

Miniaturización de una Antena Microstrip Aplicando Diseño Fractal T-cuadrado

Microstrip Antenna Miniaturization by Fractal T-Square Design

Valeria Hernández-Ambato*, Hugo Moreno-Avilés†

*Universidad Politécnica de Valencia, 46022, Valencia, España

†Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 060155, Riobamba, Ecuador

Email: *vheramb@teleco.upv.es, †h_moreno@epoch.edu.ec

Resumen— Este documento describe el diseño e implementación de una antena fractal microstrip miniaturizada con frecuencia de operación a 2.4 GHz para la aplicación en dispositivos portables. La antena se desarrolló considerando la frecuencia de operación y las características del material. El material utilizado es RO4003C con permitividad dieléctrica $\epsilon_r = 3.38$ y espesor $h = 0.254$ mm. Se aplicó dos técnicas de miniaturización: por la forma y ranura en el parche. La forma del parche miniaturizado se definió en la segunda iteración del diseño fractal del T-cuadrado. El proceso de optimización del diseño de la antena se realizó mediante simulaciones y se utilizó la herramienta Ansoft Designer. Se implementó el diseño de la antena final que alcanzó el valor del parámetro S de -21 dB. Las mediciones se realizaron con la antena transmisora y receptora separadas a 15 cm y con potencia de entrada de 15 dBm. El diseño del parche final presentó el 46,65 % de miniaturización del tamaño con respecto al parche original. La optimización del diseño final de la antena presentó el 62,2 % de reducción en el tamaño con respecto a la antena microstrip inicial.

Palabras Clave— Antena, Microstrip, Miniaturización, Fractal, Parámetro S.

Abstract— This document describes the design and implementation of a miniaturized fractal microstrip antenna at 2.4 GHz operating frequency for application in portable devices. The antenna was developed considering the operating frequency and the characteristics of the material. The material used is RO4003C with dielectric permittivity $\epsilon_r = 3.38$ and thickness $h = 0.254$ mm. Two miniaturization techniques were applied: shape and groove in the patch. The shape of the miniaturized patch was defined in the second iteration of the T-square fractal design. The antenna design optimization process was carried out through simulations in Ansoft Designer tool. The antenna was implemented with final design reached at S parameter value of -21 dB. Measurements were made with the transmitting and receiving antenna separated by 15 cm and input power of 15 dBm. The final patch design presented 46.65% miniaturization in size with respect to the original patch. The final antenna design optimization presented a 62.2% reduction in size with respect to the initial microstrip antenna.

Keywords— Antenna, Microstrip, Miniaturization, Fractal, Parameter S.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas inalámbricos permiten una comunicación entre dos estaciones separadas sin necesidad de estar conectadas por un medio guiado o cable. La comunicación inalámbrica es posible con la utilización de antenas en los sistemas de transmisión y recepción. Las especificaciones, características del diseño y tipo de antena permiten establecer las expectativas del funcionamiento de un sistema de comunicación inalámbrica. La calidad de señal está relacionada con la capacidad, ganancia y otros parámetros de las antenas y/o del canal [1].

El tamaño de una antena está relacionado con la frecuencia de operación del sistema de comunicación inalámbrico. A bajas frecuencias el tamaño es mayor y viceversa. Los dispositivos portables permiten utilizar servicios como wifi y bluetooth. Existe una aplicación que integra sistemas compatibles con WiFi IEEE 802.11n con el transceptor Bluetooth IEEE 802.15. Ambos comparten la banda de frecuencia ISM comprendida desde 2.40 a 2.48 GHz [2]. Considerando la relación inversamente proporcional a la frecuencia, el tamaño de las antenas para operar en la banda ISM será pequeño [1].

Se propone el desarrollo de una antena con tecnología Microstrip, las cuales aparecieron en 1970. Su estructura se compone por una placa de substrato conectada a tierra (ground) sobre el cual se encuentra un parche metálico. Los diseños de antenas Microstrip más conocidos son circulares, rectangulares y están orientadas a tamaños pequeños. Las principales características son la frecuencia de resonancia, polarización, patrón e impedancia. Y dentro de las aplicaciones para las cuales está diseñada son compatibles con diseños MMIC, por lo que puede ser ubicada en un dispositivo de mano [1].

No obstante, el espacio en los dispositivos portables es muy reducido, por esto se necesita optimizar el tamaño del diseño de las antenas. Una alternativa para reducir el tamaño de una antena microstrip es usar la teoría fractal. La geometría fractal está compuesta por fragmentos de formas aleatorias o repetitivas [3,4]. Se conoce que Nathan Cohen es el inventor de las antenas fractales, en su patente se describe que el diseño de una antena está determinado por la geometría euclidiana, la

cual define que el área cerrada de una antena es proporcional a su perímetro [5].

Una antena fractal está compuesta por varias copias de su forma, pero en diferentes dimensiones dentro de sí. Esto permite aplicar el diseño para antenas multibanda, reducir el tamaño original y también para formar arreglos buscando el comportamiento de una sola antena con su propio patrón de radiación [3]. En la actualidad la necesidad de reducir el tamaño de una antena sin afectar la comunicación inalámbrica, impulsan la evolución de las antenas fractales generando varios tipos y diseños. Las antenas fractales más conocidas son el triángulo de Sierpinski, arboles fractales, fractal de Minkowski, curvas e islas de Koch, entre otras [6,7].

En [7], los autores proponen aplicar diseño fractal a una antena para reducir el tamaño de un parche microstrip original. Realizan una comparativa entre los diseños fractales de Koch y de Minkowski para determinar el porcentaje de reducción. Los resultados con respecto a la antena con parche rectangular original y las antenas fractales luego de tres iteraciones muestran que: la antena con diseño de Koch alcanza una reducción de tamaño del 28,41% mientras que la antena fractal con diseño de Minkowski con un coeficiente de relación de 0,75 y 0,9, logran una reducción de tamaño de 49,76% y 62,73% respectivamente. Considerando este trabajo, se plantea que es posible alcanzar un diseño de antena lo más pequeño mediante la aplicación de la geometría fractal y los beneficios aportados por las características del sustrato elegido para el desarrollo de una antena para dispositivos portables.

La estructura de este artículo se detalla a continuación: en la sección II se describe la metodología de diseño para lo cual se realiza un breve estudio teórico del modelo de antenas que se aplica, se indica características del material sustrato necesarios para el diseño del parche de la antena, se describe la técnicas de miniaturización que se utiliza para el diseño, la etapa de simulación, optimización y finalmente se evidencia la implementación de la antena fractal en prototipo de smartwatch que se considera como un dispositivo portable. En la sección III, se muestran los resultados de la etapa de simulación y las mediciones resultantes de la evaluación de la antena implementada. Al terminar esta sección se determina el porcentaje de miniaturización de la antena implementada. En la sección IV se presenta las conclusiones de este trabajo.

II. METODOLOGÍA

El diseño e implementación de la antena fractal propuesta se divide en cuatro etapas. La primera es el estudio teórico de metodologías de diseño y miniaturización de antenas, la segunda etapa es la simulación y optimización de la antena con la herramienta Ansoft Designer, la tercera etapa es la implementación de la antena y aplicación dentro de un prototipo de smartwatch y la cuarta etapa es la evaluación del funcionamiento.

A. Modelo de la línea de transmisión

Se elige este modelo de antena porque parte de un método empírico para el análisis de antenas microstrip y se utiliza para el diseño con parches de forma rectangular o circular.

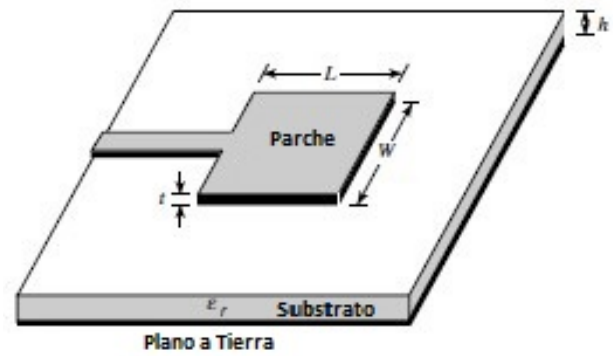


Figura 1. Modelo de la línea de transmisión [8].

Tabla I
CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL RO4003C

Parámetro	Dato
Nombre	Rogers
Serie Tipo	RO4003C
Frecuencias	Poliéster/cerámico
Espesor	Altas frecuencias 0.254 mm
Constante dieléctrica ϵ_r , para proceso	3.38 ± 0.05
Constante dieléctrica ϵ_r , para diseño	3.55
Factor de disipación tangencial	$0.0021 \sim 2.5$ GHz

Tabla II
DATOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA ANTENA

Parámetro	Dato
Frecuencia	2.4 GHz
Velocidad de la luz, c	3×10^8 m/s
Espesor del sustrato, h	0.254 mm
Constante dieléctrica ϵ_r , para diseño	3.55
Ancho de la línea de transmisión proporcionado por el fabricante	0.56 mm

Este modelo considera los bordes de la antena como dos slots o aperturas que irradian energía. Cada uno de los slots está definido por una medida. Estas medidas se describen como W (ancho de la antena) y L (largo de la antena). El modelo de línea de transmisión se muestra en la Figura 1 [8].

B. Diseño de la antena microstrip a 2.4 GHz

El dimensionamiento de la antena microstrip se desarrolló basado en la metodología propuesta en [9]. Se inició con la elección del material sustrato sobre el cual se realizó el diseño. En la Tabla I se muestra los datos técnicos del material sustrato elegido. Seguido, se realizó el cálculo de las dimensiones de la antena que está en dependencia del tipo de material. Se calculó los valores de las dimensiones del parche en función de la frecuencia de operación de 2.4 GHz. Los datos necesarios para el cálculo se detallan en la Tabla II.

El detalle de los cálculos se describe en las siguientes ecuaciones:

Ancho del parche:

$$W = \frac{c}{2 * f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = 41.44mm \tag{1}$$

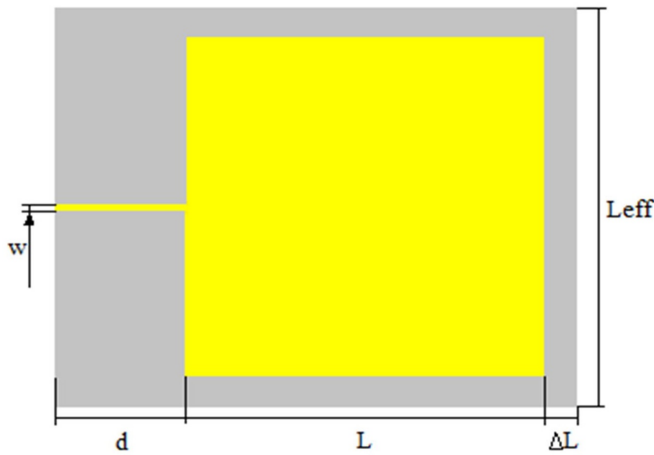


Figura 2. Esquema de la antena microstrip a 2.4 GHz

Constante dieléctrica efectiva:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{h}{W} = 3.51 \quad (2)$$

Longitud efectiva del parche:

$$L_{eff} = \frac{c}{2 * f * \sqrt{\epsilon_{eff}}} = 33.36mm \quad (3)$$

Longitud del substrato:

$$\Delta L = (0.412 * h) \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} = 0.12mm \quad (4)$$

Longitud real del parche:

$$L = L_{eff} - 2 \Delta L = 33.12mm \quad (5)$$

En base a los cálculos efectuados, el parche es un rectángulo de medidas W x L (41,44mm x 33.12mm). Sin embargo, para la aplicación de geometría fractal es conveniente trabajar con una estructura cuadrada, por lo que es mejor tomar estas medidas en la forma W x W o L x L [10]. Se decide por el dimensionamiento más pequeño, es decir L x L. Finalmente, el diseño del parche microstrip con modelo de la línea de transmisión se muestra en la Figura 2.

C. Simulación de la antena microstrip a 2.4 GHz

Esta etapa inicia con el diseño de la Figura 2 que es el parche microstrip original a 2.4 GHz. La simulación de la antena se realizó en el programa Ansoft Designer, versión estudiantil. En la Tabla II se especificó el diseño del parche de la antena microstrip y el ancho de la línea de transmisión. Debido a las propiedades del material la línea de transmisión es muy delgada, y provoca que sea muy larga. A demás, el parámetro S no fue eficiente por lo que se requirió añadir un acoplador de cuarto de onda para reducir el efecto de reflexión de la onda que se estaba generando, el diseño simulado se muestra en la Figura 3. Las dimensiones de la antena se detallan en la Tabla III. La longitud total del primer diseño de antena microstrip es de 62.77 mm.

La Figura 4 muestra la gráfica del parámetro S o VSWR que indica el nivel de acoplamiento del parche con la línea

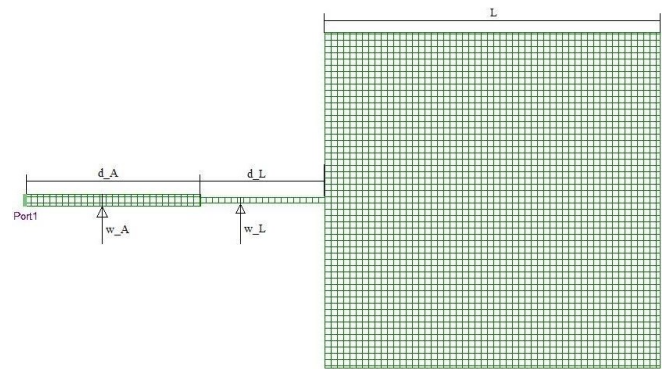


Figura 3. Antena microstrip a 2.4 GHz simulada.

Tabla III
DIMENSIONES DE LA ANTENA MICROSTRIP A 2.4GHz

Variable	Valor	Variable	Valor
L	33.12 mm	d_A	17.4 mm
d_L	12.25 mm	w_A	1.14 mm
w_L	0.56 mm	-	-

de transmisión e indica la frecuencia de resonancia de la antena microstrip convencional a 2.4 GHz. En la metodología para el diseño de antenas, el valor del VSWR de una antena diseñada y simulada debe superar el valor de -10 dB. La antena microstrip original presenta un nivel de -13 dB con frecuencia de resonancia a 2.4 GHz.

D. Técnicas de Miniaturización

Típicamente, las antenas microstrip son de tamaño reducido, pero es conveniente reducir aún más, a lo máximo posible, para aplicaciones que necesitan que se cumpla este requerimiento, como, por ejemplo: teléfonos celulares. En este documento se propone la aplicación en dispositivos portables ejemplificado

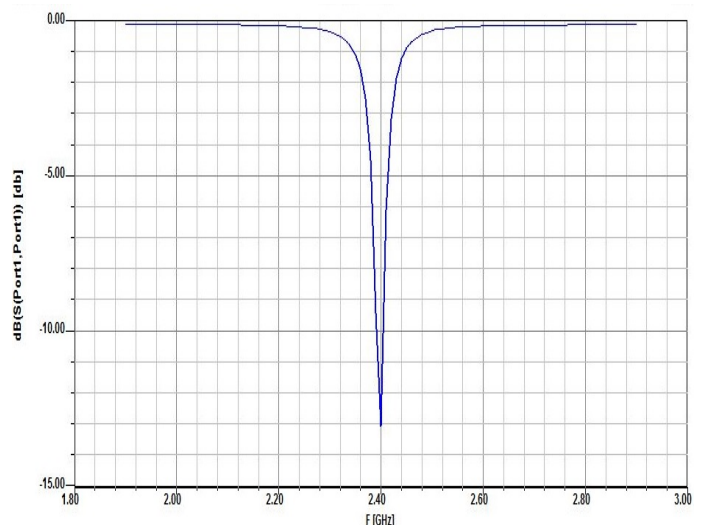


Figura 4. Parámetro S de antena microstrip convencional a 2.4 GHz.

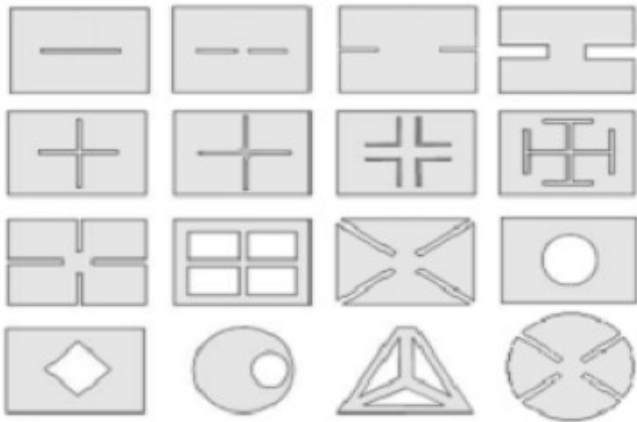


Figura 5. Tipos de ranuras para miniaturización [11].

en un smartwatch.

En [11] se detalla que existen siete técnicas de miniaturización para parches Microstrip, las cuales son por: naturaleza del sustrato, ranura en el parche, el uso de cargas concentradas o distribuidas sobre el parche, simetría, forma del parche, uso de estructuras periódicas y metamateriales. En este trabajo se elige dos técnicas para la miniaturización y se detallan a continuación:

- Miniaturización por ranura en el parche

Esta técnica consiste en la eliminación de una o varias secciones de material conductor y/o dieléctrico del interior del área del parche microstrip. Esto provoca que la propagación de onda sea más lenta causando una frecuencia de resonancia u operación más baja. Sin embargo, tiene aspectos negativos en el ancho de banda de la antena, ganancia y efectividad. Algunos ejemplos de ranura se muestran en la Figura 5 [11].

- Miniaturización por forma del parche

Es una opción para lograr una antena más pequeña y menos voluminosa. Lo importante de esta técnica es el cambio en la geometría de la antena. La geometría fractal o diseños fractales logran diseños que presentan buenas características de radiación para antenas microstrip. Ejemplos de geometrías fractales en diferentes iteraciones se muestran en la Figura 6 [11].

E. Diseño del parche fractal microstrip miniaturizado

Al dimensionamiento del parche original se aplicó interacciones fractales como método de miniaturización. El número de interacciones fueron los necesarios hasta cumplir con el objetivo de miniaturizar al máximo posible la longitud del parche microstrip. El desafío de este método fue mantener la frecuencia de operación de la antena en 2.4 GHz. Se propone cumplir que la sumatoria de las medidas de todos los segmentos en que se fragmente el lado modificado del parche debe ser igual a la medida original.

El diseño original del parche cuadrado tiene por medida $L = 33.12$ mm, como se indica en la ecuación (5). El diseño fractal del T-cuadrado no se considera un diseño conocido o frecuentemente aplicado, como se indica en la sección I. Por

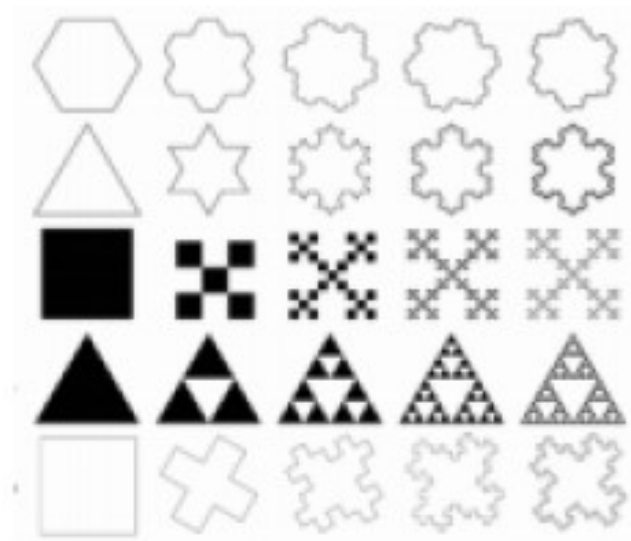


Figura 6. Geometrías fractales para parche [11].

tanto, se plantea que el aporte novedoso de este artículo es proponer la miniaturización del parche de la antena microstrip por línea de transmisión utilizando este diseño fractal. En la Figura 7 se muestra las distintas posibles iteraciones de este tipo de diseño fractal aplicado al parche inicial Microstrip.

En la Figura 8, se observa la antena fractal microstrip luego de una iteración de factorización con el diseño del T-cuadrado. El VSWR se afectó, por lo que fue necesario añadir otra línea de transmisión antes del acoplador para superar los -10 dB.

En la Figura 9, se muestra la resonancia en frecuencia de la antena y se evidencia que la frecuencia de operación se desplazó a 2.72 GHz. Este cambio es debido a la aplicación de la técnica de miniaturización por la forma del parche debido a que se reduce el tamaño del parche, aumentando la frecuencia.

Se realizó una segunda iteración fractal al parche microstrip

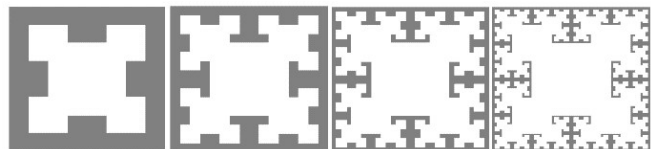


Figura 7. Fractal del T-cuadrado con cuatro iteraciones [12].

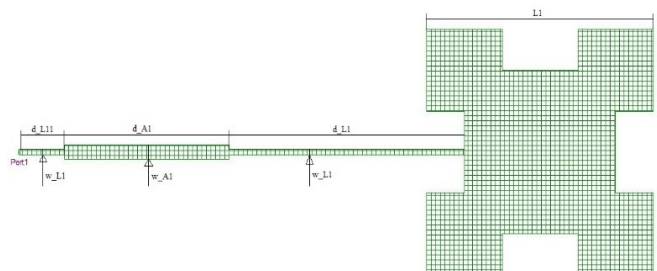


Figura 8. Antena fractal después de la primera iteración.

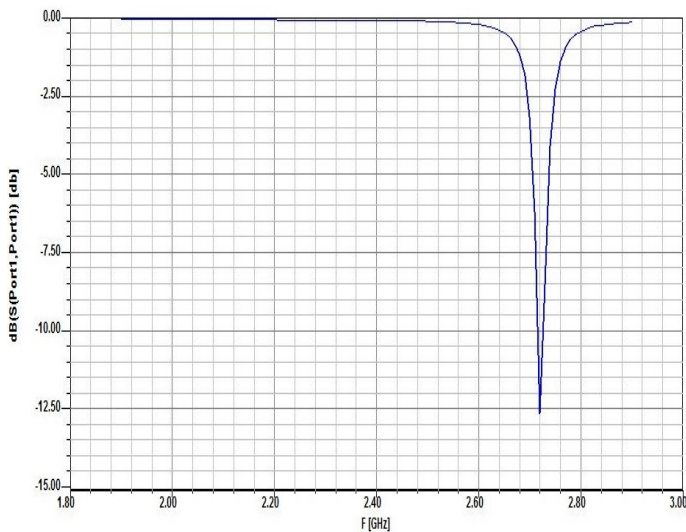


Figura 9. Frecuencia de resonancia en 2.72 GHz después de una iteración.

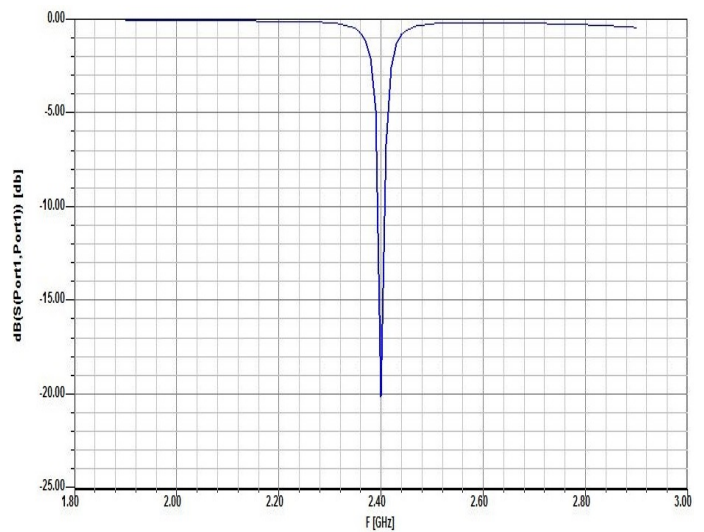


Figura 11. Frecuencia de resonancia en 2.4 GHz y VSWR de -20dB.

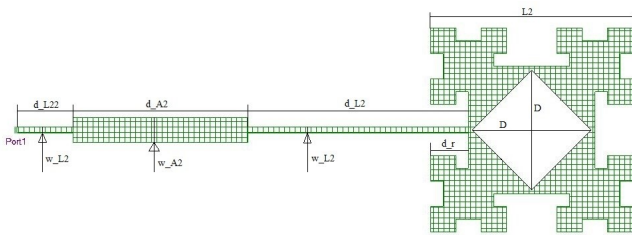


Figura 10. Antena fractal después de aplicar dos técnicas de miniaturización.

y se aplicó la otra técnica de miniaturización: ranura en el parche. Este proceso permitió corregir la frecuencia de resonancia de la antena para que opere en 2.4 GHz. Revisar Figura 10 – 11.

Además, en la Figura 11 se observa que el valor del parámetro S alcanzó el valor de -20 dB. Se decidió terminar con la etapa de reducción del parche en la segunda iteración considerando que se alcanzó un buen nivel de acople de la antena.

En la primera iteración se alcanza un parche de lado cuadrado que mide $L_1=24.84\text{mm}$, se muestra en la Figura 8. En la segunda iteración se substrajo en cada una de las subdivisiones una porción en forma de rectángulo por cada lado. En la parte central de cada uno de los lados del parche cuadrado se redujo la distancia del corte para dar el aspecto de una T. En los lados internos de este corte se substrajo solo la mitad de un rectángulo. Ahora, el lado cuadrado del parche mide $L_2 = 17,664 \text{ mm}$ como se muestra en la Figura 10. Sin embargo, la sumatoria de las subdivisiones en cada lado del diseño fractal es igual al lado L del parche original.

F. Optimización de la antena fractal microstrip

La optimización de la antena fractal microstrip se realizó modificando la forma de la línea de alimentación entre el acoplador de cuarto de onda y el parche para reducir la longitud total del arreglo de la antena. La nueva forma es espiral rectangular, la distancia de la espiral es la necesaria

para que la parte imaginaria de la carga previo al acoplador sea cero. El ancho de la línea de transmisión fue modificado con el propósito de mejorar el nivel del parámetro S. El diseño final de la antena fractal microstrip miniaturizada que se implementó se muestra en la Figura 12 y las dimensiones de la antena se indica en la Tabla IV.

El comportamiento del parámetro S de la antena fractal microstrip miniaturizada y optimizada se muestra en la Figura 13. El nivel de potencia es -20.49 dB a la frecuencia de

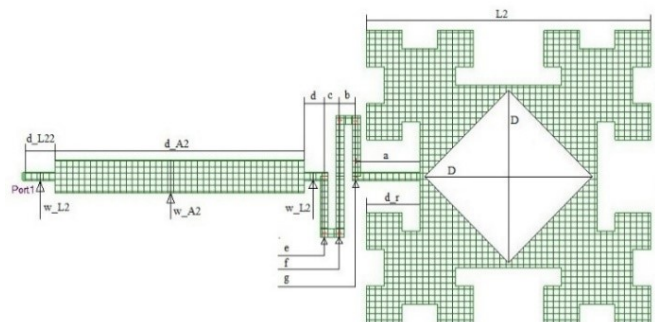


Figura 12. Antena miniaturiza y optimizada a 2.4 GHz.

Tabla IV
DIMENSIONES DE LA ANTENA MINIATURIZADA Y OPTIMIZADA

Variable	Valor	Variable	Valor
L2	17.664 mm	a	3.95 mm
w_L2	0.5 mm	b	1 mm
d_A2	15.5 mm	c	1 mm
w_A2	1.946 mm	d	1.25 mm
d_L22	2 mm	e	3.428 mm
D	10.4 mm	f	6.85 mm
d_r	3.312 mm	g	3.428 mm

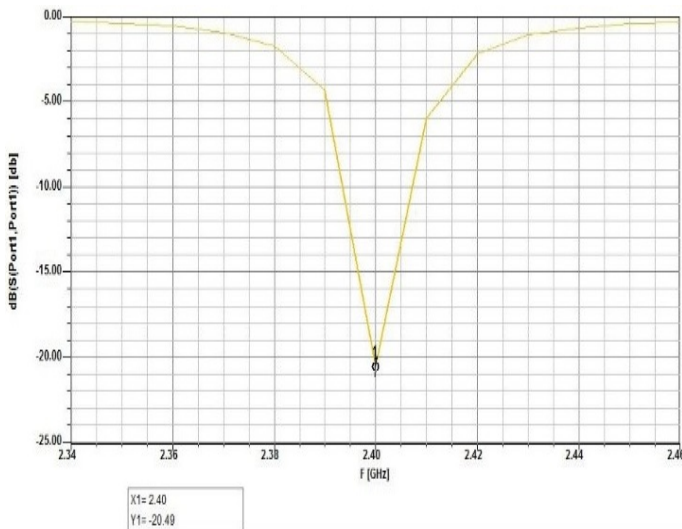


Figura 13. Parámetro S de antena optimizada a 2.4 GHz.

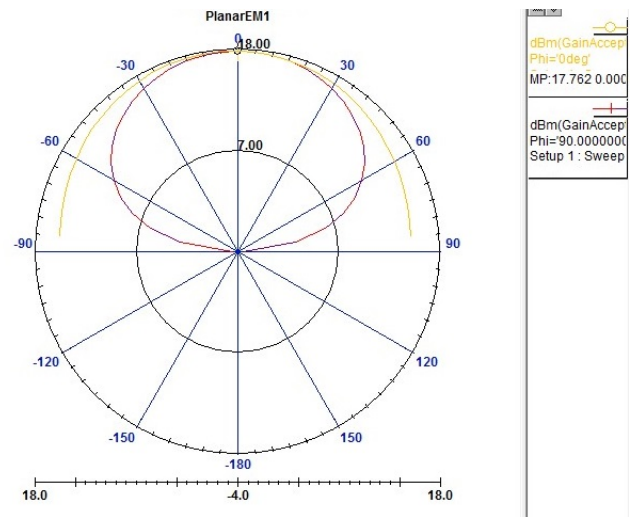


Figura 15. Diagrama de ganancia aceptada en 2.4 GHz.

Tabla V
COMPARACIÓN DE DIMENSIONES DEL PROTOTIPO IMPLEMENTADO Y SMARTWATCH FUNCIONAL DIMENSIONES DE LA ANTENA MICROSTRIP A 2.4GHZ

Parámetro	Valor	Variable	Valor
Ancho	40 mm	30 mm	22.66 mm
Largo	48 mm	54 mm	41.55 mm

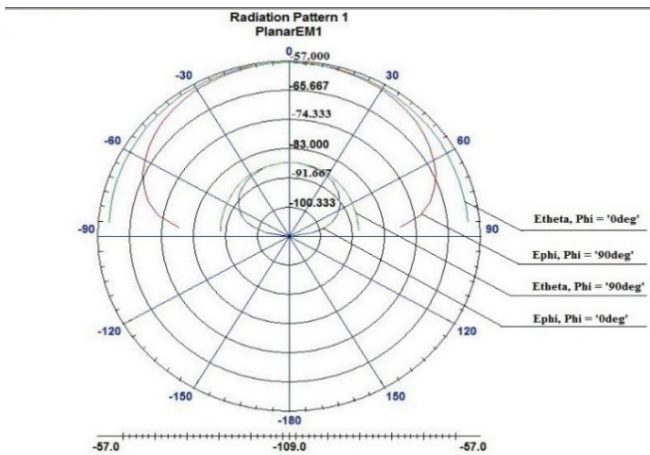


Figura 14. Patrón de radiación en frecuencia de 2.4 GHz.

2.4 GHz. Este valor del parámetro S del diseño final de la antena fractal es mejor respecto al valor de -13 dB la antena microstrip convencional. Esto muestra que después de las iteraciones de fractalización aplicadas se ha logrado un mejor acoplamiento.

El patrón de radiación resultante de la simulación se muestra en la Figura 14. Se graficó el plano E y plano H en 0 y 90 grados para los diferentes ángulos de Phi y Tetha. Se observa que la antena fractal microstrip diseñada presenta un patrón omnidireccional en ambos planos de propagación.

En la Figura 15 se muestra el diagrama de la ganancia total aceptada entre los planos E y H de la antena fractal microstrip. La ganancia se determina considerando las pérdidas de la antena, conductor, dieléctrico, modo de alimentación. Se observa que en la parte de máxima radiación se obtiene el valor de 17.76 dBm ubicado en el punto central de la curva de color amarillo como indica el marcador.

G. Encapsulamiento de la antena en un prototipo de estructura de smartwatch

Un smartwatch es un reloj inteligente que hoy en día puede realizar varias funcionalidades complementarias a un teléfono celular y conectividad wifi y bluetooth cuyas frecuencias de operación es 2.4 GHz. Para evaluar el prototipo, se fabricó la antena en una maquina CNC y posterior se colocó la antena dentro de un prototipo de estructura de smartwatch que se construyó para ejemplificar la aplicación en un dispositivo portable. El prototipo se construyó en una impresora 3D con material PLA en color negro, como se muestra en la Figura 16.

Para determinar si el tamaño de la antena es conveniente para una implementación real de dispositivo portable, en la Tabla V se resume una comparación de las dimensiones del prototipo implementado y un dispositivo smartwatch funcional.

III. RESULTADOS

Las mediciones de laboratorio sobre la antena fractal microstrip implementada se desarrolló con una distancia de separación entre la antena Tx y Rx de 15 cm. En el escenario de medición se utilizó el generador de señales Anritsu MG3690C y un el analizador de espectro Anritsu MS2427C. Se realizó un barrido de frecuencias dentro del span de 400 MHz con frecuencia central en 2.4 GHz y potencia del transmisor de 15dBm para determinar la curva del nivel de potencia recibida. Estos resultados se muestran en la Figura 17, donde se observa que en 2.4 GHz se tiene aproximadamente -72.3 dBm de



Figura 16. Prototipo de estructura de smartwatch con la antena implementada.

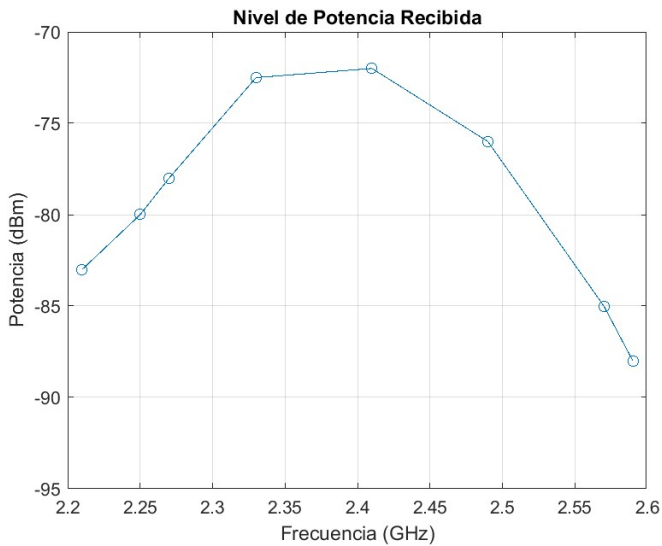


Figura 17. Barrido de frecuencias en span de 400 MHz.

potencia recibida. En contraste con los datos de simulación evidenciados en la Figura 13, el resultado de la medición reveló que la antena implementada está operando en 2.41 GHz y no en 2.4 GHz como se esperaba.

El ancho de banda se calcula considerando 3dB a cada lado del pico más alto del espectro de potencia de la antena. Se elige al lado izquierdo y se determina $\Delta = -392.72$ KHz. La ecuación para calcular el ancho de banda es:

$$BW = 2 * |\Delta| \approx 785 \text{ KHz} \quad (6)$$

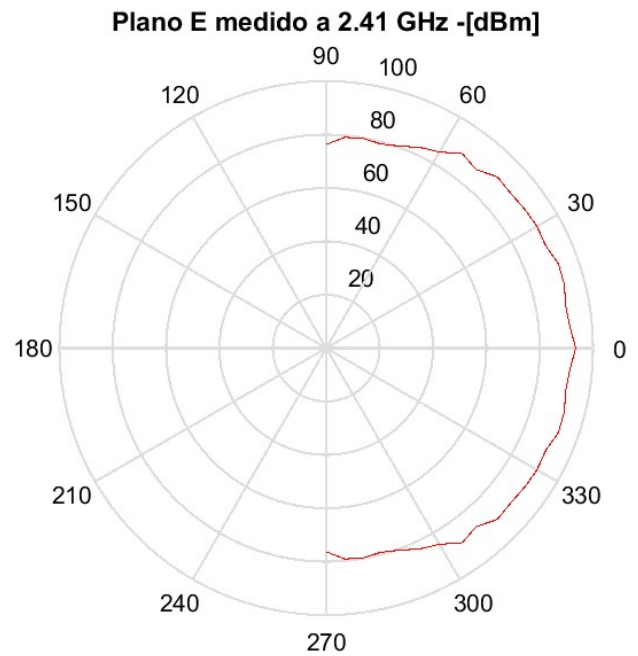


Figura 18. Plano E del patrón de radiación medido de la antena fractal microstrip a 2.41 GHz.

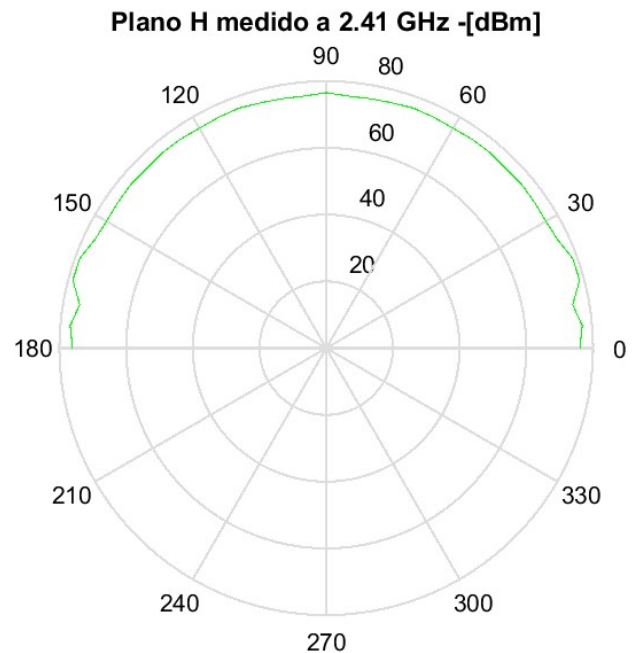


Figura 19. Plano H del patrón de radiación medido de la antena fractal a 2.41 GHz.

A demás, a partir del espectro de la antena fractal microstrip se pudo determinar el patrón de radiación medido a frecuencia de 2.41 GHz, se determinó en el plano E y H. Se muestra en la Figura 18, que el campo radiado en este plano se encuentra ubicado en $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ y $270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$.

El plano H del patrón de radiación de la antena fractal microstrip se muestra en la Figura 19. El campo radiado se encuentra en $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$.

El diagrama de la ganancia medida de la antena implementada se muestra en la Figura 20 donde se observa que el valor

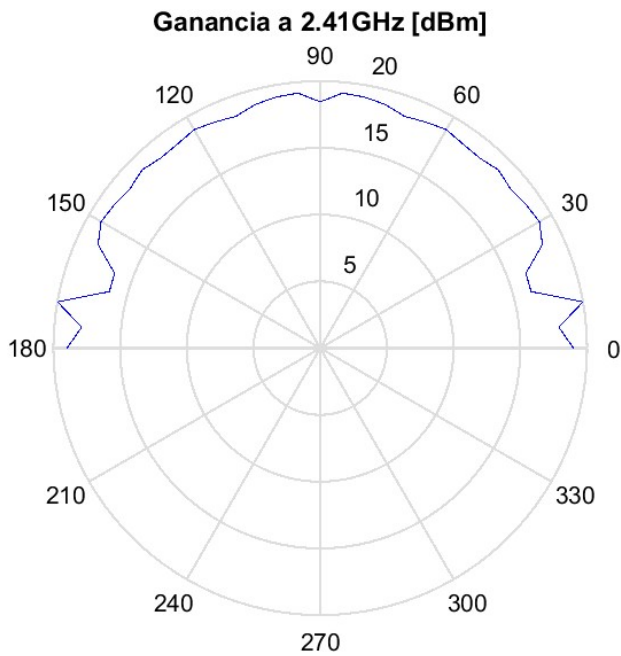


Figura 20. Ganancia medida de la antena fractal microstrip a 2.41 GHz.

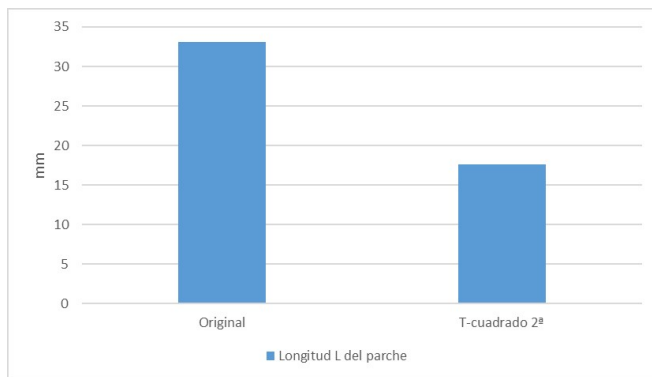


Figura 21. Comparación de la dimensión L del parche.

en 90° tiene el valor de 18.45 dBm.

Respecto a la miniaturización, se compara el tamaño del parche original L que se indica en la Tabla III con el tamaño del parche final L2 después de la segunda iteración que se indica en la Tabla IV. Se evidencia que el valor de los lados del parche son $L = 33.12$ mm y $L_2 = 17.66$ mm. Esto equivale a que al aplicar el diseño fractal T-cuadrado se redujo el tamaño del parche en un 46.65%. En la Figura 21 se muestra un diagrama de barras que representa esta comparativa.

La antena microstrip original que se muestra en la Figura 3 tiene una longitud aproximadamente de 62.77 mm mientras que la antena miniaturizada con el diseño fractal del T-cuadrado y optimizada mediante simulación que se muestra en la Figura 8 presenta una longitud aproximadamente 39.05 mm. El porcentaje de reducción de la antena fractal microstrip final es de 62.2%. Estos valores se encuentran en las Tablas III y IV respectivamente. La evidente diferencia de longitudes entre el diseño original y funcional con el diseño optimizado final confirma la miniaturización. En el Figura 22 se muestra,

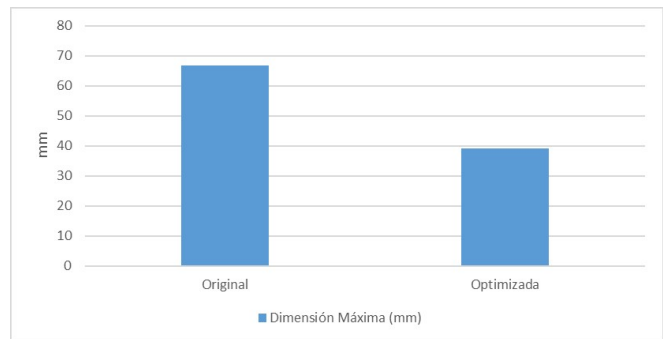


Figura 22. Comparación de la dimensión máxima de la antena microstrip.

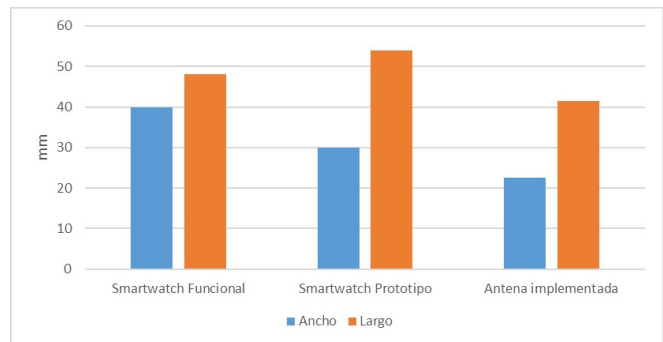


Figura 23. Tamaño de smartwatch vs antena implementada. Comparación de la dimensión máxima de la antena microstrip.

en diagrama de barras, la diferencia de dimensión máxima entre el diseño de antena microstrip original simulado y la antena fractal optimizada e implementada.

Es importante determinar si el tamaño de la antena implementada posee un tamaño apto para ser implementada en un dispositivo portable funcional. Se consideró un smartwatch como ejemplo, la Figura 23 hace referencia a la Tabla IV, en la cual se observa una comparación de medidas de ancho y largo entre un smartwatch funcional, prototipo y la antena fractal implementada.

Se observa que el tamaño de la antena es menor que el tamaño del smartwatch funcional pero también se observa que el smartwatch prototipo es más largo que el funcional, pero esto fue debido al cable coaxial utilizado para la alimentación por línea de transmisión. Se debe considerar que en un dispositivo electrónicamente implementado el modo de alimentación se lo realiza de manera compacta sin la necesidad de utilizar cables.

IV. CONCLUSIÓN

Se cumplió con el objetivo de miniaturizar una antena microstrip convencional mediante la aplicación de las técnicas de miniaturización por ranura y por la forma del parche. Esta segunda técnica se realizó mediante la aplicación de diseño fractal del T-cuadrado. La antena final luego de dos iteraciones fractales y optimizada la línea de transmisión, presentó el 46.6% de reducción respecto al tamaño del parche original. El dimensionamiento máximo final de la antena fue de 39 mm aproximadamente, que representa el 62.2% con respecto

a la antena original. Posterior al barrido de frecuencias se determina que la antena fractal microstrip implementada opera a la frecuencia de 2.41 GHz. El valor del ancho de banda de la antena evaluada físicamente es 785 KHz. El patrón de radiación simulado y medido de la antena es omnidireccional. La ganancia medida de la antena es 18.45 dBm en la dirección de $\theta = 90^\circ$. Finalmente, la antena puede ser implementada en prototipos de dispositivos portables.

REFERENCIAS

- [1] C. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, WILEY, vol. 25, n.º 3, issn 0-471-66782-X, 2005.
- [2] A. Biran, *WiFi OFDM and Bluetooth signal collision analysis*, en IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2011), pp. 1-4, doi: 10.1109/COM-CAS.2011.6105779, 2011.
- [3] S. Ramos, *Diseño y simulación de dos antenas fractales basadas en la alfombra y el triángulo de Sierpinski*, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Ecuador, pp. 20-35, [en línea] <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7303>, 2017.
- [4] A. Azari, *A New Super Wideband Fractal Microstrip Antenna*, en IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, pp. 1724–1727, doi: 10.1109/TAP.2011.2128294, 2011.
- [5] N. Cohen, *Fractal Antennas and Fractal Resonators*, (US, Belmont No. Patente: US 6,452,553 B1) United States Patent, [en línea] <https://patents.google.com/patent/US6452553B1/en>, 2002.
- [6] M. Herrera y J. Inclán, *Estudio y Metodología de Diseño de Antenas utilizando Geometría Fractal (Antenas Fractales)*, Escuela Politécnica Nacional, Escuela de Ingeniería, Quito, [en línea] <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11124>, 2004.
- [7] L. Chen, Y. Jiao, H. Xie y F. Zhang, *Minkowski fractal patch antenna for size and radar cross-section reduction*, en Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, pp. 1406-1409, doi: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159822, 2011.
- [8] S. Martínez y R. Jimenez, *Análisis de la simulación del patrón de radiación en una antena tipo parche*, Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela Ingeniería y Administración. Bucaramanga, pp. 41–46.
- [9] R. Ramirez e I. Urquiza, *Metodología de diseño para antenas microcinta de parche rectangular*, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas". México, pp. 38-40, 2010.
- [10] M. Bahjat, *Design a square microstrip patch antenna at 2.4 GHz, and comparison between unslotted and slotted versión*, en Journal of Theoretical and Applied Information Technology, pp. 231-235. issn:1817 – 3195, 2015.
- [11] J. Estela, *Técnicas de miniaturización en antenas microcintas*, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Cuba, pp. 4-7, 28-41, [en línea] <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7919>, 2017.
- [12] M. Sada, *Diseño fractal del T-cuadrado*, [en línea] <https://www.geogebra.org/m/sn2FbBNr>, 2021.