

Analizador de antenas para las bandas HF y VHF utilizando sistemas embebidos

Antenna analyzer for the HF and VHF bands using embedded systems

^aJorge-Enrique Herrera-Rubio, ^bÁngelo-Joseph Soto-Vergel, ^cJeison-Eduardo Eslava-Pedraza

 ^aDoctor en gestión de la ciencia y la tecnología, jherrera@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Cúcuta-Colombia.

 ^bIngeniero Electrónico, jeisoneduardoep@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta-Colombia.

 ^cMagister en Educación Matemática, jvergela@uninorte.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta-Colombia.

Recibido: Mayo 22 de 2021 **Aceptado:** Agosto 27 de 2021

Forma de citar: J.E. Herrera-Rubio, A.J. Soto-Vergel, J.E. Eslava-Pedraza, "Analizador de antenas para las bandas HF y VHF utilizando sistemas embebidos." *Mundo Fesc*, vol 11, no. S2 pp. 275-287, 2021.

Resumen

En la actualidad las telecomunicaciones juegan un papel fundamental en la vida diaria, debido a que son implementadas tanto en el sector industrial y comercial por lo que se busca optimizar, mejorar y medir parámetros y fenómenos físicos que puedan afectar el rendimiento de los componentes utilizados en un sistema de comunicación inalámbrico; razón por el cual es fundamental realizar el monitoreo de manera constante las antenas utilizadas en telecomunicaciones para validar su funcionamiento y operatividad, estas actividades resultan costosas debido a los dispositivos electrónicos con los que se implementan; este artículo propone el desarrollo de un sistema embebido para el análisis de antenas en las bandas de alta frecuencia HF y muy alta frecuencia VHF mediante una metodología basada en cuatro etapas: selección de parámetros, integración tecnológica, desarrollo del aplicativo, y validación del sistema. Como resultado, se construye un sistema compacto que permite la obtención de parámetros de la antena como la impedancia, patrón de radiación y haz de media potencia, todos con errores inferiores al 0.1 %, en comparación al equipo de laboratorio de referencia calibrado y ajustado para los rangos de frecuencias de 10 MHz a 50 MHz, permitiendo establecer un prototipo diseñado como una alternativa para pruebas y validaciones en laboratorios.

Palabras clave: Antenas, altas frecuencias, sistema embebido, ganancia, patrón de radiación.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: jherrera@unipamplona.edu.co



Abstract

Nowadays, telecommunications play a fundamental role in daily life, because they are implemented in both the industrial and commercial sector, so it is sought to optimize, improve and measure parameters and physical phenomena that may affect the performance of the components used in a wireless communication system; for this reason it is essential to constantly monitor the antennas used in telecommunications to validate their performance and operability, these activities are costly due to the electronic devices with which they are implemented; this article proposes the development of an embedded system for the analysis of antennas in the high frequency HF and very high frequency VHF bands through a methodology based on four stages: parameter selection, technological integration, application development, and system validation. As a result, a compact system is built that allows obtaining antenna parameters such as impedance, radiation pattern and medium power beam, all with errors lower than 0.1 %, compared to the reference laboratory equipment calibrated and adjusted for the frequency ranges from 10 MHz to 50 MHz, allowing establishing a prototype designed as an alternative for testing and validation in laboratories.

Keywords: Antennas, high-frequency, embedded system, gain, radiation pattern.

Introducción

El constante desarrollo de las telecomunicaciones ha hecho que cada vez más la sociedad dependa de los sistemas de comunicación electrónicos en el ámbito social y laboral, razón por la cual toda optimización de enlaces inalámbricos será fundamental en la productividad, competitividad empresarial, educacional y económica en el mundo globalizado para asegurar el desplazamiento rápido y eficaz de la información [1], [2].

A pesar de ello los costos de los equipos de medición para los sistemas de comunicación puede significar un problema en las aulas educativas y proyectos de laboratorio en instituciones de países en vía de desarrollo; además, la caracterización de antenas de muy alta frecuencia es un aspecto que requiere de equipos sofisticados y de alto costo[3].

Una alternativa viable para dar solución es el desarrollo de sistemas de bajo costo lo proponen [4] donde desarrollan un sistema de adquisición y procesamiento de datos para la medición de parámetros radioeléctricos en las bandas de frecuencia muy altas (en inglés, Very High Frecuencia - VHF) y frecuencias ultra altas (en inglés, Ultra

High Frequency - UHF) mediante señales de tv de canales nacionales.

De otra forma [5] utiliza un analizador vectorial de redes (VNA) portátil y de bajo coste para determinar la pérdida de retorno y la relación de onda estacionaria para lograr medir el coeficiente de reflexión vectorial, utilizando varias antena y logra resultados muy significativos.

También [6] establecen un sistema para la evaluación de antenas en campo cercano adquiriendo la información mediante una cámara anecoica con un completo y preciso sistema de exploración espacial y un software de procesamiento de los datos.

El estudio realizado [7] para el proceso de optimización de una antena evalúa los parámetros del diseño y permite modificarlos en función de la adaptación en el ancho de banda de interés, tomando como referencia la relación de onda estacionaria (ROE) en el plano de carga de entrada de la antena, para acoplar la impedancia de entrada con la línea de transmisión.

Otro aspecto a resaltar, es la poca documentación en el desarrollo de sistemas embebidos de bajo costo para la medición de parámetros de antenas de HF y VHF;

teniendo en cuenta lo anterior el desarrollo de la investigación se basa en el uso de un prototipo para el análisis de parámetros de antenas en frecuencias HF y VHF basado en sistemas embebidos, incorporar una aplicación de usuario para la visualización de dichos parámetros.

Materiales y métodos

Para el desarrollo del sistema experimental se toma como referencia la metodología propuesta por [8] la cual está compuesta de cuatro etapas: selección de parámetros, integración tecnológica, desarrollo del aplicativo, y validación del sistema. La Figura 1 muestra la metodología implementada y a continuación se describen las actividades en cada una de las etapas.

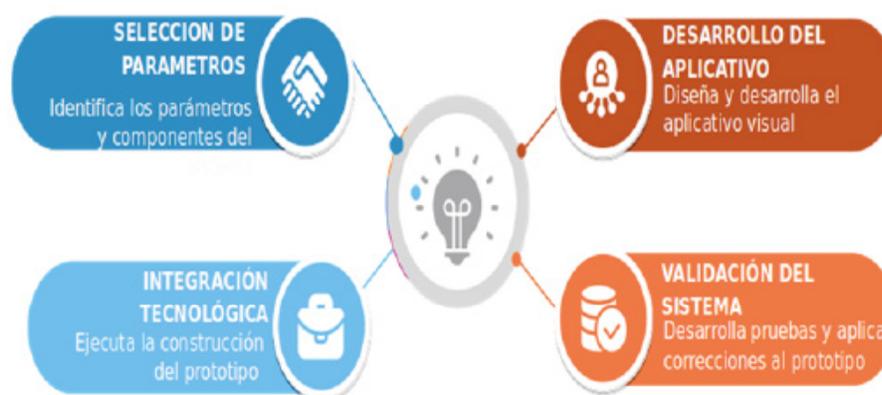


Figura 1. Metodología desarrollada.

Etapa de Selección de parámetros

Identifica los parámetros a medir en la antena como son impedancia, patrón de radiación, haz de media potencia, ancho de banda, Relación de onda estacionaria (SWR), directividad, eficiencia y ganancia [9]; así mismo, los elementos y tecnologías utilizadas para medir cada uno de los parámetros seleccionados para la construcción del dispositivo basado en un sistema integrado embebido. Para comprender esta etapa se extraen las definiciones más relevantes.

- **La impedancia:** Representa el comportamiento de un circuito a una corriente cuando se administra un voltaje y se genera en los terminales de alimentación de una antena, es calculada como una línea de transmisión abierta, teniendo en cuenta las ecuaciones (1),(2) y (3) [10].

$$R_e = \frac{(Z_0)}{2} \left[\frac{\text{Sinh}(2\alpha H)}{\cos^2(\alpha H) - \cos^2(\beta H)} \right] \quad (1)$$

$$X_e = \frac{(Z_0)}{2} \left[\frac{-\text{Sinh}(2\beta H)}{\cos^2(\alpha H) - \cos^2(\beta H)} \right] \quad (2)$$

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} \quad (3)$$

Donde:

R_e : Corresponde con la resistencia de radiación referida al punto de alimentación de la antena cuando se comporta como un circuito resonante.

X_e : Es la parte imaginaria o reactiva

Patrón de radiación: Representa un diagrama de potencia irradiada desde una antena por unidad de ángulo sólido o su intensidad de radiación basado en la ecuación (4) [11].

$$U = r^2 s \quad (4)$$

El analizador de antenas utilizado en el proyecto para las bandas HF y VHF, cuenta con un detector de escala logarítmico que permite mediante dicha escala, obtener el nivel de recepción de potencia de la antena evaluada.

- **Haz de Media Potencia:** Se define como un plano que contiene la dirección del máximo de un haz, el ángulo entre las dos direcciones en el que la intensidad de la radiación es la mitad del valor máximo del haz [9].
- **Ancho de Banda:** Es el intervalo de frecuencias dentro del cual el funcionamiento de la antena es "satisfactorio"; se toma como la distancia entre las frecuencias de media potencia (diferencia entre las frecuencias máxima y mínima de operación).

Este parámetro es calculado mediante un barrido de frecuencia de una banda previamente seleccionada, incrementando desde el límite de frecuencia inferior hasta el límite de frecuencia superior

- **Relación de onda Estacionaria (SWR):** es la relación entre las ondas estacionarias de voltaje y corriente

transmitidos y reflejados en una línea de transmisión que se propagan desde el extremo del generador a la carga Z, donde su valor se calcula con la ecuación (5).

$$SWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (5)$$

Este parámetro es calculado mediante el módulo integrado MR100 [12] que permite a través de una calibración previa, la entrada de datos por medio del cable coaxial de tipo BNC y transmite sus salidas mediante un display, para este caso el valor del ROE será tomado de la pantalla.

- **Directividad:** Relación de la densidad de potencia irradiada en una dirección particular entre la densidad de potencia irradiada al mismo punto por una antena de referencia, como se observa en ecuación (6).

$$D = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (6)$$

Este parámetro se calcula mediante la sobreposición del patrón de radiación tomado de la antena receptora sobre el patrón de radiación de una antena isotrópica.

- **Eficiencia:** Relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena, recordemos que también se define como la relación entre ganancia y directividad, expresada en la ecuación (7).

$$e = \frac{G}{D} \quad (7)$$

- **Ganancia:** Se produce por efecto de la directividad al concentrarse la máxima potencia en el patrón de radiación en zonas indicada, de acuerdo a la ecuación

(8).

$$G = 10 \log \left[4\pi * \frac{U_{max}}{P_{in}} \right] \quad (8)$$

Etapa de Integración tecnológica

Es la construcción del sistema para caracterizar las antenas en las frecuencias de las bandas HF y VHF considerando aspectos de comunicación, interferencia y ruido en el diseño del prototipo.

Etapa de desarrollo del aplicativo

Detalla el funcionamiento del aplicativo basado en la metodología en espiral [13], partiendo de la descripción de los requerimientos del sistema, seguido del desarrollo de la lógica de funcionamiento y del prototipo en el lenguaje de programación Python.

Etapa de Validación del sistema

Esta última etapa prueba holísticamente el prototipo a frecuencias de 5 MHz, 10 MHz, 50 MHz, 100 MHz y 300 MHz, con el objetivo de medir la potencia del dispositivo y obtener el error respecto a un elemento profesional de medida; además, de realizar una comparación y cálculo del error porcentual (ecuación 9).

Donde:

$$Error \% = \frac{|V_a - V_e|}{V_e} * 100 \quad (9)$$

V_a : Es el valor del voltaje Aproximado

V_e : Es el valor del voltaje real

Resultados y discusión

El sistema de adquisición de datos incorpora dos módulos independientes que permiten realizar pequeños experimentos y prácticas de laboratorios en ambientes controlados como se observa en la Figura 2.

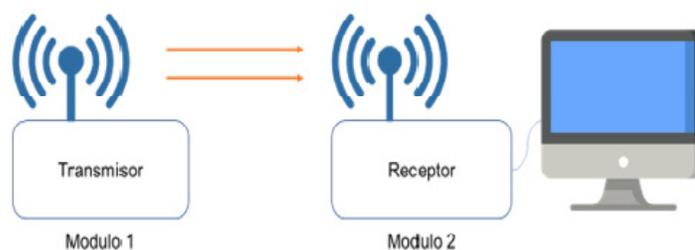


Figura 2. Diagrama General.

Con base a los parámetros establecidos que se medirán de las antenas en las frecuencias establecidas, la Tabla I presenta los componentes para el generador de señales del módulo 1 el cual implementa el AD9850 que es capaz de producir frecuencias de 125 MHz y los componentes para el módulo 2 para el receptor implementando con el dispositivo MR100 para evaluar la potencia, SWR, impedancia y reactancia, un servomotor para desplazar la antena radialmente y una placa Arduino Uno.

Tabla I. Componentes del sistema para la medición de antenas en bandas HF y VHF.

MÓDULO 1 (Transmisor)		MÓDULO 2 (Receptor)	
DISPOSITIVO	COMPONENTES	DISPOSITIVOS	COMPONENTES
Generador de señales	AD9850	Medición de potencia	AD8307
	74HCT574 H-CMOS Octal Flip-Flop	Motor de giro	Motor
	0.1 μ F and 10 μ F Ceramic Chip Capacitor		
	3.9 k Ω -50 Ω -25 Ω -2.2k Ω -1k Ω Resistor	Controlador	Arduino
	Display LCD/ Conector BNC	Captura SWR	MR100

El módulo transmisor está constituido por un generador de señales sinusoidales AD9850 para frecuencias de 1Mhz hasta 30 MHz, que a través de una salida BNC envía la señal mediante una antena conectada al mástil del módulo.

El módulo receptor cuenta con dos circuitos independientes y dos puertos USB, una entrada lleva al circuito encargado de determinar la relación de onda estacionaria y es calculada mediante un módulo independiente MR100 [12], los valores obtenidos son mostrados al usuario final mediante un display ubicado en la cubierta exterior del equipo.

La segunda salida del circuito es el encargado de estimar el nivel de recepción de intensidad de señal (RSSI), mediante el detector logarítmico AD8307 [14] de acuerdo a los cambios de voltajes y transformados en datos digitales que son exteriorizados mediante otro display.

Este detector es un dispositivo con un amplificador logarítmico de demodulación monolítica completo de 500 MHz de

rango, basado en la técnica de compresión progresiva (detección sucesiva), que proporciona un rango dinámico de 92 dB a ± 3 dB, con un límite de error de ± 1 dB en todas las frecuencias hasta 100 MHz [15].

El dispositivo receptor cuenta con salidas USB que permiten el enlace a una terminal externa donde se puede dar seguimiento y análisis a los datos capturados. Además, el módulo receptor cuenta con un motor paso a paso que permite realizar los giros controlados para la automatización del proceso de captura de los niveles de potencia que permitirán dibujar el patrón de radiación de la antena receptora.

La Figura 3 presenta el diseño general del prototipo integrado son la ubicación de los dispositivos del transmisor y receptor en un único panel, el cual incorporar conexiones coaxiales tipo BNC y SMA donde se conectan las antenas de prueba para la recepción de las señales.

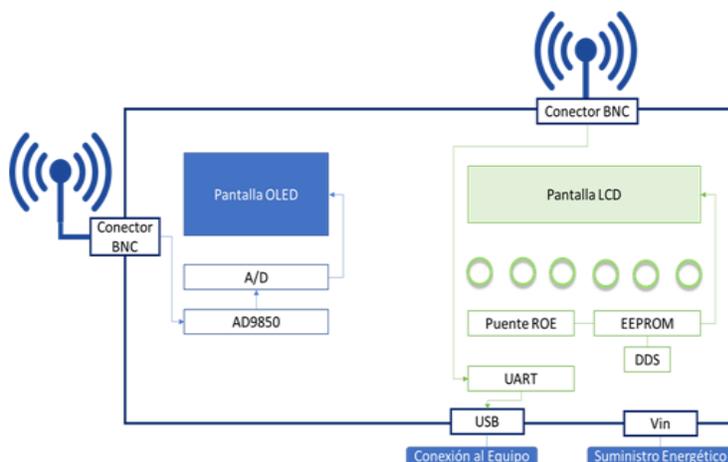


Figura 3. Diseño del sistema de mediciones

La parte del módulo receptor de la señal obtiene los datos mediante el conector BNC la cual los envía al puente de Wheatstone para el cálculo de voltaje directo y voltaje reflejado, con la finalidad de hallar el SWR [16].

La memoria EEPROM permite almacenar información y realizar comparaciones, por ejemplo, entre la señal de entrada y una señal generada mediante el Síntesis digital directa (en inglés, *Direct Digital Synthesis - DDS*).

De igual forma, el ancho de banda la implementa el generador DDS que realiza un barrido de frecuencias haciendo resonar la antena en la banda de frecuencia seleccionada permitiendo conocer el comportamiento de la antena. En cuanto a la impedancia, ésta es hallada mediante el puente de ROE al instante de ser conectada la antena.

El módulo transmisor genera las señales desde el AD9850 por medio de la antena que está ubicada en el conector SMA, la señal recibida es enviada al módulo AD8307 [17] del receptor que tiene lugar las etapas de amplificación y acondicionamiento de señal, además, la señal analógica es digitalizada

mediante el conversor análogo digital y despliega la información mediante la pantalla de salida [18]. Finalmente, el dispositivo se conecta a una terminal o computador mediante cable USB permitiendo visualizar la información en la interfaz diseñada a la medida.

La Figura 4 presenta el resultado final del prototipo de analizador de antenas [19] donde como se mencionó anteriormente incorpora una pantalla OLED y un menú de cinco opciones para la navegación, con este es posible obtener la captura del nivel de potencia trabajando en frecuencias de 1 a 500MHz, el nivel de potencia recibido, la amplitud del voltaje; solo se debe situar en la pantalla inicial y con los pulsadores de selección ubicar el valor de frecuencia en la que se van a realizar las medidas. Adicionalmente incorpora una segunda pantalla de tipo LCD que permite visualizar los parámetros restantes como: relación de onda estacionaria, impedancia, ancho de banda [20].



Figura 4. Prototipo de analizador de antenas.

En el apartado de la interfaz gráfica del analizador se establecen presentación y visualización de los datos [21] partiendo de un único menú como se observa en la Figura 5, desde allí se selecciona el puerto de comunicación en el cual se conecta el módulo transmisor y la cantidad de baudios de operación con el que se desea comunicar, también se fijan los procesos de conexión y cálculos de los parámetros de la antena.

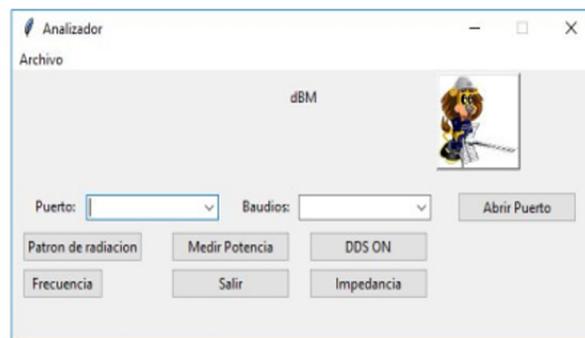


Figura 5. Interfaz gráfica para la conexión del sistema de mediciones.

La opción de patrón de radiación despliega la captura de los datos y mediante una ventana emergente permite controlar los tiempos de lectura. La Figura 6 presenta un ejemplo gráfico del patrón de radiación de 36 capturas de niveles de potencia en un sistema polar con una frecuencia de trabajo de 200 MHz [22].



Figura 6. Patrón de radiación generado por el software.

El proceso de validación del sistema construido se realiza con los equipos de laboratorio mediante la comparación de los resultados obtenidos con el medidor de campo a través de las mediciones de los niveles de potencia. Para determinar un estimado de la fiabilidad del equipo en construcción se toma como referencia un equipo de laboratorio calibrado y actualizado, el muestreo se realiza 21 referencias de frecuencia en escala logarítmica y para cada frecuencia un total de 9 niveles de potencia, desde -60 dBm hasta 20 dBm, como se observa en la tabla 3 [23].

Pruebas del módulo AD8307

Inicialmente se desarrolla una prueba con un cable coaxial directo (ver figura 7) desde el generador hasta los equipos los resultados.

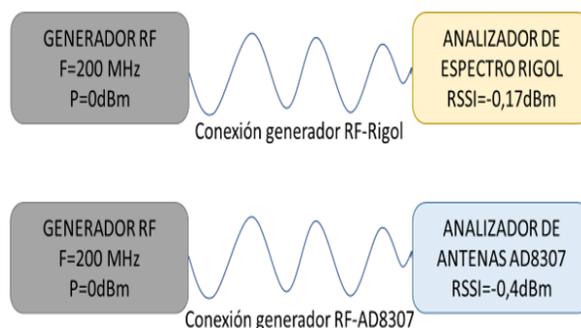


Figura 7. Pruebas de conexión y recepción de señal.

Los resultado de los niveles RSSI se probaron para la frecuencia de 200Mhz y se confrontan los resultados del analizador de antenas con el analizador del fabricante Rigol, de acuerdo a los resultado dela Tabla II.

Tabla II. Parámetros obtenidos para la prueba del generador RF-Rigol

	Potencia	Frecuencia	Instrumento	
			Rigol	AD8307
RSSI	0 dBm	200 MHz	-0.17 dBm	-0.4 dBm

En la figura 8 se presenta una segunda prueba de conexión utilizando una T coaxial para dividir la señal de entrada, las pruebas se desarrollan sobre las frecuencias de 5 MHz, 10 MHz, 50 MHz, 100 MHz y 300 MHz.

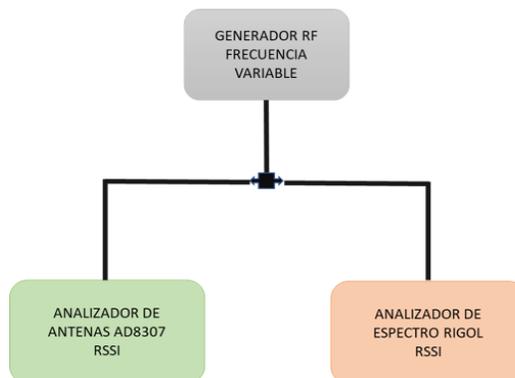


Figura 8. Conexión Generador RF-Rigol/AD8307

Como ejemplo de prueba, se detallan los resultados en la Tabla III para la frecuencia de 5Mhz [24].

Tabla III. Ejemplo de medidas de error obtenidas para la frecuencia de 5Mhz

Potencia de prueba (dBm)	RSSI (dBm)		Diferencia (dBm)		Error porcentual Rigol/ad8307
	Rigol analizador de espectro	AD8307	Rigol y potencia de prueba	AD8307 y potencia de prueba	
-60	-63	-57,1	-3	-2,9	-0,09
-50	-53,9	-53,7	-3,9	-3,7	0
-40	-44,23	-44,4	-4,23	-4,4	0
-30	-34,3	-34,6	-4,3	-4,6	0,01
-20	-24,37	-24,8	-4,37	-4,8	0,02
-10	-14,27	-14,7	-4,27	-4,7	0,03
0	4,5	-5,7	-4,5	-5,7	0,27
10	6,11	5,9	-3,89	-4,1	0,03
20	16,46	15,8	-3,54	-4,2	0,04

En la Tabla III se detallan las potencias que se inyectan con un generador de radio frecuencia, dichos niveles de potencia se miden simultáneamente en un analizador de espectro y el analizador de antenas para el ejemplo de 5Mhz, con el fin de comprar el grado de precisión del instrumento diseñado; se observa que las medidas son similares y el porcentaje de error es mínimo, lo cual constituye una relación de precisión muy buena del equipo propuesto [25].

En las pruebas de laboratorio del prototipo los valores con mayor precisión se presentan en los rangos de frecuencia de entre 10 MHz hasta 50 MHz reduciendo el error debido a que el AD8307 del analizador de antenas incorpora un sistema de compensación de ganancia en donde se evidencia que a medida que la potencia aumenta la ganancia también.

Pruebas del módulo MR100

Las mediciones se desarrollaron con valores teóricos en el laboratorio empleando una línea de transmisión coaxial de 74 cm, combinado con cargas (Z_L) de 50 Ohm, 75 Ohm y 150 Ohm, en 14 distintas frecuencias medidas por banda, el montaje de prueba se presenta en la figura 9 con un diagrama para los cálculos de onda estacionaria [26].

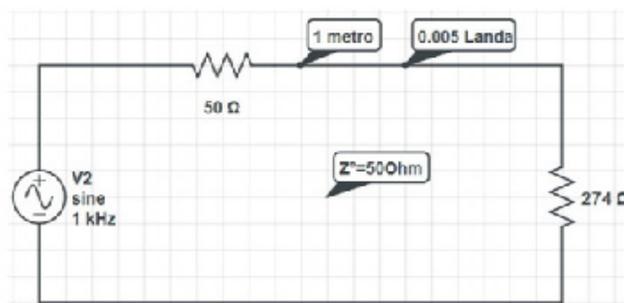


Figura 9. Esquema de conexión en pruebas de SWR

Los resultados de las pruebas para diferentes frecuencias de tabulan en la Tabla IV para hallar el SWR de acuerdo a la impedancia de entrada y la impedancia de carga.

Tabla IV. Pruebas de onda estacionaria

Frecuencia MHz	Impedancia de entrada	SWR medido	impedancia de carga
1,8	52	1	50
3,7	52	1	50
7,1	52	1	50
10,1	52	1	50
12	52	1	50
14,1	52	1	50
18,1	53	1	50
21	53	1	50
24,9	54	1	50
27	55	1,01	50
29	55	1,02	50
35,5	56	1,04	50
44,5	58	1,08	50
51	59	1,09	50

La calibración del valor de la impedancia de carga y la impedancia de entrada se obtienen mediante el uso de potenciómetros logarítmicos conectados al final de la línea de transmisión para acoplar dichos valores antes de realizar las pruebas de laboratorio.

Conclusiones

El prototipo propuesto es un referente que puede servir para determinar los parámetros mencionados de la antena de forma práctica, específicamente cuando la pruebas se realizan con dos antenas que tienen la misma configuración física y las mismas ganancias, pero hace muy complejo efectuar mediciones en anchos de banda grandes, su precisión se ajusta para el rango de frecuencias de 10MHz a 50MHz.

El detector logarítmico AD8307 es un buen estimar del nivel de potencia que facilita las medidas de los cambios de voltajes mediante un detector con un amplificador logarítmico de demodulación hasta los 500 MHz de rango con un error de ± 1 dB.

En la validación del prototipo se consideraron el uso de instrumentos calibrados para hacer una correlación y comparación de las medidas y determinar el error porcentual

de las posibles desviaciones en las medidas, que con la ayuda de los componentes y dispositivos embebidos se ven que cumplen con los requisitos mínimos de precisión en la toma de las muestras de niveles de potencia. Con elementos de bajo costo es posible crear instrumentos de medición para trabajar en bajas frecuencias que de acuerdo a la calidad del detector logarítmico y la electrónica del dispositivo embebido se pueden detectar cambios significativos de voltaje a la entrada del prototipo de antena para realizar las pruebas de medición de potencia.

En la investigación experimental se trabajó en la medición de la relación de onda estacionaria mediante un circuito de acoplamiento para un barrido de frecuencias de 1MHz hasta 51 MHz donde se estiman los valores próximos de un SWR de 1, lo cual garantiza que la relación de onda estacionaria es buena, no obstante que se presentan fuentes de ruido que se deben de considerar a momento de tomar las muestras.

Referencias

- [1] M. Guerra, M. Hilbert, V. Jordán, and C. Nicolai, "Panorama Digital 2007 de América Latina y el Caribe. Avances y

- desafíos de las políticas para el desarrollo con las Tecnologías de Información y Comunicaciones”, *Iadb.Org*, vol. CEPAL; IRS, 2007
- [2] A. Mellado, “La infraestructura de telecomunicaciones y el desarrollo económico de los países”, *Repos. la Univ. del Pacífico - UP*, 2016
- [3] C. J. Sánchez Núñez y N. A. Zamora Cedeño, “Caracterización de las ondas milimétricas para determinar su posible aplicación en la Quinta generación de comunicaciones inalámbricas”, 2018
- [4] W. F. M. Granada y M. del Pilar Celemín, “Sistema de adquisición de datos para la medición de parámetros radioeléctricos en antenas lineales en la banda de TV de VHF y UHF”, *Ing. y Cienc.*, vol. 3, no. 5, pp. 87–110, 2007
- [5] E. A. Aydin, “Low-cost Vector Network Analyzer for Biomedical Applications”, *Int. J. Eng.*, vol. 32, no. 3, pp. 400–404, 2019, doi: 10.5829/ije.2019.32.03c.07
- [6] J. G. Pulido, P. M. Blázquez, A. P. Muñoz, C. D. Hita, and F. C. Pérez, “Sistema integral de exploración para medida de antenas en campo cercano”, 2009.
- [7] C. R. Boada and I. L. Rodríguez, “WIDEBAND MONOPOLE ANTENNA POR HF AND VHF”, *International Journal of Innovation Engineering and Science Research*, vol. 1, no. 1, pp. 19–26, 2017
- [8] L. J. Rodríguez Sepulveda, J. E. Eslava Pedraza, J. E. Gutiérrez Lopera, A. R. Mejía Serrano y A. J. Soto Vergel, “Monitoreo y reporte de estadísticas de descargas atmosféricas mediante aplicación móvil en Android”, *J. Cienc. e Ing.*, vol. 12, no. 1, pp. 116–123, Aug. 2020, doi: 10.46571/JCI.2020.1.10
- [9] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2015
- [10] A. G. Domínguez, *Cálculo de Antenas: Antenas de última generación para tecnología digital y métodos de medición*. Marcombo, 2010
- [11] S. R. Saunders and A. Aragón-Zavala, *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons, 2007
- [12] U. Manual, “MR100 SWR Analyzer,” pp. 0–26, 2015
- [13] S. Shylesh, “A Study of Software Development Life Cycle Process Models”, *SSRN Electron. J.*, 2017, doi: 10.2139/ssrn.2988291
- [14] O. A. Chidimma, O. I. Chidi, and O. Victor, “An Optimized Approach for Improving Current Sensing In Digital Wattmeters Using Rogowski Coils”, no. 4, pp. 207–222, 2017
- [15] S. Delgado, L. Leija, and A. Vera, “Power meter for HIFU transducers using logarithmic amplifiers”, *Pan Am. Heal. Care Exch. PAHCE*, vol. 2015-July, pp. 4–8, 2015, doi: 10.1109/PAHCE.2015.7173353
- [16] K. Chaiyawong and S. Akatimagool, “Development of 5.8 GHz SWR Meter for Testing Telecommunication Systems”, *6th Int. Conf. Tech. Educ. ICTechEd6 2019*, pp. 8–11, 2019, doi: 10.1109/ICTechEd6.2019.8790892
- [17] A. Golmanesh, M. Khoshakhlagh, and N. Masoumi, “A High Sensitive Frequency Estimator for SAWR Sensor Smart IOT Applications Using an FM Quadrature

- Demodulation”, *28th Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2020*, pp. 0–5, 2020, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260667
- [18] W. Hlaing, S. Thepphaeng, V. Nontaboot, N. Tangsunantham, T. Sangsuwan, and C. Pira, “Implementation of WiFi-Based single phase smart meter for internet of things (IoT)”, *Int. Electr. Eng. Congr. iEECON 2017*, no. March, pp. 8–10, 2017, doi: 10.1109/IEECON.2017.8075793
- [19] L. F. Sanchez, “Measurement of the radiation patterns of navy shipboard High Frequency (HF) antennas on a large warship”, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 74, pp. 200–207, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.07.027
- [20] A. P. Junfithrana, E. T. Rahardjo, F. Y. Zulkifli, and Basari, “Development of automated antenna radiation pattern measurement using rotator application model to increase accuracy”, *3rd Int. Conf. Comput. Eng. Des. ICCED 2017*, vol. 2018-March, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/CED.2017.8308101
- [21] J. Hunt, *Advanced Guide to Python 3 Programming*. 2019
- [22] Y. P. Selvam et al., “A low-profile frequency- and pattern-reconfigurable antenna”, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, no. c, pp. 3047–3050, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2759960
- [23] S. Saunders and A. Aragon, *Antennas and propagation for wireless communications systems*. England, 2018
- [24] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*, New Jersey; John Wiley & Sons, Inc., 2007
- [25] S. Ülker, “Antennas and propagation course in education”, *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 57, no. 4, pp. 281–300, 2020, doi: 10.1177/0020720918800441
- [26] Y. Huang and K. Boyle, *ANTENNAS, Second*. Liverpool, 2021