100$ MHz	74 MHz	100 MHz
Forma referenciada a un artículo	$f_c = 2.4$ GHz		2.7271 GHz
	$S_{11} = -10$ dB		-20.7847 dB
	$BW = 100$ MHz		14.15 MHz
Forma de U con ranura sencilla	$f_c < 6$ GHz	4.5 GHz	3.4 GHz
	$S_{11} = -10$ dB		
	$BW = 100$ MHz		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2, los espacios que no cuentan con un valor, es debido a que los autores no los explicitan. Aún a pesar de esto, los datos proporcionados son suficientes para poder deducir que la geometría rectangular muestra mejores resultados en la frecuencia central de operación f_c , en el parámetro S_{11} y ancho de banda BW .

El adaptador de impedancias usado, adaptador $\lambda/4$, presentó buenos resultados, por lo menos a la frecuencia de interés.

Como recomendación, en trabajos futuros se podría implementar la metodología aquí presentada para el diseño de antenas con otro tipo de sustrato. Lo anterior con la intención de tratar de mejorar el ancho de banda de la antena. Además, se podría también implementar la metodología a otras frecuencias de operación con la finalidad de realizar un arreglo de antenas para que la respuesta sea multibanda.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering*. New York: Wiley.
- [2] Constantine A. Balanis (2016). *Antenna Theory Analysis and Design*. New Jersey: Wiley.
- [3] Singh Vivek, Mishra Brijesh, Singh Rajeev, A Compact and Wide Band Microstrip Patch Antenna for X-Band Applications, Second International Conference on Advances in Computing and Communications Engineering, 2015.
- [4] Matin M. A., Sayeed A. I., A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna, WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS, January 2010.
- [5] Shanmugapriya Rajan, Design and Analysis of Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Inset Feed Technique for Wireless Application, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Volume 4, Special Issue 4, April 2015.
- [6] Tissier Jérôme, Latrach Mohamed, A 900/1800 MHz dual-band high-efficiency rectenna, *Microw Opt Technol Lett*, 2019.
- [7] Hinostroza Víctor Manuel, Garcés Héctor, Diseño y evaluación de prototipos con diversas geometrías de antena de microcinta debajo de 6 GHz, *Pistas Educativas*, Julio 2020.
- [8] Alkanhal M. A. S., Composite Compact Triple-band Microstrip Antennas, *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, 2009.
- [9] Em: Talk, 2010, https://www.emtalk.com/mwt_mpa.htm
- [10] Sonia Sharma, C. C. Tripathi and Rahul Rishi, Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 10 2017.
- [11] Wnuk Marian, Two methods to analyze microstrip antennas for Wi-Fi bandwidth, *Archives Of Electrical Engineering* Vol.70 2021.
- [12] Xie Fangyi, Yang Guo-Min, Geyi Wen, Optimal Design of an Antenna Array for Energy Harvesting, *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol 12, 2013.

- [13] Anguera Jaume, Pérez Antonio. (2008). Teoría de Antenas. Barcelona: Cataluña, España.
- [14] Bui D.H.N., Vuong T.P., Verdier J., Allard B., Benech P., Antenne multibande pour la récupération d'énergies sans fils, JNRDM Toulouse 2016.
- [15] Pineda Ulises, Machuca Raúl, Martínez Ángel, Cárdenas Marco, Stevens Enrique, Arce Armando, Análisis y Caracterización de un Arreglo Mimo Conformado por Elementos de Microcinta en Aplicaciones de Banda Ancha Rumbo a 5G, *Pistas Educativas* 2019.
- [16] Hinostroza Víctor, Garcés Héctor, Comparación de correlación de arreglos de antenas de microcinta con diferentes sustratos, *Pistas Educativas* 2021.
- [17] González Iván, Vargas Javier, Hernández Genaro, Reyes Mario, Miranda J.R., Andrade Edgar, Estudio de una antena de microcinta fractal tipo E para la banda de los 2.4 GHZ, *Pistas Educativas* 2018.