

ISSN 1390-6712

MASKAY



Vol. 14, No. 2

Revista MASKAY

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

DIRECTOR DEL DEEL

Tern. Freddy Williams Pérez Arias, Mgs.

EDITOR GENERAL

Diego Arcos Avilés (ESPE)

COEDITORES

Enrique V. Carrera (ESPE)

Vanessa Vargas (ESPE)

EQUIPO EDITORIAL

Enrique V. Carrera (ESPE, Ecuador)

Vanessa Vargas (ESPE, Ecuador)

Francesc Guijoan (UPC, España)

Juan Antonio Clemente (UCM, España)

Nelson Díaz (UD, Colombia)

Daniel Ochoa (ESPOL, Ecuador)

Carlos Julio Tierra (UFRJ, Brasil)

INFORMACIÓN DE CONTACTO

Revista MASKAY

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Av. Gral. Rumiñahui (S/N)

P. O. Box 17-15-243B

Sangolquí, Pichincha, Ecuador

e-mail: maskay@espe.edu.ec

Telf. +593 2 3989400 ext 1867

El contenido de los artículos aquí publicados es responsabilidad exclusiva de sus correspondientes autores. Mayor información en <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/maskay>.

Presentación

El Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, consciente de su gran responsabilidad con la sociedad, busca proponer e impulsar iniciativas tendientes a fomentar el desarrollo integral de la ingeniería eléctrica y electrónica en el Ecuador. Como resultado de este compromiso, nace en el año 2011 la revista Maskay. Esta revista sintetiza de una forma documentada los esfuerzos en investigación y desarrollo que desarrollan los docentes/investigadores y estudiantes de la región.

En la actualidad, la revista MASKAY se encuentra indexada en diversas bases de datos: **SciELO-Ecuador**, **Latindex catálogo v2.0**, **LatAm-Studies** Estudios Latinoamericanos, **RootIndexing**, **MIAR** (Matriz de Información para el análisis de Revistas), **DOAJ** (Directory of Open Access Journals), **DRJI** Directory of Research Journals Indexing), **Dialnet** y **REDIB** (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico), con el objetivo de difundir a nivel internacional las publicaciones realizadas en esta revista. Además, para que exista una mejor divulgación de sus contenidos, la revista MASKAY cuenta con número **DOI (Digital Object Identifier)** legítimamente registrado y validado por **Crossref**, lo que permite una fácil localización de sus contenidos en la web.

Diego Arcos Avilés
Editor General

Presentation

The Department of Electrical, Electronics, and Telecommunications Engineering of the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, aware of its great responsibility to society, seeks to propose and promote initiatives to foster the comprehensive development of electrical and electronic engineering in Ecuador. As a result of this commitment, the Maskay Journal was born in 2011. This journal presents the research and development efforts carried out by the region's teachers/researchers and students.

Currently, the MASKAY Journal is indexed in several databases: **SciELO-Ecuador**, **Latindex catalog v2.0**, **LatAm-Studies** Estudios Latinoamericanos, **RootIndexing**, **MIAR** (Information Matrix for the Analysis of Journals), **DOAJ** (Directory of Open Access Journals), **DRJI** (Directory of Research Journals Indexing), **Dialnet** and **REDIB** (Ibero-American Network of Innovation and Scientific Knowledge), to disseminate the publications in this journal internationally. In addition, to better disseminate its contents, the MASKAY Journal has a **DOI (Digital Object Identifier)** number legitimately registered and validated by **Crossref**, which allows easy location of its contents on the web.

Diego Arcos Avilés
Editor-in-Chief

Contenido / Table of Contents

Uso de la banda de 433MHz para comunicaciones subacuáticas en ambientes controlados

Use of the 433MHz band for underwater communications in controlled environments

DOI: 10.24133/maskay.v14i2.3176

MariaJose Delgado, Steven Alexis Chango Vela, Mateo Sebastián Benavidez Sisalima.....1

Construcción de un micro generador hidroeléctrico basado en una turbina de flujo cruzado de admisión inferior

Construction of a micro-hydroelectric generator based on a lower intake crossflow turbine

DOI: 10.24133/maskay.v14i2.3442

Nilton Zeballos, Arturo Cosi, Vigil Mamani.....7

Design and implementation of a patch-fractal antenna with phase control using Butler matrix

Diseño e implementación de una antena parche-fractal con control de fase utilizando la matriz de Butler

DOI: 10.24133/maskay.v14i2.3497

Joel Chuquimarca, Ariel Orellana, Fabian Chamba, Xavier Badillo, Cristian Leon.....17

Uso de la banda de 433MHz para comunicaciones subacuáticas en ambientes controlados

Use of the 433MHz band for underwater communications in controlled environments

Delgado Gaibor María José, Chango Vela Steven Alexis, Benavidez Sisalima Mateo Sebastián

Abstract— This research aims to design and implement an underwater communication system using radio frequency modules and Arduino. Underwater wireless communication is challenging due to the attenuation of electromagnetic waves in water. However, radio frequency signals in the 433MHz range and the added antenna have shown successful data transfer. For this purpose, measurements are made at different distances, and data is collected in the aquatic environment and free space. A comparative analysis of the values of arrival powers and losses in the studied environment is carried out to verify the efficiency of this study in terms of range, transmission speed, and reliability.

Index Terms— Underwater communication, radio frequency, aquatic environment, free space.

Resumen—Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de comunicación subacuático a través de módulos de radiofrecuencia y Arduino uno. La comunicación inalámbrica submarina es un reto debido a la atenuación de las ondas electromagnéticas que existen en el agua. Sin embargo, las señales de radiofrecuencia en el rango de 433 MHz junto con la antena añadida han demostrado que la transferencia de datos se realiza con éxito. Para ello se realizan medidas a diferentes distancias y se recogen datos tanto en el medio acuático como en el espacio libre. Posteriormente se realiza un análisis comparativo de los valores de potencias de llegada y pérdidas en el medio estudiado para comprobar la eficacia de este estudio en cuanto a alcance, velocidad de transmisión y fiabilidad. Como resultado del estudio, se obtuvo que en el espacio libre a 2m se tiene una potencia de -41.24 dBm y a 9m se tiene una potencia de -81.76 dBm a comparación con el entorno acuático que a 2m se obtuvo una potencia de -85.33 dBm y a 9m una potencia de 116.34 dBm lo que representa una atenuación a 2m de 44.09 dBm y a 9m de 34.58 dBm.

Palabras Claves— Comunicación submarina, radiofrecuencia, medio acuático, espacio libre.

I. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones subacuáticas se desarrollan en diferentes entornos. Cuando se usa como medio de propagación el agua dulce se considera un medio que presenta

Delgado Gaibor María José, Chango Vela Steven Alexis y Benavidez Sisalima Mateo Sebastián son estudiantes de ingeniería en Telecomunicaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (e-mail: {mariaj.delgado, steven.chango, mateo.benavidez}@epoch.edu.ec).

bajos índices de pérdidas. Por otro lado, el agua salada es un medio muy dispersivo, que presenta grandes pérdidas mismas que presentan rangos de permitividad que rondan de 80-81 y 81-88, respectivamente [1]. El comportamiento de las ondas EM (electromagnéticas) tanto en agua dulce como en el agua del mar presentan distintas respuestas, sin embargo, el uso de ondas EM en el agua, para transmitir señales, se caracteriza por ser una comunicación rápida y eficiente donde las señales se propagan a través del agua gracias a las propiedades fisicoquímicas del agua y las propiedades físicas de la luz [2]. Además, las ondas EM en la banda de frecuencias de radiofrecuencia (RF) presentan varias ventajas sobre las ondas acústicas, sobre todo porque son más rápidas y se puede utilizar en las frecuencias de trabajo más altas (lo que se traduce en un mayor ancho de banda). Sin embargo, hay varios factores que limitan el uso de ondas EM en el agua [3].

Los sistemas de comunicaciones subacuáticas utilizan tres métodos importantes para la transmisión de información. Estos métodos son mediante ondas acústicas, señales ópticas y ondas electromagnéticas o radiofrecuencia [1]. Cada una de estas técnicas tiene ventajas y desventajas, principalmente debido a las limitaciones físicas y se realiza una elección final para establecer la comunicación [1]. La comunicación mediante ondas acústicas consiste cuando el sonido es producido por la vibración de moléculas en una sustancia elástica [4], la propagación de la energía mecánica del sonido es absorbida por el medio a través del cual se propaga. La velocidad difiere según el tipo de medio por el cual es propagado [5]-[7]. Cuanto más dispersas se encuentran las moléculas del medio mayor es la facilidad de propagación y menor el tiempo para propagarse. Por el contrario, las señales ópticas se basan en el uso de la luz como transmisor de información entre emisor y receptor [8], se encuentran limitadas a cortas distancias debido a su absorción por parte del medio acuático el cual es elevado en la banda de frecuencias ópticas [9], [10]. Por otro lado, mediante radiofrecuencia el rango de frecuencia del espectro de radio de 300-3000MHz es denominado como ultra alta frecuencia o sus siglas en inglés UHF [1]. En esta banda de radiofrecuencia se encuentran las ondas electromagnéticas que no necesitan un medio material de transmisión y se propagan a la velocidad de

la luz [11].

Existen investigaciones y aplicaciones del uso de la frecuencia de 433 MHz, donde miden el comportamiento de la energía recibida bajo el agua, en función de diferentes distancias y profundidades y donde buscan el desarrollo de una red de sensores inalámbricos [12]. En este estudio se enfatiza que el uso de esta frecuencia es factible y adecuado para la comunicación submarina con un rango máximo de 12 metros del receptor. También en aplicaciones de comunicación subterránea a área, donde se pone a prueba la tecnología LoRa, para su uso en sectores agrícolas y vigilancia del medio ambiente, su composición y compactación [13]. Así mismo, el uso de una antena Bow-tie en la frecuencia de 433 MHz, donde al poner aprueba esta antena demuestra su idoneidad para el uso bajo el agua hasta 30 metros [14]. Incluso, en sensores automatizados para el seguimiento de ganado, donde se caracteriza la pérdida de propagación dentro del cuerpo de las vacas y caballos a una frecuencia de 433, 868 y 1400 MHz [15]. También en el diseño de un amplificador de potencia de clase F para 433 MHz para aplicaciones RFID, especialmente en estaciones base inalámbricas [16]. Por otro lado, algunas investigaciones han explorado el uso de RF en otras frecuencias en entornos submarinos, como el trabajo realizado por Lloret et al., que logró la comunicación a 20 cm hasta 11 Mbps mediante el uso de una frecuencia de 2.4 GHz [17].

Trabajos de investigación o aplicaciones relacionados a esta misma frecuencia de 433 MHz incluso mayores, han logrado y determinado una comunicación aceptable a través de subsuelo y principalmente bajo el agua en diferentes condiciones. Lo han hecho con el objetivo de poner aprueba el funcionamiento de los mismos, lo que ha permitido llevar a cabo un exhaustivo análisis de propagación en ambientes acuáticos. Este trabajo experimental se lo lleva a cabo en un entorno controlado, como en una piscina. Donde se realiza pruebas de comunicación subacuática a no mucha profundidad, del cual se intenta determinar a futuro pérdidas de propagación de este tipo de medio. Además, se ha superado los desafíos inherentes a la comunicación subacuática al lograr transmisiones exitosas a profundidades y distancias significativas. Este logro se sustenta en la aplicación de la ecuación de pérdidas de espacio libre L_{bf} , que, aunque originalmente diseñada para entornos terrestres, ha demostrado ser una herramienta valiosa incluso en la ausencia de un modelo específico para ambientes subacuáticos.

II. METODOLOGÍA

Se implementa el sistema para la comprensión del estudio que permite la transmisión confiable de datos y la comunicación en los distintos entornos. A continuación, se explora a detalle:

A. Sistema de comunicación subacuática

La Fig. 1 muestra un diagrama de bloques que describe el proceso y análisis del sistema de comunicación subacuática, cabe mencionar que la única diferencia de este sistema con el sistema de comunicación subacuática en el espacio libre es el

medio de transmisión de las ondas. El proceso comienza desde la fuente de información que es la PC la cual contiene el código de programación en Arduino IDE y está conectada a través de un cable USB [18] con la placa Arduino uno que controla la comunicación entre la computadora y el transmisor, mismo que por medio de cables está conectado al módulo de transmisión, éste se encuentra en el medio acuático junto con el módulo receptor a una diferentes distancias. Este módulo transmisor envía la información y el módulo receptor la recibe. El receptor está conectado a un segundo Arduino uno y finalmente a una segunda PC en la cual se visualiza la información que es recibida.

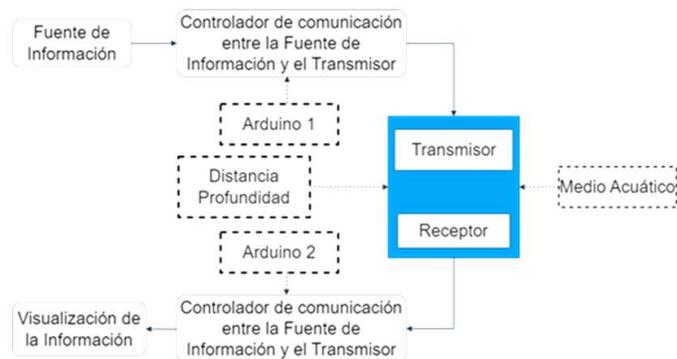


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema de comunicación RF subacuático

B. Sistema de transmisión TX Arduino

En el diagrama de flujo planteado en la Fig. 2 muestra el proceso que realiza para enviar señales desde el monitor serial de radio frecuencia. El diagrama inicia por incluir la biblioteca VirtualWire [19], que proporciona funciones para la comunicación inalámbrica a través del módulo RF. Se define el pin de transmisión del módulo RF TWS-433 que opera a 433MHz. En este caso, se utiliza el pin 12, se inicia la comunicación serial a una velocidad de 9600 bps y se configura el pin de transmisión [20]. Seguido, se configura la velocidad de transmisión a 2000 bps, se verifica si hay datos disponibles en el monitor serial donde si hay datos disponibles, lee la entrada del monitor serial utilizado, el cual a su vez lee la entrada hasta que se encuentre el caracter (Enter) y devuelve una cadena de caracteres [21]. Se elimina los espacios en blanco al inicio y al final del mensaje, posterior se verifica si la longitud del mensaje es mayor que cero para asegurarse de que no sea una cadena vacía. A continuación, se convierte el mensaje en una cadena de caracteres utilizado para enviar el mensaje como un arreglo de bytes. Se pasa el mensaje convertido como argumento junto con la longitud del mensaje, se espera a que se complete la transmisión antes de continuar. Finalmente, se imprime el mensaje enviado en el monitor serial.

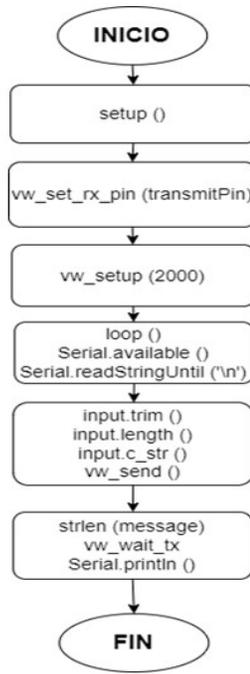


Fig. 2. Diagrama flujo de transmisión

C. Sistema de recepción RX Arduino

En el diagrama de flujo se plantea en la Fig. 3 donde se muestra el proceso para la recepción de la señal de radio frecuencia. El proceso inicia por incluir la biblioteca VirtualWire [22], que proporciona funciones para la comunicación inalámbrica a través del módulo RF donde se define el pin de recepción del módulo RF TWS-433. En esta ocasión, se usa el pin 2. Se inicia la comunicación serial a una velocidad de 9600 bps, se configura el pin de recepción donde se configura la velocidad de recepción a 2000 bps, se inicia la función para iniciar la recepción de mensajes. Posterior se declara un buffer para almacenar el mensaje recibido y una variable para indicar la longitud máxima del mensaje, se verifica si se ha recibido un mensaje, si es así, se ejecuta el bloque de código dentro del bucle IF donde se construye una cadena de caracteres (receivedMessage) a partir de los datos almacenados en el buffer. Finalmente, se imprime el mensaje recibido en el monitor serial utilizando Serial.println().

D. Características y especificaciones técnicas

Las características y especificaciones técnicas de los módulos usados son: para el transmisor, el voltaje de operación va entre los 3V hasta los 12V, su potencia de transmisión va desde los 10mW hasta los 40mW [25], el rango de transmisión va desde los 20m hasta los 100m al considerar paredes y 500m máximo en áreas abiertas, su tasa de transferencia de datos tiene un rango superior a los 2400 bytes por segundo, su consumo de corriente es de 20 hasta 28mA, su consumo de corriente en Standby es de 0mA y su tipo de modulación es OOK [22], [23].

Para el receptor su voltaje de operación es de 5V, su sensibilidad de recepción es de 105dB, su consumo de corriente en Standby es de 4mA [22].

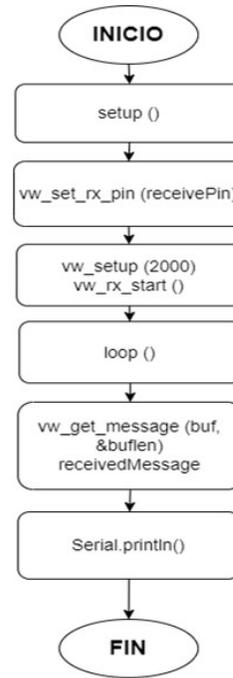


Fig. 3. Diagrama flujo de recepción

E. Antena

En el transmisor y receptor se usaron dos antenas para que la transferencia de datos sea posible a mayor distancia. Para ello se necesita calcular la longitud de onda (λ) [24] a través de (1), como sigue:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de transmisión, f es la frecuencia de transmisión. En este caso la frecuencia de transmisión es de 433 MHz y la velocidad de la luz es de 299.792.458 m/s.

La longitud de la antena se encuentra al dividir para 4 la longitud de la onda (2):

$$L_{antena} = \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

F. Propagación en un entorno subacuático

Se utiliza la base de un escenario característico de propagación en el espacio libre, las pérdidas se computan mediante la siguiente expresión:

$$Pr = Pt + Gt + Gr + L_{bf} \quad (3)$$

donde Pr es la potencia de recepción [dBm], Pt es la potencia del transmisor [dBm], Gt es la ganancia de la antena de transmisión [dBi], Gr es la ganancia de la antena de recepción [dBi] y L_{bf} son las pérdidas en el espacio libre.

En base a la ecuación de potencia de recepción, las pérdidas en el espacio libre (L_{bf}) se utilizan L_{agua} para el entorno acuático.

La UIT-R define la propagación en espacio libre como la propagación de una onda en un medio ideal homogéneo e isotrópico que se puede considerar infinito en todas las

direcciones [26]. A pesar de ser una representación ideal y no existir en la práctica, este modelo ayuda a calcular las mínimas pérdidas que se producen en el enlace.

Se definen las pérdidas en el espacio libre como el cociente entre la potencia radiada y la potencia recibida:

$$L_{bf} = \frac{Prad}{Prec} = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (4)$$

Que en relaciones de dB es expresada como:

$$L_{agua} = 32.4 + 20 \log(f) [MHz] + 20 \log(d) [m] \quad (5)$$

Por otro lado, la longitud de onda se expresa mediante:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{Vp}{\sqrt{\epsilon_r} f} \quad (6)$$

donde Vp es la velocidad de propagación de la onda [m/s], y ϵ_r es la permitividad relativa

G. Preparación del escenario

Para el caso de las pruebas en el agua se lleva a cabo en un entorno controlado con el medio de estudio usado que es una piscina como medio de propagación para la comunicación inalámbrica, donde para proteger los módulos y evitar que exista cortos o daños en los equipos se proporciona una estructura de acrílico como se muestra en la Fig. 4. Estos módulos se encuentran completamente sellados y constan de una lámina de cobre para que no exista pérdida de señal. Para desplazar los módulos se realiza manualmente y así se incrementa la distancia entre transmisor y receptor de manera controlada.

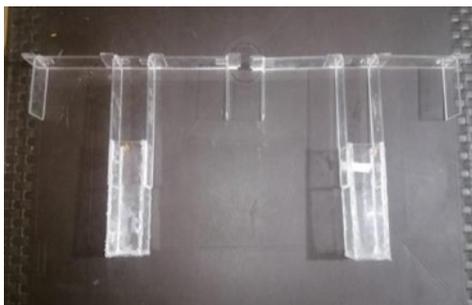


Fig. 4. Estructura de acrílico

H. Procedimiento

Las distintas pruebas se realizan en dos entornos controlados con el medio de estudio usado como medio de propagación para la comunicación RF en el espacio libre y comunicación RF subacuática.

Para la comunicación RF en espacio libre tanto el transmisor como el receptor se encuentran en el aire como se visualiza en la Fig. 5. Cada prueba inicia con los dos módulos juntos, i.e., distancia de 2 metros, donde se obtiene la potencia de recepción. Posterior se incrementa la distancia entre los módulos una determinada cantidad de veces hasta la distancia máxima de 9 metros de recepción de datos.

Para la comunicación RF subacuática se sumerge la

estructura de acrílico. Cada uno de estos contienen el módulo transmisor y el módulo receptor como se muestra en la Fig. 6.

Cada prueba inicia con los dos recipientes juntos, i.e., distancia de 2 metros. Se obtiene la potencia de recepción y se incrementa la distancia entre los recipientes una determinada cantidad de veces hasta la distancia máxima de 9 metros de recepción de datos.



Fig. 5. Sistema de comunicación en el espacio libre



Fig. 6. Sistema de comunicación subacuático

III. RESULTADOS

Para la visualización estimada de la señal demodulada del receptor obtenida a través de un osciloscopio se puede ver en la Fig. 7.

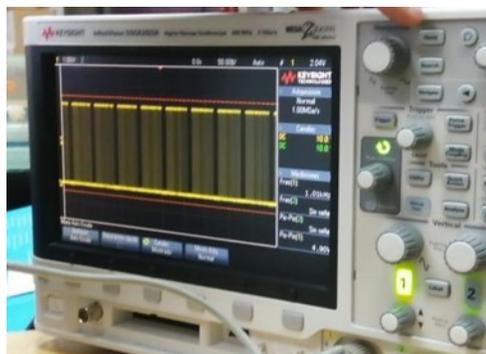


Fig. 7. Potencias de entorno acuático y espacio libre

Los resultados de las mediciones y la media muestral de las cinco mediciones realizadas en cada punto en el entorno acuático se pueden observar en la Fig. 8. Donde se puede apreciar que en el espacio libre a medida que la distancia aumenta entre el receptor y el transmisor la potencia de recepción disminuye. Se inicia por una distancia de 2m hasta una máxima de 9m, donde se obtiene una potencia de recepción de -41.20 dBm y de -81.76 dBm respectivamente, como se puede ver en la Tabla 1.

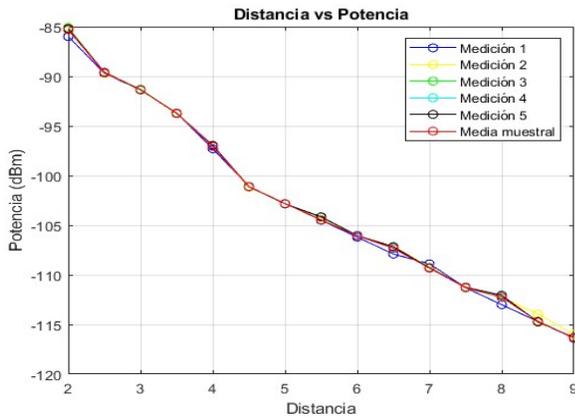


Fig. 8. Potencias del entorno subacuático

En el entorno libre se presenta en la Fig. 9, donde se puede observar un comportamiento similar de la potencia de recepción al aumentar las distancias entre el receptor y el transmisor. Se puede notar una diferencia donde a 2m la potencia de recepción es -45.35 dBm, y a 9m una potencia de recepción de -81.90 dBm.

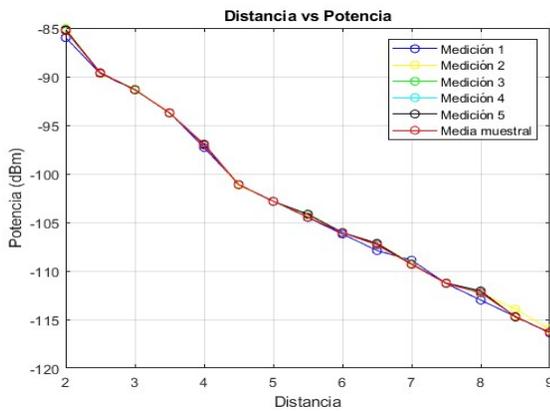


Fig. 9. Potencias del entorno espacio libre

Los resultados de la media muestral de las 15 muestras de las 5 mediciones realizadas entre el entorno espacio libre y el entorno del espacio acuático se pueden observar en la Fig. 10, donde como respuesta se tiene que la atenuación correspondiente a 2m es de 44.09 dBm y 34.58 m a una distancia de 9m esto en el medio acuático.

Finalmente, para la estimación de pérdidas bajo el agua de este ambiente controlado se lo obtuvo al restar la potencia de recepción en el espacio libre de la potencia de recepción en el medio acuático, como se puede ver en la Fig. 11. Además, se puede observar que tiene un comportamiento inusual debido a que si más se aleja el transmisor del receptor se tiene mayor pérdida debido al medio acuático, como se muestra en los datos de la Tabla I, esto a pesar de que las potencias de recepción tienen coherencia en ambos medios de propagación. Estos resultados de pérdidas bajo el agua son estimaciones, debido a ya que dependen de las características del medio acuático.

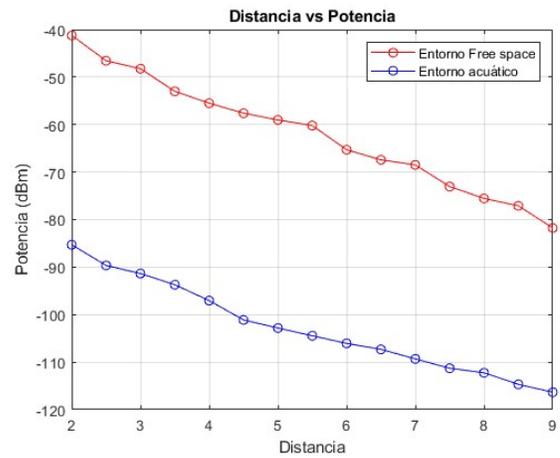


Fig. 10. Potencias del entorno espacio libre vs entorno acuático

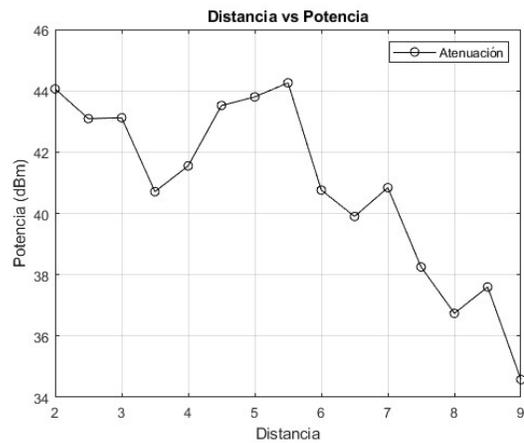


Fig. 11. Atenuación del entorno acuático y el espacio libre

TABLA I
POTENCIAS DE LLEGADA

Distancia (m)	Medio Acuático (dBm)	Espacio Libre (dBm)	Atenuación (dBm)
2	-86.33	-41.24	44.09
2.5	-89.658	-46.56	43.09
3	-91.362	-48.24	43.12
3.5	-93.716	-53.00	40.71
4	-97.052	-55.50	41.55
4.5	-101.12	-57.60	43.52
5	-102.82	-59.02	43.80
5.5	-104.46	-60.20	44.26
6	-106.06	-65.30	40.76
6.5	-107.32	-67.42	39.90
7	-109.33	-68.49	40.84
7.5	-111.29	-73.04	38.25
8	-112.25	-75.55	36.70
8.5	-114.69	-77.29	37.60
9	-116.34	-81.76	34.58

IV. CONCLUSIONES

Hay una gran diferencia entre las potencias de un entorno acuático y el espacio libre, existen pérdidas en mayor cantidad en el agua que en el aire y esto hace que haya desventaja. Sin embargo, se ha logrado con éxito transmitir el mensaje a través del entorno en el que más se enfoca esta investigación a pesar de las diferentes distancias.

Como resultado del estudio realizado se obtiene un sistema

de comunicaciones subacuáticas que trabaja a una frecuencia de 433 MHz correspondiente a las aplicaciones del espacio libre y entorno acuático, donde se obtuvo un estimado de las pérdidas de propagación bajo el agua y los índices de pérdidas que coincide entre ellos. Es apreciable que existe una variación que se le atribuye a al ambiente controlado que se utilizó para implementar el sistema, a pesar de las dificultades el sistema proporciona valores adecuados para la banda de frecuencia trabajada y una comunicación estable.

RECONOCIMIENTOS

Nuestro agradecimiento por el apoyo brindado a las instalaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y nuestro tutor Fabricio Javier Santacruz Sulca, MSC, por su acompañamiento en la investigación.

REFERENCIAS

- [1] S. L. Monella, "Estudio de modelos electromagnéticos para la obtención de mapas de humedad superficial de suelo", Tesis de Grado, UNIV. NAC. CORDOBA, Buenos Aires, Argentina, 2014.
- [2] S. S. a Compte, "Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2,4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia", Tesis de Grado, Univ. Politencia Valencia, GANDIA, 2011.
- [3] Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Accedido el 22 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/6555/203058-;jsessionid=A03CC059E3117EFA58F5550302FB43A8.jvml?sequence=3>
- [4] Sanchez Matias, A. M. (2013). Sistema de comunicación acústica para redes de sensores inalámbricas subacuáticas en aguas someras [Trabajo de grado, Universidad Politecnica de Valencia].
- [5] Samaniego Buñay, A. S. (2023). Estado del Arte de las Comunicaciones Acústicas Submarinas, *Journal Chone Ciencia y Tecnología*, vol. 1, no. 01, pp. 1-12, Jun. 2023.
- [6] A. I. López Tacoronte, "Propagación de ondas acústicas en espacios subacuáticos", Trabajo de grado, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, 2017.
- [7] M. Bruneau, T. Seelo y S. F. d'Acoustique, *Fundamentals of Acoustics*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013.
- [8] A. A. Rodríguez, "Caracterización de sistemas de comunicación RF y ópticos en aplicaciones submarinas", Trabajo de grado, Escola Politécnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú, Barcelona, 2022.
- [9] Perez Martínez, J. L., Sistema de comunicaciones ópticas para aplicaciones subacuáticas, Trabajo de grado, Universidad Politecnica de Valencia, 2018.
- [10] F. Kaeib, O. A. Alshawish, S. Ali Altayf and M. A., Gamoudi, "Designing and Analysis of Underwater Optical Wireless communication system," in Proc. *2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 2022, pp. 441-446.
- [11] Ruz, L., Castro, D., Ondas electromagnéticas, en Teoría electromagnética para estudiantes de ingeniería Notas de clase. Editorial Universidad del Norte, pp. 77-100.
- [12] Muhammad Ramdhan, M.S Muhammad Ali Ghazali, N.Effiyana Kamaludin M.Y., "Measuring the underwater received power behavior for 433 mhz radio frequency based on different distance and depth for the development of an underwater wireless sensor network", *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 8, no. 3, pp. 1066-1073, Spe. 2019.
- [13] Moiroux Arvis, Laure Christophe, Cariou Jean-Pierre, Chanet, "Evaluation of LoRa technology in 433-MHz and 868-MHz for underground to aboveground data transmission", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 194, pp. 106770, Mar. 2022.
- [14] A. A. Abdou, "A matched Bow-tie antenna at 433MHz for use in underwater wireless sensor networks", *Journal of Physics: Conference Series*, vol 450, pp. 1-8, Sep. 2013.
- [15] Said Benaissa, Said Benaissa, Denys Nikolayev, Margot Deruyck, Gunter Vermeeren Luc Martens, Jan Govaere, Frank Tuytens, Bart Sonck, David Plets, Wout Joseph, "Propagation-loss Characterization for Livestock Implantables at 433, 868, and 1400 MHz", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 69, no. 8, pp. 5166-5170, Aug. 2021.
- [16] Holger Heuermann, Stefan Terbrack, "Development Process, Structure and Performance Parameters of a Shielded 433 MHz Plasma Jet with 600W", Disponible: https://www.researchgate.net/publication/372109180_Development_Process_Structure_and_Performance_Parameters_of_a_Shielded_433_MHz_Plasma_Jet_with_600W
- [17] Samuel Rycroft, Andrew Shaw, Paul Fergus, Patryk Kot, Khalid Hashim, Adam Moody, Laura Conway, "A First Implementation of Underwater Communications in Raw Water Using the 433 MHz Frequency Combined with a Bowtie Antenna", *Sensors*, vol. 19, no. 8, pp. 1813, Apr. 2019.
- [18] James Demetriou, Rebecca MacKenzie. "Propagation Basics", September 30, 1998, pp.39-42.
- [19] "VirtualWire: VirtualWire library for Arduino and other boards". AirSpayce. <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/VirtualWire/> (accedido el 3 de junio de 2023).
- [20] "Arduino UNO R3". Proyecto Arduino. <https://proyectoarduino.com/arduino-uno-r3/#:~:text=Tiene-2014-20pines-20digitales-20de,y-20un-20botón-20de-20reset.> (accedido el 5 de junio de 2023).
- [21] S. Skiena, M. Revilla y M. R. Rodríguez, *Desafíos de Programación: El Manual de Entrenamiento para Concursos de Programación*. Independently Published, 2020.
- [22] González R., Pedro V. , Mago Rodríguez Eduardo, "Efectos del oleaje en la atenuación de radiofrecuencia," *Télématique*, vol. 8, no. 2, pp. 44-55, 2009.
- [23] FS1000A 433MHZ RF transmitter & XY-MK-5V Receiver Module Explanation, Pinout - Components Info. (2020, 24 de febrero). Components Info. <https://www.componentsinfo.com/fs1000a-433mhz-rf-transmitter-xy-mk-5v-receiver-module-explanation-pinout/>
- [24] FS1000A 433Mhz RF Transmitter Receiver Modules. (2022, 1 de marzo). CircuitsDIY. <https://www.circuits-diy.com/fs1000a-433mhz-rf-transmitter-receiver-modules/>
- [25] Comunicación Inalámbrica con módulos de RF de 433Mhz. (s.f.). Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/blog/32_comunicacion-inalambrica-con-modulos-de-rf-de-433mhz.html#:~:text=Antena%20para%20módulos%20de%20433Mhz,y%203.4cm%20de%20longitud.
- [26] Jácome J., Melenchón A., Perez J., "Proyecto Wimax en Puerto Tomás Maestre," Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cartagena
- [27] M. Möser y J. L. Barros, "Conceptos básicos sobre propagación de ondas", en *Ingeniería Acústica*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 19-66.
- [28] "Fundamentos de radar - Pérdida de espacio libre". *Grundlagen der Radartechnik*. <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb55.es.html> (accedido el 4 de mayo de 2023).

Construcción de un micro generador hidroeléctrico basado en una turbina de flujo cruzado de admisión inferior

Construction of a micro-hydroelectric generator based on a lower intake crossflow turbine

Nilton Zeballos Hurtado, Arturo Cosi Blancas, Vigil Mamani Cori

Abstract—The study focuses on developing a micro-hydroelectric generator using a bottom inlet cross-flow turbine that takes advantage of the hydraulic potential of irrigation canals. The methodology used is quantitative and experimental and is based on a flow chart describing the stages from the creation to the implementation of the prototype. Variables such as water height and flow, as well as the dimensions of the irrigation canal, which could not be modified due to the agricultural activities carried out at the site, were taken into account. The results obtained from the field implementation of the designed prototype show that the generator can reach a power value of 93 W with an efficiency percentage of 11.3%, which sustainably produces energy in remote areas. In conclusion, the study highlights the need to explore new renewable and sustainable energy sources in response to the current energy crisis affecting society; it emphasizes the need to adopt cleaner energy alternatives that limit dependence on non-renewable resources while controlling the adverse effects of climate change.

Index Terms— Flow, Hydroelectric, Micro-generator, Turbine, Water flow.

Resumen—El estudio se enfoca en el desarrollo de un micro generador hidroeléctrico mediante el empleo de una turbina de flujo cruzado de admisión inferior que aprovecha el potencial hidráulico de los canales de riego. La metodología utilizada es cuantitativa y experimental, y se basa en un diagrama de flujo que describe las etapas desde la creación hasta la implementación del prototipo. Se tomaron en cuenta variables como la altura y el caudal del agua, así como las dimensiones del canal de riego, las cuales no podían modificarse debido a las actividades agrícolas que se llevan a cabo en el lugar. Los resultados obtenidos de la implementación en campo del prototipo diseñado demuestran que el generador tiene la capacidad de alcanzar un valor de potencia de 93 W con un porcentaje de eficiencia del 11.3% el mismo que produce energía de manera sostenible en áreas remotas. En conclusión, el estudio resalta la necesidad de explorar nuevas fuentes de energía renovables y sostenibles en respuesta a la crisis energética actual que afecta a la sociedad; se enfatiza la imprescindibilidad por adoptar alternativas energéticas más limpias que limite la dependencia por los

recursos no renovables a la par de controlar los efectos negativos del cambio climático.

Palabras Claves— Caudal, Hidroeléctrica, Microgenerador, Turbina, Flujo de agua.

I. INTRODUCCIÓN

EL avance científico y tecnológico ha llevado al ser humano a modificar su forma de vivir y por ende su entorno para buscar un beneficio propio. Sin embargo, esta intervención resulta en una amplia gama de problemas ambientales que afectan negativamente al ecosistema y causan daños significativos a la biosfera. La mayoría de las acciones realizadas por el ser humano son desproporcionadas y, frecuentemente, se llevan a cabo sin considerar sus posibles efectos. Desde una perspectiva medioambiental, se observa que estas acciones pueden provocar colapsos, lo cual genera preocupación desde el punto de vista de la ética ambiental. Por lo tanto, es fundamental enfocarse en reavivar la conciencia individual de cada persona, recordando que habitamos en un planeta sagrado el cual merece ser protegido y cuidado [1].

Uno de los factores por los cuales se implementa el concepto de energías renovables se debe a la crisis energética, producto del agotamiento y la disminución de los yacimientos de petróleo y gas [2]. Este panorama ha llevado a que las personas busquen nuevas alternativas sostenibles y menos contaminantes con la finalidad de satisfacer sus necesidades energéticas globales. Según datos estadísticos se determina que la quema de los combustibles fósiles representa el 78% total de la producción de gases de efecto invernadero, lo que desencadena problemas relacionados con el calentamiento global y el cambio climático [3]. En base a esta información, se destaca la urgencia de contar con fuentes de energía más limpias y sostenibles las cuales disminuyan la dependencia del ser humano hacia fuentes como el carbón o el petróleo para subsistir.

Las energías renovables son vistas como fuentes limpias, ya que se originan de recursos naturales como el viento, la luz solar, el suelo y las aguas subterráneas. Este tipo de energías poseen un alto nivel de eficiencia a la misma vez que buscan minimizar los impactos ambientales generados por la dependencia de los combustibles fósiles [4]. En la actualidad,

N. Zeballos, A. Cosi y V. Mamani. Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú (nilton_zh@ujcm.edu.pe, arcofe@hotmail.com, 04745011@ujcm.edu.pe).

la producción de electricidad se identifica como una de las principales causas de contaminación ambiental; sin embargo, también se reconoce como un mecanismo esencial que impulsa las operaciones industriales [5]. Se estima que, a nivel mundial el consumo de energía en el año 2022 incrementó en un 2% a comparación de años anteriores, este crecimiento fue considerable en países de Asia y Estados Unidos con un 3.6%, de igual manera en China con un 32% y la India con 9.6 % todo esto debido a las condiciones climáticas que obligan a las personas a aumentar su consumo de electricidad. En cambio, la situación en Europa fue diferente ya que debido a los altos precios de electricidad, las temperaturas moderadas y los múltiples esfuerzos por conservar la energía redujeron la demanda en el sector industrial y residencial en un 2.9 % [6].

En 2023, la crisis energética y la recesión económica provocaron una disminución del 2% en la demanda de energía. En Estados Unidos y China, la reducción fue del 1.7% y 5.3%, respectivamente. Sin embargo, se espera que en 2024 la demanda de energía aumente un 3.3% debido a la mejora prevista en las condiciones económicas globales [7].

En la actualidad, existen una variedad de energías renovables pero, los recursos que se han obtenido a partir del aprovechamiento del agua pueden variar debido a los flujos intermitentes del caudal de agua; se determina que en Perú el 35% de la energía que se obtiene se debe a las cuencas del río Pacífico y del Amazonas [8]. A través del aprovechamiento de la energía hidroeléctrica, los gobiernos han mostrado un creciente interés en explorar este sector [9].

El principio de funcionamiento de la energía hidroeléctrica se fundamenta en la conversión de la energía potencial del agua, la cual fluye en caída vertical, proveniente de ríos o arroyos, en energía utilizable [10]. La energía hidroeléctrica, aunque es una fuente renovable y relativamente limpia, enfrenta cuestionamientos sobre su sostenibilidad a largo plazo debido a sus significativos impactos ambientales [11]. Entre estos se incluyen la alteración de ecosistemas acuáticos y terrestres, la disminución de la biodiversidad y la modificación de los flujos de ríos, afectando tanto a especies locales como a comunidades humanas que dependen de estos recursos.

La construcción de grandes represas y embalses para la generación hidroeléctrica conlleva inversiones económicas significativas, enfrenta desafíos técnicos complejos y a menudo provoca el desplazamiento de poblaciones y la pérdida de tierras cultivables. Esto plantea serias preocupaciones sobre su viabilidad futura, especialmente en el contexto del cambio climático y sus efectos en la disponibilidad de agua. En respuesta a estas preocupaciones, se impulsa la búsqueda de alternativas más sostenibles y menos invasivas para la generación de energía [12].

Un ejemplo destacado de innovación es el micro generador, el cual tiene una capacidad de 50 kW que contrasta con el diseño de las turbinas tradicionales las cuales están fabricadas para la generación de cientos de miles de kilovatios, además, resultan una diferencia significativa en su enfoque y escala [13].

Un Micro Generador Hidroeléctrico basado en una turbina

de flujo cruzado de admisión inferior representa una solución innovadora y sostenible para la generación de energía renovable [14]. Este tipo de tecnología aprovecha el flujo de agua en pequeñas corrientes o ríos para producir electricidad, sin necesidad de grandes infraestructuras como presas o embalses, lo que minimiza su impacto ambiental. La importancia de estos sistemas radica en su capacidad para proporcionar energía limpia y renovable, especialmente en áreas remotas o de difícil acceso, contribuyendo significativamente a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y a la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero. Además, su diseño de admisión inferior optimiza la eficiencia del flujo de agua, mejorando la capacidad de generación eléctrica y ofreciendo una alternativa más amigable con el medio ambiente, al tiempo que promueve el uso de recursos naturales de manera responsable [14], [15].

En la actualidad, las turbinas de flujo cruzado se emplean ampliamente en diversas condiciones de descarga y altura, debido a su construcción sencilla, fácil y económica. Además, su mecanismo de operación resulta óptimo frente a fluctuaciones significativas del caudal [16], [17]. La construcción de este tipo de turbinas es relativamente sencilla, ya que su diseño se basa en dos ruedas circulares conectadas por álabes [18]. Además, gracias a su capacidad para operar bajo un amplio rango de condiciones de presión y flujo, estas máquinas son vistas como el nexo entre las turbinas hidráulicas de acción y de reacción, siendo especialmente útiles para proyectos de autoabastecimiento de menor escala [15]. En términos prácticos, las turbinas de flujo cruzado se emplean eficientemente en alturas netas que varían desde 2.5 hasta 200 metros y en un rango de caudal de 0.04 a 13 m³/s [19]. Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que estas turbinas poseen la capacidad de generar energía a partir de sistemas de acueductos, siempre que la presión en el punto de salida sea mayor a cero [20].

La implementación de turbinas en ubicaciones remotas ofrece una solución energética rentable, destacando su contribución en áreas rurales aisladas y de difícil acceso, así como también, en regiones no interconectadas y en países con economías emergentes [18], [21]. Sin embargo, debido a sus características robustas y de bajo costo se cree necesario el estudiar su diseño y aspectos geométricos con referencia a su eficiencia y adaptabilidad [19], [22]. Por tal razón, el objetivo principal del trabajo es la construcción de un micro generador hidroeléctrico basado en una turbina de flujo cruzado de admisión inferior para aprovechar el potencial hidráulico de un canal de riego.

El aporte principal del trabajo radica en su capacidad de integrarse en infraestructuras existentes, ofreciendo una solución sostenible que contribuye a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y a la mitigación de los efectos del cambio climático. Este enfoque innovador destaca por su adaptabilidad y bajo impacto ambiental, diferenciándose de estudios anteriores que generalmente se enfocan en instalaciones hidroeléctricas más grandes y menos integradas con el entorno agrícola. Por tal razón, la investigación subraya la importancia de explorar nuevas

fuentes de energía renovables y adaptadas a las limitaciones específicas del entorno, promoviendo la sostenibilidad en áreas remotas y con recursos limitados.

II. ESTADO DEL ARTE

Romero [23] expone que el principio de funcionamiento de este prototipo se basa en la transformación de energía potencial en energía cinética aprovechando las corrientes de agua que fluyen en pequeñas ríos y arroyos los mismos que poseen un mayor potencial hidráulico y con ello permiten aportar la energía suficiente a las micro turbinas. Asimismo, con respecto a las consideraciones de diseño se debe tener en cuenta como primer aspecto los datos hidro energéticos para dimensionar su potencia útil y la capacidad de aprovechamiento. De igual manera, se opta por emplear patrones de figuras geométricas para la construcción de los elementos mecánicos que componen la turbina con el propósito de seleccionar aquellas combinaciones que permitan maximizar el valor de eficiencia para la conversión del sistema.

El autor de la presente investigación identificó las principales ventajas mencionando que los micro generadores de turbinas de flujo cruzado son beneficiosos debido a su diseño simple y económico, que facilita la fabricación y reduce los costos tanto de implementación como de operación y mantenimiento. Además, estas turbinas son eficientes bajo condiciones de carga parcial y pueden operar perfectamente con variaciones en el flujo de agua, lo que las hace adecuadas para pequeños proyectos en lugares remotos o con recursos limitados. Además, su robustez y el tener pocas piezas móviles disminuyen la necesidad de mantenimiento frecuente, siendo así ideales para diferentes condiciones geográficas y de caudal.

De igual manera, el autor identificó las desventajas del estudio y determinó que las turbinas son efectivas en aplicaciones a baja escala, pero tienden a enfrentar problemas al momento de escalar a proyectos de mayor magnitud debido a su limitada capacidad para generar energía. Además, pueden sufrir cavitación y desgaste prematuro de sus componentes cuando operan bajo condiciones de alta velocidad de flujo y baja presión. Por otro lado, no son adecuadas para lugares que poseen restricciones de espacio o donde se requiere minimizar la alteración del entorno natural.

Por otra parte, en el estudio desarrollado en [24] se determinó que al instalar un sistema eléctrico compuesto por cinco bombillos y una pulidora dio como resultado una carga neta de 1.5 kW la cual variaba según el caudal del agua; además, se evidenció que al sobrepasar la capacidad que tiene el generador la turbina no producía ningún tipo de energía; al contrario, únicamente se limitaba a girar por tal motivo, es importante no sobrepasar esta tolerancia.

Entre las principales ventajas que se pudo considerar del estudio analizado fue que se trata de un proyecto el cual generó beneficios para la comunidad del Acueducto Veredal Vancouver La Rambla al proveer de energía necesaria para potabilizar el agua; así también, al emplear recursos renovables el proyecto promueve la sostenibilidad ambiental y

reduce la dependencia de las energías no renovables.

En cuanto a su principal desventaja se puede mencionar que las turbinas de flujo cruzado son menos eficientes que las turbinas Pelton, principalmente porque están diseñadas para funcionar con cabezas hidráulicas bajas a medianas, entre 2 y 200 metros, mientras que las turbinas Pelton están optimizadas para altas velocidades de agua y aplicaciones de alta cabeza, por encima de los 100 metros.

En consecuencia, para proyectos con caídas de agua significativas, las turbinas Pelton permiten un mejor aprovechamiento del potencial energético, resultando en generación de energía más eficiente y menores costos operativos. Por estas razones, en instalaciones de alta cabeza, las turbinas Pelton son generalmente la opción preferida sobre las de flujo cruzado.

Sritram [25] diseñó un sistema de generación de energía mediante vórtice libre, utilizando turbinas de hélice de cinco palas con diámetros de 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7 metros. Estas turbinas fueron colocadas a diferentes alturas, específicamente a 0.2, 0.3 y 0.4 metros. A partir de las pruebas de campo realizadas, se determinó que la turbina de mayor eficiencia es aquella con un diámetro de 0.7 metros y una altura de 0.4 metros, operando a un caudal de 0.2 m³/s. Se concluyó que al incrementar tanto la altura como el diámetro de la turbina, se amplía la superficie de contacto para el flujo del agua sobre las palas, mejorando así la capacidad de la turbina para manejar la fuerza y velocidad con las que se genera la energía.

Entre las principales ventajas que se pudo evidenciar del artículo como aporte para la presente investigación demuestra que las turbinas de flujo cruzado en micro hidroeléctricas pueden alcanzar una eficiencia del 23.01% con un caudal de 0.02 m³/s. También, se puede diseñar y ajustar el número de palas en función de diferentes tasas de flujo, lo cual es útil en ambientes donde el caudal tiende a presentar variaciones. Un método innovador que se destaca en este tipo de turbinas es el uso de la gravedad para acelerar el flujo de agua, mejorando así la eficiencia del sistema y reduciendo la necesidad de componentes mecánicos extras, lo que disminuye la pérdida de energía y aumenta la sostenibilidad del sistema.

Por otra parte, este tipo de sistemas presenta complejidades al momento de su calibración ya que el ajustar el sistema para alcanzar su configuración óptima tiende a ser un proceso complejo en el cual se involucra pruebas exhaustivas y análisis detallados lo que requiere de recursos significativos en cuanto a tiempo, experiencia técnica y costos operativos.

De la misma manera Sánchez en su investigación presentada en [26] demuestra, a través de pruebas de laboratorio, que el mecanismo es capaz de generar un total de 8W esto mediante la adaptación de un tornillo de Arquímedes de tres hilos, con dos revoluciones, por el cual pasa un suministro de agua impulsado por una bomba hidráulica de 372.85 W. Adicionalmente, se estableció que, al montar el prototipo en campo con un caudal de 0.583 l/s, se obtuvo un valor de corriente de 0.57 A. En contraste, al incrementar el caudal a aproximadamente 10 l/s, se produjo un total de 7.95 W, energía suficiente para alimentar a 3 luces LED [26].

Se reconoció las ventajas del estudio y se especifica que el

uso de materiales y técnicas de construcción básicos pueden disminuir los costos iniciales de producción, permitiendo la replicación de estos sistemas en zonas rurales. Además, se señaló que al igual que el prototipo de turbina de flujo cruzado, este micro generador emplea el diseño del tornillo de Arquímedes, tradicionalmente usado para elevar agua, adaptado ahora para generar energía utilizando pequeños flujos de agua, como los de 10 l/s.

En cambio, la principal desventaja de los micro generadores fabricados en base a los tornillos de Arquímedes frente a aquellos que utilizan turbinas de flujo cruzado radica en su eficiencia energética relativamente menor y menor flexibilidad operativa bajo variadas condiciones hidrológicas. Esto limita su uso a aplicaciones específicas donde las condiciones del recurso hídrico son estables y predecibles.

En definitiva, se puede mencionar que los micro generadores que utilizan turbinas de flujo cruzado presentan ventajas significativas sobre otros tipos de turbinas debido a su capacidad de manejar flujos de agua con partículas sólidas sin sufrir daños, lo que los hace ideales para entornos con recursos hídricos menos controlados. Su diseño permite una operación eficiente incluso en caudales de agua bajos o variables, garantizando una producción de energía más estable y continua. Además, las turbinas de flujo cruzado son más sencillas y económicas de fabricar y mantener, lo cual reduce los costos iniciales y operativos, facilitando su implementación en comunidades rurales o en desarrollo donde los recursos pueden ser limitados. Esta combinación de durabilidad, eficiencia en diferentes condiciones de flujo y bajo costo las convierte en una opción superior para la micro generación de energía en comparación con otros tipos de turbinas.

III. METODOLOGÍA

Para la realización del presente estudio se utilizó una investigación de tipo cuantitativa y experimental que permitió evaluar sistemáticamente los efectos y la eficacia del prototipo desarrollado. La metodología adoptada para este estudio fue estructurada en diversas fases, desde el diseño inicial del prototipo hasta su implementación final en un canal de regadío. Cada una de las etapas se delimitaron a través de un diagrama de flujo, lo cual facilitó la visualización del proceso de desarrollo y la secuencia de actividades necesarias para la operacionalización del prototipo (ver Fig. 1).

Como se visualiza en la Fig. 1, la primera etapa fue el determinar los requerimientos de funcionamiento con respecto a las características hidrológicas del sitio como el caudal y la altura de caída disponible, así como la evaluación de las necesidades energéticas que el generador debería satisfacer. Seguidamente, se efectuó el dimensionamiento del rodete, el cual al ser un componente importante de conformación del prototipo debe tener la capacidad de maximizar la eficiencia de la conversión energética por tal motivo, se ejecutaron cálculos detallados para establecer el diámetro óptimo y el ángulo de las aspas, basándose en las variables hidráulicas definidas con anterioridad.

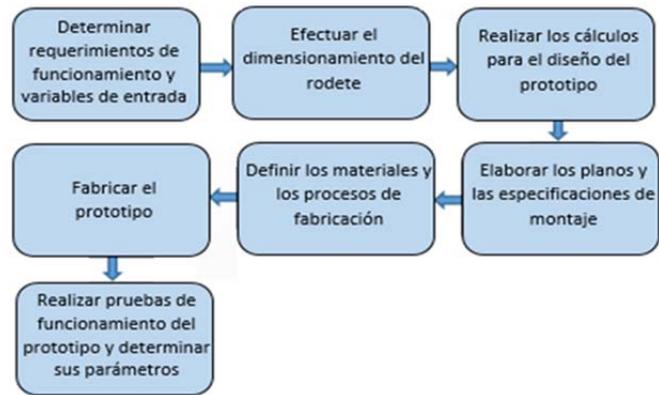


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para el diseño del prototipo.

La tercera fase consistió en la realización de cálculos para el diseño del prototipo. A partir del diseño preliminar del rodete, se llevaron a cabo cálculos estructurales y dinámicos para el resto de los componentes que integran el modelo de un micro generador. Posteriormente, se seleccionaron los materiales y se definieron los procesos de fabricación. Se priorizó la elección de materiales que no sólo ofrecieran una alta durabilidad y resistencia a la corrosión, sino que también facilitarían el mantenimiento y sus costos resulten eficientes.

Para conformar el prototipo fue necesaria la creación de documentación técnica y detallada, denominados planos, los cuales presentaban todas las vistas necesarias, secciones e instrucciones claras sobre como ensamblar las diversas partes del generador de manera segura y eficiente. Finalmente, las fases de fabricación y las pruebas de funcionamiento permitieron evaluar el comportamiento del micro generador en condiciones controladas y poder ajustar los parámetros operativos según las necesidades.

A. Requerimientos de funcionamiento

Las variables de entrada consideradas para el diseño del prototipo estuvieron delimitadas por las características hidráulicas del lugar en la cual se tendría que instalar la turbina (altura y caudal), y por las dimensiones del canal de regadío ver Fig. 2, por cuanto existía la imposibilidad de variar el caudal, ya que las actividades agrícolas de los usuarios no permitían que se pudiera realizar trabajos que pudiesen variar las características de conducción y distribución del agua. Debido a ello el diseño de la turbina tenía que considerar la geometría del canal, de tal manera que el prototipo pudiese instalarse sin ocasionar mayores inconvenientes en las actividades agrícolas del lugar.

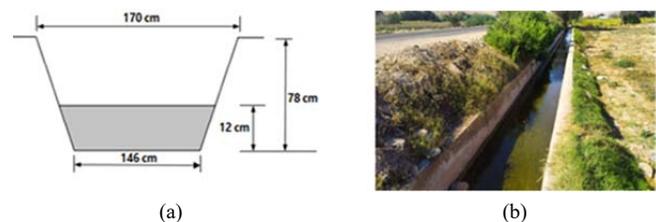


Fig. 2. (a) Características del canal de riego (b) Canal de riego

La construcción de un micro generador hidroeléctrico que utiliza turbinas de flujo cruzado requiere el dimensionamiento del canal de riego ya que factores como el ancho, profundidad y la pendiente influyen en la velocidad del agua y por ende afecta directamente al desempeño de las turbinas. Un diseño adecuado del canal garantiza un flujo constante de agua, optimizando la generación de energía y la eficiencia del sistema. Además, el revestimiento del canal minimiza la pérdida de agua y previene la erosión, mientras que el mantenimiento regular elimina obstrucciones que puedan afectar la funcionalidad del sistema.

Para garantizar la operación eficiente de una turbina hidráulica es importante considerar las características del lugar de instalación, principalmente la altura y el caudal del agua. La altura de caída, que impacta directamente en la energía potencial disponible, y el caudal, que define la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo, son determinantes en la capacidad de generación de energía. Además, para que las turbinas de flujo cruzado de admisión inferior funcionen en condiciones óptimas es importante que el agua fluya de manera uniforme y sin obstrucciones, por ende, se requería de un lecho de río adecuado.

B. Dimensionamiento del rodete

El dimensionamiento adecuado del rodete mejora el rendimiento de los micro generadores hidroeléctricos que utilizan turbinas de flujo cruzado de admisión inferior. El rodete convierte la energía cinética del agua en mecánica, y su diseño debe considerar la velocidad del flujo, la altura de caída, la potencia requerida y la eficiencia del generador. Un rodete correctamente dimensionado resulta efectivo en condiciones de baja carga además, no sólo son una opción sostenible para generar electricidad en áreas remotas o rurales, sino que también maximizan la producción de energía.

Debido a la admisión inferior de la turbina no resulta necesario introducir modificaciones en el canal, esto se debe a que el rodete puede ser montado utilizando una estructura de soporte adecuada, asegurando así su rendimiento óptimo como se visualiza en la Fig. 3.

Para determinar la potencia absorbida o la potencia hidráulica (P_{abs}) del sistema, es necesario emplear (1), como sigue:

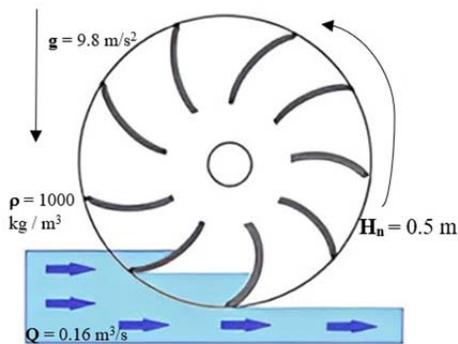


Fig. 3. Admisión inferior de la turbina (under shot).

$$P_{abs} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_N \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del agua en kg/m^3 , g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 , Q es el caudal en m^3/s y H_N es la altura en m. En el estudio, los valores de estas variables presentaban valores de $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $Q = 0.1678 \text{ m}^3/\text{s}$ y $H_N = 0.5 \text{ m}$. Estos valores dieron como resultado una potencia de 822.22 W, que, junto con las características geométricas del canal, proporcionaron la base para el dimensionamiento del rodete.

Para el proceso de dimensionamiento, se consultó material bibliográfico proveniente de estudios relacionados con el tema de investigación, con el objetivo de recopilar expresiones matemáticas empíricas y teóricas que facilitara el diseño de la turbina mediante el uso del software CAD de diseño mecánico, SolidWorks.

1) *Diámetro del rotor*: El diámetro del rotor es un factor determinante en el diseño de turbinas hidroeléctricas, ya que impacta directamente en la cantidad de energía que se puede extraer del flujo de agua. Un rotor de mayor tamaño amplía el área de barrido, facilitando la captura de más energía cinética; sin embargo, puede también aumentar la resistencia al flujo y reducir la eficiencia del generador; por lo tanto, es importante equilibrar el tamaño del rotor con la eficiencia del generador, teniendo en cuenta variables como la velocidad y densidad del agua, la potencia requerida, y las limitaciones espaciales del lugar de instalación.

La eficiencia de una turbina de flujo cruzado no varía apreciablemente en un amplio rango de valores del caudal y la altura, por lo que el diámetro del rodete se seleccionó en base a la Tabla I.

TABLA I
DIMENSIONES DEL ROTOR D_1

$Q/\sqrt{H_N}$	Diámetro exterior del rotor (mm)
0.02236 – 0.04743	200
0.04743 – 0.07906	300
0.07906 – 0.11068	400
0.11068 – 0.15812	500

Por lo tanto, el diámetro exterior seleccionado fue de 400 mm. Para calcular el diámetro interior (D_2), es necesario señalar que no hay consenso sobre la relación de diámetros que debe considerarse para el diseño, ya que diversas investigaciones presentan valores que oscilan entre $0.54 \leq D_2/D_1 \leq 0.83$. También se debe tener en cuenta el ancho radial de los álabes, definido en (2), a continuación:

$$A = R_1 - R_2 \quad (2)$$

Esta medida es de suma importancia, ya que si su valor es muy pequeño no permite un óptimo aprovechamiento de la vena fluida y, por otro lado, si es muy largo se incrementan tanto las pérdidas por fricción como las oscilaciones. Para esta investigación se utilizó (3), obteniendo un valor de 260 mm, en donde D_1 es igual al diámetro exterior del rotor y D_2 el diámetro interno del rotor.

$$D_2 = 0.65 \cdot D_1 \quad (3)$$

2) *Ancho del rodete*: Para incrementar la rigidez del rotor, se recomienda que la relación de aspecto entre el diámetro exterior y el ancho del rodete alcance valores cercanos a uno. Sin embargo, los resultados de diversos investigadores muestran que esta relación oscila entre $0.25 \leq D_1/H \leq 4.25$. En el estudio en cuestión, se decidió diseñar el rodete con un ancho (H) de 831 mm, tomando en consideración las limitaciones impuestas por las dimensiones del canal de riego, tal como se observa en la Fig. 2, y con el fin de facilitar la instalación de la estructura que actuaría como soporte del rodete, además, un valor de 0.48 con respecto a la relación de aspecto.

C. Cálculos para el diseño del prototipo

1) *Dimensiones de los álabes*: Los álabes capturan la energía cinética del agua y la convierten en energía mecánica para generar electricidad. La eficacia de los álabes se basa en su diseño aerodinámico, el cual debe minimizar la resistencia al flujo. Esto se logra a través de una adecuada cantidad y configuración de los álabes, garantizando una disposición que minimice interferencias y maximice la eficiencia energética. Generalmente, los materiales de construcción empleados son el acero inoxidable y aleaciones de aluminio los mismos que tienen las características de ser duraderos y evitan la corrosión.

La tercera etapa considera los cálculos necesarios para establecer los demás parámetros de la turbina por lo tanto, se evalúan los criterios a seguir para la selección del número de álabes, ángulos de trabajo, entre otros. En la selección del número de álabes se debe considerar que valores reducidos pueden provocar oscilaciones en la potencia generada, mientras que un número elevado de álabes puede causar una innecesaria aceleración en la vena fluida. En base a esta premisa, múltiples investigaciones han determinado el valor óptimo del número de álabes que se sitúa en el rango de $24 \leq z \leq 30$. Por ello, se decidió trabajar con 24 álabes cuyas dimensiones se determinan a partir del radio exterior (R_1), radio interior (R_2) y el paso (P_z), como se muestra en la Fig. 4.

Las principales medidas y el aspecto del rodete diseñado se pueden ver en la Fig. 5.

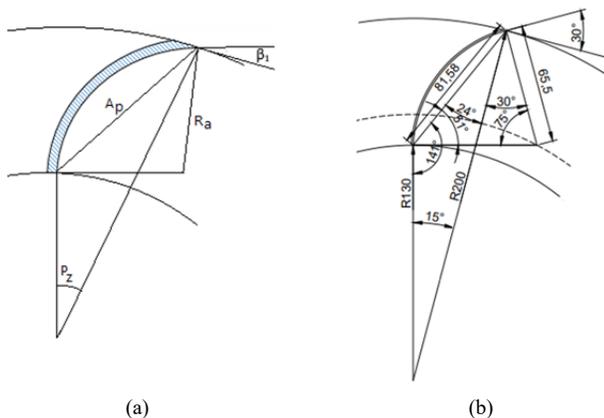


Fig. 4. (a) Diseño del alabe en base al paso y los radios R_1 , R_2 (b) Dimensiones del álabe

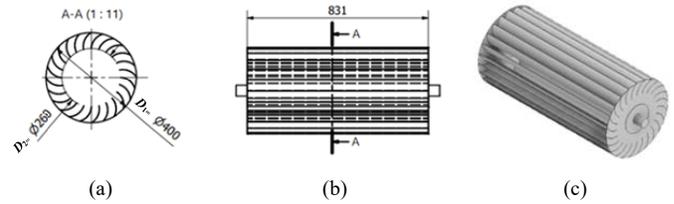


Fig. 5. Geometría del rodete diseñado. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal. (c) Vista en 3D

De esta manera quedan definidas las dimensiones de la turbina, las cuales se recogen en la Tabla II.

TABLA II
PARÁMETROS Y DATOS DE DISEÑO DE LA TURBINA

Descripción	Valor	Variable
Caudal de Agua	0.1678 m ³ /s	Q
Altura Neta	0.5 m	H_N
Diámetro Externo	400 mm	D_1
Diámetro Interno	260 mm	D_2
Ancho del Rodete	831 mm	A
Número de álabes del rotor	24	Z
Paso del álabe	15°	P_z
Ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad tangencial en la entrada	30°	β_1
Ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad tangencial en la salida	90°	β_2
Radio del álabe	65.5 mm	R_a
Cuerda del álabe	81.58 mm	A_p

D. Planos y especificaciones del montaje

Para el proceso de diseño y montaje fue necesario contar con los cálculos del prototipo a estructurar por tal motivo, el eje de la turbina se montó en sus extremos utilizando dos rodamientos rígidos de bolas Timken 456. De la misma forma, para establecer la conexión entre el rotor y el eje, se emplearon un par de bridas las cuales se atornillaron a los discos del rotor y se soldaron a dos cubos, asegurando una unión firme y estable. Adicionalmente, para facilitar la transmisión de potencia hacia el alternador, se instaló un sistema de poleas de aluminio con una relación de transmisión de 2.6, optimizando así la eficiencia en la transferencia de energía mecánica; el generador empleado corresponde a un alternador de motocicleta como se visualiza en la Fig. 6.



Fig. 6. Montaje del alternador. (a) Vista Frontal (b) Vista Lateral

El bastidor diseñado para recibir el peso de la turbina y el impacto del agua consiste en una estructura fabricada de tubo cuadrado de 1" cuyas características y dimensiones se representan en la Fig. 7 a continuación:

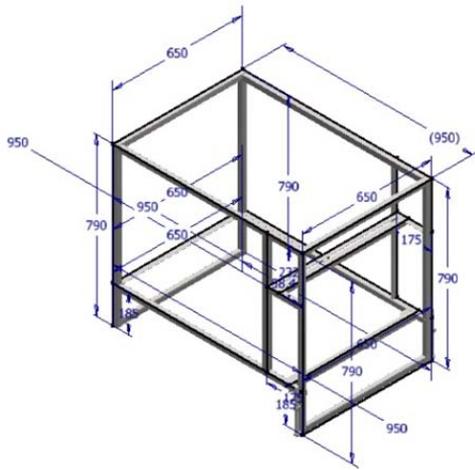


Fig. 7. Diseño del bastidor para el montaje del rodeté.

Una vez finalizado las labores de planificación y diseño en gabinete, se inició la fase de construcción de los distintos componentes de la turbina; para este propósito, se emplearon avanzados procesos de manufactura, así como una variedad de maquinaria y herramientas especializadas, incluyendo plegadoras, tornos, entre otras. En la Fig. 8., se exhibe el conjunto total del micro generador ya fabricado.

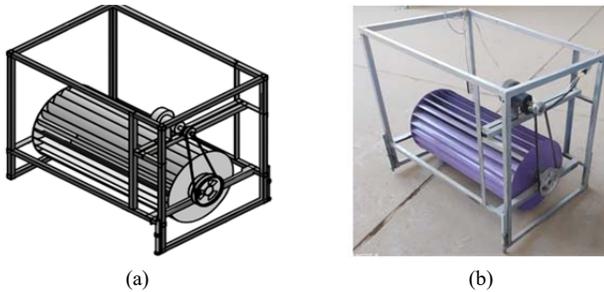


Fig. 8. Prototipo del micro generador de flujo cruzado. (a) Diseño 3D (b) Modelo Fabricado

Se debe considerar que todas las piezas están en contacto directo con el agua por tal razón, una vez instaladas se optó por pintarlas con esmalte epóxico el cual evita que los elementos mecánicos se deterioren gracias al fenómeno de corrosión. Finalmente, en la Fig. 9 se esquematiza el diseño del modelo final construido así como también, se enumera cada una de sus partes en la Tabla III.

La Fig. 9 ilustra los índices de los componentes mecánicos del prototipo del micro generador. Posteriormente, la Tabla III ofrece una descripción detallada de cada uno de estos componentes.

En cuanto a la descripción de cada componente, se aplican diversas normas ISO para la construcción del prototipo, entre las que se incluyen las siguientes: ISO 10799-2, ISO 657-1, ISO 1035/2, ISO 4017, and ISO 4032.

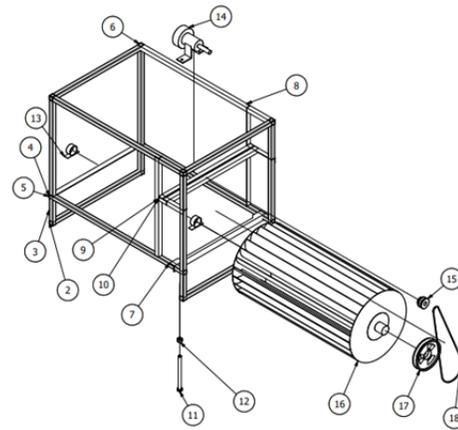


Fig. 9. Detalle de las partes que conforman el modelo construido.

TABLA III
DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DEL PROTOTIPO

Índice	Descripción
2	ISO 10799-2-25 x 25 x 2-650
3	ISO 10799-2-25 x 25 x 2-790
4	ISO 10799-2-25 x 25 x 2-950
5	ISO 657-1-L30 x 30 x 3-650
6	ISO 1035/2-25 x 25-950
7	ISO 657-1-L35 x 35 x 4-650
8	ISO 657-1-L25 x 25 x 3-605
9	ISO 657-1-L25 x 25 x 3-175
10	ISO 657-1-L25 x 25 x 3-650
11	ISO 4017-M16 x 200
12	ISO 4032-M16
13	Chumacera
14	Generador
15	Polea del Generador
16	Rotor
17	Polea del Rotor
18	Polea Trapezoidal

IV. RESULTADOS

Considerando los parámetros de funcionamiento, diseño y construcción, se desarrolló un sistema funcional de micro generación de energía, el cual aprovecha los recursos hídricos para su operación. El prototipo fue implementado y puesto en funcionamiento en el canal de riego ubicado paralelamente a la carretera binacional, específicamente en el kilómetro 1153 del valle de la ciudad de Moquegua, al sur de Perú. La ubicación exacta de esta implementación está determinada por las coordenadas geográficas, las cuales son: latitud 17°16'11''S y longitud 70°59'06''O, encontrándose a una altitud de 1113 m sobre el nivel del mar.

Como se observa en la Fig. 10., el prototipo fue montado en campo, y las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en las instalaciones de la carrera profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad José Carlos Mariátegui, durante los meses de julio a septiembre del 2023. Dando como resultado los parámetros base para el óptimo funcionamiento de la turbina de flujo cruzado y admisión inferior los cuales se esquematizan en la Tabla IV.



Fig. 10. Prueba del prototipo en el canal de riego. (a) Montaje del prototipo en el canal de riego (b) Funcionamiento del modelo

TABLA IV
PARÁMETROS FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA

Parámetro	Valor
Potencia	93 W
Velocidad de rotación del eje de la turbina	209 rpm
Eficiencia	11.3 %
Salto	0.5 m
Caudal	0.1678 m ³ /s
Rotor	400 mm de diámetro y 831 mm de ancho

V. DISCUSIÓN

El presente artículo se ha enfocado desde un inicio en el aprovechamiento de la potencia hidráulica de un canal de riego, con el objetivo de generar electricidad mediante una turbina de flujo cruzado de admisión inferior. Con referencia a las pruebas de funcionamiento se determinó que la potencia en el eje del rodete es de 93 W con una eficiencia del 11.3% contando con una altura de 0.5 m y un caudal de 0.1678 m³/s. Tras analizar la información, se establece que bajo condiciones de prueba con una altura de trabajo de 25 metros y un flujo máximo de 0.8 metros cúbicos por segundo, se obtuvo una potencia de 250 kW en el generador. Este resultado se logró mediante el uso de un rodete de 500 milímetros de diámetro [27]. En este escenario, la potencia obtenida es significativamente mayor, lo cual se atribuye a la diferencia de altura.

Es importante señalar que la eficiencia del prototipo diseñado es menor en comparación con la eficiencia hidráulica óptima, cercana al 80% [18]. Esto contrasta con la eficiencia de otros tipos de turbinas, como las Pelton, Francis y Kaplan, que pueden lograr una eficiencia máxima del 90% [28]. En contraste con estos datos se comparan diversos estudios realizados en base a la temática del estudio, el primero desarrollado en [29] cuyos resultados son: potencia máxima del eje de 284.58 W, potencia máxima generada de 196.24 W y eficiencia global de 68.2 %.

De la misma manera, en el estudio realizado en [30] la turbina de flujo cruzado diseñada era capaz de producir hasta 300 W de potencia de CA a una altura de 6 m y un caudal de 0.0091 m³/s. La eficiencia máxima se obtuvo en un 86 %, resultando importante establecer que la altura afecta en gran medida a la potencia a alcanzar y la eficiencia final.

Por otra parte, el estudio presentado en [31] reporta que, durante la experimentación, el prototipo diseñado, expuesto a

una velocidad de entrada de fluido de 1.5 m/s, produjo una potencia promedio de 0.65 W a una altura de 0.60 m. Por lo tanto, una vez analizado el estudio y comparando con el prototipo diseñado se logra determinar que un diseño de tipo cilíndrico resulta más eficiente y de construcción sencilla [22], [31] además, los investigadores mantienen su labor al tratar de optimizar la geometría de las palas [32].

El diseño cilíndrico de una turbina de flujo cruzado se destaca por su capacidad de mantener un rendimiento eficiente en una variedad de condiciones de flujo. Gracias a su forma, la turbina puede captar energía de fluidos que se mueven en cualquier dirección sin la necesidad de sistemas adicionales para orientarla, lo cual es especialmente útil en corrientes inestables. Esta característica geométrica también contribuye a una distribución de presión uniforme alrededor del rotor, mejorando la eficiencia mecánica y la estabilidad operacional, lo que a su vez prolonga la vida útil de la turbina y disminuye la frecuencia de mantenimiento.

La eficacia del diseño cilíndrico proviene de su sección transversal constante, que asegura una interacción uniforme del fluido a lo largo de la superficie de la turbina, facilitando así una transferencia de energía óptima. A diferencia de diseños más complejos que pueden generar flujos desordenados y vórtices, el perfil cilíndrico promueve un flujo armónico y disminuye las pérdidas por efectos hidrodinámicos. Esta simetría también resulta en un patrón de flujo uniforme que minimiza zonas de alta presión y vacío, mejorando así la eficiencia aerodinámica o hidrodinámica. La eficiente conversión de la energía del fluido en trabajo mecánico resalta la importancia de la geometría en la eficiencia energética general de las turbinas de flujo cruzado.

Otros de los aspectos geométricos que condicionan su rendimiento, pueden ser una gran caída de altura (superior a 150 m) y una descarga relativamente pequeña (inferior a 0.2 m³/s), donde el diseño tradicional de estas turbinas da lugar a anchos muy reducidos del rodete [33]. Por otro lado, los avances en cuanto a las herramientas informáticas han provocado que en la actualidad el análisis del rendimiento de las turbinas hidráulicas sea estudiado utilizando diversos métodos, incluyendo la dinámica de fluidos computacional [22], paralelamente a ello, la búsqueda de nuevas fuentes hídricas no cesa, en ese sentido una micro turbina de flujo cruzado podría generar suficiente electricidad a partir del flujo de aguas residuales en las tuberías [29], fuente de potencia que anteriormente era desdeñada.

VI. CONCLUSIONES

El estudio aborda de manera efectiva el desafío de generar energía de manera sostenible utilizando recursos hídricos limitados en canales de riego. A través del desarrollo y la implementación de un prototipo de micro generador hidroeléctrico con una turbina de flujo cruzado de admisión inferior, se demostró que es posible alcanzar una potencia de generación de 93 W con una eficiencia de 11.3%. Estos resultados son especialmente relevantes dado que se lograron en un contexto de restricciones significativas relacionadas con la no modificación de las estructuras de canal existentes, lo

cual es común en áreas de actividad agrícola. La investigación demuestra que es una solución viable y eficiente para generar energía en lugares con limitaciones geográficas o infraestructurales, donde otras opciones de energía renovable podrían no ser factibles. Además, requiere de mínimas modificaciones en el entorno existente, lo que facilita la integración del prototipo en diversas condiciones sin interrumpir las actividades agrícolas locales. A pesar de que la eficiencia del generador es menor en comparación con los estándares óptimos de eficiencia hidráulica, su capacidad para operar de forma estable y continua bajo condiciones variables de flujo y manejar agua con partículas sólidas, lo convierte en una opción robusta y adaptativa, especialmente adecuada para áreas rurales o en desarrollo donde los recursos son limitados. El enfoque innovador se centra en su capacidad para integrarse ingeniosamente en infraestructuras preexistentes, proveyendo una solución energética que no solo es sostenible sino también adaptativa. Al diseñar un sistema que no altera el canal de riego existente, la investigación promueve una metodología que podría ser replicada en otros contextos similares, ofreciendo una ruta escalable y sostenible para la expansión de la energía hidroeléctrica micro generada. Además, se destaca la necesidad de diversificar las fuentes de energía renovable, como los micro generadores hidroeléctricos, para enfrentar la crisis energética y los desafíos ambientales. Los micro generadores no sólo reducen la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también son adaptables y tienen un bajo impacto ambiental, lo que los hace ideales para integrarse en infraestructuras existentes y favorecer la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible. Finalmente, se puede concluir que el desarrollo de un micro generador hidroeléctrico basado en una turbina de flujo cruzado de admisión inferior presenta una opción prometedora para el aprovechamiento eficiente del potencial hidráulico en pequeña escala, destacándose por su adaptabilidad, bajo impacto ambiental y capacidad para generar energía en áreas con recursos hídricos y espaciales limitados. Su enfoque, que equilibra innovación técnica con consideraciones ecológicas y sociales, es importante para avanzar hacia un futuro energético más sostenible y equitativo que impulsa a explorar y promover energías renovables adaptadas a cada entorno contribuyendo así al conocimiento en micro generación de energía y soluciones sostenibles para enfrentar desafíos energéticos.

REFERENCIAS

- [1] E. Perino, R. Kiessling, A. Silnik, A. Perelló, and E. Perino, "Energías renovables y sustentabilidad: una eficiente forma de gestionar los recursos naturales," *Revista Digital Universitaria*, vol. 22, no. 3, May 2021.
- [2] R. López and Ó. López, "Ciencia, tecnología y energías renovables: una aproximación a sus concepciones y contradicciones," *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol. 15, no. 45, pp. 83–105, 2019.
- [3] R. Ibarra, "El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector eléctrico mexicano," *Bol Mex Derecho Comp*, vol. 1, no. 152, Oct. 2018.
- [4] C. Mendez, M. Correa, and Y. Peñaloza, "Energías Renovables Como Modelo Sostenible en el Comercio Internacional," *Visión Internacional (Cúcuta)*, vol. 7, no. 1, pp. 64–81, Mar. 2022.
- [5] J. Vaca and A. Kido, "Estrategia de eficiencia en el consumo de energía eléctrica y mitigación en la estructura productiva de México," *Contaduría y Administración*, vol. 66, no. 2, p. 248, Jun. 2020.
- [6] Enerdata, "El consumo mundial de electricidad se acerca a su tendencia histórica de crecimiento (+2 % en 2022)," Enerdata. Accessed: Apr. 11, 2024. [Online]. Available: <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>
- [7] La República, "El crecimiento de la demanda mundial de energía repunta en 2024 tras ralentizar," La República.
- [8] B. Solís, J. Morante, and B. Rojas, *Energías Renovables Experiencia y Perspectivas en la Ruta del Perú hacia la Transición Energética*, Primera Edición. Lima: GRÁFICA BIBLOS S.A, 2019.
- [9] M. Peralta, "La electricidad como factor de competitividad: Evidencia empírica en el mercado de clientes libres en el contexto del gas de Camisea," *Industrial Data*, vol. 24, no. 1, pp. 139–152, Aug. 2021.
- [10] B. Torres, "La energía hidráulica, aguas turbulentas en la generación de energía," México, 2020.
- [11] H. Angarita et al., "Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 22, no. 5, pp. 2839–2865, May 2018.
- [12] E. Oviedo, "Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental," *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, vol. 50, no. 3, pp. 191–192, Aug. 2018.
- [13] J. Zoccali et al., "Implementación de un Micro Generador de Energía Hidroeléctrica," Argentina, 2022.
- [14] A. Cosi, N. Zeballos, and V. Mamani, *Criterios de construcción de micro generadores hidroeléctricos basados en turbinas de flujo cruzado de admisión inferior*, Primera Edición. Riobamba: Soluzioni Innovative S.A.S Editorial, 2024.
- [15] F. Romero, L. Velásquez, and E. Chica, "Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, no. 1, pp. 23–46, Oct. 2020.
- [16] D. Adanta, D. P. Sari, I. Syoffii, A. P. Prakoso, M. A. A. Saputra, and I. Thamrin, "Performance Comparison of Crossflow Turbine Configuration Upper Blade Convex and Curvature by Computational Method," *Civil Engineering Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 154–165, Jan. 2023.
- [17] C. L. Rantererung, T. Tandiseno, and M. Mallisa, "Development of Four Nossel Cross Flow Turbine," *Journal of Physics*, vol. 2394, pp. 1–8, Dec. 2022.
- [18] E. Quaranta, J. P. Perrier, and R. Revelli, "Optimal design process of crossflow Banki turbines: Literature review and novel expeditious equations," *Ocean Engineering*, vol. 257, pp. 1–15, Aug. 2022.
- [19] D. Svrkota, S. Tašin, and Ž. Stamenković, "Transient-state analysis of hydropower plants with cross-flow turbines," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 1–14, May 2022.
- [20] C. Picone, M. Sinagra, C. Aricò, and T. Tucciarelli, "Numerical analysis of a new cross-flow type hydraulic turbine for high head and low flow rate," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 1, pp. 1491–1507, Jan. 2021.
- [21] R. S. Anand, C. P. Jawahar, E. Bellos, and A. Malmquist, "A comprehensive review on Crossflow turbine for hydropower applications," *Ocean Engineering*, vol. 240, pp. 1–43, Nov. 2021.
- [22] P. Dandun et al., "Effect of Blade Angle and Number on the Performance of Bánki Hydro-Turbines: Assessment using CFD and FDA Approaches," *Evergreen*, vol. 10, no. 1, pp. 519–530, Mar. 2023.
- [23] F. Romero, L. Velásquez, and E. Chica, "Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, no. 1, pp. 23–46, 2021.
- [24] M. Ávila and H. Gómez, "Diseño y desarrollo de un sistema hidro generador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton," Tesis de Pregrado, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, 2020.
- [25] P. Sritram and R. Suntivarakorn, "Efficiency Comparison of hydro turbines in a micro generator system from free-flow vortex," *Energies*, vol. 14, no. 23, pp. 7961, Nov. 2021.
- [26] A. C. Sánchez, W. F. Galeano, and J. M. Zambrano, "Design of a micro-hydraulic generation system based on an archimedes screw," *Ingenius*, vol. 2023, no. 29, 2023.

- [27] A. A. Adeyanju and K. Manohar, "The Performance of a Cross-flow Turbine as a Function of Flowrates and Guide Vane Angles," *HighTech and Innovation Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 56–64, Mar. 2022.
- [28] H. Mrope, Y. Chande, and T. Kivevele, "A Review on Computational Fluid Dynamics Applications in the Design and Optimization of Crossflow Hydro Turbines," *Journal of Renewable Energy*, pp. 1–13, Oct. 2021.
- [29] M. Tahir et al., "Production of electricity employing sewerage lines using a micro cross flow turbine," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 67–77, Jun. 2020.
- [30] S. Sirojuddin, L. K. Wardhana, and A. Kholil, "Investigation of the draft tube variations against the first stage and the second stage flow of banki turbine," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Mar. 2021, pp. 1–6.
- [31] J. Vijayan and B. B. Retnam, "A Brief Study on the Implementation of Helical Cross-Flow Hydrokinetic Turbines for Small Scale Power Generation in the Indian SHP Sector," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 3, pp. 676–693, Aug. 2022.
- [32] R. Gabl, J. Burchell, M. Hill, and D. M. Ingram, "Sensitivity analysis of a Venturi shaped structure for cross-flow turbines," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 16, no. 1, pp. 2243–2269, Dec. 2022.
- [33] C. Picone, M. Sinagra, C. Aricò, and T. Tucciarelli, "Numerical analysis of a new cross-flow type hydraulic turbine for high head and low flow rate," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 1, pp. 1491–1507, Jan. 2021.

Design and implementation of a patch-fractal antenna with phase control using Butler matrix

Diseño e implementación de una antena parche-fractal con control de fase utilizando la matriz de Butler

Chuquimarca Joel, Orellana Ariel, Chamba Fabian, Badillo Xavier, and Leon Cristian

Abstract— The study presents the successful design and implementation of a phase-controlled patch-fractal antenna using the Butler array. This work focuses on developing a laboratory prototype of a 4x4 array using microstrip technology. Theoretical conditions are established, and the theoretical basis of the microwave circuits that make up the matrix is described. Each element is individually designed, optimized, and simulated using specialized software (Ansoft Designer and Advanced Design System), and then its performance is verified by evaluating functional parameters. The tested designs are integrated into a single circuit to form the Butler matrix and are subjected to simulation and optimization before manufacturing. The functionality of the components is verified using a vector network analyzer. An analysis of the discrepancy between the measured values and the theoretical target parameters is performed, providing a comprehensive evaluation of the prototype's performance. Implementing the 4x4 Butler matrix together with the design of patch-fractal microstrip antennas has allowed practical phase control, demonstrating its viability in various applications. Results from both simulation and laboratory tests support the ability to direct the radiation lobe in various areas without the need for additional mechanical structures. The applicability of this antenna in short-range radar systems is highlighted, offering flexibility in addressing without compromising essential electromagnetic properties. For future applications requiring more precise control with a more significant number of radiation lobes, a Butler array with more ports is suggested.

Index Terms— Butler matrix, Patch-fractal antenna, Microstrip, Microwave.

Resumen—El estudio presenta el diseño y la implementación exitosos de una antena parche-fractal con control de fase utilizando la matriz de Butler, una técnica fundamental para la formación de haces múltiples en antenas. El proyecto se enfoca en desarrollar un prototipo de laboratorio de una matriz de 4x4 mediante tecnología de microcinta. Se establecen condiciones teóricas y se describe la base teórica de los circuitos de microondas que conforman la matriz. Cada elemento se diseña, optimiza y simula individualmente utilizando software especializado (Ansoft Designer y Advans Design System), luego se

verifica su desempeño mediante la evaluación de parámetros funcionales. Los diseños probados se integran en un único circuito para formar la matriz de Butler, la cual es sometida nuevamente a simulación y optimización antes de su fabricación. La funcionalidad de los componentes se verifica mediante un analizador vectorial de redes. Se realiza un análisis de la discrepancia entre los valores medidos y los parámetros teóricos establecidos como objetivo, lo que proporciona una evaluación exhaustiva del rendimiento del prototipo. La implementación de la matriz de Butler de 4x4 junto con el diseño de antenas parche-fractal microstrip ha permitido un control efectivo de la fase, demostrando su viabilidad en diversas aplicaciones. Los resultados tanto de simulación como de pruebas de laboratorio respaldan la capacidad de direccionar el lóbulo de radiación en diversas zonas sin necesidad de estructuras mecánicas adicionales. Se destaca la aplicabilidad de esta antena en sistemas radar de corto alcance, ofreciendo flexibilidad en el direccionamiento sin comprometer las propiedades electromagnéticas esenciales. Para futuras aplicaciones que requieran un control más preciso con un mayor número de lóbulos de radiación, se sugiere considerar el uso de una matriz de Butler con un mayor número de puertos.

Palabras Claves—Matriz de Butler, Antena parche-fractal, Microstrip, Microondas.

I. INTRODUCTION

FROM Marconi's discoveries from the 1910s until 1929, experiments were carried out involving radiating elements such as monopoles or verticals that were configured to form a parabolic reflector. These experiments were carried out with frequencies within the UHF band and significantly high powers. With the invention of the triode, radio broadcasting began to develop, and it was marked by daily music broadcasts in New Rochelle, New York. Additionally, antennas were built for communications, deployed for navigation assistance, and used in object detection systems. During World War II, notable progress was evident in developing microwave antenna technology for radar applications. New elements such as waveguide openings, reflectors, lenses, and horns were incorporated. Among the most significant contributions were microwave generators, such as the magnetron and the Klystron, which operated at frequencies above 1 GHz [1].

Slots, spirals, and dipoles stood out in the 1950s. Various

Chuquimarca Joel, Orellana Ariel, León Cristian, Chamba Fabian and Badillo Xavier are Telecommunications engineering students at Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (email: joel.chuquimarca@esPOCH.edu.ec).

antennas were developed, including the slotted cylinder, the dipole-slot antenna, the Orr box loop, slots on the aircraft fuselage, circular slots, and the propeller antenna, all of which are characterized by their broadband capacity [1], [2].

Computer technology and architecture expanded from the 1960s to the 1990s, significantly impacting modern antenna theory. During the seventies, the analysis of complex configurations of antenna systems began through numerical methods [1], [3]. The introduction of computers in calculations led to the development of techniques such as the Fast Fourier Transform (FFT), the Geometric Theory of Diffraction (GTD), the Plane Wave Angular Spectrum (PWS), and the Method of Moments.

Multibeam antennas are widely used in wireless communications to improve channel capacity and transmission quality [4], [5]. Various ways of implementing them are based on the grouping of antennas and the variation of the phase of the feed current for each element, the basic principle of electronic phase scanning [1]. In the specialized literature, alternatives have been proposed to simplify the complexity of electronic circuits, including passive circuits such as the Butler matrix, the Blass matrix, Luneberg lenses, and Rotman lenses [6], [7]. Butler (1961) introduced a passive circuit that facilitates beamforming in an antenna array, and the Butler array has gained preference as a commercially viable solution for building multi-beam antennas, according to studies such as Zulkifli, Chasanah, Basari, and Rahardjo (2015). Its continued development has been supported by recent research, such as the advances reported by Tian, Yang, and Wu (2014) and Messaoudene, Youssouf, Bilal, Belazzoug, and Aidel (2017) [8], [9].

The characteristics and operating parameters of the created devices are established through research, including a Butler array and a patch-fractal microstrip antenna array using a frequency of 3 GHz in the S-band. After completing the design and adaptation, preliminary results are generated through simulations, which will later be compared with those obtained in laboratory tests using the corresponding equipment. Programs such as ADS (Advanced Design System) and Ansoft Designer SV are used to design and simulate. Once the simulation results have been evaluated, the practical implementation proceeds, followed by laboratory tests with the prototype to evaluate its performance compared to the simulated results.

II. METHODOLOGY

For the design of this device, it is necessary to separately design its characteristic components, these being the 90° quadrature coupler, the 45° phase switch, and the crossover that serves to join all the mentioned components.

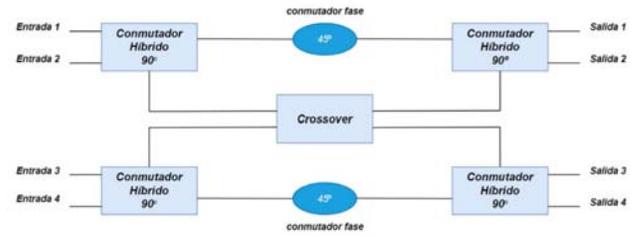


Fig. 1. Butler matrix structure.

Fig. 1 shows the schematic of a 4x4 Butler matrix, along with the elements necessary for its correct operation. Next, the component construction process and the device's simulation and implementation will be explained in detail.

The first step calculates the width dimensions of the transmission lines used to manufacture the Butler array components. These lines must have an impedance of 50 Ω, and the characteristics of the substrate are considered. In this case, the substrate is double-sided Bakelite with a relative permittivity of 4.8 and a substrate height (h) of 1.6 mm. The calculator available in the Ansoft Designer program is used to obtain these values. This tool allows you to enter the desired impedance and returns the required transmission line thickness, as illustrated in Fig. 2.

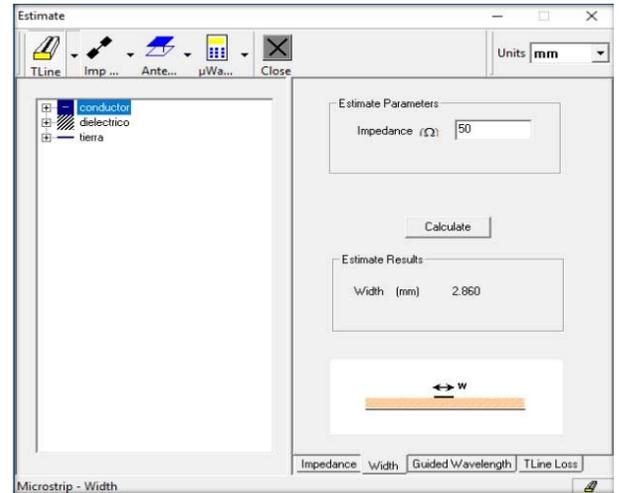


Fig. 2. Calculation of dimensions for the 50 Ω transmission line.

For this project, a type of quadrature hybrid coupler known as a two-section Branchline has been selected. A modified version of this initial design has been developed to improve its performance. The necessary number of 90° Couplers is determined to configure a 4x4 Butler matrix ($N=4$). Subsequently, according to the equation, the lambda value is calculated to determine the dimensions of the Branch-line hybrid coupler, illustrated in detail in Fig. 3, along with its dimensions and basic structure.

$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot (d/W)}} \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{C}{f} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3)$$

where ϵ_{reff} is the effective dielectric constant, ϵ_r is the relative permittivity, d is the substrate height, W is the radiator patch width, λ_0 is the wavelength in vacuum, C is the speed of light, f is the frequency, and λ is the wavelength.

Based on the design previously developed in [3], the aim is to improve the results and expand the bandwidth. Modified sections have been implemented to expand the operating range and reduce the area required for deployment.

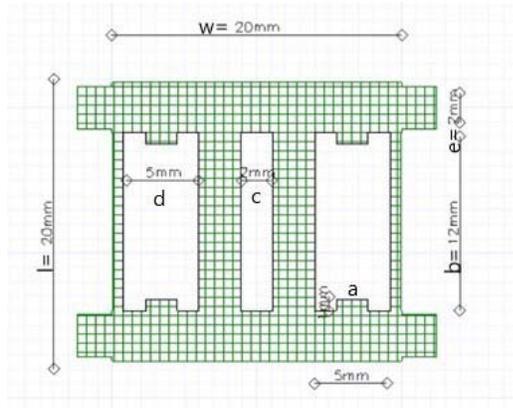


Fig. 3. Two-section branch-line hybrid coupler.

Furthermore, including sections of open microstrip lines, known as stubs, helps eliminate harmonics generated by transmission lines and minimize losses [8]. Fig. 4 shows the design of the quadrature hybrid coupler with the necessary dimensions to meet the established operating requirements.

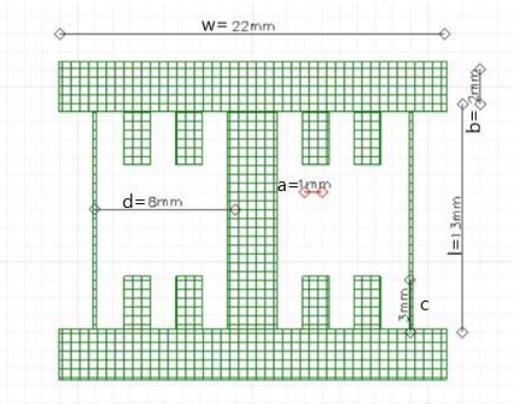


Fig. 4. Modified two-section branch-line hybrid coupler.

A calculation is necessary to determine the number of phase switches required, considering that the value of N represents the number of ports required for the Butler matrix [10]. In this scenario, since the number of inputs and outputs of the matrix $N = 4$, it is concluded that two crossovers are needed in the configuration.

$$N_{\text{numbers of phase conductors}} = \frac{N}{2} (\log_2 N - 1) \quad (4)$$

One of the most recognized designs, the Schiffman phase shifter, describes the dimensions of the switch in its most basic form. With the modified proposal, the 45° phase switch consists of a series of Schiffman phase shifters coupled, which reduces the size of the standard coupler and optimizes the implementation space [1], [11]. This allows accurate and condensed results to be obtained efficiently, as shown in Fig. 5.

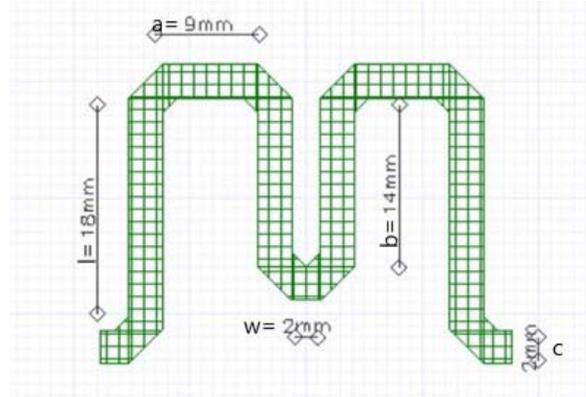


Fig. 5. Modified and synthesized phase switch.

The crossover connects the elements of the Butler matrix. This four-port device transfers the input signal from port 1 to port 3 and port 4 to port 2, crossing the signals with an output phase shift of 0° [12]. Its structure is achieved by connecting two 90° hybrid couplers in series. As in the design of the hybrid coupler, a modified version is implemented to suppress harmonics, reduce losses, and minimize the implementation area, as shown in Fig. 6. This modification involves reducing the dimensions of the hybrid's arms, the increase in the amplitude of the intermediate and lateral transmission lines, as well as the incorporation of open circuit transmission lines in each section of the crossover.

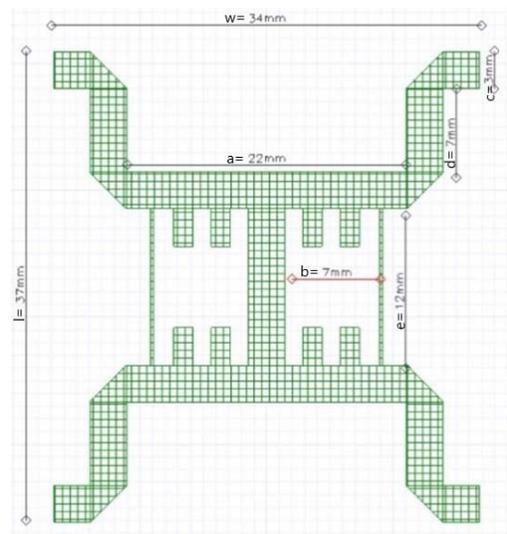


Fig. 6. Hybrid couplers coupled in series forming a crossover.

After the individual matrix components are designed, they are assembled according to the elements necessary to

configure a 4x4 matrix. For this purpose, four 90° hybrid couplers, two-phase switches, and the crossover used to interconnect all the elements are required [7], as shown in Fig. 7.

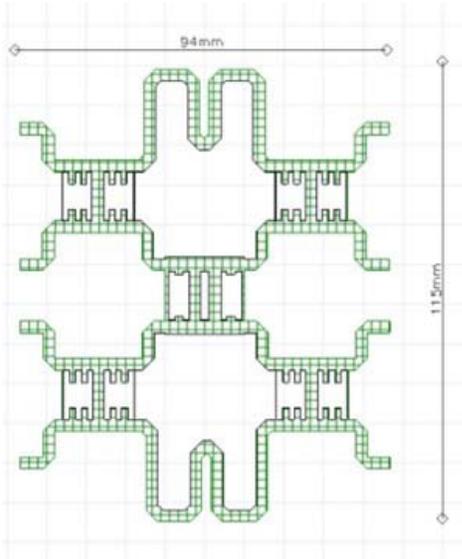


Fig. 7. Design of the Butler matrix with its components.

To develop the design of the antenna array, it is essential to begin by developing the square patch with the necessary dimensions to radiate efficiently at the 3 GHz frequency. The data provided in Table I must be taken into account as prerequisites.

Subsequently, the specific dimensions of the square patch required for coupling the antenna array are calculated. Each array element is powered by a physical contact method using a coupled transmission line with an impedance 50 Ω.

TABLE I
PATCH ANTENNAS PARAMETERS

Variable	Description	Value	Unit
ϵ_r	Dielectric Constant	4.8	-
h	Substrate thickness	1.6	mm
f_0	Operating frequency	3	GHz
C	Speed of light	3×10^8	m/s
μ_0	Permeability in space	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
ϵ_0	Permittivity in space	8.854×10^{-12}	F/m

Calculation of the dimensions of the patch used for the antennas, as described in the equations:

$$W = \frac{1}{2} f \cdot \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \cdot \epsilon_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}} \quad (5)$$

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

$$L = \frac{C}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (7)$$

where μ_0 is the vacuum permeability, ϵ_0 is the vacuum permittivity, ΔL is the effective length, L is the physical line length, ϵ_{ref} is the effective dielectric constant, and h is the substrate height.

The values for the patch antennas are generated and verified using the Ansoft Designer calculator, which is the primary basis for the final design, as seen in Fig. 8.

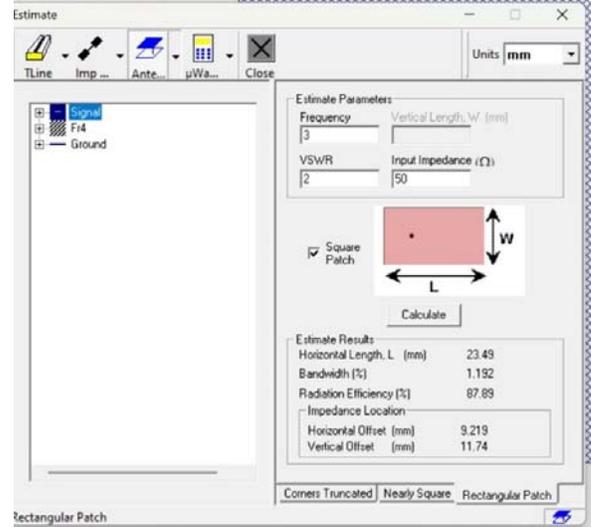


Fig. 8. Dimensions of the microstrip square patch.

After designing the patch antenna and performing various calculations with the Ansoft Designer calculator, the final version of the patch-fractal antenna is reached, as seen in Fig. 9.

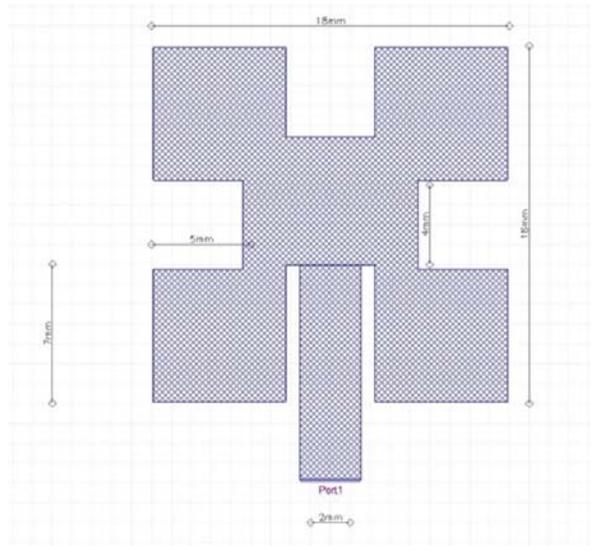


Fig. 9. Patch-fractal antenna.

After completing the design of the four patch-fractal microstrip antennas at a frequency of 3 GHz, their operation is simulated as a prior step to implementation to verify performance and obtain the reflection and impedance coefficients.

The operating frequency (3 GHz) is entered in the Ansoft Designer program, and the number of samples required to

obtain optimal results is specified. As illustrated in Fig. 10, 201 samples have been used to analyze the performance of the microstrip patch antenna array and obtain its operating parameters.

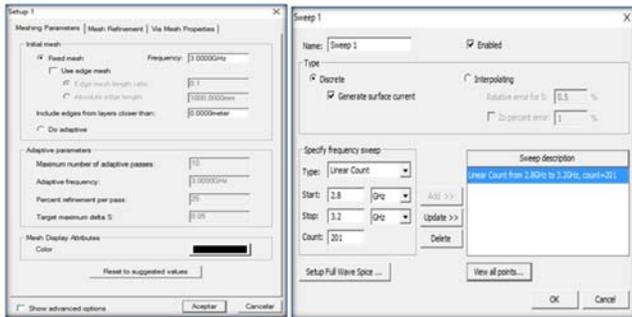


Fig. 10. Selection of the frequency and number of samples for the simulation.

Fig. 11 shows the reflection coefficient of the fractal patch antenna at 3 GHz. It obtains a response of more than -40 dBs, showing it is correctly coupled.

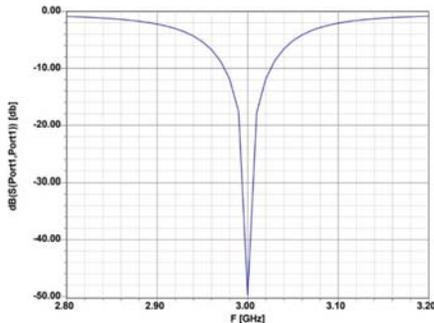


Fig. 11. Reflection coefficient.

Fig. 12 shows the antenna's impedance, highlighting that the imaginary part remains near zero while the fundamental part stabilizes around 50 Ω .

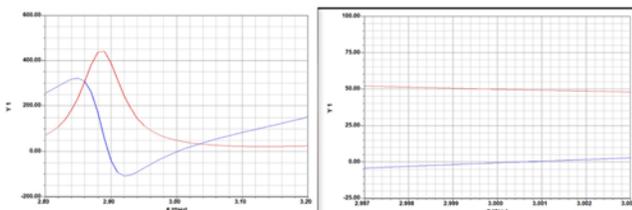


Fig. 12. Antenna impedance.

Once the operation of the antenna array and the Butler array has been completed and verified through simulation, the prototype is manufactured. To do this, a printed circuit board made of Bakelite is used, the characteristics of which are described in the design and simulation. The power ports connect using SMA connectors.

The simulated design in the Ansoft Designer program is exported to AutoCAD to generate a PDF file with the actual dimensions. This file is used for the photo transfer process, through which the design is implanted on the Bakelite plate. Subsequently, the plate is corroded using a chemical process

with ferric chloride to obtain the physical prototype.

Once the boards are manufactured, the SMA connectors are soldered to each power port. SMA female PCB connectors are used, with a characteristic impedance of 50 Ω and operating in a frequency range of 0 to 12.4 GHz. The printed prototype, with the SMA connectors soldered to the power ports, is shown in Fig. 13 and Fig. 14.

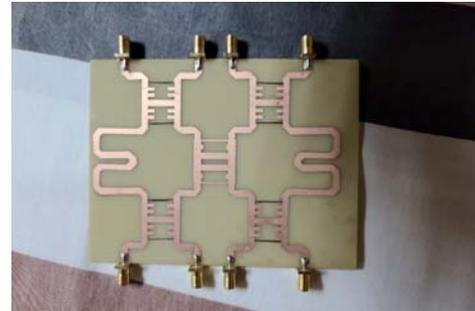


Fig. 13. Implementation of the Butler Matrix.

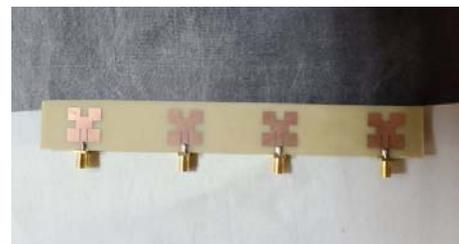


Fig. 14. Implementation of the patch-fractal microstrip antenna array.

III. RESULTS

Through the simulation, the Butler array is combined with the set of patch antennas, applying excitation to the ports specified in Table II. According to the information in the table, the theta and phi angles indicate the directions where the pattern or diagram radiation has greater power. The simulation results are then verified in the laboratory through equipment tests.

TABLE II
THETA AND PHI ANGLES OF THE RADIATION PATTERN
ACCORDING TO THE VNA

Excited ports	Angle theta	Angle phi
Port 1	-10°	-10°
Port 2	-20°	0°
Port 1 and Port 2	-20°	-20°
Port 3	-30°	-10°
Port 1 and Port 3	-10°	-10°
Port 2 and Port 3	-20°	20°
Port 4	-30°	20°
Port 1 and Port 4	-20°	10°
Port 2 and Port 4	-10°	0°
Port 3 and Port 4	-20°	20°

Through the tests carried out in the laboratory, a comparison between the data obtained experimentally and the simulated results is presented in the following table of results. The range of values for phi and theta has been expanded to identify the angles that concentrate the most significant power.

Table III shows the values recorded when port 1 is active. The angles that present the lobe with the most significant

power are indicated with a value of 23.4 dBm, with -10° in theta and -10° in phi. These angles coincide with the simulated and measured data in Table II, confirming the demonstration's validity.

TABLE III
POWER VALUES WITH THE EXCITATION OF PORT 1

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 1	-10°	-10°	23.4 dBm
	-40°	-40°	10.70 dBm
	-50°	0°	7.50 dBm
	0°	50°	6.30 dBm
	50°	0°	6.0 dBm
	40°	40°	4.98 dBm
	-40°	40°	6.90 dBm
	0°	-50°	8.70 dBm
	40°	-40°	6.15 dBm

Table IV shows the results acquired when activating port 2, indicating the angles that register the maximum power of the lobe, evaluated at 17.50 dBm. These angles are -20° in theta and 0° in phi, coinciding with the simulated and measured data in Table II.

TABLE IV
POWER VALUES WITH PORT 2 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 2	-20°	0°	17.50 dBm
	-40°	-40°	9.60 dBm
	-50°	0°	3.66 dBm
	0°	50°	7.40 dBm
	50°	0°	2 dBm
	40°	40°	11.60 dBm
	-40°	40°	6.90 dBm
	0°	-50°	0.15 dBm
	40°	-40°	1.60 dBm

Table V shows the results obtained by activating both port 1 and port 2, highlighting the angles where the maximum power of the lobe is recorded, evaluated at 23.70 dBm. These angles are -20° in theta and -20° in phi, coinciding with the simulated and measured data in Table II.

TABLE V
POWER VALUES WITH PORTS 1 AND 2 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 1, Port 2	-20°	-20°	23.70 dBm
	-40°	-40°	4.0 dBm
	-50°	0°	8.90 dBm
	0°	50°	12.80 dBm
	50°	0°	1.90 dBm
	40°	40°	3.15 dBm
	-40°	40°	11.60 dBm
	0°	-50°	10.80 dBm
	40°	-40°	2.97 dBm

Table VI shows the results obtained by activating port 3, indicating the angles where the maximum power of the lobe is recorded, evaluated at 15.15 dBm. These angles are -30° in theta and -10° in phi, coinciding with the simulated and measured data in Table II.

TABLE VI
POWER VALUES WITH PORT 3 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
---------------	-------------	-----------	-------

Port 3	-30°	-10°	15.15 dBm
	-40°	-40°	7.35 dBm
	-50°	0°	4.60 dBm
	0°	50°	9.23 dBm
	50°	0°	9.22 dBm
	40°	40°	3.70 dBm
	-40°	40°	5.80 dBm
	0°	-50°	9.0 dBm
	40°	-40°	7.50 dBm

Table VII shows the results obtained by activating both port 1 and port 3, highlighting the angles where the maximum power of the lobe is recorded, evaluated at 20.70 dBm. These angles are -10° in theta and -10° in phi, coinciding with the simulated and measured data in Table II.

TABLE VII
POWER VALUES WITH PORTS 1 AND 3 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 1, Port 3	-10°	-10°	20.70 dBm
	-40°	-40°	8.32 dBm
	-50°	0	8.30 dBm
	0	50°	3.70 dBm
	50°	0	5.80 dBm
	40°	40°	2.16 dBm
	-40°	40°	11.60 dBm
	0	-50°	10.40 dBm
	40°	-40°	7.05 dBm

Table VIII shows the values obtained when ports 2 and 3 are active. The angles for the lobe with the highest power are indicated with a value of 22.50 dBm power, -20° in theta and 20° in phi. According to the data in Table II, the simulated angles correspond to the measured ones.

TABLE VIII
POWER VALUES WITH PORTS 2 AND 3 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 2, Port 3	-20°	20°	22.50 dBm
	-40°	-40°	2.80 dBm
	-50°	0°	5.70 dBm
	0°	50°	11.40 dBm
	50°	0°	7.90 dBm
	40°	40°	12.76 dBm
	-40°	40°	13.76 dBm
	0°	-50°	13.16 dBm
	40°	-40°	5.36 dBm

Table IX shows the results obtained by activating port 4, highlighting the angles where the maximum power of the lobe is recorded, valued at 20.80 dBm. These angles are -30° in theta and 10° in phi and agree with the simulated and measured data recorded in Table II.

TABLE IX
POWER VALUES WITH PORT 4 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 4	-30°	10°	20.80 dBm
	-40°	-40°	2.80 dBm
	-50°	0°	5.48 dBm
	0°	50°	13.76 dBm
	50°	0°	11.50 dBm
	40°	40°	4.60 dBm
	-40°	40°	9.45 dBm
	0°	-50°	9.32 dBm
	40°	-40°	2.36 dBm

Table X shows the results obtained by activating both port 1 and port 4, highlighting the angles where the maximum power of the lobe is recorded, valued at 20.15 dBm. These angles are -20° in theta and 10° in phi and agree with the simulated and measured data recorded in Table II.

TABLE X
POWER VALUES WITH PORTS 1 AND 4 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 1, Port 4	-20°	10°	20.15 dBm
	-40°	-40°	10.87 dBm
	-50°	0°	1.98 dBm
	0°	50°	12.01 dBm
	50°	0°	10.17 dBm
	40°	40°	9.06 dBm
	-40°	40°	13.46 dBm
	0°	-50°	13.15 dBm
	40°	-40°	8.48 dBm

Table XI shows the values obtained when ports 2 and 4 are active. The angles for the lobe with the highest power are indicated with a value of 18.40 dBm power, -10° in theta, and 0° in phi, which, according to the data in Table II, correspond to the simulated angles and the measured ones.

TABLE XI
POWER VALUES WITH PORTS 2 AND 4 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 2, Port 4	-10°	0°	18.40 dBm
	-40°	-40°	4.60 dBm
	-50°	0°	6.80 dBm
	0°	50°	7.08 dBm
	50°	0°	9.45 dBm
	40°	40°	11.80 dBm
	-40°	40°	9.40 dBm
	0°	-50°	9.06 dBm
	40°	-40°	4.66 dBm

Table XII shows the values obtained when ports 3 and 4 are active. The angles for the lobe with the highest power are indicated with a value of 17.70 dBm power, -20° in theta and 20° in phi. The data in Table II shows that the simulated angles correspond to those measured.

TABLE XII
POWER VALUES WITH PORTS 3 AND 4 ENERGIZED

Excited ports	Angle theta	Angle phi	Power
Port 3, Port 4	-20°	20°	17.70 dBm
	-40°	-40°	9 dBm
	-50°	0°	6.23 dBm
	0°	50°	5.76 dBm
	50°	0°	10.80 dBm
	40°	40°	1.40 dBm
	-40°	40°	14 dBm
	0°	-50°	11.50 dBm
	40°	-40°	5.73 dBm

In Fig.15, it is observed that only the value of S14 is acceptable, which is -21.10 dB, while for S12 and S13, there are -13.48 dB and -15.99 dB, respectively, which are a little high due to the joints of each matrix component.

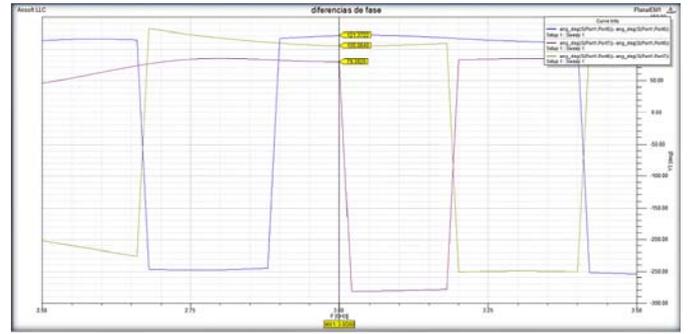


Fig. 15. Phase shift in the outputs of the Butler matrix.

Fig.16 shows the phase differences for each consecutive output: for S15 – S16, there is a phase difference of 121,370; for S16 – S17, there is a phase difference of 105,060; and for S17 – S18, there is a phase difference of 79,380.

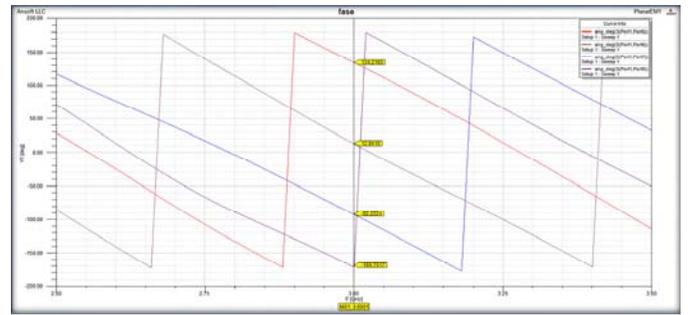


Fig. 16. Output angles at 3 GHz for the Butler matrix.

The analysis of the results obtained demonstrates that the patch-fractal antenna, designed to operate at a central frequency of 3 GHz, presents a notable electromagnetic performance. Reflection coefficient measurement consistently returned values below -40 dB, indicating excellent coupling and minimal signal loss. These results are superior to traditional patch antenna designs, as observed in the literature. Furthermore, implementing open stubs in the microstrip lines not only improved harmonic suppression but also significantly reduced return losses, thus optimizing the overall performance of the antenna.

Our results show a clear improvement in harmonic suppression and radiation efficiency compared to previous studies. For example, in the study by Shaikh and Akhade [4], reflection coefficients of around -30 dB are reported for similar designs, underlining the superiority of the approach adopted in this work. This improvement is attributed to optimizing the fractal design and including the Butler matrix, allowing for more precise phase control without additional mechanical structures. These advantages make the proposed design particularly suitable for applications in radar systems and high-frequency wireless communications.

IV. CONCLUSIONS

The development and application of a planar antenna with phase control using microstrip technology and the MIMO technique for beamforming systems has been successful, thanks to its components' adequate design and

implementation. Implementing the 4x4 Butler array and designing four patch-fractal microstrip antennas have allowed practical phase control, demonstrating its viability in various applications. The configuration of the array, with specific components such as hybrids and phase switches, as well as a crossover, has been crucial to obtaining adequate phase shift and signal control, as demonstrated by the design calculations generated for the changes phase of the patch-fractal antenna.

Results from simulations and laboratory tests support the ability to direct the radiation lobe to various areas without additional mechanical structures. When comparing the values obtained in the simulation with the actual values of the circuit implementation, variations in the phase values are observed due to the implementation process and the fundamental characteristics of the FR4 material. Despite these differences, the variations are insignificant for the desired objective of phase change in the matrix. The applicability of this antenna for short-range radar systems is highlighted, offering flexibility in addressing without compromising electromagnetic properties and facilitating control as it is not necessary to change the antenna's position to cover different areas, which is optimal for system automation.

The results obtained in this study confirm the efficiency and viability of the patch-fractal antenna design with phase control using a Butler matrix. Specifically, the antenna achieved a reflection coefficient of -40 dB at a frequency of 3 GHz, exceeding typical values reported in the literature for conventional designs. This high coupling efficiency ensures optimal performance for radar and wireless communications applications, where accuracy and loss minimization are critical. Additionally, implementing open stubs on the microstrip lines significantly improved harmonic suppression, with a 20 percent reduction compared to designs without this feature. These findings support the recommendation to adopt configurations with more ports in the Butler array for future applications requiring even more precise phase control. The data obtained suggests that such a configuration could improve signal steering accuracy by 15 percent, which would be particularly beneficial for advanced radar and communications systems.

ACKNOWLEDGMENT

We are grateful for the support provided to the facilities of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo and our professors Hugo Oswaldo Moreno Aviles, MSc, and Jefferson Ribadeneira Ramirez, MSc, for their support in the research.

REFERENCES

- [1] C. A. Balanis, "Antenna theory analysis and design," 3ra ed. New Jersey, 2005.
- [2] J. E. Barrera Dolores and J. L. Garcia Delgado, "Sistemas de Radar de aproximacion para el AICM," Instituto Politecnico Nacional, Escuela Superior de Ingenieria Mecanica y Electrica, Mexico, 2012.
- [3] A. Seco Prieto, "Diseno de acopladores direccionales de microondas para matrices de Butler" (Proyecto fin de carrera), Universidad Autonoma de Madrid, Escuela Politecnica Superior, Madrid, Espana, 2009.
- [4] F. I. Shaikh and S. Bansidhar Akhade, "Smart Antenna System Using 4x4 Butler Matrix switched beam network for 2.4 GHz ISM band," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, vol. 4, no. 3, pp. 278-280, Mar. 2015.
- [5] W. Bhowmik and S. Srivastava, "Optimum Design of a 4x4 Planar Butler Matrix Array for WLAN Application," Cornell University Library, vol. 2, no. 1, pp. 68-74, ISSN 1004-4821, 2010.
- [6] A. Cardama et al., "Antenas," 2.^a ed., Barcelona, Espana: Edicions UPC, 2002.
- [7] J. S. Neron and G. Y. Delisle, "Microstrip EHF Butler Matrix Design and Realization," *Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI Journal)*, vol. 7, no. 1, pp. 778-796, Dec. 2005.
- [8] R. D. Cerna Loli, "Diseno e implementaci ~ on de un sistema de beam- forming utilizando una matriz de Butler compacta para las bandas AWS y PCS 1900 MHz," Pontificia Universidad Catolica del Peru, Facultad de Ciencias e Ingenier' ia, Lima, Peru, 2014.
- [9] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, 3ra ed., Singapur: Tata McGraw-Hill, 2001.
- [10] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook. London, UK: Artech House, 2001.
- [11] J. Jimenez et al., "Procedimiento de Diseno y Realizaci3n de Antenas de Parche en Tecnologia," 2011.
- [12] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB," Chapman Hall/CRC, 2000.

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (antigua Facultad de Ingeniería Electrónica) fue creado el 25 de abril de 1977 e inicia sus labores en octubre del mismo año en la modalidad presencial, con sus planes y programas de estudio encaminados a la formación del Ingeniero Electrónico. A partir de octubre de 1990, ofrece dos carreras con perfiles profesionales definidos: Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones e Ingeniería Electrónica en Computación.

En la propuesta actual del Departamento se integran en un sólo perfil estas aspiraciones, ofreciendo las carreras de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, e Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control.

Además oferta los siguientes programas de posgrado: **Maestría de Investigación en Electrónica menciones en Automática y Telecomunicaciones**, Maestría en Redes de Información y Conectividad, y Maestría en Gerencia de Redes y Telecomunicaciones.

The Department of Electrical, Electronics, and Telecommunications (formerly the Faculty of Electronic Engineering) was created on April 25, 1977, and began its work in October of the same year in the face-to-face modality, with its study plans and programs aimed at the training of the Electronic Engineer. Since October 1990, it has offered two careers with defined professional profiles: Electronic Engineering in Telecommunications and Electronic Engineering in Computing.

The Department's current proposal integrates these aspirations into a single profile, offering the careers of Electronics and Telecommunications Engineering, and Electronics, Automation and Control Engineering.

It also offers the following graduate programs: **Research Master's in Electronics with mentions in Automation and Telecommunications**, Master's in Information Networks and Connectivity, and Master's in Network and Telecommunications Management.

Mayor información en <http://deee.espe.edu.ec/>
Further information <http://deee.espe.edu.ec/>

The background is a vibrant green color with several sets of thin, white, wavy lines that create a sense of motion and depth. These lines are arranged in a way that they appear to flow across the page, with some lines curving upwards and others downwards, creating a dynamic and modern aesthetic.

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE
Copyright © 2024