

ISSN 1390-6712

MASKAY

Vol. 16, No.2

Revista MASKAY

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

DIRECTOR DEL DEEL

Tcn. Cristian Manrique Arias Espinosa, Mgtr.

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 autores correspondientes. Mayor información en <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/maskay>.

Presentación

El Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, consciente de su gran responsabilidad hacia la sociedad, busca proponer e impulsar iniciativas orientadas a fomentar el desarrollo integral de la ingeniería eléctrica y electrónica en el Ecuador. Como resultado de este compromiso, en 2011 nació la revista Maskay. Esta revista sintetiza de manera documentada los esfuerzos de investigación y desarrollo realizados por 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 un 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 at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, aware of its responsibility to society, seeks to propose and promote initiatives that 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 of 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 content, the MASKAY Journal has a **DOI (Digital Object Identifier)** number, registered and validated by **Crossref**, which enables easy access to its content online.

Diego Arcos Avilés
Editor-in-Chief

Contenido / Table of Contents

Artículos técnicos / Technical papers

Antena monopolo tipo Tap alimentada por microcinta con rendimiento ultraancho para aplicaciones en IoT y 5G

Microstrip-fed tap monopole antenna with ultra-wideband performance for IoT and 5G applications

DOI: 10.24133/maskay.v16i2.4159

Henry Mayorga, Kelly Baño Cando, James Neira Veloz 1

Evaluación del rendimiento y escalabilidad en redes SDN usando sFlow

Evaluation of performance and scalability in SDN networks using sFlow

DOI: 10.24133/maskay.v16i2.4203

Sebastian Ruiz, Esthefanny Bonilla, Madelaine Muñoz 6

Factibilidad técnica – económica: Cobertura LTE en banda de 700 MHz en la comuna El Tambo

Technical-economic feasibility: LTE coverage in the 700 MHz band in the El Tambo commune

DOI: 10.24133/maskay.v16i2.4286

José Regatto, Daniel Jaramillo 13

Algoritmo adaptativo para consumo energético en redes de internet de las cosas

Adaptive algorithm for energy consumption in Internet of Things networks

DOI: 10.24133/maskay.v16i2.4294

Santiago Meneses, Emilio Zhuma, Milton Bajaña, Diego Intriago 25

Microstrip-fed tap monopole antenna with ultra-wideband performance for IoT and 5G applications

Antena monopolo tipo Tap alimentada por microcinta con rendimiento ultraancho para aplicaciones en IoT y 5G

Henry Mayorga Pérez, Kelly Baño and James Neira

Abstract—In this paper, a planar microstrip-fed tab monopole antenna is designed and presented for ultra-wideband (UWB) wireless communication applications. The impedance bandwidth of the antenna is enhanced by adding a slit on one side of the monopole, introducing a tapered transition between the monopole and the feed line, and incorporating a two-step staircase notch in the ground plane. The proposed antenna would be printed on an Epoxy FR4 substrate, has a small size of 16×19mm, and provides an ultra-wide bandwidth from 1.2 to 20.8 GHz with a low VSWR level and good radiation characteristics, satisfying the requirements of current and future wireless communications systems.

Index Terms—Ultra wideband, IoT, microstrip-fed, monopole antenna.

Resumen—En este artículo se diseña y presenta una antena monopolo en tapa con alimentación Microstrip para aplicaciones de comunicaciones inalámbricas de ultrabanda ancha (UWB). El ancho de banda de impedancia de la antena se mejora mediante la adición de una ranura en un lado del monopolo, la introducción de una transición gradual entre el monopolo y la línea de alimentación, y la incorporación de una muesca escalonada de dos niveles en el plano de tierra. La antena propuesta se imprimiría sobre un sustrato de Epoxy FR4, tiene un tamaño reducido de 16×19 mm y proporciona un ancho de banda ultraancho desde 1.2 hasta 20.8 GHz, con un bajo nivel de VSWR y buenas características de radiación, lo que satisface los requisitos de los sistemas de comunicaciones inalámbricas actuales y futuros.

Palabras Claves—Ultra Banda Ancha, Iot, Alimentación Microstrip, Antena monopolo.

I. INTRODUCTION

THE technologies for wireless communications always need additional improvements to meet higher resolution and data requirements. That's why the Federal Communications Commission (FCC) reviewed ultra-wideband communications systems covering 3.1 GHz to 10.6 GHz in

February 2002, which are currently under development. There is always an increasing demand for smaller sizes, higher capacities, and transmission speeds, which will undoubtedly require a higher operating bandwidth in the near future. Planar tap monopole antennas have been extensively adopted and studied for UWB communications systems due to their numerous features, including a wide impedance bandwidth, a simple structure, a small size, a low profile, and omnidirectional radiation patterns. A variety of wideband tap monopole configurations, including rectangular, elliptical, pentagonal, and hexagonal, have been proposed for UWB applications. Wide impedance bandwidth of (1:1.7), (1:2.25), and (1:7.9) for VSWR=2, and a small antenna size of 16:30 and 16 mm are reported in [1]-[6], respectively. These reported results demonstrate the ongoing research and development efforts aimed at optimizing UWB antenna designs, with a focus on achieving wider bandwidths and miniaturization. The challenge lies in balancing these performance requirements with practical considerations such as cost-effectiveness and ease of integration into devices [7], [8]. This document presents a proposal for a modified printed tap monopole antenna for UWB applications. The presented antenna exhibits an ultra-wide impedance bandwidth of (1:7.9), and a small approximate size of 16 mm, which is less than or equal to the antennas presented in [9].

II. PARAMETERS FOR ANTENNA DESIGN

The proposed antenna has a small size, with approximate measurements of 16 x 19 mm, and would provide an ultrawide bandwidth with a low VSWR level. Fig. 1 illustrates the design of the top layer, which features a Rectangular Patch, Slit, Tapered Transition, and Feedline. Fig. 2 shows the design of the Bottom layer, where the Ground Plane with Notch is located. This antenna was created with FR4 Epoxy substrate.

Mayorga Henry, Baño Kelly, and Neira James are with the Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (email: {henry.mayorga, kelly.banio, james.neira}@epoch.edu.ec).

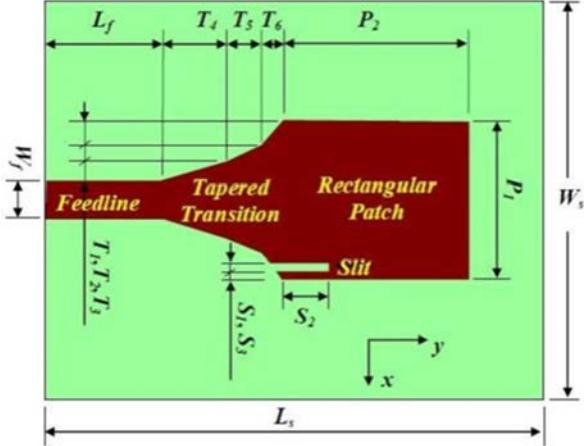


Fig. 1. The geometry and parameters of the proposed planar tap monopole antenna on the top layer.

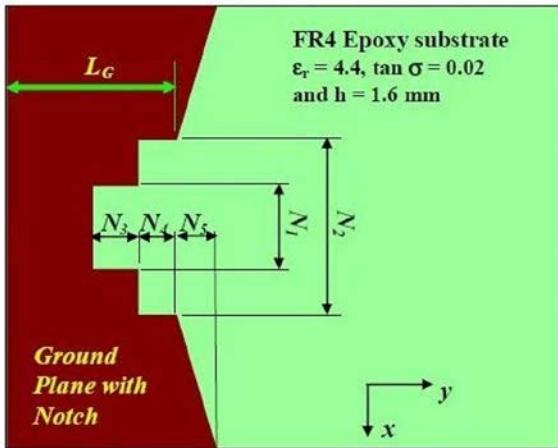


Fig. 2. The geometry and parameters of the proposed planar tap monopole antenna on the bottom layer.

III. ANTENNA GEOMETRY

The patch is connected to a feed line of width W_f and length L_f through a tapered transition, which is defined by the parameters T_1 to T_6 , as shown in Fig. 1. The tapering produces a smooth transition, which reduces the reflections resulting from the sudden change from the feedline width to the patch width. On the other side of the substrate, a conducting ground plane of width (W_s) and length (L_G) is placed. The truncated ground plane plays a crucial role in the broadband characteristics of this antenna, as it helps match the patch to the feedline over a wide frequency range [10], [11]. This is because the truncation creates a capacitive load that neutralizes the inductive nature of the patch, producing nearly pure resistive input impedance. To further enhance the matching, a two-step staircase notch is embedded in the truncated ground plane. The notch is defined by the parameters N_1 to N_4 as depicted in Fig. 2.

IV. NUMERICAL ANALYSIS

The initial dimensions of the antenna are as follows: (1) Substrate: $W_s = 16$, $L_s = 19$, (2) Patch and Slit: $P_1 = 7$, $P_2 = 9$, $S_1 = 0.3$, $S_2 = 2.5$, $S_3 = 0.5$, (3) Tapered Transition: $T_1 = 1$, $T_2 = 0.75$, $T_3 = 0.75$, $T_4 = 4$, $T_5 = 1$, $T_6 = 1$, (4) Feedline:

$W_f = 2$, $L_f = 3$, and (5) Ground and Notch: $L_G = 4$, $N_1 = 7$, $N_2 = 5$, $N_3 = 1.5$, $N_4 = 1$, $N_5 = 0$ mm. In this study, the parameters T_4 : T_6 and S_2 are presented in figures from Fig. 3 to Fig. 8, respectively, to illustrate the effect of the tapered transition [12], [13] and the slit on the VSWR of the antenna. The VSWR is computed over a large bandwidth, from 2 to 21 GHz, using the commercial computer software package Ansys from Ansoft.

Fig. 3, 4, and 5 show the effects of T_4 , T_5 , and T_6 , respectively. Generally, increasing these parameters improves the overall VSWR level because the transition from the feedline to the monopole becomes smoother. The parameter T_4 has more effect in the middle range. Additionally, increasing T_4 decreases the upper operating frequency, resulting in a decrease in bandwidth after T_4 reaches 5 mm [8]. The parameter T_6 can be used to enhance the VSWR at higher frequencies, thereby improving the bandwidth. The maximum bandwidth occurs at $T_6 = 1.5$ mm.

The slit length S_2 and the slit distance from the edge S_3 control the VSWR level at 11.5 GHz. This is mainly because these two parameters control the impedance of the arm to the right of the slit, which can be considered an open circuit stub [14], [15].

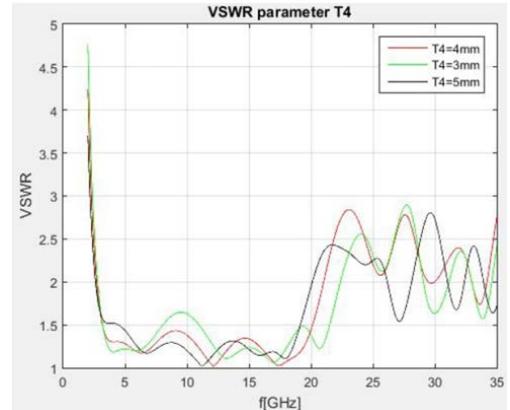


Fig. 3. The effect of the tapered transition parameter T_4 .

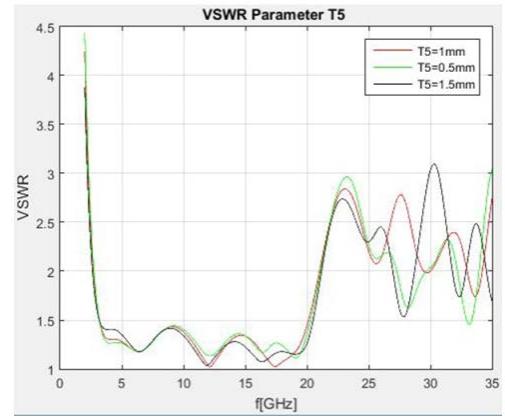


Fig. 4. The effect of the tapered transition parameter T_5 .

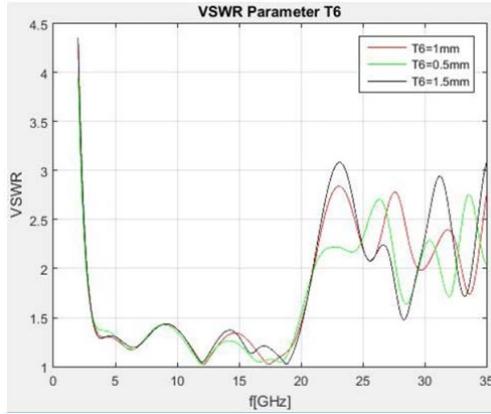


Fig. 5. The effect of the tapered transition parameter T_6 .

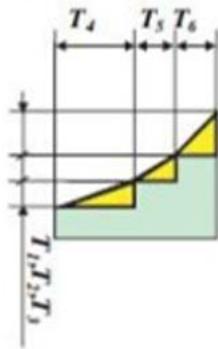


Fig. 6. The effect of the tapered transition parameters exposed previously.

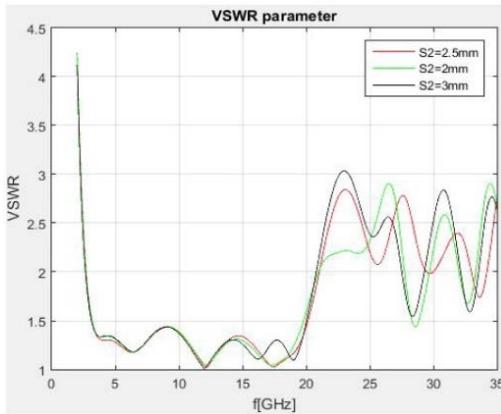


Fig. 7. The effect of the tapered slit parameter S_2 .

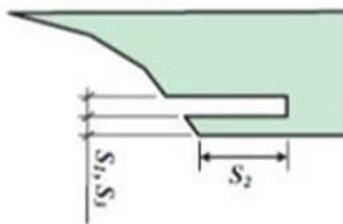


Fig. 8. The effect of the tapered slit parameters S .

V. FINAL DESIGN

The best bandwidth and VSWR level are achieved for the antenna with $N_2 = 4$ mm, where the antenna remains functional up to 15 GHz. Therefore, the VSWR is recomputed up to 18 GHz using Ansys. The results show that

the antenna operates over a wide range that extends from 2 to 21 GHz, which is (1:7.8). The VSWR level is less than 1.5 in almost the entire operating band. The low VSWR level is achieved through the tapered transition and the good matching provided by the two-step staircase notch, as shown in Fig. 9. The average value of the real part of the resulting input impedance is approximately 50 ohms. In contrast, the imaginary part fluctuates slightly around zero. This supports the aforementioned explanation of how truncating the ground plane and introducing a staircase notch within it produces an almost pure resistive input impedance.

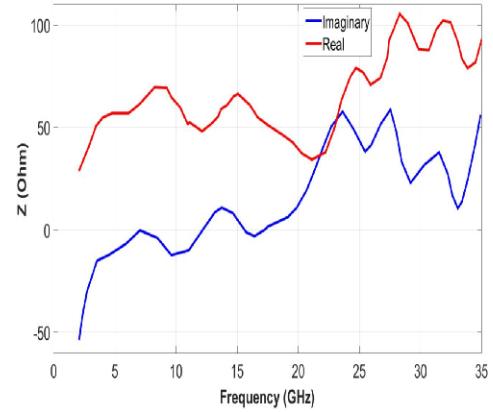


Fig. 9. The computed Z parameter in its real and imaginary parts.

The E-plane radiation patterns for the 3D simulated monopole tap antenna are shown in Fig. 10, while Figs. 11 and 12 present the results for the antenna implemented using the spectrum analyzer [16], [17].

Fig. 12 shows the area of interest that goes from 0 to 90 degrees, with a HPBW of 40 degrees, while Fig. 13 shows the reflection coefficient. As can be observed, there are two pronounced dips at 12 and 17 GHz.

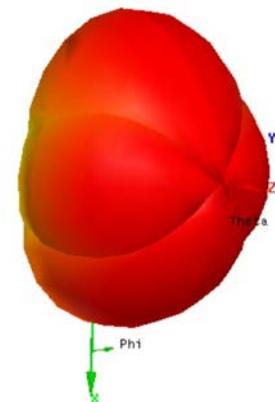


Fig. 10. The computed radiation pattern in the E theta and E phi in dB, at 0 degrees and 90 degrees.

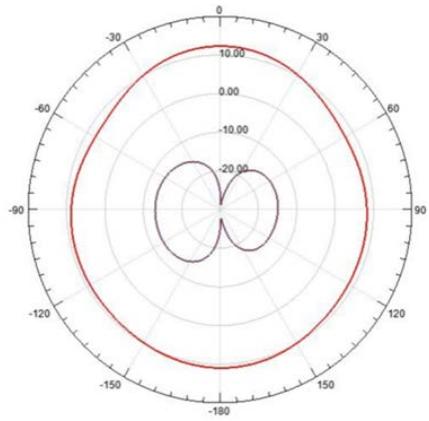


Fig. 11. The real radiation pattern in the E phi in dB, at 0 degrees and 90 degrees.

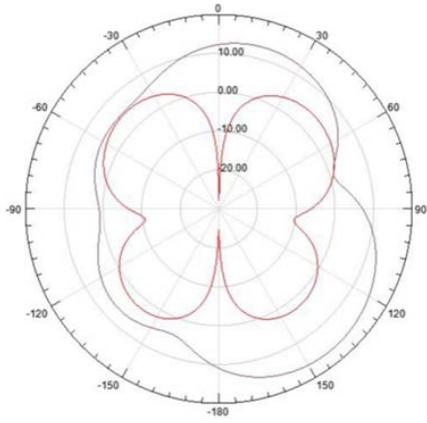


Fig. 12. The real radiation pattern in the E theta in dB, at 0 degrees and 90 degrees.

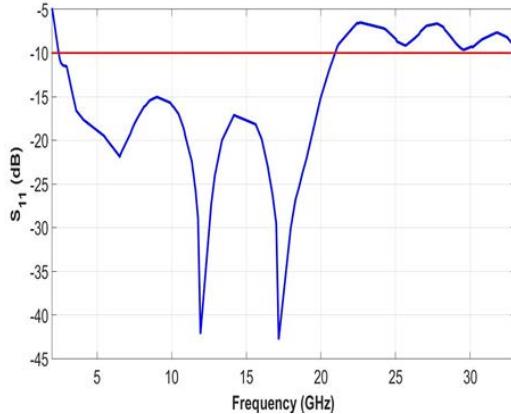


Fig. 13. The S parameter that indicates the bandwidth is from 2 to 21 GHz.

VI. MEASUREMENTS

The block diagram in Fig. 14 represents the antenna measurement, which connects the transmitting antenna via the SMA connector to the generator model MG3692C, spanning frequencies from 0 to 20 GHz. The signal range was configured to verify the gain within the bandwidth in which the antenna operates. The same procedure is performed with the receiving antenna connecting it to the spectrum analyzer Anritsu model MS2724C from 9 kHz to 20 GHz, the measurements were performed inside the semi-anechoic

chamber available at the Faculty of Informatics and Electronics of the ESPOCH, to avoid external interference from the environment, in FAR FIELD in steps of 0.1 obtaining 180 points frequency vs. gain to verify the simulated bandwidth.

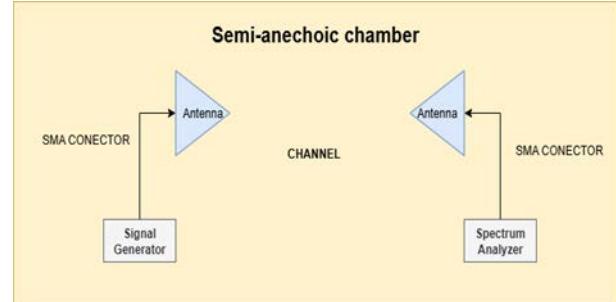


Fig. 14. Block diagram used in the measurement of the antenna.

VII. IMPLEMENTATION AND RESULTS ANALYSIS

Once the antenna is optimized, we proceed to the physical construction of the antenna. For this, the dielectric used is FR4, with a thickness of 1.5 mm and dimensions of 16 mm and 19 mm in length and height, respectively. An SMA connector is connected to the patch and the antenna ground, as shown in Fig. 15. As can be seen, the antenna is so small that it resembles the size of a penny coin. In the results, we observe a slight variation compared to the simulation results. Three frequencies do not work correctly. This is due to the incorrect implementation of the slit, because in the print, this slit is not visible. This is the reason why Figure 16 shows three very low peaks at 5.3 GHz, 17.8 GHz, and 18.2 GHz.

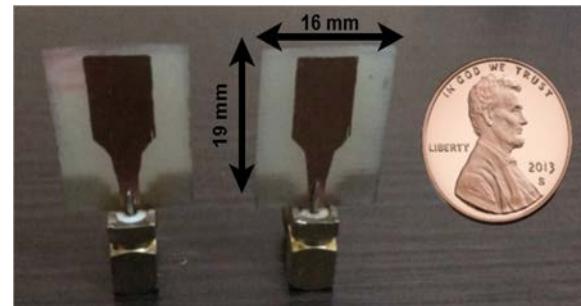


Fig. 15. Microstrip-Fed Tap Monopole Antenna implemented.

As shown in Fig. 16, the frequency of 12.3 GHz exhibits a good gain. Assuming the same time spectrum analyzer selects a suitable width for this frequency band, the graphics are similar to those obtained in Ansys.

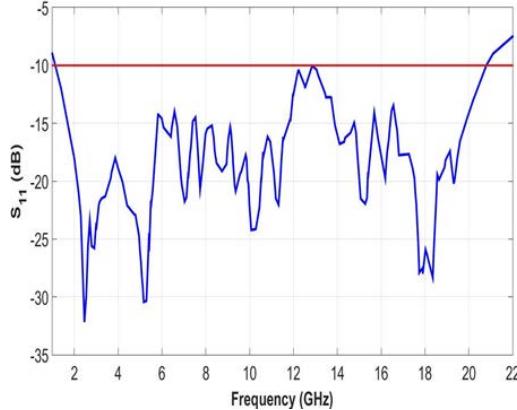


Fig. 16. The S parameter of the implemented antenna indicates that the bandwidth is from 1 to 21 GHz.

VIII. CONCLUSIONS

This paper presents a design of a printed tap monopole antenna with a small size for UWB wireless communications applications. A slit, tapered transition, and two-step staircase notch are implemented to obtain the ultra-wide bandwidth of the antenna. The presented antenna exhibits an ultra-wide impedance bandwidth of 1:7.8, with a low VSWR level of less than 1.75, and a small size compared to the UWB antennas investigated. This antenna is a good candidate for handheld UWB applications. A slot within a plane conductor forms the microstrip-fed tap monopole antenna. Widely used in the microwave field. The electric field at the ends of the extremities, while the current flows in the metal, is minimal in the middle and high in the extremities.

Thanks to software, we can determine the exact point of coupling between the antenna through an analysis of the impedance and reflection coefficient results. In the simulation, it was appreciated that the antenna has a bandwidth of 2.7 to 21 GHz. At the time of implementation, with the help of the spectrum analyzer, it was possible to verify that the antenna effectively operates within a bandwidth of 1 to 21 GHz. This is because the Slit had changed its location and size slightly on the board.

REFERENCES

- [1] C.-C. Lin, Y.-C. Kan, L.-C. Kuo, and H.-R. Chuang, "A planar triangular monopole antenna for UWB communication," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 624–626, 2005.
- [2] S. Ghosh, "Band-notched modified circular ring monopole antenna for ultrawideband applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 276–279, 2010.
- [3] B. Mohamadzade, R. B. V. B. Simorangkir, R. M. Hashmi, Y. Chao-Oger, M. Zhadobov, and R. Sauleau, "A conformal band-notched ultrawideband antenna with monopole-like radiation characteristics," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 203–207, 2020.
- [4] M. Wang, Z. Zhang, and A. Chen, "Ultrawideband pattern-reconfigurable planar monopole antenna based on liquid metal," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 3734–3738, 2024.
- [5] L. Ghanbari, A. Keshtkar, S. Ghanbari, and S. Jarchi, "Planar low vswr monopole antenna for UWB and LTE communication," in *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2016, pp. 1–4.
- [6] B. Mohamadzade, R. B. V. B. Simorangkir, R. M. Hashmi, and A. Lalbakhsh, "A conformal ultrawideband antenna with monopole-like radiation patterns," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 6383–6388, 2020.
- [7] E. Antonino-Daviu, M. Sonkki, M. Ferrando-Bataller, and E. Salonen, "UWB differentially-fed circular monopole antenna with stable radiation pattern," in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2017, pp. 2663–2667.
- [8] J. A. Nunn, L. Li, S. Yan, C. O'Neill, C. D. Simpson, P. Gogineni, and D. Dahl-Jensen, "A lightweight planar ultrawideband uhf monopole mills cross array for ice sounding," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 1197–1200, 2020.
- [9] A. A. Eldekk, "Design of a microstrip-fed tap monopole antenna with an ultra wide bandwidth," in *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2007, pp. 5131–5134.
- [10] B. L. Mrdakovic and B. M. Kolundzija, "Improvements in insertion of auxiliary parity segments in wipl-d all-quad meshing algorithm," in *2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, 2020, pp. 1–2.
- [11] D. I. Olcan and B. M. Kolundzija, "Efficient calculation of time-domain responses of antennas analyzed in frequency-domain by wipl-d code," in *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2007, pp. 1437–1440.
- [12] W. Gong, W. Zhang, X. Chen, G. Han, L. Han, J. Su, and R. Yang, "A low-profile energy selective surface with ultra-wide absorption band," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 3, pp. 1348–1355, 2023.
- [13] P. Arul Jenshiya, K. Madhan Kumar, and A. Riyaz Fathim, "Design of an efficient UWB rectangular microstrip patch antenna with reduced specific absorption rates (SAR)," in *2019 International Conference on Recent Advances in Energy-efficient Computing and Communication (ICRAECC)*, 2019, pp. 1–6.
- [14] Y.-C. Hou, D.-L. Su, and J.-P. Ma, "Analysis and design of ultra wide band planar monopole antenna," in *2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, 2008, pp. 244–247.
- [15] B. Wang, Z. Shen, T. H. Gan, and Y. H. Lee, "Radiation pattern improvement of a wide-band planar monopole antenna," in *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, 2024, pp. 2219–2220.
- [16] A. Eldekk, A. Elsherbeni, and C. Smith, "Dual-polarized dual-band square slot antenna wiU-shaped printed tuning stub for wireless communications," in *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1B, 2005, pp. 451–454 1B.
- [17] R. K. Dash, P. Bikash Saha, and D. Ghoshal, "Design of an equally spaced U-shaped slotted patch antenna with defected ground structure for multiband applications," in *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2020, pp. 267–272.

Evaluation of performance and scalability in SDN networks using sFlow

Evaluación del rendimiento y escalabilidad en redes SDN usando sFlow

Sebastian Ruiz, Esthefanny Bonilla, Madelaine Muñoz

Abstract—Software-Defined Networking (SDN) separates the data plane from the control plane, enabling centralized and flexible network management. Traditional networks face significant challenges in terms of scalability and flexibility; therefore, implementing efficient traffic monitoring techniques is crucial. Using a protocol like sFlow within an SDN network helps optimize performance and resource management, facilitating the analysis of network scalability and efficiency. In this work, we investigate the integration of the sFlow protocol into an SDN architecture to collect real-time network status data and evaluate its scalability. A custom topology was created using the Mininet simulation environment and the Ryu controller, with the sFlow protocol and sFlow-RT deployed to capture traffic metrics, including packet loss, jitter, throughput, and total traffic. The results enable an analysis of how network scalability is affected as the number of devices increases. As more devices connect, network capacity begins to decline, especially when over thirty devices are connected, leading to higher packet loss and reception failures. This behavior heavily depends on how efficiently the controller manages the network.

Index Terms—SDN network, Ryu controller, sFlow protocol, Real-time monitoring, sFlow-RT.

Resumen—Las redes definidas por software (SDN) permiten separar el plano de datos del plano de control, permitiendo una gestión centralizada y flexible de la red. Las redes tradicionales enfrentan grandes desafíos relacionados con la escalabilidad y la flexibilidad; por lo tanto, es necesario implementar técnicas de monitoreo eficiente del tráfico. Al implementar una herramienta como sFlow en la red SDN, se permite optimizar el rendimiento y la gestión de los recursos, permitiendo analizar la escalabilidad de la red. En este trabajo, se analiza la integración del protocolo sFlow en una arquitectura SDN con el objetivo de recolectar información en tiempo real sobre el estado de la red y analizar la escalabilidad. Se desarrolló una topología con el entorno de simulación Mininet y el controlador Ryu, implementando el protocolo sFlow y sFlow-RT para capturar métricas de tráfico como paquetes descartados, jitter, throughput, tráfico total. Los resultados obtenidos permiten analizar la escalabilidad de la red al aumentar el número de dispositivos. Al incrementar la cantidad de dispositivos, la capacidad de la red empieza a

Sebastian Ruiz is with the Engineering, computer science, modeling, electronics and systems engineering department, Università della Calabria, Calabria, Italy (email: rzjmsp97r14z605w@studenti.unical.it)

Esthefanny Bonilla is with the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (e-mail: bonillaesthefanny99@gmail.com)

Madelaine Muñoz is with the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (email: madelaine.munioz@epoch.edu.ec)

disminuir, especialmente a partir de tener más de treinta dispositivos conectados, lo que conduce a tener más pérdida de paquetes y fallas en la recepción. Este comportamiento depende mucho de la eficiencia en la gestión del controlador.

Palabras Claves—Red SDN, controlador Ryu, protocolo sFlow, monitoreo en tiempo real, sFlow-RT.

I. INTRODUCTION

SOFTWARE-Defined Networking (SDN) technology was first presented in Ethane [1], a research project carried out in the laboratories of Stanford University. Since then, it has grown in importance worldwide in the field of networking technologies, establishing itself as one of the key solutions on the Internet [2]. Over the years, SDN has reinforced the concept of separation between information handling and forwarding roles (CNC separation). In this model, data layer switches are limited to the task of packet forwarding. At the same time, the control plane centralizes data collection and decision-making through a controller that oversees the entire network. Communication between the two planes occurs through a standard interface, where the controller sends forwarding policies and regulations to subordinate switches, which are responsible for implementing these guidelines. This design enhances operational efficiency in network management and, simultaneously, significantly reduces the costs associated with network administration. Several companies and enterprises have already developed and launched their own SDN solutions to reduce costs and increase network utilization [3].

The rapid advancement of network technologies, combined with the increasing complexity of interactions between society and the digital environment, has significantly expanded the magnitude and impact of the Internet. Against this backdrop, the conventional network architecture and the processing capacity of devices are being subjected to increasingly demanding requirements. In this context, SDN emerges as an innovative solution by decoupling the control function of traditional networks, thereby establishing a logical and centralized control plane. This plane enables the design and management of services and policies in an integrated manner, generating flow tables that are distributed to the network devices. This form of operation significantly increases the efficiency of network resource utilization and contributes to optimizing operating costs.

Several cloud service providers that have integrated and used SDN in a significant way include Google, Facebook, and Microsoft, as they have publicly highlighted their use. In addition, major telecom operators such as AT&T, Deutsche Telekom,

NTT and Comcast have shared their intentions to adopt SDN-based solutions, especially in their access networks. However, they do so with caution, as most of their projects employ hybrid methods [3].

SDN (Software-Defined Networking) systems [4] utilize basic switches with OpenFlow and sFlow support, along with an advanced software core controller that enables network engineers to monitor and create traffic in new ways easily. These OpenFlow switches connect to traffic analysis solutions such as sFlowRT, sFlowTrend, Ganglia, among others [5]. The network of sFlow-enabled switches sends measurement datagrams to one or more collectors. The sFlow collectors enable an SDN application to gain visibility into the network traffic. sFlow and OpenFlow [6] offer complementary capabilities in software-defined networking environments.

The rest of the document is organized as follows. In section II, the SDN background is described, and SDN, sFlow, and OpenFlow technologies are described in the context of flow monitoring. In Section III, the methodology and the network topology used to implement sFlow and obtain the monitoring metrics are developed. Section IV shows the comparative results and graphs obtained with the RYU controller. Section VI concludes the article.

II. BACKGROUND OF SDN

A. Software-Defined Network

The introduction of SDN in traditional networks provides a new approach to the design, implementation, and management of networks. This technology separates the control plane, which manages traffic control and routing, from the data plane, which is responsible for packet forwarding. This enables networks to be centrally programmed through software, rather than relying on manual configurations [7].

SDN enables network administrators to manage, configure, and optimize networks using software programming, rather than relying on physical hardware devices such as routers and switches. This provides greater control over traffic management, resulting in increased agility, efficiency, and flexibility. SDN uses north-bound and south-bound application programming interfaces (APIs), where the north-bound API facilitates communication between applications and the control layer. In contrast, the south-bound API connects the infrastructure and control layers [8].

In [9], it talks about the northbound interface, which connects network applications to the controller. This interface provides routing information for applications, manages infrastructures and controllers, and provides information about policies governing communications between controllers and applications.

The southbound interface connects the controller to network devices. This interface is essential in that it can be easily and

quickly reconfigurable, as it must cope with the dynamism and flexibility of the change in the control plane, must be able to make traffic safe and isolated from other networks to guarantee the required constraints, and must share the characteristics of the physical resources available. The general architecture of the SDN network is shown in Fig. 1.

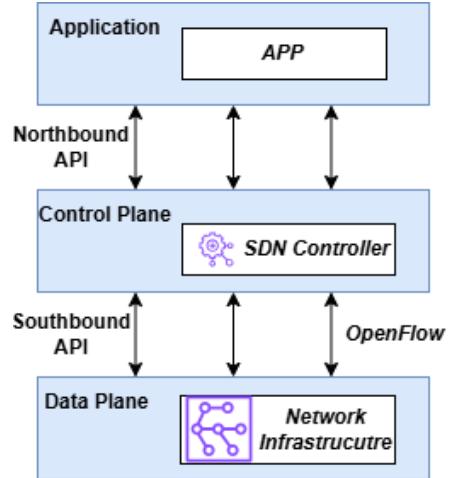


Fig. 1. Architecture of SDN network

B. OpenFlow

OpenFlow is a network communication protocol used between controllers and forwarders in the SDN architecture. An OpenFlow controller serves as the brain of the SDN architecture, located in the control layer, and instructs data forwarding through the OpenFlow protocol. The OpenFlow switch is responsible for forwarding in the data plane. It exchanges messages with the controller through a secure channel to receive forwarding instructions and report its status [10].

OpenFlow utilizes the concept of a flow table, where forwarders transmit data packets, and controllers implement flow tables within the forwarders through OpenFlow interfaces, thereby achieving control over the forwarding plane. To forward packets, switches maintain flow tables consisting of flow entries. Each flow entry includes match fields such as the incoming interface port, source and destination ports, IP addresses, MAC addresses, and network protocol type.

When a switch receives a data packet from a host, it performs a lookup in its flow table using the packet's header characteristics [1]. If the packet matches a flow rule, the table counter increases, and the specified actions are applied. If no matching entry is found, the packet flow is forwarded via the OpenFlow protocol to the controller, which decides what action to take and returns the data path. The controller can either drop or forward the packets. Fig. 2 shows the packet processing flow in an OpenFlow switch, where the Packet-In and Packet-Out messages are special control messages that enable interaction between the OpenFlow switch.

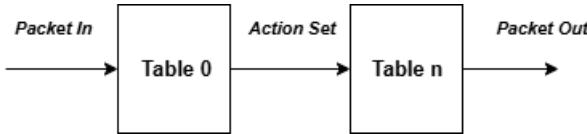


Fig. 2. Flows and tables OpenFlow

C. Sampled Flow (sFlow)

sFlow is a network traffic monitoring protocol that uses statistical sampling to capture and analyze data packets in real-time. sFlow monitoring technology collects network packet samples and sends them in a UDP datagram to a monitoring station, known as a collector, via port 6343 [11].

The header of an sFlow packet consists of four fields, as shown in Fig. 3. The Ethernet Header, which contains the source and destination MAC addresses, as well as frame control information. IP Header, which contains the source and destination IP addresses, as well as routing-related information. UDP Header, which contains information such as source and destination ports, and the sFlow Datagram Header, which contains the sample data.

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Ethernet Header (14 bytes) | IP Header (20 bytes) | UDP Header (8 bytes) | sFlow Datagram (1500 bytes) |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|

Fig. 3. sFlow packet header

The topology of sFlow consists of two main components: a sFlow agent, which is integrated into devices and enables packet capture and metrics collection from network devices, and then sends them to the sFlow collector. The collector is a server that receives and analyzes the data sent by the sFlow agent [12]; it can be software such as sFlow-RT.

sFlow-RT is an open-source product with an integrated OpenFlow controller, enabling the monitoring of sFlow agents embedded in network devices and converting the collected measurements into actionable metrics accessible via a RESTful Flow API [13].

In a sFlow system, the sFlow agent collects traffic statistics from an interface by sampling packets and encapsulating the statistics into sFlow packets. When the sFlow packets expire, the sFlow agent sends the sFlow packets to the sFlow collector. The sFlow collector analyzes the sFlow packets and displays the analysis results [14]. The expiration period is 1 second.

III. METHODOLOGY

A. Network topology

For implementing the topology, use Mininet version 2.3.1b4, which supports both Python 3 and Python 2. The switches used are Open vSwitch version 2.13.8 (ovs-vsctl), which is included by default in Mininet. These switches are configured with the sFlow protocol version 6.04, which enables the collection and transmission of network monitoring metrics using the sFlow-RT tool version 3.1.1711.

The SDN network is managed by a Ryu version 4.34 controller, which is responsible for creating the flow tables

and allowing communication between hosts.

The topology employs a tree-like structure with three levels: the first level comprises the root switch, the second level features two child switches, and the third level consists of four switches. The network comprises a total of seven connected switches, with two hosts connected to each switch on the third level and one host connected to each switch on the second level, resulting in a total of eight hosts. The available computing resources constrain the bandwidth of the links connecting the switches.

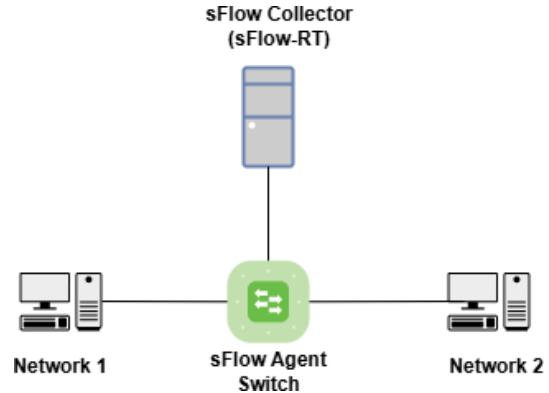


Fig. 4. sFlow topology

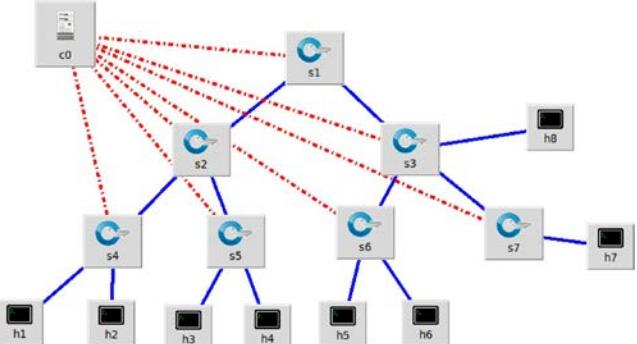


Fig. 5. Network topology

To create the topology, the following parameters were configured. Static IP addresses were assigned to the hosts, while the MAC addresses were set by default by Mininet. Furthermore, the bandwidth of the links connecting the switches was defined. Regarding the controller, the port, controller type, and the IP address for listening and communication were configured. For the sFlow Agent, the collector address to which the data is sent for processing was specified, as well as the Sampling, Polling, and Header parameters. These parameters are summarized in Table I.

TABLA I
MAIN NETWORK PARAMETERS

| Configuration | Parameter |
|-----------------------|---|
| Number host | 8 (h1-h8) |
| Number Switch | 7 (s1-s7) |
| IP Address Host | 10.0.0.0/8 |
| MAC Address Host | Default |
| Links (Bandwidth) | Delimited by the device Type Controller |
| IP Address Controller | 127.0.0.1 |
| Port Controller | 6653 |

| | |
|--------------------|------------|
| sFlow Collector IP | 127.0.0.1 |
| sFlow Sampling | 10 |
| sFlow Polling | 20 seconds |
| Number Switch | 7 (s1-s7) |
| sFlow Header | 128 bytes |

To analyze the scalability of the network, it is necessary to increase the number of switches, which modifies the base topology according to the requirements of the devices under evaluation. To achieve this, Mininet commands were used, enabling the creation of various topologies based on the number of devices.

Using the command `mn --topo tree, depth=3, fanout=2 --switch ovsk --controller remote`, it is possible to create tree topologies, where depth specifies the number of levels in the tree, fanout defines the number of child switches per parent switch, switch ovsk defines the switch type (Open vSwitch), and controller remote specifies the controller type. Meanwhile, with the command `mn --topo linear,n --switch ovsk --controller remote`, linear topologies can be created, where n is the number of devices.

With these two command lines, different topologies are generated for evaluation, considering networks with 10 to 100 switches to assess their performance. The configured parameters according to the number of switches are shown in Table II.

TABLE II
PARAMETERS FOR THE CREATION OF THE TOPOLOGIES

| Number Switch | Configuration |
|---------------|------------------|
| 10 | n=10 |
| 20 | depth=2,fanout=4 |
| 30 | depth=2,fanout=5 |
| 40 | n=40 |
| 50 | n=50 |
| 60 | n=60 |
| 70 | depth=2,fanout=8 |
| 80 | n=80 |
| 90 | depth=2,fanout=9 |
| 100 | n=100 |

B. Performance metrics

The implementation of sFlow allows the collection and analysis of various metrics in the SDN network. The primary metrics evaluated in this work are jitter, throughput, dropped packets, and sFlow packets.

- Throughput refers to the amount of data successfully transmitted within the SDN network.
- Jitter is the delay experienced by packets in reaching their destination.
- Dropped packets refer to the number of packets that are discarded before being delivered.
- sFlow packets represent the number of sampled packets within the network.

To obtain these metrics, measurements were performed using the `iperf` command, which allows evaluating network performance by generating TCP or UDP traffic. To generate traffic, two sessions must be created: one with the host acting as the client and another with the host acting as the server. In our main scenario, shown in Fig. 5, we generated TCP and

UDP traffic for 30 seconds to obtain the metrics above. For measuring overall network performance, traffic was generated for 60 seconds.

C. RYU Controller

To implement the RYU controller, a flow rule was configured to forward all packets to the controller. When a packet arrives at the controller, the source MAC address and the incoming port are inspected to determine how to process it within the controller and to begin building the MAC address tables. If the destination address is registered in the MAC address table, the packet is forwarded to the corresponding port; otherwise, flooding is performed, sending the packet to all ports except the one it arrived on. Once the destination is known, the controller installs flow rules in the switch so that subsequent packets with similar characteristics are handled directly by the switch, rather than being sent to the controller. In Fig. 6, the flow tables created by the RYU controller in each switch are shown.

```
mininet> sh ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-flows s1
cookie=0x0, duration=122.705s, table=0, n_packets=82, n_bytes=8530, priority=0 actions=CONTROLLER:65535
mininet> sh ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-flows s2
cookie=0x0, duration=132.449s, table=0, n_packets=86, n_bytes=8920, priority=0 actions=CONTROLLER:65535
mininet> sh ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-flows s3
cookie=0x0, duration=134.572s, table=0, n_packets=85, n_bytes=8834, priority=0 actions=CONTROLLER:65535
mininet>
```

Fig. 6. Flow tables

D. sFlow

By default, sFlow is not enabled on devices. To activate this protocol on the switches, the parameters specified in Table I must be configured. These parameters are: Agent, which defines the IP address of the device generating the flow data; Target, which specifies the IP address and port of the server that receives and analyzes the traffic data; Sampling, which sets the rate at which packets are sampled; Polling, which determines the interval in seconds for sending traffic statistics to the collector; and Header, which defines how many bytes of the packet header are included in each sample. The command line to configure sFlow is shown in Fig. 7.

```
$ ovs-vsctl -- --id=@sflow create sflow agent=${AGENT_IP} \
target="${COLLECTOR_IP}:${COLLECTOR_PORT}" \
header=${HEADER_BYTES} \
sampling=${SAMPLING_N} polling=${POLLING_SECS} \
-- set bridge br0 sflow=@sflow
```

Fig. 7. sFlow command line

To verify that the sFlow protocol is correctly established, we can use the Wireshark software, which allows us to capture and examine network traffic in real-time. By filtering the data, we can observe that the packets passing through the network contain a new header corresponding to the sFlow protocol, as shown in Fig. 8.

The configuration of these parameters enables the collection of metrics sent by the switches. These metrics are sent from the sFlow agent to the collector, which processes the data and allows monitoring through tools such as sFlow-RT. By default, sFlow uses port 6343.

sFlow-RT includes a REST API that allows us to query and extract specific sFlow metrics. This tool also provides an embedded dashboard with the main metrics, as shown in Fig. 9. To access this dashboard, the sFlow-RT tool must be

executed and then accessed through the browser using the IP address configured in the collector, in this case, 127.0.0.1.

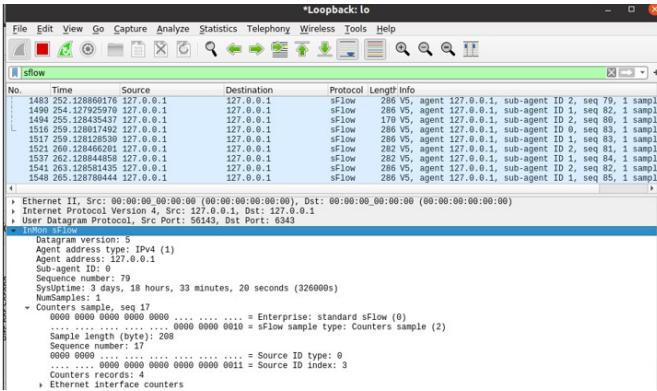


Fig. 8. sFlow packets

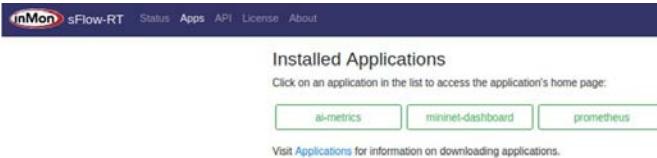


Fig. 9. sFlow-RT dashboard

IV. RESULTS

To analyze the performance and scalability of SDN networks, two scenarios will be conducted. The first will verify the operation of the sFlow protocol using our network with a tree topology composed of seven switches, and the second will involve generating different types of networks with Mininet commands to vary the number of switches and assess scalability.

To analyze the operation of the sFlow protocol and obtain key metrics, such as jitter, throughput, and dropped packets, we first examined our main tree-type topology. To generate UDP and TCP traffic, the iperf command was used, creating traffic for 30 seconds. The generated traffic was transmitted through four hosts connected to different child nodes at the third level.

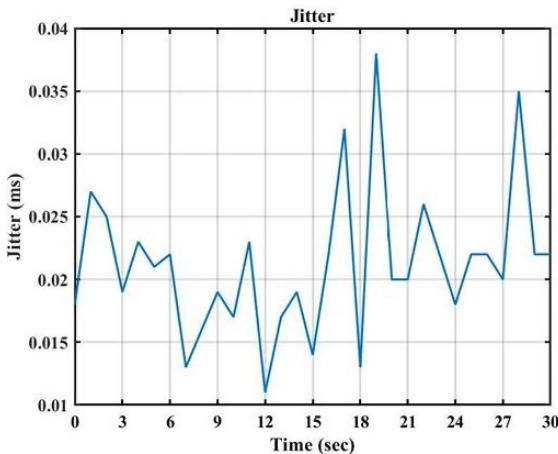


Fig. 10. Jitter

Fig. 10 shows the jitter measured in the SDN network. To

measure this parameter, UDP traffic was generated between the network hosts, resulting in different delay values. These values range from 0.03 ms to 0.038 ms.

This parameter analyzed depends on the flow tables created by the controller. If the switches do not have the flow rules for the packets in their tables, the packets are sent to the RYU controller (Packet-in) for processing, and the flow rule is installed and sent back to the switches (Packet-out). This round-trip processing between the controller and the switches increases the delay. If the controller takes a long time to decide what to do with the packets, it also increases the packet delay. If the flow is already specified in the switch tables, these packets are not sent to the controller and are forwarded directly, thus reducing the delay.

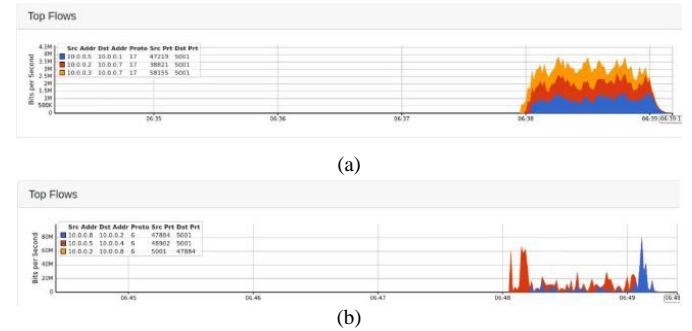


Fig. 11. Throughput;(a) UDP Traffic; (b) TCP Traffic

Fig. 11 shows the network throughput generated by the four hosts. The first image illustrates the throughput during UDP traffic generation, while the second corresponds to the throughput using TCP traffic. These data are obtained from the sFlow metrics, which are sent to the collector, processed, and visualized through the sFlow-RT dashboard, as shown in the figure. In addition to reporting the throughput values, the figure provides information about the source and destination IP addresses generating the traffic, as well as the ports in use.

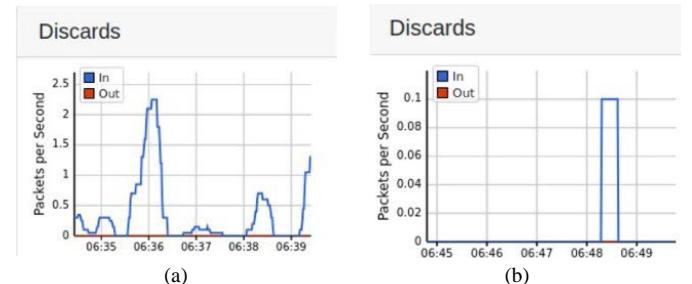


Fig. 12. Discard Packet;(a) UDP Packets; (b) TCP Packets

sFlow-RT, having several built-in dashboards, also allows visualizing the packets discarded per second when transmitting UDP or TCP traffic, as shown in Fig. 12. These discarded packets may be caused by congestion in the switches, resulting in packets being lost and not processed correctly, or by improperly configured flow rules in the RYU controller, leading to packet loss. As shown in the first figure, the discarded packets under UDP traffic appear randomly, while for TCP traffic, the packet loss is constant. All these values are captured by the sFlow datagrams and sent to the

controller for analysis and processing.

Fig. 13 shows the total amount of traffic flowing through the switch interfaces during the 30-second traffic generation. These measurements are obtained from sFlow datagrams, which are sent to the collector for visualization and analysis. This traffic is represented in bits per second. In the first figure, we can observe the total traffic generated by UDP packets, which remains constant over the 30 seconds of traffic generation. In contrast, the second image shows TCP traffic, which is more random compared to UDP.

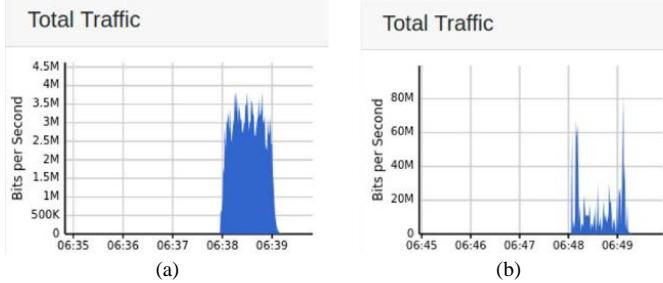


Fig. 13. Total Traffic;(a) UDP Traffic; (b) TCP Traffic

To analyze scalability, different topologies are implemented considering the number of switches to be evaluated. For this purpose, the configurations defined in Table II are utilized. As in the first scenario, jitter, throughput, discarded packets, and sFlow packets will be assessed. To obtain these parameters, tests were conducted by generating TCP and UDP traffic for 60 seconds.

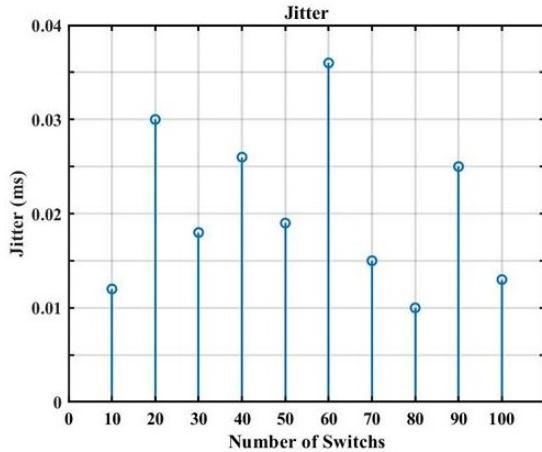


Fig. 14. Jitter with respect to the number of devices

Fig. 14 shows the analysis of jitter as the number of devices increases. As observed, jitter increases significantly when there are 20 and 60 connected devices. This is because, in these cases, the implemented topologies produce more delay between the links, causing the jitter value to rise, while for the other configurations, the increase is moderate.

Fig. 15 illustrates the number of discarded packets as the network size increases. As observed, the more devices there are in the network, the more flow rules the controller has to configure, leading to more discarded packets and increased traffic congestion in the switches. In this case, an exponential behavior is observed as the number of devices increases.

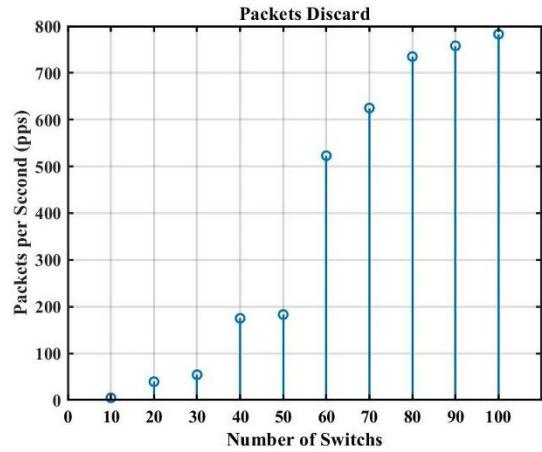


Fig. 15. Packets respect the number of devices

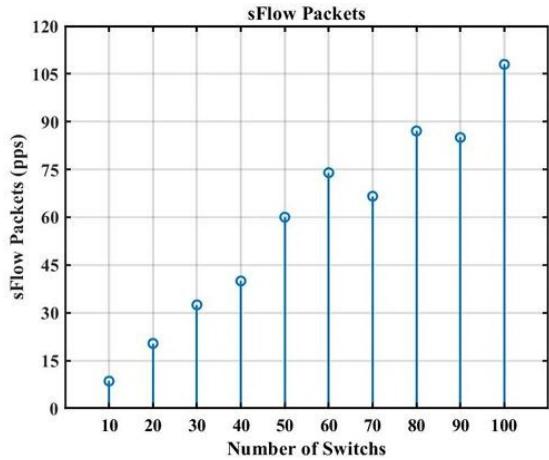


Fig. 16. sFlow Packets respect the number of devices

sFlow packets are sent by the switches and contain all the monitoring information collected by the sFlow protocol. These packets are sent every second and are used to analyze network performance or detect failures. Fig. 16 shows that as the number of switches increases, the number of sFlow packets generated also increases, with minor nonlinear variations, such as in the cases of having 70 and 90 devices. The number of packets generated will depend on the number of devices and the type of topology used.

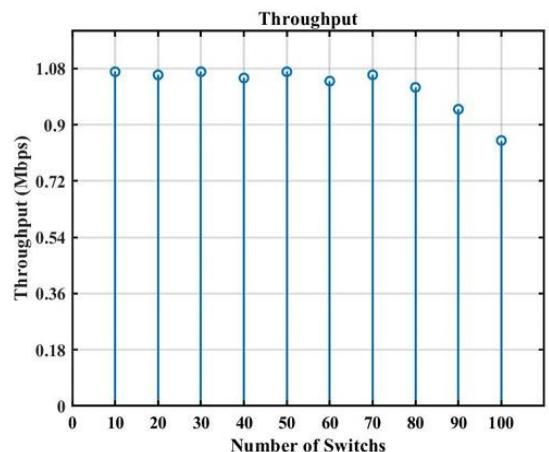


Fig. 17. Throughput with respect to the number of devices

Fig.17 shows the amount of valuable data that the network can transmit per unit of time. As the number of devices increases, this parameter decreases because the controller receives more Packet-In requests to process and needs more time to respond to each flow. This consumes additional bandwidth that could otherwise be used for valuable data, slowing down the processing between the switch and the controller and resulting in a reduction of throughput.

V. DISCUSSION

The contribution of this work lies in demonstrating how monitoring protocols can be implemented in SDN networks to monitor and analyze the variation of parameters, such as throughput, jitter, and discarded packets, with increasing numbers of devices. This provides valuable information for sizing controllers and planning scalable network topologies.

During the tests, it was observed that throughput begins to decrease once 30 devices are connected. This is due to the controller's saturation when creating tables and processing packets; as the number of devices increases, the controller receives more flows and may become overloaded or even fail. Consequently, if the controller becomes saturated, it will start discarding packets. When analyzing the discarded packet metric, we can observe that starting from 60 devices, the controller begins to experience failures and does not properly send out packets, which may lead to connectivity loss between devices. If we analyze the sFlow packets, we can see that the more devices are connected, the more information is sent to the controller. It can be determined that from 80 devices onward, the controller receives a larger number of packets. This metric allows us to monitor the controller's performance and anticipate packet drops primarily.

The jitter metric depends on the topologies implemented, since as the number of devices increases, packets experience greater delays traveling from their source to their destination, resulting in higher latency between links, as observed with 20 and 60 devices. These results confirm that as the number of devices increases, the Ryu controller may encounter failures in table creation and packet forwarding.

Upon analyzing the results obtained from previous research, it is evident that using a single controller is not an efficient approach; therefore, relying solely on a single controller in an extensive network can lead to packet loss. Hence, it is necessary to employ multiple controllers to improve performance and achieve load balancing. This enables greater scalability in the network and improved packet management, resulting in a reduced number of discarded packets and enhanced throughput [15].

VI. CONCLUSION

This work analyzes the performance and scalability of Software-Defined Networks (SDN) using the sFlow monitoring protocol. The primary metrics obtained were throughput, discarded packets, jitter, and total network traffic. The results show that as the network scales, the number of discarded packets and sFlow messages increases, leading to

congestion and packet loss, while the overall network capacity decreases. These behaviors are strongly influenced by the efficiency of the controller and the implemented topology. However, this study is limited to a single centralized controller (Ryu) and a specific telemetry protocol. As future work, it is suggested that multi-controller architectures be evaluated to enable better load balancing and traffic management among controllers. Additionally, it is recommended to adopt other telemetry protocols, such as INT, which allows for obtaining more complex and realistic metrics.

REFERENCES

- [1] A. M. D. Tello and M. Abolhasan, "Sdn controllers scalability and performance study," in the 13th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2019, pp. 1–10.
- [2] M. Wang, Y. Lu, and J. Qin, "Source-based defense against ddos attacks in sdn based on sflow and som," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 2097–2116, 2022.
- [3] O. V. Peterson, Cascone and Davie, "Software-defined networks: A systems approach: Use cases," <https://sdn.systemsapproach.org/uses.html>, 2022, accessed: 2025-07-02.
- [4] O. D. Adeniji, "Scalable flow based management scheme in software define network (sdn) using sflow," *WSEAS Transactions on Computers*, vol. 22, pp. 64–69, 2023.
- [5] InMon Corp., "sflow-rt: Real-time network analytics engine," <https://sflow-rt.com/>, 2025, accedido el 02 julio 2025.
- [6] A. Ram, M. P. Dutta, and S. K. Chakraborty, "A flow-based performance evaluation on ryu sdn controller," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 105, pp. 203–215, 2024.
- [7] K. Benzekki, A. El Fergougui, and A. Elbelrhiti Elalaoui, "Software-defined networking (sdn): a survey," *Security and Communication Networks*, vol. 9, no. 18, pp. 5803–5833, 2016. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sec.1737>
- [8] M. A. Diouf, S. Ouya, J. Klein, and T. F. Bissyande, "Software security in software-defined networking: A systematic literature review," *arXiv preprint arXiv:2502.13828*, 2025.
- [9] Z. Latif, K. Sharif, F. Li, M. M. Karim, S. Biswas, and Y. Wang, "A comprehensive survey of interface protocols for software defined networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 156, p. 102563, 2020.
- [10] U. I. Sunday and S. D. Akhibi, "Application of software-defined networking," *European Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 27–48, 2022.
- [11] X. Liu, X. Zhang, Z. Li, Z. Zhang, and Z. Zhang, "Towards sflow and adaptive polling sampling for deep learning-based intrusion detection," *Future Generation Computer Systems*, vol. 101, pp. 1–9, 2019.
- [12] S. Hublikar, V. Eligar, and A. Kakhandki, "Detecting denial-of-service attacks using sflow," in *Inventive Communication and Computational Technologies*, G. Ranganathan, J. Chen, and A. Rocha, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 483–491.
- [13] sFlow RT, "sflow-rt real-time analytics," 2025, accedido: 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://sflow-rt.com>
- [14] M. Ilham and N. R. Rosyid, "Pengembangan aplikasi pemantauan jaringan berbasis web pada software-defined networking dengan protokol sflow," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 8, no. 6, pp. 1117–1126, 2021.
- [15] M. M. Elmoslemany, A. S. Tag Eldien, and M. M. Selim, "Performance analysis in software defined network (sdn) multi-controllers," *Delta University Scientific Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 181–192, 2023.

Factibilidad técnica – económica: Cobertura LTE en banda de 700 MHz en la comuna El Tambo

Technical-economic feasibility: LTE coverage in the 700 MHz band in the El Tambo commune

José Regatto, Daniel Jaramillo

Abstract—The rural commune of El Tambo, in the province of Santa Elena, is characterized by a very marked digital divide, due to the deficient coverage of the services of mobile phone operators, which have coverage between -140 dBm and -120 dBm, making networks with 4G technology inoperable, which limits the population from developing socioeconomically. The objective of this research was to determine the technical and economic feasibility of implementing a node with LTE coverage on the 700 MHz platform. The research validation methodology combined simulations in the specialized software ATOLL (under an educational license) to design the coverage, with a financial analysis using a 15% discount rate. The technical results confirm that the proposed solution guarantees optimal coverage, with RSRP signal levels above -85 dBm, despite colocation, in the El Tambo commune and surrounding communities such as Prosperidad, La Ladrillera, and La Delicia. In the economic field, the project demonstrated a high viability and profitability index, presenting a Discounted Payback Time, TDR, of 1 year and 5 months. In contrast, the profitability was ratified with a Net Present Value, NPV, of \$30217.15 and an Internal Rate of Return, IRR, of 49.81% at the end of year 2. At that time, the recovery of invested capital is resolved. It is concluded that this implementation is a technical necessity for developing community strategies and a good investment opportunity that promises a financial return significantly greater than the required risk.

Index Terms—LTE Coverage, Digital Divide, 700 MHz, El Tambo, 4G Telephony.

Resumen—La comuna rural de El Tambo, en la provincia de Santa Elena, se caracteriza por una marcada brecha digital debido a la deficiente cobertura de los servicios de telefonía móvil, que oscila entre -140 dBm y -120 dBm. Esto hace que las redes con tecnología 4G queden inoperativas, lo que limita el desarrollo socioeconómico de la población. El objetivo de esta investigación fue determinar la viabilidad técnica y económica de implementar un nodo con cobertura LTE en la banda de 700 MHz. La metodología de validación combinó simulaciones en el software especializado ATOLL (bajo licencia educativa) para diseñar la cobertura, junto con un análisis financiero que utilizó una tasa de descuento del 15%. Los resultados técnicos

Regatto J., estudiante del programa de maestría de Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador (email: j.regattodelpezo@upse.edu.ec).

Jaramillo D. docente del programa de maestría de Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador (email: djaramillo@upse.edu.ec).

confirman que la solución propuesta garantiza una cobertura óptima, con niveles de señal RSRP superiores a -85 dBm, incluso en la colocación, en la comuna de El Tambo y en comunidades aledañas como Prosperidad, La Ladrillera y La Delicia. En el ámbito económico, el proyecto demostró un alto índice de viabilidad y rentabilidad, con un período de recuperación de la inversión (PRI) de 1 año y 5 meses. En contraste, la rentabilidad se confirmó con un Valor Actual Neto (VAN) de \$30,217.15 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 49.81% al final del segundo año. En ese momento, se resolvió la recuperación del capital invertido. Se concluye que esta implementación es técnicamente necesaria para el desarrollo de estrategias comunitarias y constituye una buena oportunidad de inversión que promete un retorno financiero significativamente mayor que el riesgo asumido.

Palabras Claves—Cobertura LTE, brecha digital, 700 MHZ, El Tambo, telefonía 4G.

I. INTRODUCTION

A conectividad a Internet se ha consolidado como un pilar fundamental para el desarrollo socioeconómico en el siglo XXI. Sin embargo, la brecha digital persiste, especialmente en áreas rurales y con topografía compleja. La conectividad limitada a internet en las comunidades rurales constituye una barrera significativa para su desarrollo integral. La topografía accidentada y la dispersión demográfica del sector de estudio dificultan la implementación de una infraestructura de telecomunicaciones robusta, afectando a la comunidad en diversos ámbitos de la vida y ampliando la brecha digital existente [1]. La inexistencia de una cobertura de telefonía celular con tecnología LTE afecta directamente a la población, limitando el acceso a servicios como la educación en línea y el comercio electrónico y generando restricciones educativas y económicas en los habitantes [2].

La implementación de un nodo LTE en estas zonas no solo mejoraría la calidad de vida de sus habitantes al facilitar el acceso a información y servicios digitales, sino que también impulsaría el desarrollo económico local [3]. En este contexto, la comuna EL Tambo, cuya actividad económica principal es la producción de muebles, se ve afectada por la falta de conectividad a internet, lo que limita el crecimiento y el desarrollo de este sector [4]. La falta de acceso al servicio de internet, ya sea mediante la conectividad celular o fija, hace

que los fabricantes desconozcan las tendencias de diseño, la innovación en materiales y las tecnologías de producción [5].

Implementar una estación base de cobertura 4G en la comuna de El Tambo se presenta como una necesidad para cerrar la brecha digital y promover el desarrollo sostenible de la zona de estudio [6]. La comunidad tendrá múltiples beneficios, como el desarrollo de la economía local y la mejora de la calidad de vida, entre otros. El trabajo conjunto de los actores involucrados y las autoridades es de vital importancia, pues garantizará la integración de la comunidad en la sociedad de la información [7].

El estudio tiene como objetivo la evaluación de la factibilidad técnica – económica para la implementación de una estación base con cobertura 4G dentro de la comunidad El Tambo mediante el uso de simuladores especializados, ATOLL, para determinar la cobertura óptima, capacidades de la red, y calidad de servicio a ofertar a los usuarios de esta comunidad en diferentes escenarios de tráfico.

En la actualidad, el desarrollo socioeconómico de las comunidades se basa en la conectividad a internet [8]. Sin embargo, aún existen comunidades rurales que se enfrentan al desafío del acceso a servicios de calidad en el ámbito de las telecomunicaciones, lo que limita la educación en línea y el comercio electrónico, y impide que los habitantes participen como individuos activos en la sociedad de la información [9].

Los autores Soto et al. aseguran que implementar una red de cobertura LTE en áreas rurales permite mejorar la calidad de vida de sus habitantes y, además, impulsa el desarrollo económico local. Uno de los sectores con mayores beneficios de la conectividad será el productivo, en particular, el dedicado a la fabricación de muebles [10].

Los artesanos y fabricantes podrían acceder a información actualizada sobre tendencias de diseño, nuevos materiales y tecnologías de producción, lo que les permitiría mejorar la calidad de sus productos y expandir sus mercados. Además, la conectividad facilitaría la colaboración con diseñadores y fabricantes de otros lugares, fortaleciendo la cadena de valor local y generando nuevas oportunidades de negocio [11].

En este contexto, se evidencia el reconocimiento de los impactos positivos que la conectividad genera en las comunidades rurales. Sin embargo, se puede identificar un alto grado de información inexistente para profundizar en los aspectos técnicos de la implementación de tecnologías como el LTE en las zonas rurales ecuatorianas [12]. Debido a esto, es importante realizar estudios focalizados para comprender las particularidades y los desafíos inherentes a la implementación de estas señales [13].

Asimismo, es importante comprender que la justificación técnica y económica para la implementación de este tipo de proyectos debe estar respaldada por un marco regulatorio vigente en la República del Ecuador. La Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) establece normativas sobre cobertura, calidad de servicio (QoS) y los requisitos técnicos que las operadoras deben cumplir. En esta situación, se establecen las exigencias para que las operadoras mantengan umbrales mínimos que permitan un QoS aceptable en el Nivel de Potencia de Señal

Recibida (RSRP), de al menos -105 dBm, para el adecuado funcionamiento de la red 4G LTE y sus servicios adicionales [14].

En conclusión, la falta de conectividad a internet en la comuna de El Tambo es un obstáculo para su desarrollo integral. La implementación de una red 4G no solo es una necesidad técnica, sino también una inversión estratégica que permitirá cerrar la brecha digital, mejorar la calidad de vida de los habitantes, impulsar el desarrollo económico local y posicionar a la comuna El Tambo como una población más conectada y competitiva en el siglo XXI [15].

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Para los autores Chamorro et al., la investigación planteada sobre la implementación de una estación base LTE en la zona rural del Perú aborda el análisis de la brecha digital existente entre las áreas urbanas y rurales del país. La investigación realizada tiene como centro la evaluación de la conectividad y calidad de señal mediante las métricas de indicadores de rendimiento, KPIs, a través de niveles de señal recibido, específicamente se mide la relación señal-ruido (SRN), esta variable se compara con las recomendaciones determinadas por la UIT para las frecuencias de 700 MHz y 2100 MHz donde se puede determinar que la estación base implementada cumple los estándares internacionales, superando los valores mínimos establecidos. La investigación presentó valores de 31.4 dB y -9.6 dB, superando los valores establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones de 20 dB y -15 dB para SRN y calidad de señal, respectivamente [16].

De acuerdo con Shutko et al., la cobertura en las zonas rurales de Ucrania se ha enfrentado a diversos desafíos debido a las distancias y a la complejidad geográfica de las regiones. La solución propuesta en esta investigación es la implementación de antenas externas de alta ganancia, donde el modelo Yagi de 20 dBi con tecnología MIMO alcanza velocidades de 8 Mbps, señales con SINR positivo y conectividad con estaciones a una distancia de hasta 30 km. Estas características permiten el acceso a internet. Para lograr estos enlaces es necesario instalar antenas con ganancias de 15 a 24 dBi a una altura mínima de 6 metros. La propuesta define soluciones viables para hogares en zonas rurales, bioestaciones y estaciones médicas en zonas remotas, lo que permite la continuidad de los servicios y contribuye a la economía y la ciencia locales de las regiones más apartadas [17].

Un estudio técnico-económico realizado para evaluar la tecnología Acceso Inalámbrico Fijo (FWA) LTE demuestra que es una estrategia efectiva para mitigar la brecha digital de banda ancha en los sectores rurales europeos. Este estudio incluye un análisis comparativo frente a soluciones guiadas de alta velocidad, como G.fast (Gigabit Digital Subscriber Line, DSL, protocolo de alta velocidad, 1 Gbps en un par de cables de cobre) y FTTP (Fiber To The Distribution Point, arquitectura de red de fibra óptica donde el cobre G.fast completa la última milla). Uno de los problemas más importantes fue la densidad poblacional, que oscilaba entre 30 y 50 personas por km²; sin embargo, la tecnología aplicada

demostró ser la más rentable, proporcionando conectividad a internet con velocidades de hasta 30 Mbps. La diferencia económica entre las tecnologías se centra en el CAPEX, donde la tecnología FFTdp representa el 72% de la inversión, sin incluir las tarifas de asignación de espectro, mientras que FWA representa el 34.7% en costos de eNodeB y las tarifas de alquiler de espectro el 23.5%; es decir, la inversión representa el 58.2% del CAPEX. De acuerdo con el estudio realizado, la tecnología LTE FWA aprovecha la cobertura que ya poseen las redes móviles y requiere menos inversión y subsidios que la implementación de redes fijas [18].

Para el respaldo de esta propuesta de bajo costo se analiza el trabajo de implementación de un prototipo de estación base con tecnología 4G/LTE con una inversión de referencial de \$2960.00, este proyecto a pesar de haberse desarrollado con hardware de bajo costo, BladeRF Micro 2.0 xA9 y el software abierto OpenAirInterface, se logra una velocidad de descarga de 10 Mbps operando en la banda de 2.8 GHz. Adicional a esto, se realizaron pruebas de potencia de la señal recibida, que mostraron un desempeño estable, con valores de -75 dBm y -88 dBm a 1 y 2 metros, respectivamente, del equipo emisor. [19].

III. METODOLOGÍA

La investigación propuesta adoptó un diseño no experimental de tipo transversal, misma que se fundamentó en el fenómeno de interés, falta de cobertura móvil LTE en la ruta Santa Elena – Ancón, cuyas condiciones preexistentes se observaron y se analizaron sin la manipulación deliberada por parte del investigador, además la recolección de datos se realizó en un único momento temporal, lo que permitió examinar la incidencia y la interrelación de las variables de estudio [20].

Debido al alcance y propósito, la investigación poseyó un enfoque mixto descriptivo – analítico, debido a que no se limitó a la descripción del fenómeno para la caracterización del contexto de estudio, estado de conectividad y la naturaleza de los problemas percibidos, sino también a entender de manera profunda cómo y por qué la ausencia de cobertura LTE impacta a los grupos de interés.

Esto conllevó el análisis de correlación entre las variables de infraestructura y la factibilidad técnica [21].

Adicional a esto, el enfoque se extendió a la factibilidad socioeconómica, donde la investigación validó la necesidad social mediante la medición de la brecha digital con la métrica Reference Signal Received Power (RSRP) y probó la factibilidad financiera, demostrando la asequibilidad de los planes de la operadora TUENTI para la economía local.

El proceso metodológico combinó la recolección de datos con equipos especializados y la simulación del modelado técnico en la etapa inicial. Las mediciones realizadas in situ son importantes, ya que los resultados se utilizaron para optimizar el modelo de propagación de radiofrecuencia en ATOLL. Además, con esta información se realizó un análisis correlacional mediante el índice de Pearson, lo que permitió la validación y calibración del nuevo modelo para establecer una predicción de la cobertura total de la señal 4G en la zona y,

finalmente, se realizó la evaluación técnico-económica de la propuesta para la implementación de la red LTE, Fig. 1.

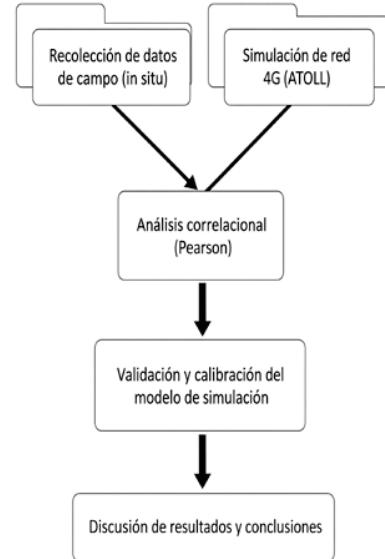


Fig. 1. Diagrama de proceso de la metodología aplicada

El desarrollo de la propuesta tuvo lugar en un sector rural de la provincia de Santa Elena, cantón del mismo nombre, comuna El Tambo y en la ruta Santa Elena – El Tambo – Ancón. La Fig. 2 presenta el mapa geográfico de cobertura, propiedad de la operadora TUENTI, que demuestra que en la comunidad se mantiene un nivel de recepción extremadamente bajo, en un rango de -120 a -140 dBm, para las señales 4G (LTE), lo que la hace inoperable para los servicios de telefonía celular.

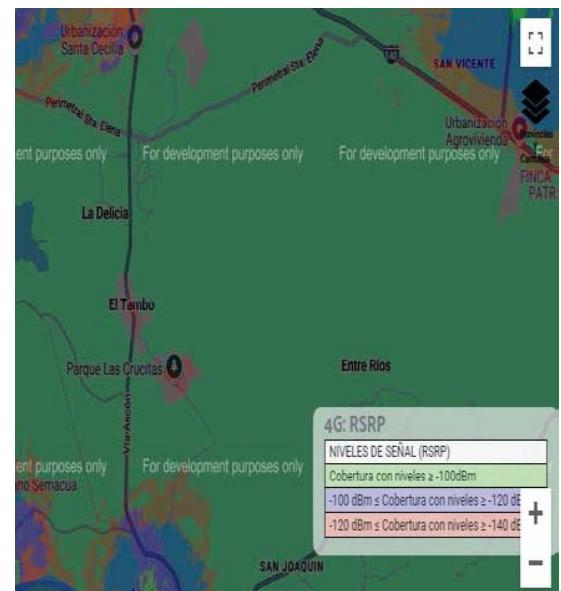


Fig. 2. Ubicación del escenario de estudio y cobertura

Es importante mencionar que la renovación de los contratos de concesiones de uso de frecuencias para las operadoras de telefonía móvil en el país, con las operadoras telefónicas

Conecel (Claro) y Millicom (Movistar y Tuenti) tienen un periodo de 13 años, hasta el año 2038, y además incluye los títulos habilitantes para la transmisión en la banda 28, misma que representa los 700 MHz [22].

El planteamiento de la solución está diseñado en 4 etapas, Fig. 3, con una estructura robusta para mantener un control estricto en las tareas secuenciales: Planificación, Recolección, Modelado y Análisis. Una de las ventajas más importantes de esta estructuración es la mitigación de riesgos, ya que cada etapa se convierte en un hito de control para verificar la calidad de los datos y validar las simulaciones, lo que permite corregir errores.



Fig. 3. Etapas de la solución propuesta

A. Planificación y definición de objetivos

El objetivo principal de este estudio es evaluar la factibilidad técnica del despliegue de una red 4G en la comunidad de El Tambo mediante la simulación en el software ATOLL, con el fin de determinar la cobertura óptima, la capacidad de la red y la calidad del servicio que se puede ofrecer a los usuarios en diferentes escenarios de tráfico.

Los objetivos de la investigación es realizar un levantamiento de información referente a los niveles de señal actuales de la red celular 4G de la operadora TUENTI, propiedad de Millicom, y las características geográficas, topográficas y de infraestructura de la comuna, incluyendo la identificación de obstáculos a la propagación de la señal, posteriormente una simulación y despliegue de la red 4G en ATOLL, variando la ubicación de la estación base para determinar la cobertura óptima y analizar la intensidad de la señal y la capacidad de la red en diferentes puntos de la zona; finalmente estimar el costo de la implementación de la solución, considerando toda la infraestructura correspondiente.

Durante esta etapa se seleccionaron los puntos, Fig. 4, donde se efectuaron las mediciones, se especificaron los parámetros a medir, los equipos y las rutas de medición. Para abordar la problemática planteada, fue necesario realizar mediciones en la ruta que va desde Santa Elena hasta la comuna de San José de Ancón, que pasa por El Tambo.

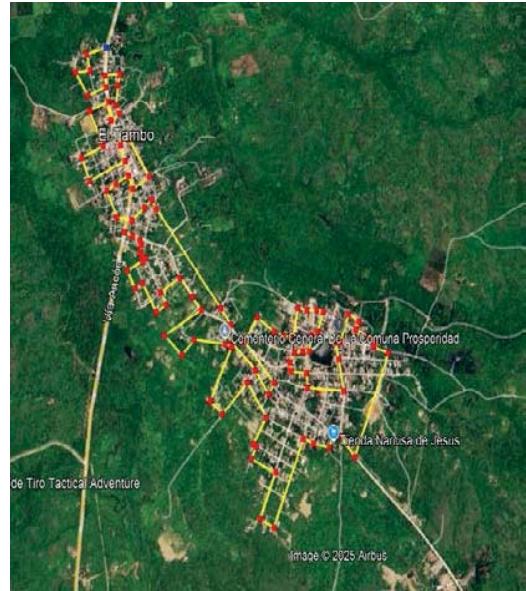


Fig. 4. Recorrido dentro de la comuna para adquisición de datos de potencia de señal recibida

En este contexto, se ha establecido que las mediciones se realizarán en tres recorridos (véase la Tabla I).

TABLA I
DISTANCIAS Y ÁREAS DE TRAMOS DONDE SE REALIZARÁ LA MEDICIÓN DE LA POTENCIA DE SEÑAL

| Ruta | Distancia | Área |
|------------------------|-----------|----------------------|
| Ancón – El Tambo | 3.50 km | - |
| El Tambo | 10.91 km | 1.08 km ² |
| El Tambo – Santa Elena | 3.68 km | - |

Una vez definidos los puntos y áreas en los que se tomaron las mediciones, se establecieron los tipos de señales que podían medirse, como se muestra en la Tabla II. Es importante mencionar que, para este estudio en particular, se utilizó la señal RSRP (Reference Signal Received Power) de la torre de transmisión. Esta señal debe tener un nivel de al menos -115 dBm para poder utilizar los servicios básicos de la telefonía móvil, y de al menos -90 dBm o mayor para el uso de servicios adicionales de la tecnología 4G [23]-[25].

TABLA II
MÉTRICAS DE SEÑAL CELULAR PARA 4G/LTE Y 5G

| Señal | Medida | Descripción |
|-------|--------------|--|
| RSRP | Potencia dBm | Esta señal es la potencia media recibida de las señales de referencia (RS) de la celda más cercana y se considera un indicador de la cobertura y la intensidad de la señal útil. |
| SINR | Calidad dB | Esta señal define la tasa de transmisión o velocidad de datos capaz de alcanzar mediante la medición de la relación señal a interferencia más al ruido. |
| RSSI | Potencia dBm | Este parámetro es un indicador de la intensidad de la señal recibida, capaz de medir la potencia total recibida por un dispositivo dentro del ancho de banda de un canal. |
| RSRQ | Calidad dB | Métrica de calidad que combina RSRP y RSSI sobre un número de bloques de |

recursos, informando el nivel de interferencia y carga de la celda, esta señal permite conocer la calidad de la señal de referencia recibida

A continuación, se detallan los equipos disponibles para medir la métrica seleccionada (véase la Tabla III).

TABLA III
DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS A UTILIZAR

| Equipo | Tipo | Característica | Función |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Network Cell Info | Aplicación | Monitoreo de redes móviles y Wi-Fi | Calidad y rendimiento de red |
| Narda SMR-3006 | Medidor de campos electromagnéticos | Medidor de parámetros técnicos de red | Medición precisa y detallada de señales |
| Xiaomi Redmi Note 11 | Smartphone | Terminal móvil para uso de aplicación | Instrumento para recolección de datos |

B. Recolección de datos en campo.

Durante esta etapa, se recolectaron datos en campo; la información obtenida resultó útil para el análisis de la cobertura. Sin embargo, es necesario preparar los equipos y calibrarlos conforme a las configuraciones establecidas por el fabricante y a los estándares aplicables, asegurando la exactitud y la validación de los datos.

Con los equipos correctamente calibrados, se procedió a la toma de métricas según el siguiente protocolo (ver Tabla IV).

TABLA IV
PROTOCOLO DE TOMA DE POTENCIA DE SEÑAL

| Parámetro | Valor | Observación |
|---|------------|---------------------------------|
| Altura de antena (equipo de recepción) | 1.25 m | Altura promedio de las personas |
| Tiempo total de muestreo | 2 h 35 min | - |
| Intervalo de muestreo | 0.25 s | - |
| Distancia de rutas | 7.18 km | |
| Velocidad de desplazamiento en rutas | 20 km/h | Por seguridad se realiza |
| Distancia dentro de la comuna | 10.91 km | dentro de un vehículo |
| Velocidad de desplazamiento dentro de la comuna | 5 km/h | |
| Entorno | Rural | - |

Los datos obtenidos se almacenaron en formato digital. La aplicación utilizada tuvo la capacidad de generar un archivo con los datos recopilados, como el nivel de RSRP, las coordenadas geográficas, el dispositivo desde el que se ejecutó y el estándar de cobertura recibido por el terminal móvil. Para la contrastación y validación de datos se utilizó el equipo Narda SMR3006 para medir la misma variable y, al igual que permite, se exportaron los datos almacenados durante el recorrido.

C. Modelado y simulación

Una vez finalizada la etapa de recolección, organización y validación de las métricas obtenidas en campo, se procedió a realizar la simulación en el software especializado ATOLL. Esta etapa fue de suma importancia, ya que permitió un análisis real y tangible del efecto de las transmisiones de las

estaciones base.

Inicialmente, se realizó una simulación de la situación actual, en la que se elaboró el perfil del sector estudiado.

La comuna El Tambo, ubicada en la parroquia Ancón de la provincia de Santa Elena, Ecuador, presenta características geográficas particulares que influyen significativamente en su desarrollo y en la planificación de proyectos como el despliegue de una red 4G, con una extensión de 2287 hectáreas y limita al norte con la capital provincial Santa Elena, por el sur la comuna San José de Ancón cabecera parroquial, por el este la Bocana y la Comuna San Vicente; por el oeste el sector de la Represa Velasco Ibarra, La Libertad y Salinas [26]. La topografía de la zona es variada, con planicies, colinas y valles. Es importante considerar la altitud, la pendiente y la orientación de las laderas al planificar la ubicación de las estaciones base, ya que estos factores influyen en la propagación de la señal radioeléctrica [27]. La Fig. 5 presenta el mapa topográfico obtenido mediante el software de simulación, en el que se muestran los niveles de elevación del área de estudio, que van de 4 a 52 metros sobre el nivel del mar.

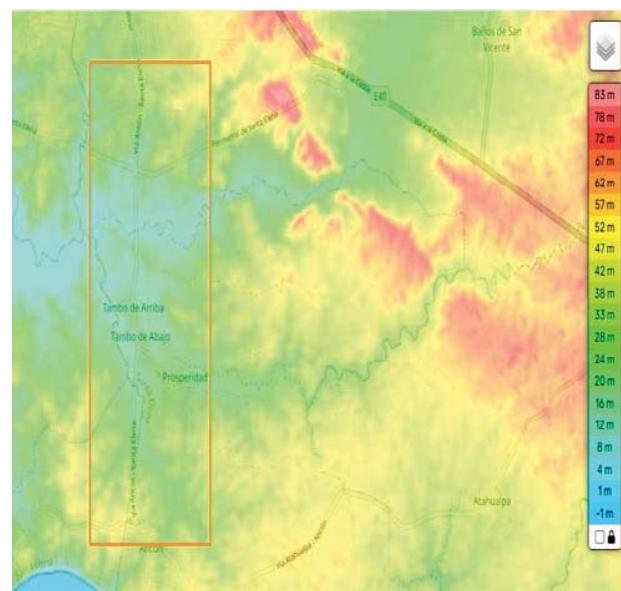


Fig. 5. Mapa topográfico del sector de estudio

Con esta información, se procedió a realizar la simulación en el software con la estación base más cercana, esta se encuentra ubicada en la parroquia San José de Ancón, en las coordenadas $2^{\circ}19'54.54"S$; $80^{\circ}51'13.39"O$, misma que se encarga de dar cobertura a todo el sector de estudio, una vez cargado los parámetros en el simulador (ver Tabla V) se obtiene como resultado la siguiente cobertura por parte de la estación base, Fig. 6.

TABLA V
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN PARA ESTACIÓN BASE

| Parámetro | Valor |
|---------------------|------------------------|
| Tipo de Celda | LTE |
| Banda de Frecuencia | E-ULTRA Band 12 -10MHz |
| Potencia Máxima | 43 dBm |
| RS EPRE (Reference) | 15.4 dBm |

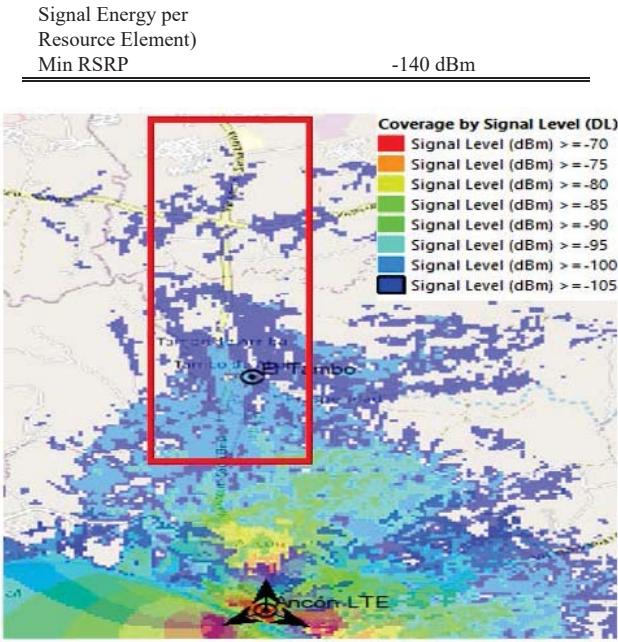


Fig. 6. Simulación de cobertura actual en la ruta Ancón - Santa Elena (comuna El Tambo)

Se observa que los niveles de señal en la comuna El Tambo y en la ruta Ancón – Santa Elena se encuentran por debajo del umbral óptimo para aprovechar los servicios que puede ofrecer la tecnología LTE.

Para resolver la problemática presentada, se propone la implementación de un nodo LTE dentro de la comuna El Tambo, es importante mencionar que actualmente existe una infraestructura perteneciente a otra operadora donde hay disponibilidad de espacio para colocación de antenas sectoriales y aplicar lo que técnicamente se conoce como Colocation, esta práctica es estándar y altamente recomendada, misma que permite la reducción de CAPEX, disminución del tiempo de despliegue, y mitigación de los riesgos de implementación. Utilizando las mismas configuraciones de la TABLA V para la simulación del eNodeB en la comuna el tambo, asumiendo que se utiliza la infraestructura de la otra operadora, ubicada en las coordenadas geográficas $2^{\circ}17'18.66''S$; $80^{\circ}51'19.07''O$, la única diferencia es la altura a la que se encuentran las antenas, que para el caso de la nueva implementación es de 25 m.

En la simulación se aprecia una mejora significativa en los niveles de potencia de la señal recibida, Fig. 7, donde la comuna El Tambo no es la única favorecida por la implementación del eNodeB, sino también las poblaciones circundantes, más pequeñas, como La Delicia, La Ladrillera, El Club de Tiro “Tactical Adventure” y parte de la avenida perimetral.

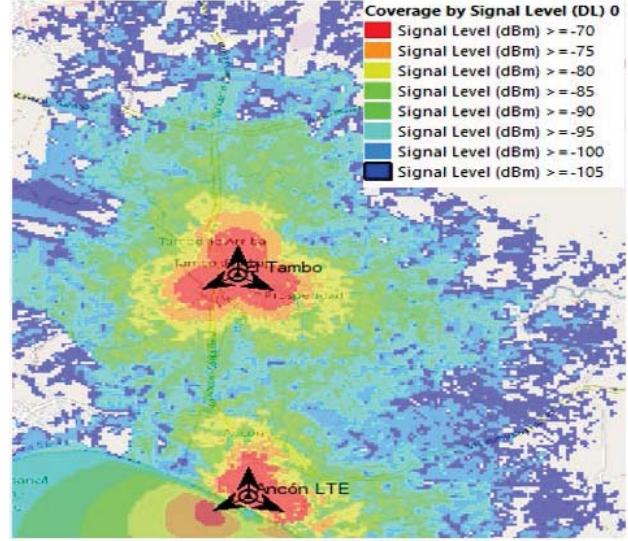


Fig. 7. Simulación de Cobertura luego de la implementación de un e-NodeB en la comuna El Tambo

IV. RESULTADOS

El primer paso es la validación de los datos recolectados mediante el uso de la aplicación frente a los registrados por el equipo Narda, para ello es necesario realizar un análisis estadístico que incluye: el cálculo del error para cada medición realizada (1), y la definición de la desviación estándar del error (2) utilizando un 95% de intervalo de confiabilidad (3), y finalmente determinar el MAPE (4) para la cuantificación de la discrepancia entre ambos registro de datos, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla VI.

$$Error_i = Variable2_i - Variable1_i \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Error_i - Errormedio)^2} \quad (2)$$

$$Margendeerror = z \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}; \quad z = 1.96 \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Variable2_i - Variable1_i}{Variable1_i} \right| \quad (4)$$

TABLA VI
ANÁLISIS DE LAS VARIABLES: COMPARACIÓN ENTRE LA APLICACIÓN Y EL EQUIPO NARDA

| Parámetro | Valor |
|------------|------------|
| Variable | RSRP (dBm) |
| Error (1) | 1.04 dB |
| Desv. (2) | 0.57 dBm |
| Margen (3) | 2.0 dB |
| MAPE (4) | 15.30% |

La precisión de los datos se define por los valores de las métricas de error y de desviación, calculadas a partir de los datos obtenidos durante el muestreo. El error del conjunto de datos es de 1.04 dB, lo que se considera un valor bajo, ya que en ingeniería de RF se permite hasta 3 dB para aceptar el parámetro. En cuanto al valor de la desviación, es de 0,57

dBm, es decir, muy cercano a 0, lo que implica que la aplicación está leyendo 0,57 dBm más fuerte, un error fácil de corregir. Por lo tanto, se puede inferir que los datos obtenidos por la aplicación son precisos y válidos para modelar la cobertura LTE en la comuna de El Tambo.

Los valores de la señal recibida en el equipo móvil, Fig. Las Tablas VII, VIII y IX coinciden con los valores generados en la simulación, Fig. 9. Donde se demuestra que los valores de cobertura oscilan entre -95 dBm y -105 dBm. Sin embargo, también se puede observar que en gran parte de la ruta Ancón – El Tambo – Santa Elena la señal es inexistente; estos resultados de lecturas en campo coinciden con la información de cobertura proporcionada por la operadora.

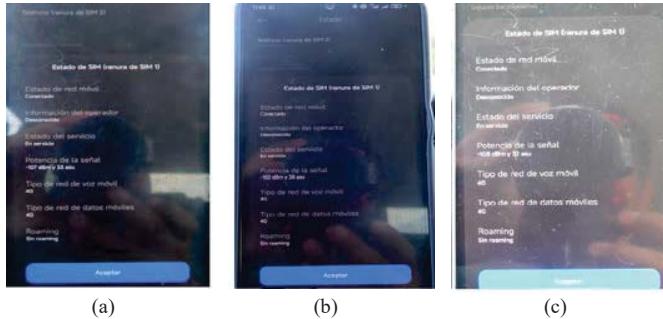


Fig. 8. Nivel de señal recibida en el dispositivo. (a) ruta: Ancón - El Tambo, (b) El Tambo, (c) ruta: El Tambo - Santa Elena

TABLA VII
EXTRACTO DE DATOS DE RECEPCIÓN DE SEÑAL EN LA RUTA: ANCÓN - EL TAMBO

| Sim | RT | Lat | Lon | Sig | Dev |
|-----|-----|------------|-------------|------|----------------------|
| 1 | LTE | -2.3116363 | -80.859073 | -106 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3110924 | -80.8590174 | -106 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3105578 | -80.8589105 | -106 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3099156 | -80.8590063 | -108 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3094141 | -80.8588759 | -116 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3088113 | -80.8588525 | -111 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3082016 | -80.8588403 | -109 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.3076338 | -80.8588203 | -108 | Xiaomi_220 1117TL |

TABLA VIII
EXTRACTO DE DATOS DE RECEPCIÓN DE SEÑAL, DENTRO DE LA COMUNA EL TAMBO

| Sim | RT | Lat | Lon | Sig | Dev |
|-----|-----|------------|-------------|------|----------------------|
| 1 | LTE | -2.2867753 | -80.8558736 | -114 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2864791 | -80.8560083 | -114 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2861077 | -80.8559842 | -115 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2859117 | -80.8562317 | -119 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2855959 | -80.8563707 | -117 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2851852 | -80.8566394 | -115 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2848916 | -80.8568683 | -118 | Xiaomi_220 1117TL |

| | | | | | |
|---|-----|------------|-------------|------|----------------------|
| 1 | LTE | -2.2845762 | -80.8570716 | -119 | Xiaomi_220 1117TL |
|---|-----|------------|-------------|------|----------------------|

TABLA IX
EXTRACTO DE DATOS DE RECEPCIÓN DE SEÑAL EN LA RUTA: EL TAMBO - SANTA ELENA

| Sim | RT | Lat | Lon | Sig | Dev |
|-----|-----|------------|-------------|------|----------------------|
| 1 | LTE | -2.2600325 | -80.8581257 | -113 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2594829 | -80.8578962 | -113 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2589538 | -80.8578707 | -109 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2583669 | -80.8580129 | -113 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2577485 | -80.8580599 | -101 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2569538 | -80.8580243 | -113 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2553099 | -80.857758 | -103 | Xiaomi_220 1117TL |
| 1 | LTE | -2.2545737 | -80.8576627 | -97 | Xiaomi_220 1117TL |

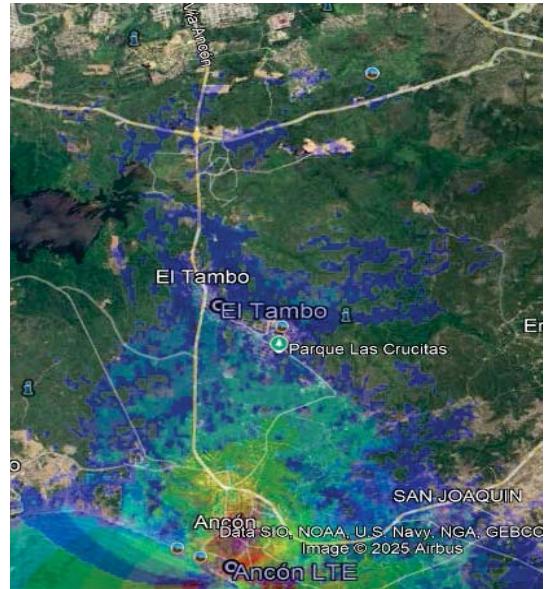


Fig. 9. Cobertura generada por ATOLL, exportada a Google Earth

Con la implementación del eNodeB, la zona de estudio presenta cobertura LTE, según la Fig. 10, en la ruta Ancón – El Tambo, se logra captar señal de las estaciones de ambas localidades; sin embargo, el proceso de Hard Handover permite la conectividad con la estación de mejor señal. Para esta simulación, en este punto específico (aproximadamente a la mitad de la ruta), el terminal móvil se conectaría con la estación base de El Tambo, obteniendo una potencia de señal de -93.62 dBm, lo que permitiría la conectividad a internet de alta velocidad y un desplazamiento de 90 km/h.

De igual manera, se realiza un análisis para la ruta El Tambo – Santa Elena, en un punto intermedio, donde el móvil recibiría señal de las estaciones de las tres localidades: Ancón, El Tambo y Santa Elena. La configuración Hard Handover conectaría el terminal móvil con la estación de El Tambo, otorgándole una señal de -90.49 dBm, con las mismas características de conectividad y desplazamiento Fig. 11.

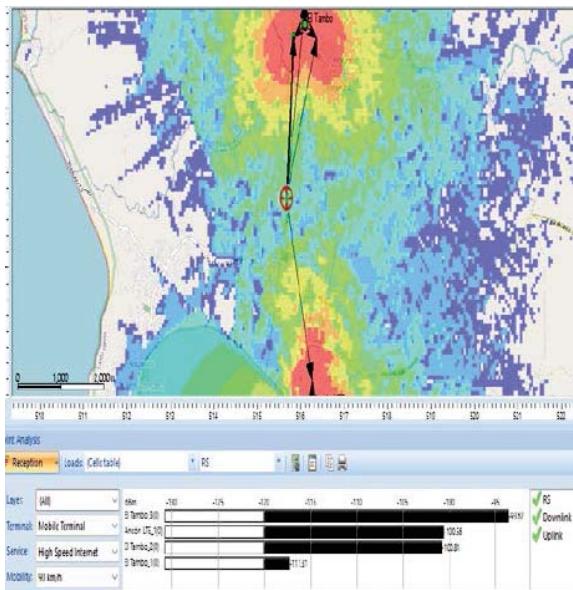


Fig. 10. Simulación de un objetivo en la ruta Ancón - El Tambo

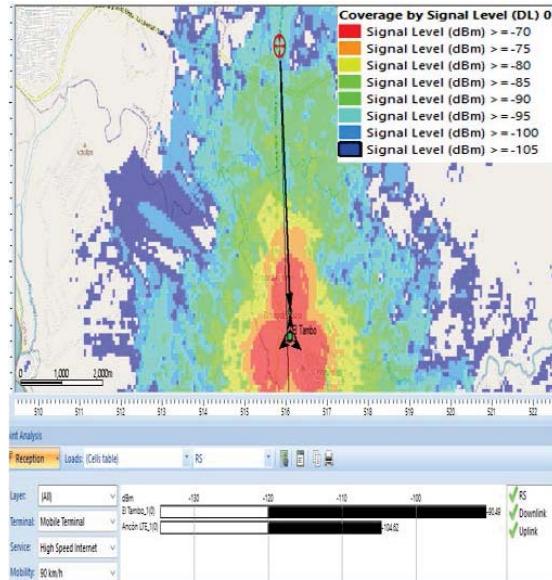


Fig. 11. Simulación de un objetivo en la ruta El Tambo - Santa Elena

En cuanto a la cobertura dentro de la localidad, se puede observar que la implementación de la solución provee de señal en un rango de -38 a -140 dBm, cubriendo un área total de 68 Km² (ver Fig. 12), sin embargo, es importante mencionar que para el uso de los servicios 4G es necesario que la intensidad de señal sea mayor a -90 dBm, lo que reduce el área de cobertura a 17.20 Km², como se muestra en la Fig. 13.

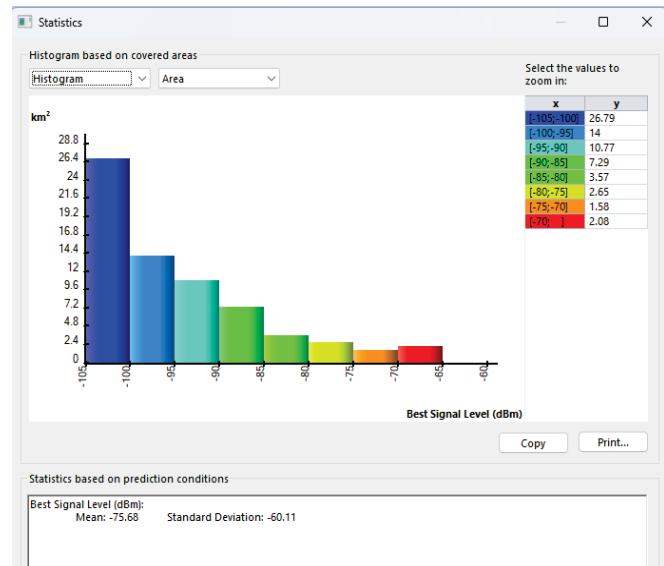


Fig. 12. Histograma de áreas de cobertura de acuerdo al nivel de señal recibida

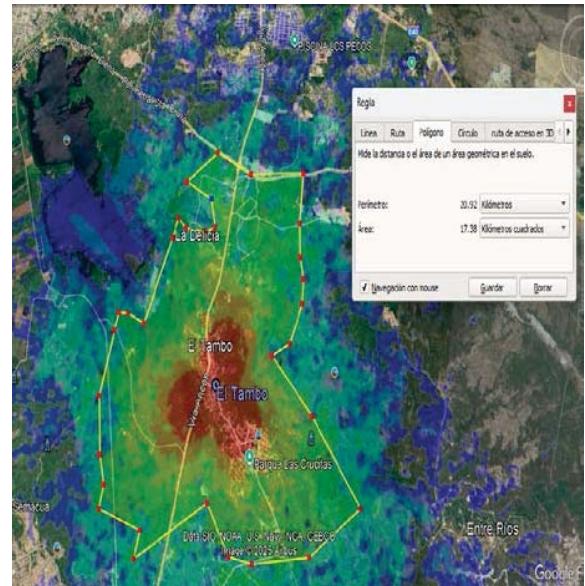


Fig. 13. Simulación de cobertura 4G de la estación base implementada en El Tambo

Lograr la conectividad en la comuna El Tambo dependerá de la infraestructura que se instalará in situ; para ello, se realiza un cálculo para determinar el gasto de inversión de capital (CAPEX; ver Tabla X), el gasto operativo anual (OPEX; ver Tabla XI) y la proyección de ventas. Estos datos permitirán evaluar la factibilidad económica de implementar el e-NodeB.

Para definir las proyecciones de ingresos, es necesario reconocer que la operadora ya cuenta con un nivel de penetración en el mercado. Sin embargo, la nueva cobertura propuesta podrá satisfacer las necesidades reprimidas de servicios esenciales para una rápida migración de los usuarios a la operadora. Es importante definir el ingreso promedio por usuario (ARPU), que se refleja en la adquisición de un plan que incluya datos 4G y justifique la inversión en LTE. La

ventaja que presenta al ser una operadora ya establecida es la rapidez con la que la población podrá adquirir el servicio, lo que implicará un periodo de recuperación acelerado.

TABLA X
CAPEX, INVERSIÓN INICIAL PARA IMPLEMENTACIÓN DE ESTACIÓN BASE EN EL TAMBO

| Servicio | Componente | Subcomponente | Valor |
|--------------------|----------------------------------|--|----------|
| Equipamiento RAN | eNodeB/RRU (3 sectores) | Unidad de Radio Remota y Baseband | 23000.00 |
| | Antenas LTE | 3 antenas Sectoriales 120° | 6000.00 |
| | Cables y Conectores RF | Cables de fibra, coaxiales, RF y accesorios | 2500.00 |
| Backhaul | Radio Enlaces de Microondas | ODU e IDU | 6000.00 |
| | Antenas de Radioenlace | 2 antenas Parabólicas | 3000.00 |
| | Gabinete Exterior y Rectificador | Gabinete y sistema de conversión AC-DC | 4500.00 |
| Sistema de Energía | Baterías (BackUp) | Banco de baterías 4-6 horas | 2000.00 |
| | Ingeniería y Diseño | Estudio, Diseño, Link Budget | 3500.00 |
| | Instalación y Commissioning | Mano de obra para montar equipos y configuración | 5500.00 |
| Total CAPEX | | | 56000.00 |

TABLA XI
OPEX, COSTOS OPERATIVOS ANUALES DE ESTACIÓN BASE EN EL TAMBO

| Componente | Valor |
|----------------------------|---------|
| Alquiler de Torre | 3000.00 |
| Consumo Eléctrico | 2500.00 |
| Mantenimiento y Reparación | 2000.00 |
| Licencias y Seguros | 1000.00 |
| Total OPEX | 8500.00 |

Los planes de la operadora tienen una amplia gama de planes que permite la conectividad con los servicios 4G / LTE [28], Tabla XII, por lo tanto, se realiza la selección de un valor promedio y asequible, siendo este el plan de \$10 mensuales, mismo que se establece como ARPU para la proyección de ingresos, en este caso se espera que iniciada la operación de la estación base, se logre conseguir el 5% de índice de penetración en la zona e ir creciendo a un ritmo progresivo del 5%, hasta alcanzar el límite de la capacidad técnica operativa de las antenas.

TABLA XII
PLANES DISPONIBLES DE LA OPERADORA

| Plan | Beneficios | Valor |
|------------------|--|----------|
| 500 Megas 1 día | 10 min a otras operadoras Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 1.00 |
| 1 Giga 5 días | 15 min a otras operadoras Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 2.00 |
| 3 Gigas 15 días | 30 min a otras operadoras Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 4.00 |
| 8 Gigas 30 días | 80 min a otras operadoras Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 8.00 |
| 12 Gigas 30 días | 100 min a otras operadoras Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 10.00 |
| 17 Gigas 30 días | 150 min a otras operadoras Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 15.00 |
| 25 Gigas 30 días | Min ilimitados a misma operadora 50 Sms (Spotify y Whatsapp) Ilimitado | \$ 25.00 |

Para calcular los ingresos proyectados a 5 años, se recurre al análisis de la población favorecida por el proyecto, que corresponde a la parroquia de San José de Ancón, a la que pertenece la comuna de El Tambo. Bajo esta consideración, se toma como población 7920 habitantes (población económicamente activa) [29]. Se estima que la operadora pueda captar anualmente el 5% de la población para lograr una migración exitosa (ver Tabla XIII).

TABLA XIII
USUARIOS Y CÁLCULO DE INGRESO ANUAL

| Año | % Penetración | Usuarios | Ingreso Anual |
|-----|---------------|----------|---------------|
| 1 | 5 | 350 | 42000.00 |
| 2 | 10 | 700 | 84000.00 |
| 3 | 15 | 1050 | 126000.00 |
| 4 | 20 | 1250 | 150000.00 |
| 5 | 25 | 1250 | 150000.00 |

Una vez determinado el CAPEX, el OPEX y los ingresos anuales, se procede a realizar el flujo de caja (TABLA XIV), mismo que permitirá la evaluación de la factibilidad económica mediante la aplicación de índices de rentabilidad, con el Valor Actual Neto (VAN), y la Tasa Interna de Retorno (TIR), además, se considera un 15% como tasa de descuento (TMAR) que es el resultado de la proyección de inflación, riesgo país y Pria de riesgo Específico [30].

TABLA XIV
FLUJO DE CAJA

| Año | CAPEX | OPEX | Ingreso anual | Flujo de caja neto | Flujo de caja acumulado |
|-----|----------|---------|---------------|--------------------|-------------------------|
| 0 | 56000.00 | 0.00 | 0.00 | -56000.00 | -56000.00 |
| 1 | 0.00 | 8500.00 | 42000.00 | 33500.00 | -22500.00 |
| 2 | 0.00 | 8500.00 | 84000.00 | 75500.00 | 53000.00 |
| 3 | 0.00 | 8500.00 | 126000.00 | 117500.00 | 170500.00 |
| 4 | 0.00 | 8500.00 | 150000.00 | 141500.00 | 312000.00 |
| 5 | 0.00 | 8500.00 | 150000.00 | 141500.00 | 453500.00 |

De acuerdo con los cálculos del flujo de caja neto, se observó que la recuperación de la inversión se produjo al finalizar el segundo año. Por lo tanto, a pesar de haberse proyectado para 5 años, se demuestra que su recuperación se realiza en un periodo menor. Por lo tanto, se procedió a calcular el factor de descuento, FDCTO (5), para cada año y a obtener el flujo de caja con descuento, FCD (ver Tabla XV).

$$FDCTO = \frac{1}{(a + tasa\ dpto)^t} \quad (5)$$

TABLA XV
FLUJO DE CAJA, TASA DE DESCUENTO

| Año | Flujo de caja neto | FDCTO (5) | Flujo de caja dpto. | Flujo de caja dpto. acumulado |
|-----|--------------------|-----------|---------------------|-------------------------------|
| 0 | -56000.00 | 1.00 | -56000.00 | -56000.00 |
| 1 | 33500.00 | 0.8696 | 29131.6 | -26868.40 |
| 2 | 75500.00 | 0.7561 | 57085.55 | 30217.15 |

Definido el FCD, se procede a calcular el VAN (6), la TIR (7) y el Tiempo de Recuperación (TR) (8); véase la Tabla XVI.

$$VAN_2 = \sum_{t=0}^2 \frac{\text{Flujo de caja Neto}_t}{(1 + tasa\ de\ dscto)^t} \quad (6)$$

Para el cálculo de la TIR es necesario realizar la evaluación en el punto de equilibrio financiero donde $VAN = 0$ y la tasa de descuento se convierte en la variable TIR.

$$\sum_{t=0}^2 \frac{\text{Flujo de caja Neto}_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \quad (7)$$

$$TR = 1 \text{ año} + \frac{FCD_{ultimo\ negativo}}{FCD_{año\ de\ calculo}} \quad (8)$$

TABLA XVI
INDICADORES DE RENTABILIDAD

| Parámetro | Valor |
|-----------|----------------|
| VAN (6) | \$30217.15 |
| TIR (7) | 49.81% |
| TR (8) | 1 año, 5 meses |

V. DISCUSIÓN

Los hallazgos del estudio demuestran la factibilidad técnica y económica de la solución propuesta para la implementación de una estación base con tecnología LTE en la comuna de El Tambo, mediante un modelado orientado a la optimización de costos. Durante la simulación inicial de la potencia de señal

recibida (RSRP), se confirman los datos recolectados en campo, que demuestran que la cobertura actual no superaba los umbrales para el uso de los servicios de 4G, lo que valida la necesidad imperiosa de implementar la propuesta para disminuir la brecha digital existente.

La combinación de los criterios de uso de frecuencia en la banda de 700 MHz y la estrategia de colocation presentan un alto índice de éxito, debido a que estas frecuencias son aptas para la propagación de óptima en ambientes rurales y topografía compleja, mientras que la estrategia de utilizar, mediante alquiler, infraestructura existente minimiza el CAPEX y los riesgos de despliegue.

Referente a la viabilidad económica de la propuesta, se demuestra que el proyecto es atractivo, pues presenta un porcentaje exigente para la recuperación de capital, 15%, y aunque el proyecto inicialmente se proyectó a 5 años, se valida la recuperación y rentabilidad en un periodo de 1 año 5 meses, aproximadamente, presentando valores de índice de rentabilidad superiores al rendimiento exigido. De esta manera, el VAN muestra un valor positivo desde el punto de vista de la rentabilidad. La TIR, al término del segundo año, supera la tasa de recuperación inicialmente establecida.

En resumen, los resultados técnicos y financieros sugieren que la propuesta presentada para el modelo de negocio demuestra robustez y sostenibilidad en la implementación de una red LTE en la comuna de El Tambo, donde la inversión estratégica permite disminuir la brecha digital y asegurar el retorno del capital.

VI. CONCLUSIONES

La factibilidad técnica y económica se demuestra mediante los resultados obtenidos durante la investigación, que evidencian una cobertura actual deficiente, con niveles por debajo de -120 dBm en toda la vía Ancón – Santa Elena, lo que no permite el uso de los servicios de la tecnología LTE. El modelo simulado de un e-nodeB en la comuna El Tambo permite mantener la conectividad tanto en la zona poblada de la comuna como en las rutas Ancón – El Tambo y El Tambo – Santa Elena. Esta implementación, por sus características, permite beneficiar un área de 17.20 km² alrededor de la estación, donde se encuentran no solo la comuna El Tambo, sino también la comuna de Prosperidad, con niveles de señal RSRP por encima de -85 dBm, lo que permite el uso de los diferentes servicios del LTE.

Además, en la simulación se demuestra que las rutas contarán con rangos de potencia de -95 dBm a -80 dBm, lo que permite el uso de servicios de telefonía celular que no requieren un alto flujo de datos, como llamadas y mensajería instantánea.

La implementación de esta solución conlleva un gasto económico considerable; sin embargo, se han propuesto varias estrategias para reducir el CAPEX a \$56000.00. Entre ellas se encuentra el colocation, que consiste en el uso de la infraestructura existente de otra operadora mediante un contrato de arrendamiento, lo que reduce los riesgos de implementación. La rentabilidad económica del proyecto se basa en los índices de rentabilidad calculados, que arrojan una

Tasa Interna de Retorno (TIR) del 49.81% y un Valor Actual Neto (VAN) de \$30217.15.

Estos valores se calculan al finalizar el segundo año de operaciones, cuando el flujo de caja acumulado con descuento se convierte en positivo. El tiempo exacto donde el proyecto es capaz de realizar una devolución total del capital invertido es en 1 año 5 meses, considerando que la operadora al encontrarse operando a nivel nacional, cuenta con un alto índice de penetración en el mercado nacional, sin embargo, en el sector del estudio al encontrarse reprimida por falta de cobertura, se espera que este índice comience en un 5% y vaya aumentando a un ritmo constante de 5% anual para poder cumplir con las proyecciones realizadas.

Finalmente, esta investigación tiene valor estratégico para la operadora TUENTI, propiedad de Millicom, pues se ha identificado como proveedor de planes prepago asequibles para la economía local, lo que la convierte en una herramienta clave para las negociaciones. Ante la ARCOTEL, se debe presentar formalmente la propuesta, demostrando que el despliegue de la red 4G mediante colocation cumple con las obligaciones regulatorias para las coberturas en zonas de brecha digital. Además de presentar un VAN positivo que minimiza el riesgo financiero y maximiza el cumplimiento de la Norma de Calidad de Servicio Móvil.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Estatal Península de Santa Elena por brindar apoyo y facilitar el uso de los equipos para medir las métricas en campo.

REFERENCIAS

- [1] M. V. Ramos, D. S. Hernández, y R. R. Gaeta, “Acción pública y telefonía comunitaria para la inclusión digital de comunidades rurales indígenas: el caso de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca”, *PAAKAT Rev. Tecnol. Soc.*, n.o. 22, Feb. 2022, doi: 10.32870/Pk.a12n22.674.
- [2] N. Santamaría, “Desconexión y despoblación rural en España: un asunto urgente en la era de la educación digital”, *Perspect. Rural. Nueva Época*, vol. 23, n.o. 45, pp. 1-20, ene. 2025, doi: 10.15359/prne.23-45.1.
- [3] J. L. C. Moreira, A. G. F. Aguilera, I. A. M. Solís, J. F. L. Dután, M. V. C. Centeno, y N. B. I. Taco, “Reducción de la brecha digital en zonas rurales: soluciones tecnológicas para una educación equitativa”, *South Fla. J. Dev.*, vol. 5, n.o 10, pp. e4527-e4527, oct. 2024, doi: 10.46932/sfjdv5n10-033.
- [4] D. P. Rodríguez, “Estudio para la ampliación de la red Wireless del ISP Santa Elena Net, dirigida para la comuna Prosperidad del cantón Santa Elena”, Ingeniería en Tecnologías de la Información, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Santa Elena, 2023. Accedido: 4 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/9271>
- [5] E. Gómez, P. Ricaurte, y I. Siles, “Descolonizando los métodos para estudiar la cultura digital: Una propuesta desde Latinoamérica”, *Cuadernos.info*, n.o. 54, pp. 160-181, 2023, doi: 10.7764/cdi.54.52605.
- [6] G. D. Corzo, E. L. Alvarez-Aros, “Estrategias de competitividad tecnológica en la conectividad móvil y las comunicaciones de la industria 4.0 en Latinoamérica”, *Inf. Tecnológica*, vol. 31, n.o 6, pp. 183-192, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-07642020000600183.
- [7] D. Monti y G. Assusa, “Estrategias sociales y educativas para enfrentar la “continuidad pedagógica”: jóvenes estudiantes, desigualdad y apropiaciones tecnológicas en Villa María, Argentina, durante la pandemia Covid-19”, *Civ. - Rev. Ciênc. Sociais*, vol. 23, p. e, ago. 2023, doi: <https://doi.org/10.15448/1984-7289.2023.1.42269>.
- [8] C. Adrogué, M. E. Orlicki, C. Adrogué, y M. E. Orlicki, “Acceso y uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en la Escuela Secundaria en diferentes contextos socioeconómicos en Argentina”, *Prax. Educ.*, vol. 24, n.o 3, pp. 117-117, Sep. 2020.
- [9] A. D. Ojeda et al., “Análisis del impacto de la inteligencia artificial ChatGPT en los procesos de enseñanza y aprendizaje en la educación universitaria”, *Form. Univ.*, vol. 16, n.o, 6, pp. 61-70, dic. 2023, doi: 10.4067/S0718-50062023000600061.
- [10] D. Soto, O. D. Valencia-López, y R. Rentería, “Alfabetización y brecha digital entre los pueblos originarios de México, 1990-2015. Efectos socioeconómicos”, *Trilogía Cienc. Tecnol. Soc.*, vol. 12, n.o. 23, pp. 84-107, dic. 2020, doi: 10.22430/21457778.1720.
- [11] J. G. Aguilar, A. B. Mungaray, y R. Mahecha, “Los retos de las nuevas emprendedoras de negocios por internet en un mundo pospandémico”, *PAAKAT Rev. Tecnol. Soc.*, vol. 13, n.o. 24, 2023, doi: 10.32870/pk.a13n24.769.
- [12] G. A. Chica, Á. F. Díaz, M. Espinosa, y D. N. Angulo, “Implementación de estación base GSM recepción de señales LTE aplicando radio definido por software”, *Iteckne*, vol. 17, n.o. 1, pp. 19-30, jun. 2020, doi: 10.15332/iteckne.v17i1.2426.
- [13] F. Ulloa, L. García, y D. Carrizo, “Simulación de comunicación inalámbrica WAN para internet de las cosas: Un estudio de caso”, *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 30, n.o. 2, pp. 218-228, jun. 2022, doi: 10.4067/S0718-33052022000200218.
- [14] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, “Norma de calidad para los servicios de telecomunicaciones”, Quito, 2018. Accedido: 3 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2022/09/9._resumen_air_-_normadecalidad_publicacion_26ago22.pdf
- [15] M. A. D. Olarte, D. J. Flores, K. J. Rios, A. D. Quispe, y N. A. Seguil, “Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en la gestión empresarial: Un análisis cienciométrico”, *Comuni@cción*, vol. 14, n.o. 4, pp. 388-400, oct. 2023, doi: 10.33595/2226-1478.14.4.899.
- [16] O. Chamorro, E. Pizarro, y D. Arce, “Evaluation of the Quality Parameters of a 4G-LTE Communications Base Station, Installed in a Rural Area of Peru”, *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 5, n.o. 1, pp. 71-76, ene. 2020, doi: 10.25046/aj050109.
- [17] V. Shutko, N. Fomenko, y O. Klyuchko, “Implementation of 3G, 4G Mobile Connections Technologies in Urban and Rural Regions”, *Electron. Control Syst.*, vol. 4, n.o. 78, pp. 62-68, dic. 2023, doi: 10.18372/1990-5448.78.18277.
- [18] N. Ioannou, D. Katsianis, y D. Varoutas, “Comparative techno-economic evaluation of LTE fixed wireless access, FTTPoF G.fast and FTTC VDSL network deployment for providing 30 Mbps broadband services in rural areas”, *Telecommun. Policy*, vol. 44, n.o. 3, p. 101875, abr. 2020, doi: 10.1016/j.telpol.2019.101875.
- [19] J. G. Ochoa y S. García, “Implementación de un prototipo de estación base para una red 4G-LTE utilizando SDR”, *CEDAMAZ*, vol. 13, n.o. 1, pp. 71-77, jun. 2023, doi: 10.54753/cedamaz.v13i1.1839.
- [20] P. I. V. Zúñiga, R. J. C. Cedeño, y I. A. M. Palacios, “Metodología de la investigación científica: guía práctica”, *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 7, n.o. 4, pp. 9723-9762, sep. 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i4.7658.
- [21] E. Hernandez y R. Sampieri, Metodología de la investigación, vol. 1. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2014.
- [22] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, “Ecuador recibe la valoración de las Bandas 2.5 GHZ y 700 MHZ y abre el camino para la Renegociación de Contratos con las operadoras de Servicio Móvil Avanzado y nuevos servicios”, ARCOTEL. Accedido: 3 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.arcotel.gob.ec/ecuador-recibe-la-valoracion-de-las-bandas-2-5-ghz-y-700-mhz-y-abre-el-camino-para-la-renegociacion-de-contratos-con-las-operadoras-de-servicio-movil-avanzado-y-nuevos-servicios/>
- [23] C. Rocha, “Detección de patrones de comportamiento de parámetros de rf en redes de comunicación móvil mediante mediciones de campo y técnicas de machine learning - propuesta de un modelo predictivo para identificar factores que se manifiestan en las fallas de handover en redes lte utilizando mediciones de campo y un árbol de decisión en r studio (caso de estudio voip)”, Ingeniería en Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [24] K. A. Molina Villalta, “Análisis de desempeño del servicio de voz sobre redes LTE (VoLTE) mediante el uso de indicadores claves de

- rendimiento (KPI)”, Maestría en Telecomunicaciones, Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2021. Accedido: 3 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/17692>
- [25] A. A. Apablaza de la Cuadra, “Estudio y simulación de cobertura VoLTE mediante diseño de link Budget para red 4G LTE de Entel de Santiago”, Ingeniería Civil Eléctrico, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2017. Accedido: 3 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150298>
- [26] J. L. Gonzabay, “Turismo comunitario y su aporte al desarrollo turístico de la comuna Palmar, parroquia Colonche, cantón Santa Elena, año 2023”, bachelorThesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2024. Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/12338>
- [27] L. Palacios, “Diseño y Desarrollo de un inhibidor de señal celular para tecnología 4G /LTE en el rango de los 1900 MHZ”, Universidad Politécnica Salesina, Quito, 2016. Accedido: 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13354/1/UPS%20-%20ST002873.pdf>
- [28] OPERADORA TUENTI, “¿Planes Móviles? Olvídate de los contratos y conoce los Combos Tuenti | Tuenti Ecuador”. Accedido: 2 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.tuenti.ec/comprar-combos-tuenti?gclsrc=aw.ds&gad_source=1&gad_campaignid=17758527770
- [29] Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, “Santa Elena”, INEC, CENSO Y POBLACIÓN, 2010. Accedido: 2 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/santa_elena.pdf
- [30] Ministerio de Economía y Finanzas, “Programación Macroeconómica 2025 – 2028”, Ministerio de Economía y Finanzas, Quito, Programación Macroeconómica, abr. 2025.

Algoritmo adaptativo para consumo energético en redes de internet de las cosas

Adaptive algorithm for energy consumption in Internet of Things networks

Santiago Meneses, Emilio Zhuma, Diego Intriago, Milton Bajaña

Abstract— This project proposed the design and implementation of an adaptive algorithm to optimize energy consumption in Internet of Things (IoT) networks using the RPL routing protocol. The research addressed the need to improve the efficiency of IoT devices powered by limited batteries, especially in contexts with limited electrical infrastructure, such as the Mocache canton in Ecuador. By integrating metrics such as residual energy, link quality (ETX), and signal strength (RSSI), the algorithm enabled dynamic adjustment of transmission power and the selection of more efficient routes, reducing energy loss without compromising service quality. The methodology was based on controlled simulations in Cooja/Contiki-OS, using a domestic scenario with three nodes (coordinator, sensor, and actuator), running two treatments: standard RPL and the modified RPL with the proposed algorithm. The results demonstrated a 22% reduction in average energy consumption (from 35 mJ to 27 mJ per node), an increase in PDR from 94.5% to 95.2%, and a decrease in parent changes, evidencing greater DODAG stability. The proposal achieves efficiency comparable to previous works while maintaining low computational overhead, operating on microcontrollers with limited resources. It is concluded that the adaptive algorithm represents a viable solution for domestic and rural IoT networks with energy constraints, providing a balance between energy savings and implementation simplicity.

Index Terms— Energy efficiency, routing protocols, low-power networks, network simulation, residual energy.

Resumen— Este proyecto planteó el diseño e implementación de un algoritmo adaptativo para optimizar el consumo energético en redes de Internet de las Cosas (IoT) que utiliza el protocolo de enrutamiento RPL. La investigación respondió a la necesidad de mejorar la eficiencia de los dispositivos IoT que dependen de baterías limitadas, especialmente en contextos con infraestructura eléctrica limitada, como el cantón Mocache, Ecuador. Mediante la integración de métricas como la energía residual, la calidad de enlace (ETX) y la intensidad de señal (RSSI), el algoritmo permitió ajustar dinámicamente la potencia de transmisión y seleccionar rutas más eficientes, reduciendo las pérdidas de energía sin comprometer la calidad del servicio. La metodología se basó en simulaciones controladas en Cooja/Contiki-OS, con un escenario doméstico de tres nodos (coordinador, sensor y actuador), y se ejecutaron dos tratamientos: RPL estándar y RPL modificado con el algoritmo propuesto. Los resultados demostraron una reducción del 22%

Santiago Meneses, Emilio Zhuma, Diego Intriago, Milton Bajaña pertenecen a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, (e-mail: {smenesesn, ezhuma, dintriagor3, mbajanar}@uteq.edu.ec).

en el consumo energético promedio (de 35 mJ a 27 mJ por nodo), un incremento del PDR del 94.5% al 95.2% y una disminución de los cambios de padre, lo que evidencia una mayor estabilidad del DODAG. La propuesta alcanza una eficiencia comparable a la de trabajos previos, manteniendo una sobrecarga computacional baja y operando en microcontroladores con recursos limitados. Se concluye que el algoritmo adaptativo representa una solución viable para redes IoT domésticas y rurales con limitaciones energéticas, aportando un equilibrio entre el ahorro energético y la simplicidad de implementación.

Palabras Claves— Eficiencia energética, protocolos de enrutamiento, redes de bajo consumo, simulación de redes, energía residual.

I. INTRODUCCIÓN

EL Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, permitiendo la comunicación y el intercambio de datos entre ellos. Durante la última década, el número de dispositivos IoT se ha incrementado de manera exponencial, con más de 10 000 millones de dispositivos conectados en 2021 y previsiones de 41 000 millones para 2027 [1], integrándose en diversos sectores como la salud, la industria y el hogar, donde facilita la automatización de procesos y mejora la eficiencia operativa [2], [3].

Uno de los desafíos más significativos en el desarrollo de redes IoT es la gestión eficiente del consumo de energía, ya que los dispositivos suelen contar con recursos limitados y ser alimentados por baterías, lo que requiere optimizar el consumo de energía para prolongar su vida útil y asegurar un funcionamiento sostenible [4]. En este contexto, el Protocolo de Enrutamiento para Redes de Bajo Consumo (RPL), estandarizado en el RFC 6550 [5], se ha establecido como el estándar para las comunicaciones en redes inalámbricas de bajo consumo.

Para lograr una comunicación eficiente en entornos con recursos limitados, RPL organiza los nodos en una topología jerárquica denominada Grafo Dirigido Acíclico de Destino (DODAG, por sus siglas en inglés) [6]. Esta estructura funciona como un árbol, donde un nodo raíz, usualmente el coordinador que conecta la red con internet, se sitúa en la cima [7]. Cada dispositivo selecciona un nodo "padre" para reenviar la información en dirección ascendente hacia la raíz, creando rutas estables y optimizadas. Este mecanismo es fundamental para soportar los diversos patrones de tráfico en redes IoT, incluyendo la comunicación de muchos a uno (many-to-one) y

punto a punto (point-to-point) [8].

A pesar de sus ventajas, RPL presenta limitaciones en la optimización del consumo energético, especialmente cuando se utilizan dispositivos con recursos limitados [4]. La versión estándar del protocolo no realiza ajustes dinámicos de métricas como la calidad del enlace (ETX) y la energía residual de los nodos, lo que limita su eficiencia en escenarios prácticos y justifica la necesidad de investigaciones orientadas a optimizar su consumo energético.

En Ecuador, esta problemática se agudiza debido a la crisis energética, que ha alcanzado niveles críticos, con apagones diarios de hasta 14 horas, producto de la peor sequía en seis décadas [9]. Específicamente, en el cantón Mocache, de la provincia de Los Ríos, los cortes de energía frecuentes y la falta de infraestructura avanzada en zonas rurales afectan directamente el consumo energético de los hogares. En estos contextos, surge la necesidad de soluciones adaptadas a las realidades locales donde se busca implementar dispositivos IoT para la gestión de electrodomésticos inteligentes, enfrentando el desafío de optimizar el consumo energético en redes de dispositivos con baterías limitadas y condiciones de operación restrictivas que demandan estrategias eficientes y sostenibles.

Para abordar este desafío, diversas investigaciones han explorado estrategias de optimización energética en redes IoT. Estos enfoques incluyen el control dinámico de la potencia de transmisión, que regula la potencia de los nodos en función de la calidad del enlace y la distancia, evitando un gasto excesivo en escenarios estables; el uso de algoritmos adaptativos capaces de ajustar parámetros de operación en tiempo real según las condiciones cambiantes de la red; y la optimización de la tasa de transmisión, que disminuye la frecuencia de envío de datos cuando la red presenta estabilidad o cuando las variables medidas no requieren actualizaciones constantes [10]. En conjunto, estas técnicas buscan alcanzar un equilibrio entre el ahorro energético y la calidad del servicio, aunque su efectividad depende de su capacidad de integrarse de manera transparente con protocolos de aplicación ampliamente utilizados en IoT, como CoAP y MQTT.

El propósito de este estudio es implementar un algoritmo basado en el Protocolo de Enrutamiento para Redes de Bajo Consumo que reduzca el consumo de energía en redes de Internet de las cosas. La propuesta integra métricas como la energía residual y la calidad de enlace (ETX, RSSI), lo que permite ajustar dinámicamente la potencia de transmisión y seleccionar rutas más eficientes mediante un controlador lineal, reduciendo las pérdidas de energía sin comprometer la calidad del servicio. La validación se realizó mediante simulaciones en entornos controlados con Contiki-OS, en un escenario doméstico de tres nodos (coordinador, sensor y actuador) que representan una vivienda típica.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversas investigaciones han propuesto mejoras al protocolo RPL para optimizar el consumo energético en redes IoT, abordando el problema desde distintas perspectivas técnicas. El Algoritmo de Función Objetivo Adaptativa (AOF)

desarrollado por Lamaazi y Benamar [11] ajusta en tiempo real la métrica de RPL para mejorar la estabilidad del DODAG, logrando una reducción del 22% en el consumo energético y una mejora del 10% en el PDR. Sin embargo, el estudio no considera el control dinámico de la potencia de transmisión y se limita a la selección de rutas. Esta omisión es crítica en escenarios con nodos de energía restringida, donde el ajuste de potencia puede representar hasta el 50% del consumo total.

El protocolo LOA-RPL propuesto por Sennan et al. [12], incorpora el Algoritmo de Optimización de León para seleccionar los cluster heads según la energía residual, lo que permite una reducción del 20% en el consumo y un incremento del 25% en la vida útil de la red. No obstante, el esquema de clusterización es complejo y poco aplicable a redes domésticas pequeñas (3-10 dispositivos). La sobrecarga de mensajes de control para mantener la estructura de clústeres incrementa el tráfico, lo que contraviene el objetivo de minimizar el consumo en entornos de bajo tráfico.

La propuesta de Tarif, Mirzaei y Nouri-Moghaddam [13] emplea búsqueda Tabú para optimizar la selección de padres y reducir las pérdidas de paquetes, logrando una reducción del 15% en el consumo energético y una mejora del 8% en PDR. Sin embargo, el algoritmo requiere una mayor capacidad de procesamiento y de memoria para mantener la lista Tabú y evaluar múltiples candidatos. Los autores reconocen que el overhead computacional puede representar hasta un 30% adicional de ciclos de CPU, lo que compromete la viabilidad en nodos con restricciones de procesamiento.

EQ-RPL, presentado por Wang y Liu [14], aborda el balance energético y la calidad del enlace mediante un método de dos fases. Primero, el rango de cada nodo se calcula utilizando una métrica de calidad derivada del ETX y de la diversidad de enlaces, a fin de asegurar la robustez de la ruta. Posteriormente, durante la transmisión de datos, se aplica una estrategia de "máxima energía gana", seleccionando como siguiente salto al parent con la mayor energía residual. Los resultados de su simulación confirman que EQ-RPL mejora la tasa de entrega de paquetes y equilibra el consumo energético en la red.

El modelo multiatención aplicado por Wang y Li [15] alcanza la mayor eficiencia reportada, con una reducción del 25% en el consumo y una mejora del 30% en la vida útil en entornos industriales de IoT. No obstante, la necesidad de un entrenamiento prolongado (10.000 episodios), un alto consumo de memoria (512 KB) y la dependencia de hardware especializado hacen poco viable este enfoque en entornos residenciales, donde los microcontroladores típicos disponen de 10-48 KB de RAM.

Un enfoque de capa cruzada (cross-layer) es explorado por Poornima et al. [16], quienes diseñan una función objetivo que integra información de la capa MAC en las decisiones de enrutamiento de RPL. Su método utiliza lógica difusa para ponderar métricas tradicionales, como el ETX, junto con un indicador innovador de "energía por paquete" (EPP), derivado de la dinámica de los strobes del Radio Duty Cycling (RDC). Esta estrategia, validada tanto en simulación como en un

testbed físico, demostró una mejora del 15% en la eficiencia energética.

Finalmente, R. Sirwan [17] propuso un protocolo RPL adaptativo basado en el contenido, con el objetivo de reducir el tráfico y mejorar la eficiencia energética en redes IoT de gran escala. Aunque el enfoque es innovador, se centra principalmente en sistemas de distribución de información a gran escala, lo que lo aleja de la realidad de las redes residenciales. Este trabajo sirve como referencia sobre la importancia de la adaptación en RPL, pero la investigación actual se centra en escenarios más reducidos y realistas, como los hogares del cantón Mocache.

III. METODOLOGÍA

Este estudio adoptó un enfoque cuantitativo mediante simulaciones controladas en Cooja/Contiki-OS para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto frente al protocolo RPL estándar. La elección de un entorno simulado responde a la necesidad de garantizar la reproducibilidad y un control riguroso de las variables, lo que permite aislar el efecto del algoritmo de las interferencias externas propias de las implementaciones físicas. El diseño cuasiexperimental con grupo de comparación permite contrastar dos tratamientos bajo condiciones idénticas de topología, tráfico y configuración de hardware.

A. Escenario de pruebas

El escenario simulado representa una vivienda doméstica de 25×45 m ubicada en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador, con dos paredes internas de mampostería que introducen una atenuación de señal realista. La red se compone de tres nodos basados en microcontroladores MSP430: un coordinador (nodo raíz) ubicado junto al router del hogar, un sensor ambiental en un dormitorio y un actuador en la sala, como se ilustra en la Fig. 1.

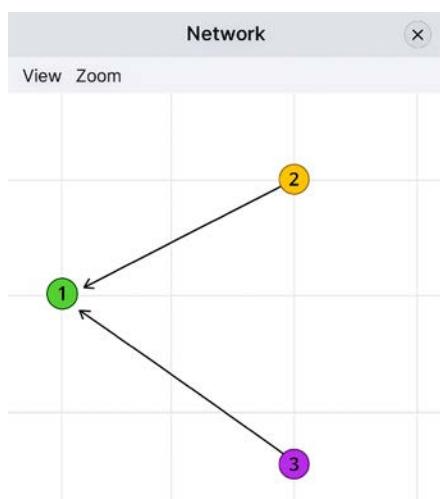


Fig. 1. Escenario doméstico simulado con tres nodos en Cooja

Cada nodo transmite paquetes de datos cada 60 segundos en el canal 26 del estándar IEEE 802.15.4 (2.48 GHz). Se ejecutaron dos tratamientos: T₀ (RPL estándar con potencia fija de -10 dBm) y T₁ (RPL modificado con el algoritmo

adaptativo), cada uno con tres réplicas, utilizando semillas pseudoaleatorias distintas (42, 87, 135) para garantizar la robustez estadística.

B. Diseño del algoritmo adaptativo

El algoritmo propuesto se implementó como una modificación del protocolo RPL mediante la integración de un módulo de control que opera en la capa de red, sin alterar las capas de aplicación (CoAP/MQTT) ni la pila IEEE 802.15.4/6LoWPAN.

El modelo se compone de dos componentes principales ejecutados periódicamente cada 60 segundos: un selector de padre basado en función de costo multicriterio que combina métricas de calidad de enlace (ETX) y energía residual, y un controlador lineal que ajusta dinámicamente la potencia de transmisión del radio en función de las condiciones del enlace y el estado energético del nodo. Ambos componentes operan de forma transparente sobre la estructura DODAG de RPL, manteniendo la compatibilidad con los nodos estándar de la red.

La función de costo para evaluar candidatos a padre se define como:

$$C_p(t) = w_{ETX} \cdot \frac{ETX_{i \rightarrow p}(t)}{ETX_{max}} + w_{EN} \cdot [1 - E_p(t)] \quad (1)$$

donde ETX representa el número esperado de retransmisiones hacia el padre candidato p, normalizado por un valor máximo de referencia ($ETX_{max} = 4$), y E_p denota la energía residual normalizada del nodo padre. Los pesos de ponderación se fijaron en $w_{ETX} = 0.6$ y $w_{EN} = 0.4$, priorizando la estabilidad del enlace sin descuidar la distribución equitativa del consumo energético.

El ajuste dinámico de potencia de transmisión se implementó mediante un controlador lineal:

$$P_{Tx} = (t+1) = sat \left[P_{Tx}(t) + k_1(ETX - ETX_{obj}) + k_2(RSSI_{obj} - RSSI) - k_3(E_{TH} - E_i) \right] \quad (2)$$

donde ETX_{obj} y $RSSI_{obj}$ representan los valores objetivo, E_{TH} es el umbral de energía crítica, y las ganancias $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ regulan la sensibilidad del controlador. La función $sat()$ garantiza que la potencia se mantenga dentro del rango operativo del radio [-24, 0] dBm. El diagrama de flujo del algoritmo se presenta en la Fig. 2, mostrando la secuencia de lectura de métricas, normalización, cálculo del costo, selección del padre y ajuste de potencia.

Para su implementación, el algoritmo se calibró con una serie de parámetros fijos que definen su comportamiento objetivo. Estos valores, detallados en la Tabla I, fueron seleccionados tras un análisis de sensibilidad para determinar el equilibrio óptimo entre el ahorro energético y la estabilidad.

La configuración de estos parámetros refleja la estrategia del algoritmo. Los pesos de la función de costo ($w_{ETX} = 0.6$, $w_{EN} = 0.4$) otorgan mayor prioridad a la estabilidad del enlace (ETX) frente a la energía residual, con el fin de minimizar las retransmisiones costosas. Los valores objetivo de RSSI y ETX

definen el umbral de un "enlace saludable", mientras que las ganancias unitarias del controlador ($k = 1.0$) aseguran una respuesta equilibrada, evitando ajustes de potencia demasiado agresivos o demasiado lentos.

Estos parámetros fueron implementados en C dentro del sistema operativo Contiki-OS, utilizando sus librerías nativas para la gestión del protocolo RPL (rpl-lite/rpl.h) y la estimación de energía (sys/energest.h).

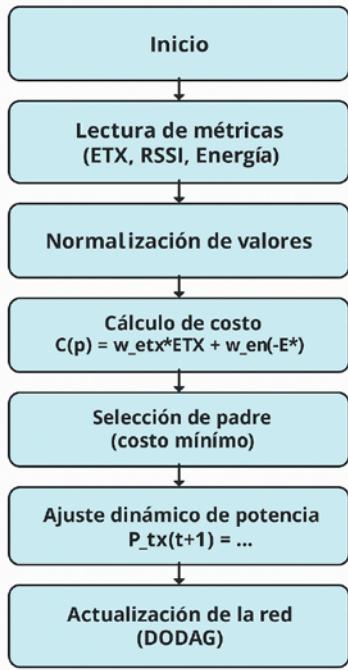


Fig. 2. Diagrama de flujo del algoritmo adaptativo

TABLA I

COMPARACIÓN ENTRE RPL ESTÁNDAR Y EL ALGORITMO PROPUESTO

| Parámetro | Valor Asignado | Descripción |
|-----------------|----------------|---|
| $RSSI_{obj}$ | -80 dBm | Umbral objetivo de intensidad de señal. |
| ETX_{obj} | 1.5 | Número esperado de retransmisiones. |
| w_{ETX} | 0.6 | Peso asignado a la métrica ETX. |
| w_{EN} | 0.4 | Peso asignado a la energía residual. |
| k_1, k_2, k_3 | 1.0 | Ganancias del controlador para ETX, RSSI y energía. |

C. Configuración del algoritmo en el simulador

La estimación del consumo energético y de la energía residual de los nodos se realizó mediante las herramientas Energest y Powertrace, integradas en el sistema operativo Contiki-NG y en el simulador Cooja. Estas utilidades permiten calcular el gasto energético de cada nodo a partir del tiempo que permanece en diferentes estados de operación, sin necesidad de instrumentación física: CPU activo (procesamiento), LPM (Low Power Mode o modo de bajo consumo), RX (recepción de radio), TX (transmisión de radio).

En cada estado, el simulador acumula el tiempo de

ejecución y lo relaciona con parámetros de consumo energético predeterminados para el mote virtual como mps340 a partir de estos valores, la energía consumida se estimó mediante:

$$E = \sum_i V \cdot I_j \cdot t_i \quad (3)$$

Este método se utiliza ampliamente en simulaciones de IoT con Contiki-OS porque no requiere instrumentación física y proporciona resultados reproducibles. El procedimiento seguido para esta estimación se representa en el esquema de la Fig. 3.

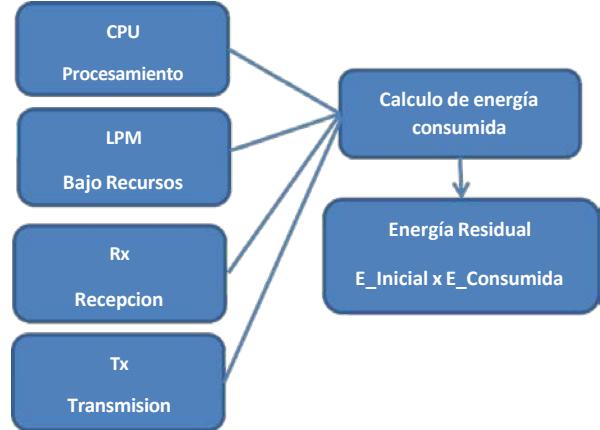


Fig. 3. Esquema de medición de energía residual

El esquema representa el procedimiento seguido para estimar la energía residual de los nodos en la simulación. Cada dispositivo virtual alterna entre cuatro estados principales: CPU (procesamiento activo), LPM (modo de bajo consumo), RX (recepción de radio) y TX (transmisión de radio). El simulador acumula el tiempo en cada estado y lo convierte en energía consumida mediante las herramientas Energest y Powertrace.

D. Métricas de evaluación

Además del consumo energético, se evaluaron métricas de calidad del servicio y de estabilidad de la red. La tasa de entrega de paquetes (PDR) se midió como el porcentaje de paquetes recibidos con éxito respecto del total enviado, mientras que la latencia extrema a extremo se definió como el tiempo promedio entre la transmisión y la recepción. La estabilidad de la red se evaluó contabilizando los cambios de padre en la estructura DODAG durante la simulación, donde una menor cantidad de cambios indica una mayor persistencia de rutas y un menor overhead de mensajes de control.

E. Variables de análisis

La investigación requirió definir variables para medir el efecto del algoritmo propuesto frente al protocolo RPL estándar. Estas variables se clasificaron en tres categorías: independientes, dependientes y controladas, para garantizar la validez y la reproducibilidad de los resultados.

1) Variable independiente

La condición de enrutamiento constituyó la variable independiente manipulada en dos tratamientos experimentales. El tratamiento T_0 correspondió al protocolo RPL estándar operando con una potencia de transmisión fija de -10 dBm y una función objetivo por defecto basada exclusivamente en ETX. El tratamiento T_1 implementó el algoritmo adaptativo propuesto, integrando el control dinámico de potencia y la selección del parent mediante la función de costo combinada. Esta manipulación permitió aislar el efecto del algoritmo sobre las métricas de desempeño de la red.

2) Variables dependientes

Las variables dependientes cuantificaron el desempeño de ambos tratamientos mediante cinco indicadores principales. El consumo energético por nodo se expresó en milijulios (mJ), calculado mediante Energest y Powertrace que acumulan el tiempo en cuatro estados operativos: CPU activo, modo de bajo consumo (LPM), recepción (RX) y transmisión (TX). La tasa de entrega de paquetes (PDR) se definió como el porcentaje de paquetes recibidos con éxito respecto del total enviado, lo que proporciona una medida directa de la confiabilidad de la red.

La latencia de extremo a extremo registra el tiempo total, en milisegundos (ms), que requiere un paquete para viajar desde el nodo de origen hasta el destino final, una métrica crítica para aplicaciones de tiempo real. La estabilidad de la red se evaluó contabilizando los cambios de parent en la topología DODAG durante la simulación, donde una menor cantidad de cambios indica una mayor persistencia de rutas y un menor overhead de mensajes de control. Finalmente, la energía residual se expresó como porcentaje de la capacidad inicial de la batería, lo que permitió proyectar la autonomía restante de los nodos y su vida útil operativa.

3) Variables controladas

Las variables controladas fueron aquellas mantenidas constantes para asegurar la validez del experimento, entre ellas: el número y la posición de los nodos en la topología (coordinador, sensor y actuador), el intervalo de generación de tráfico (60 s), el tamaño de los paquetes, el canal de radio, la semilla del generador pseudoaleatorio (PRNG) y la duración de cada simulación.

IV. RESULTADOS

Los resultados presentados corresponden a los valores promedio obtenidos y contrastan el desempeño del protocolo RPL estándar (T_0) con el del algoritmo adaptativo propuesto (T_1) bajo las condiciones descritas en la metodología.

A. Comparación de consumo energético

La Tabla II sintetiza las métricas principales obtenidas en ambos tratamientos, incluyendo el consumo energético, la tasa de entrega de paquetes, la latencia y la estabilidad de la red.

TABLA II
COMPARACIÓN ENTRE RPL ESTÁNDAR Y EL ALGORITMO PROPUESTO

| Métrica | RPL Estándar | Algoritmo propuesto | Mejora (%) |
|---------------------------------|--------------|---------------------|------------|
| Consumo energético | 35mJ | 27mJ | 22 |
| PDR (%) | 94.5% | 95.2% | +0.7 |
| Latencia extremo a extremo (ms) | 122ms | 120ms | -1.6 |

El algoritmo propuesto redujo el consumo energético promedio por nodo en un 22%, pasando de 35 mJ a 27 mJ. Esta reducción se concentró principalmente en los estados de transmisión y recepción, donde el ajuste dinámico de potencia evitó el desperdicio asociado a la mantención de niveles fijos. El nodo sensor ubicado en la zona de mayor atenuación obtuvo el mayor beneficio individual.

B. Calidad de servicio

Un hallazgo clave del estudio es que la optimización energética no comprometió la calidad de servicio (QoS), un aspecto fundamental en las aplicaciones de IoT. La tasa de entrega de paquetes (PDR) también experimentó una ligera mejora, pasando del 94.5% al 95.2%. Esta relación de equilibrio, en la que la latencia de extremo a extremo también se mantuvo estable en 120 ms, puede apreciarse visualmente en la comparativa de la Fig. 4. Estos resultados confirman que el algoritmo es robusto y no introduce retrasos perjudiciales en la comunicación.

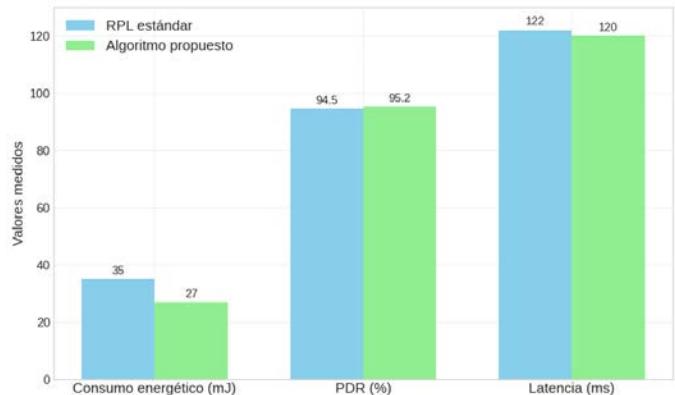


Fig. 4. Comparación de métricas de rendimiento entre RPL estándar y el algoritmo propuesto

Más allá de las métricas de PDR y latencia, la investigación también evidenció una mejora cualitativa en la estabilidad de la topología de la red. El algoritmo propuesto demostró favorecer la persistencia del DODAG, reduciendo el número de cambios de parent durante la simulación. Esta mayor estabilidad en la estructura jerárquica se traduce directamente en una menor sobrecarga de mensajes de control, lo que contribuye a un ahorro energético indirecto y a una mayor fiabilidad en la comunicación.

C. Comportamiento adaptativo del controlador

Uno de los componentes centrales del algoritmo propuesto es su capacidad para gestionar activamente la potencia de transmisión (P_{tx}), un factor clave del consumo energético total de un nodo. A diferencia del RPL estándar que opera con una

potencia fija, el controlador adaptativo fue diseñado para ajustarse dinámicamente a las condiciones del enlace de comunicación. La lógica es simple pero efectiva: reducir la potencia cuando la calidad de la señal es alta para maximizar el ahorro de energía, e incrementarla únicamente cuando el enlace se degrada para garantizar la conectividad y la fiabilidad de la red.

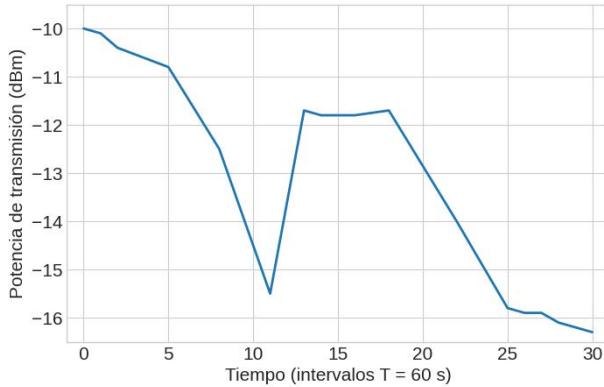


Fig. 5. Evolución de la potencia de transmisión (Ptx) del controlador adaptativo

La Fig. 5 muestra la evolución temporal de esta potencia en el nodo sensor durante la simulación, sirviendo como evidencia visual de su funcionamiento. En la gráfica se observa claramente cómo el controlador reduce progresivamente la potencia desde los -10 dBm iniciales hasta un mínimo de -15.5 dBm durante los primeros 10-12 intervalos, un período en el que las condiciones del enlace eran óptimas. Posteriormente, ante una degradación simulada, el sistema reacciona aumentando la potencia de forma puntual para mantener la comunicación.

Este comportamiento confirma que el ajuste se realiza de manera inteligente y solo cuando las condiciones lo requieren. Al evitar el desperdicio energético asociado a mantener una potencia de transmisión alta de forma constante, como ocurre en RPL estándar, el controlador adaptativo se convierte en el principal responsable del ahorro energético del 22% logrado en este estudio.

D. Tiempo de adaptación del algoritmo

El algoritmo propuesto requiere tres ciclos de comunicación (180 segundos) para alcanzar la convergencia completa ante cambios significativos en las condiciones del enlace o en el nivel energético de los nodos. Este tiempo de estabilización está determinado por dos factores principales: el período de actualización de 60 segundos del proceso de control y el filtro exponencial con factor $\alpha = 0.5$ aplicado a las métricas ETX y RSSI. El filtro exponencial se define como:

$$\hat{x}(t) = \alpha \cdot \hat{x}(t-1) + (1-\alpha) \cdot x(t) \quad (4)$$

donde $\hat{x}(t)$ representa el valor filtrado de la métrica (ETX o RSSI) en el instante t . Con $\alpha = 0.5$, el sistema pondera equitativamente las mediciones previas y actuales, lo que permite una respuesta gradual que se estabiliza por completo en tres iteraciones. Este comportamiento evita ajustes bruscos

en la potencia de transmisión que podrían provocar oscilaciones en la calidad del enlace, garantizando transiciones suaves entre estados operativos sin comprometer la conectividad durante el proceso de ajuste.

Durante este período de adaptación, no se evidenció pérdida de datos. La tasa de entrega de paquetes (PDR) se mantuvo en 95.2%, un valor que incluso supera al obtenido con el RPL estándar (94.5%). Esto se debe a que el protocolo RPL actualiza su tabla de enrutamiento de forma incremental, preservando las rutas establecidas mientras las métricas de calidad ($ETX < 4$, $RSSI > -90$ dBm) permanezcan dentro de umbrales aceptables.

E. Estabilidad de la topología

La estructura lógica del DODAG establecida en el escenario doméstico se mantuvo inalterada durante las simulaciones. En la Fig. 6. Se representan las rutas ascendentes desde los nodos hijos (sensor y actuador) hacia el coordinador, que actúa como nodo raíz.

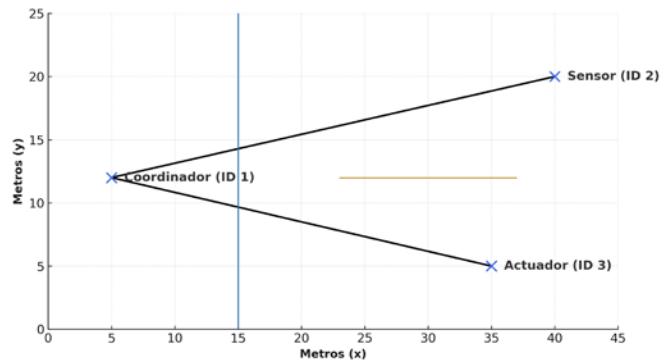


Fig. 6. Organización jerárquica de la red bajo RPL

La selección de padres basada en la función de costo combinado (1) permitió mantener la persistencia de las rutas establecidas, reduciendo la necesidad de reconfiguraciones frecuentes. Ambos nodos hijos mantuvieron al coordinador como padre preferido durante la mayor parte de la simulación, lo que evidencia la estabilidad del algoritmo propuesto.

F. Análisis de sensibilidad de parámetros

La calibración de los pesos de ponderación (w_{ETX} , w_{EN}) y de las ganancias del controlador (k_1 , k_2 , k_3) resultó determinante para el desempeño del algoritmo. La configuración $w_{ETX} = 0.6$ y $w_{EN} = 0.4$ logró el mejor equilibrio entre el ahorro energético y la estabilidad de la red. Configuraciones con mayor peso en energía ($w_{EN} = 0.6$) incrementaron el ahorro, pero generaron mayor inestabilidad en la topología, mientras que priorizar exclusivamente ETX ($w_{ETX} = 0.8$) redujo el ahorro energético obtenido.

En cuanto a las ganancias del controlador, los valores $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ mostraron una respuesta equilibrada, sin oscilaciones, en la potencia de transmisión. Valores superiores ($k = 1.5$) generaron ajustes bruscos, mientras que valores menores ($k = 0.5$) redujeron la capacidad de reacción ante la degradación del enlace. Estos hallazgos confirman la importancia de la calibración para mantener el equilibrio entre

la eficiencia energética y la calidad del servicio.

V. DISCUSIÓN

Los hallazgos de este estudio muestran claramente que el algoritmo adaptativo propuesto reduce el consumo energético en un 22% respecto al protocolo RPL estándar, manteniendo la calidad de servicio con un PDR de 95.2% y una latencia estable de 120 ms. Estos resultados demuestran que es posible optimizar la eficiencia energética en redes IoT domésticas mediante mecanismos de control simples, sin recurrir a técnicas computacionalmente costosas. Adicionalmente, se evidenció una mejora significativa en la estabilidad del DODAG al disminuir la frecuencia de cambios de padre, lo cual es relevante para minimizar la sobrecarga de mensajes de control.

Al contextualizar estos resultados, el ahorro energético del 22% posiciona al algoritmo de manera competitiva frente a otros enfoques. Es comparable a los resultados obtenidos por Sennan et al. [12] con algoritmos bioinspirados (20%) y superior al 15% alcanzado por Tarif et al. mediante búsqueda heurística [13]. La mejora de la estabilidad de la red, por su parte, coincide con lo planteado por Lamaazi y Benamar [11], quienes señalan que una mayor persistencia en la topología reduce el tráfico de control y, en consecuencia, el consumo de energía.

El esquema desarrollado logra un notable equilibrio entre eficiencia y simplicidad. A diferencia de algoritmos de mayor complejidad, como los de Wang y Li [14], que requieren recursos computacionales elevados para alcanzar un 25% de ahorro, esta propuesta obtiene un rendimiento similar a un bajo costo computacional. Este hallazgo es particularmente relevante en escenarios con conectividad limitada, como los de Mocache. La evidencia sugiere que el algoritmo no solo es viable en simulación, sino que también tiene un alto potencial en implementaciones reales con recursos limitados.

Este estudio se limitó a la validación en entornos de simulación, sin realizar pruebas en hardware físico que pudieran revelar comportamientos no capturados por Cooja. Factores como las interferencias en la banda de 2.4 GHz (Wi-Fi, Bluetooth), la variabilidad térmica de los componentes y los efectos de multipaso en entornos reales no se consideraron. El escenario evaluado se limitó a tres nodos, lo que representa una topología mínima válida para hogares básicos, pero insuficiente para generalizar a redes de mayor escala, con más saltos y una mayor densidad de dispositivos.

Se recomienda que futuras investigaciones validen el algoritmo mediante implementaciones físicas en plataformas y evalúen su comportamiento en redes con 10 a 30 nodos distribuidos en múltiples niveles jerárquicos. Resulta necesario explorar la integración de técnicas de predicción de la degradación del enlace y su interacción con aplicaciones IoT críticas que impongan requisitos estrictos de latencia, como el monitoreo médico o el control industrial en tiempo real, y verificar que el ajuste dinámico no introduzca retardos adicionales en escenarios de alta criticidad.

VI. CONCLUSIONES

La investigación permitió implementar y validar, en un entorno de simulación, un algoritmo basado en el protocolo RPL que demostró ser eficaz para reducir el consumo energético en redes IoT. Las pruebas confirmaron que la propuesta no solo mejora la autonomía estimada de los dispositivos, sino que también mantiene niveles robustos de calidad de servicio, logrando un equilibrio fundamental entre la eficiencia energética y el rendimiento de la red.

El desarrollo del algoritmo adaptativo demostró que la integración de métricas de energía residual y de calidad del enlace resulta clave para lograr un ahorro energético significativo sin sacrificar la estabilidad de la red. La validación simulada mostró que el ajuste dinámico de la potencia y la selección de rutas eficientes constituyen una estrategia viable y práctica, especialmente en redes domésticas con recursos computacionales y energéticos limitados.

Los resultados cuantitativos evidenciaron un ahorro energético del 22%, un PDR del 95.2% y una latencia estable de 120 ms. Se confirmó, además, una mejora en la estabilidad de la topología DODAG, lo que disminuyó la frecuencia de los cambios de padre y, por ende, la sobrecarga de mensajes de control. Estos hallazgos demuestran que es posible optimizar redes IoT mediante mecanismos simples, sin necesidad de recurrir a técnicas de alta complejidad computacional.

La validación mediante simulaciones confirmó la viabilidad técnica de la propuesta, especialmente en escenarios con infraestructura eléctrica limitada, como el del cantón Mocache. La configuración óptima de parámetros, con un mayor peso en la calidad del enlace ($WETX = 0.6$) y ganancias unitarias en el controlador, demostró ser clave para lograr el mejor equilibrio entre el ahorro energético y la estabilidad de la red. Este estudio concluye que el algoritmo propuesto representa una solución eficiente y de bajo costo computacional, alineada con las restricciones de los dispositivos IoT actuales.

REFERENCIAS

- [1] K. Elgazzar et al., “Revisiting the Internet of Things: New Trends, Opportunities and Grand Challenges,” *Frontiers in the Internet of Things*, vol. 1, Nov. 2022, doi: 10.3389/friot.2022.1073780.
- [2] J. Sebastián and T. Daza, “Routing IOT,” Jul. 29, 2022, Universidad de los Andes, Bogotá. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1992/59452>
- [3] T. V Manohar and Dr. T. Dharini, “Energy Efficiency in IoT: Challenges, Techniques, and Future Directions,” *International Journal of Innovative Research in Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 1136–1142, 2024, Accessed: Oct. 05, 2025. [Online]. Available: <https://ijirt.org/article?manuscript=168552>
- [4] K. F. Haque, A. Abdalgawad, V. P. Yanambaka, and K. Yelamarthi, “An Energy-Efficient and Reliable RPL for IoT,” IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2020 - Symposium Proceedings, Jun. 2020, doi: 10.1109/WF-IOT48130.2020.9221450.
- [5] T. Winter et al., “RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks,” Internet Engineering Task Force (IETF), Mar. 2012, doi: 10.17487/rfc6552.
- [6] R. Elsas, E. De Poorter, and J. Hoebeke, “DRiPLOF: An RPL Extension for Multi-Interface Wireless Sensor Networks in Interference-Prone Environments,” *Sensors*, vol. 22, no. 10, p. 3906, May 2022, doi: 10.3390/S22103906/S1.

- [7] Z. A. Almusaylim, N. Z. Jhanjhi, and A. Alhumam, "Detection and Mitigation of RPL Rank and Version Number Attacks in the Internet of Things: SRPL-RP," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 5997, Nov. 2020, doi: 10.3390/S20215997.
- [8] S. Sennan, S. Ramasubbareddy, A. K. Luhach, A. Nayyar, and B. Qureshi, "CT-RPL: Cluster Tree Based Routing Protocol to Maximize the Lifetime of Internet of Things," *Sensors*, Vol. 20, Page 5858, vol. 20, no. 20, p. 5858, Oct. 2020, doi: 10.3390/S20205858.
- [9] S. Quevedo, A. B. Carrasco, K. J. L. Cabrera, C. E. S. Parrales, and V. B. S. Soledispa, "Análisis del impacto de los apagones de energía eléctrica en la rentabilidad de las grandes empresas en la provincia del Guayas, 2024," *Polo del Conocimiento*, vol. 10, no. 5, pp. 1411–1430, May 2025, doi: 10.23857/pc.v10i5.9513.
- [10] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, "The Constrained Application Protocol (CoAP)," *Internet Engineering Task Force*, Jun. 2020, Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7252>
- [11] S. Ibrahimy, H. Lamaazi, and N. Benamar, "IoT Nodes Behavior Analysis Under Constrained Environment Using RPL Protocol," 2021 3rd IEEE Middle East and North Africa COMMunications Conference, MENACOMM 2021, pp. 74–79, 2021, doi: 10.1109/MENACOMM50742.2021.9678215.
- [12] S. Sennan, S. Ramasubbareddy, A. Nayyar, Y. Nam, and M. Abouhawwash, "LOA-RPL: Novel Energy-Efficient Routing Protocol for the Internet of Things Using Lion Optimization Algorithm to Maximize Network Lifetime," *Computers, Materials and Continua*, vol. 69, no. 1, pp. 351–371, May 2021, doi: 10.32604/CMC.2021.017360.
- [13] M. Tarif, M. Homaei, A. Mirzaei, and B. Nouri-Moghaddam, "Optimizing RPL Routing Using Tabu Search to Improve Link Stability and Energy Consumption in IoT Networks," Aug. 2024, Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2408.06702.pdf>
- [14] S. Srividhya, S. Sankaranarayanan, S. A. Kozlov, and J. J. P. C. Rodrigues, "Fuzzy Aggregator Based Energy Aware RPL Routing for IoT Enabled Forest Environment," *Computers, Materials & Continua*, vol. 72, no. 2, pp. 4039–4055, Mar. 2022, doi: 10.32604/CMC.2022.026306.
- [15] Y. Wang, Y. Li, J. Lei, and F. Shang, "Robust and energy-efficient RPL optimization algorithm with scalable deep reinforcement learning for IIoT," *Computer Networks*, vol. 255, p. 110894, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.COMNET.2024.110894.
- [16] M. R. Poornima, H. S. Vimala, and J. Shreyas, "Fuzzy-Based Novel Cross-Layer RPL Objective Function for Energy-Aware Routing in IoT," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 1–25, Dec. 2025, doi: 10.1007/S44196-025-00916-2/FIGURES/21.
- [17] R. Sirwan and M. Al-Ani, "Adaptive Routing Protocol RPL in IOT Networks based on Content Centric," Jun. 2020, Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343837257_Adaptive_Routing_Protocol_RPL_in_IOT_Networks_based_on_Content_Centric

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 inició sus labores en octubre del mismo año, en la modalidad presencial, con 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 solo perfil estas aspiraciones, ofreciendo las carreras de Ingeniería en Telecomunicaciones e Ingeniería en Electrónica y Automatización.

Además, ofrece los siguientes programas de posgrado: **Maestría de Investigación en Electrónica, con 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 Telecommunications Engineering, and Electronics and Automation 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.

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Copyright © 2026