

EVALUACIÓN

DEL TIEMPO DE RESPUESTA EN NODOS DE TELECOMUNICACIONES CON RESPALDO FOTOVOLTAICO MEDIANTE PACKET TRACER

EVALUATION OF RESPONSE TIME IN TELECOMMUNICATION NODES WITH PHOTOVOLTAIC BACKUP USING PACKET TRACER

Luis Arturo Caisaguano-Caisaguano¹

E-mail: luis.caisaguanoc@ug.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2992-2714>

Diana Carolina Decimavilla-Alarcón¹

E-mail: diana.decimavillaa@ug.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0375-0216>

José Otton Pinela-Tigua¹

E-mail: jose.pinelat@ug.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1713-8973>

Leonardo Xavier García-Correa²

E-mail: lgarcia@istvr.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9309-5496>

¹ Universidad de Guayaquil. Ecuador.

² Instituto Superior Tecnológico Vicente Rocafuerte. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Caisaguano-Caisaguano, L. A., Decimavilla-Alarcón, J. O., Pinela-Tigua, J. O., & García-Correa, L. X. (2026). Evaluación del tiempo de respuesta en nodos de telecomunicaciones con respaldo fotovoltaico mediante Packet Tracer. *Sophia Research Review*, 3(3), 4-14.

Fecha de presentación: 30/05/2026

Fecha de aceptación: 23/07/2026

Fecha de publicación: 01/09/2026

RESUMEN

La creciente dependencia de los sistemas de telecomunicaciones respecto a un suministro eléctrico estable representa un desafío crítico en contextos donde las interrupciones energéticas son frecuentes, como ocurre en Ecuador, país que desde 2023 enfrenta cortes programados que afectan directamente la continuidad operativa de sus redes de datos, sus usuarios y sus instituciones, generando consecuencias económicas, sociales y tecnológicas de considerable magnitud, situación que exige soluciones técnicas viables, sostenibles y reproducibles que puedan integrarse de forma efectiva a la infraestructura existente, sin comprometer la calidad del servicio ni incrementar desproporcionadamente los costos de operación de las operadoras telefónicas y los proveedores de internet del país, razón por la cual la presente investigación evalúa el tiempo de respuesta y las pérdidas de datos en nodos de telecomunicaciones cuando se integra un sistema de respaldo energético fotovoltaico, utilizando el simulador Cisco Packet Tracer como entorno de modelado, configurando una red que interconecta los nodos de Quito, Guayaquil y Cuenca mediante protocolos de enrutamiento estático y dinámico, con paneles solares monocristalinos, baterías de almacenamiento y medidores IoT para el monitoreo de potencia, obteniendo como resultado que la conmutación entre la red eléctrica convencional y el respaldo fotovoltaico ocurre en milisegundos, sin pérdidas

de paquetes ni degradación perceptible del rendimiento de la red, lo cual valida la viabilidad técnica de esta alternativa energética para garantizar la resiliencia de las telecomunicaciones en escenarios de contingencia eléctrica.

Palabras clave:

Telecomunicaciones, respaldo fotovoltaico, tiempo de respuesta, pérdida de datos, Packet Tracer, protocolos de enrutamiento, resiliencia de red.

ABSTRACT

The growing dependence of telecommunication systems on a stable power supply represents a critical challenge in contexts where energy interruptions are frequent, such as Ecuador, a country that since 2023 has faced scheduled power cuts that directly affect the operational continuity of its data networks, users, and institutions, generating considerable economic, social, and technological consequences, a situation that demands viable, sustainable, and reproducible technical solutions that can be effectively integrated into existing infrastructure without compromising service quality or disproportionately increasing operational costs for telephone operators and internet providers, which is why this research evaluates the response time and data loss in telecommunication nodes when a photovoltaic energy backup system is



integrated, using the Cisco Packet Tracer simulator as a modeling environment, configuring a network that interconnects the nodes of Quito, Guayaquil, and Cuenca through static and dynamic routing protocols, with monocrystalline solar panels, storage batteries, and IoT meters for power monitoring, obtaining as a result that the switching between the conventional power grid and the photovoltaic backup occurs in milliseconds, without packet loss or perceptible degradation of network performance, thereby validating the technical viability of this energy alternative to ensure telecommunications resilience in electrical contingency scenarios.

Keywords:

Telecommunications, photovoltaic backup, response time, data loss, Packet Tracer, routing protocols, network resilience.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de telecomunicaciones constituyen hoy el tejido nervioso de la sociedad moderna, ya que a través de ellos circulan datos, voces, imágenes y señales que sostienen desde las transacciones financieras hasta los servicios de salud, la educación en línea y la gestión gubernamental, lo cual convierte su disponibilidad en un requisito no negociable para el funcionamiento del Estado y la economía, especialmente en países latinoamericanos donde la digitalización avanza de forma acelerada, ampliando simultáneamente la base de usuarios dependientes de una conexión estable y continua (Théodore, 2024), y donde cualquier interrupción del suministro eléctrico que alimenta los nodos y estaciones de transmisión puede traducirse en pérdida de conectividad para millones de personas, afectando directamente la productividad, la comunicación y el acceso a servicios críticos en el territorio nacional.

Ecuador enfrenta desde 2023 una crisis energética que ha derivado en cortes programados de electricidad con duraciones que oscilan entre cuatro y doce horas diarias en distintas regiones del país, situación que se torna aún más compleja si se considera que la demanda eléctrica nacional continúa creciendo impulsada por la expansión industrial, el incremento del parque automotor eléctrico y la masificación de los servicios digitales, mientras que la incorporación de nuevas centrales de generación no avanza al ritmo que la coyuntura exige; generando una brecha estructural entre oferta y demanda que, de no resolverse con medidas correctivas y sostenibles en el corto y mediano plazo, podría derivar en interrupciones energéticas prolongadas durante los próximos años, con consecuencias directas sobre la infraestructura de telecomunicaciones que sostiene la conectividad del país.

En este contexto, la implementación de sistemas de respaldo energético basados en fuentes renovables

emerge como una alternativa técnicamente viable y económicamente sostenible para garantizar la continuidad operativa de los nodos de telecomunicaciones durante los períodos de interrupción del suministro eléctrico convencional, siendo la energía fotovoltaica una de las opciones más prometedoras dado que Ecuador, por su posición geográfica ecuatorial, recibe niveles de irradiancia solar significativos durante todo el año, lo cual permite aprovechar esta fuente inagotable y limpia de energía para alimentar los equipos de red mediante paneles solares y sistemas de almacenamiento en baterías (Roldán, 2009), ofreciendo así una solución que fortalece simultáneamente la resiliencia de la infraestructura y contribuye a la diversificación de la matriz energética nacional.

Frente a este escenario, el presente trabajo evalúa el comportamiento del tiempo de respuesta y la integridad de los datos en nodos de telecomunicaciones cuando se integra un sistema de respaldo fotovoltaico, utilizando el simulador Cisco Packet Tracer como entorno de modelado y prueba, herramienta que ha demostrado ser suficientemente robusta para reproducir topologías de red complejas, configurar protocolos de enrutamiento y capturar tráfico en tiempo real sin requerir hardware físico (G'aniyeva, 2025; Javid, 2014), permitiendo así analizar con precisión el impacto de la conmutación energética sobre la estabilidad de la red en un entorno controlado, reproducible y de bajo costo, condiciones que lo convierten en el instrumento metodológico más adecuado para los objetivos de esta investigación.

Los protocolos de red constituyen el conjunto de reglas que gobiernan la comunicación entre dispositivos interconectados, definiendo los formatos de los mensajes, los procedimientos de establecimiento y cierre de conexiones, los mecanismos de control de errores y las condiciones de enrutamiento que determinan la trayectoria que siguen los paquetes desde su origen hasta su destino, lo cual implica que dos dispositivos que deseen comunicarse deben compartir necesariamente los mismos protocolos y acordar las mismas condiciones de transmisión para que el intercambio de información pueda realizarse de forma correcta y fiable (Fernández, 2025), siendo esta coordinación implícita la que hace posible que redes heterogéneas, compuestas por equipos de distintos fabricantes y generaciones tecnológicas, funcionen de manera cohesionada y eficiente en la práctica cotidiana de las telecomunicaciones modernas.

En la arquitectura del modelo OSI, los protocolos se organizan en capas funcionales que separan las responsabilidades de la comunicación, desde la transmisión física de bits hasta la presentación de datos al usuario final, siendo las capas de red y transporte las más relevantes para el análisis del tiempo de respuesta y la pérdida de paquetes que ocupa la presente investigación, ya que en ellas

operan protocolos fundamentales como IP, TCP y UDP, responsables de direccionar, encapsular y garantizar o no, según el protocolo la entrega íntegra y ordenada de los datos entre los nodos de la red (Fernández, 2025; Haryadi, 2018), determinando así la calidad del servicio percibida por los usuarios finales en escenarios de operación normal y de contingencia energética.

El Protocolo de Control de Transmisión (TCP) establece una conexión orientada, lo que significa que antes de transferir datos verifica la disponibilidad del receptor, añade números de secuencia a cada segmento, solicita confirmación de recepción y retransmite automáticamente los paquetes perdidos, garantizando así la entrega íntegra y ordenada de la información a costa de una mayor latencia y overhead de gestión, lo que lo convierte en la elección natural para aplicaciones donde la integridad de los datos es prioritaria, como la transferencia de archivos, la navegación web o el correo electrónico (Wahab & Wibowo, 2024), mientras que el Protocolo de Datagrama de Usuario (UDP), al prescindir del establecimiento de conexión y de los mecanismos de confirmación, ofrece una transmisión más veloz aunque sin garantías de entrega, siendo preferido en aplicaciones de tiempo real como la transmisión de video, audio y consultas DNS donde una pequeña pérdida de paquetes es tolerable (Matni et al., 2024).

El enrutamiento es el proceso mediante el cual los dispositivos intermedios de una red, principalmente los routers, determinan la mejor trayectoria para conducir cada paquete desde su origen hasta su destino, decisión que se toma consultando tablas de rutas que pueden ser configuradas manualmente por un administrador, enrutamiento estático o actualizadas de forma automática mediante el intercambio de información entre routers vecinos, enrutamiento dinámico (Limonés, 2021), siendo la elección entre ambos enfoques uno de los factores que mayor impacto tiene sobre la resiliencia de la red ante cambios topológicos, como los que puede provocar una falla de alimentación eléctrica en uno de los nodos, situación directamente relevante para el análisis que propone la presente investigación sobre el comportamiento de la red durante la conmutación al respaldo fotovoltaico.

El enrutamiento estático resulta adecuado para redes pequeñas y estables donde el administrador puede anticipar y controlar todas las rutas posibles, ya que su configuración manual garantiza predictibilidad y bajo consumo de recursos computacionales, pero se vuelve inmanejable a medida que la red crece, puesto que cada nuevo nodo requiere actualizar manualmente las tablas en todos los routers existentes, incrementando el riesgo de errores, rutas inconsistentes y bucles de enrutamiento (Limonés, 2021), limitaciones que contrastan con las ventajas del enrutamiento dinámico, el cual, mediante protocolos como OSPF (Open Shortest Path First), RIP (Routing Information Protocol)

o BGP (Border Gateway Protocol), permite que los routers intercambien información sobre el estado de la red y calculen de forma autónoma y adaptativa la mejor ruta disponible en cada momento, reaccionando automáticamente ante caídas de enlaces o cambios en la topología (Ariganello, 2019; Microsoft, 2021).

OSPF, en particular, resulta especialmente relevante para el escenario de esta investigación, ya que utiliza el algoritmo de Dijkstra, también denominado SPF, Shortest Path First para construir un mapa completo de la topología de la red a partir de paquetes de estado de enlace (LSA) que cada router distribuye hacia todos sus vecinos, permitiendo que cada dispositivo calcule de forma independiente la ruta más eficiente hacia cualquier destino sin depender de actualizaciones periódicas como lo hace RIP, lo cual reduce significativamente el tráfico de control y acelera la convergencia ante cambios en la topología (Fadila & Litanianda, 2024; Frâncu et al., 2025), características que lo convierten en el protocolo de enrutamiento dinámico más utilizado en redes de telecomunicaciones de mediana y gran escala, incluyendo las que integran nodos con respaldo energético fotovoltaico, tal como se ilustra en la Figura 1.

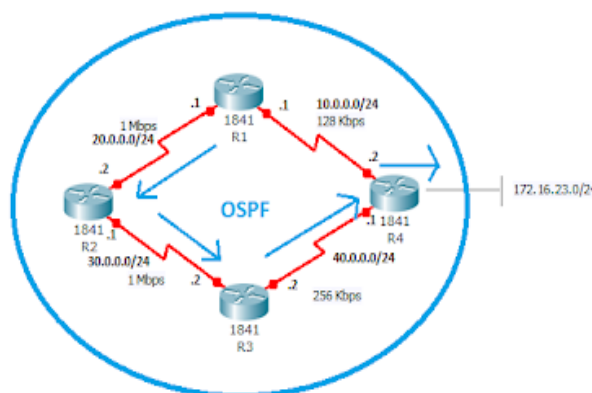


Figura 1. Enrutamiento OSPF mediante algoritmo Dijkstra (SPF).

Fuente: Adaptado de Ariganello (2019).

Cisco Packet Tracer es un simulador de redes desarrollado por Cisco Systems que permite diseñar, configurar y probar topologías de red complejas en un entorno virtual, sin necesidad de hardware físico, ofreciendo soporte para una amplia gama de dispositivos y protocolos, incluyendo routers, switches, PCs, servidores, dispositivos IoT y conexiones de fibra óptica, lo cual lo convierte en una herramienta de alto valor tanto para la formación académica como para la investigación aplicada en telecomunicaciones (CCNA, 2024; Javid, 2014), siendo además una de las plataformas más accesibles para implementar escenarios de simulación reproducibles que, como señalan Thoyyibah et al. (2024), permiten analizar el comportamiento de la red bajo condiciones controladas que serían costosas o logísticamente complejas de

reproducir en entornos físicos reales; la Figura 2 muestra la representación básica de esta topología en el simulador.

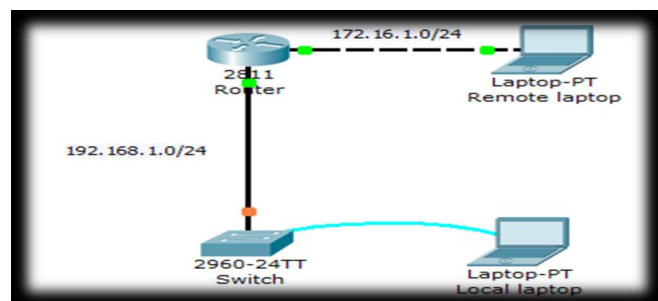


Figura 2. Intercomunicación de nodos en Cisco Packet Tracer.

Una de las capacidades más relevantes de Packet Tracer para los propósitos de esta investigación es su panel de simulación en tiempo real, que permite capturar y visualizar los eventos de transmisión de paquetes entre dispositivos, registrando el protocolo utilizado, el dispositivo origen, el dispositivo destino y el tiempo exacto de cada evento en segundos, lo cual facilita el cálculo preciso del tiempo de respuesta entre nodos y la identificación de posibles pérdidas de paquetes durante la operación de la red (G'aniyeva, 2025), ofreciendo así una métrica objetiva y reproducible del rendimiento de la red que puede compararse bajo diferentes configuraciones energéticas, topológicas y de enrutamiento, tal como lo requiere el diseño metodológico del presente estudio sobre el impacto del respaldo fotovoltaico en la calidad del servicio de telecomunicaciones.

La energía solar fotovoltaica se obtiene mediante la conversión directa de la radiación solar en electricidad a través de celdas semiconductoras agrupadas en paneles, siendo los paneles monocristalinos los de mayor eficiencia comercial disponible actualmente, con valores típicos que oscilan entre el 18 % y el 22 % de conversión, lo que los convierte en la opción preferida para aplicaciones donde el espacio disponible es limitado, como ocurre en las estaciones base y nodos de telecomunicaciones (Roldán, 2009), cuya superficie de techo o terreno adyacente es generalmente acotada pero suficiente para instalar los paneles necesarios para alimentar los equipos de red durante las horas de irradiación solar y cargar simultáneamente las baterías de respaldo que garantizarán la operación nocturna o durante períodos de baja radiación asociados a condiciones climáticas adversas como lluvia, nubosidad persistente o sombreado parcial de los módulos fotovoltaicos.

La integración de un sistema fotovoltaico en un nodo de telecomunicaciones implica, además de los paneles solares y las baterías de almacenamiento, la incorporación de un controlador de carga que regula el flujo de energía entre los paneles, las baterías y la carga los equipos de red, así como un inversor

que convierte la corriente continua generada por los paneles y almacenada en las baterías en corriente alterna compatible con los equipos, y un sistema de monitoreo que permite registrar en tiempo real los parámetros de operación del sistema, incluyendo la potencia generada, el estado de carga de las baterías y el consumo de los equipos (Chedia & Chkhartishvili, 2022; Théodore, 2024), parámetros que en el contexto de esta investigación fueron simulados mediante dispositivos IoT conectados a la red en Packet Tracer, permitiendo replicar el comportamiento del sistema de monitoreo energético en el entorno virtual.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo de tipo experimental-simulado, en el cual el entorno de prueba es un modelo virtual construido en Cisco Packet Tracer, lo que permite controlar con precisión las variables de configuración: topología, protocolos, carga energética; y registrar los datos de rendimiento de la red, tiempo de respuesta, pérdida de paquetes, bajo condiciones reproducibles y libres de interferencias externas que podrían introducir ruido en los resultados, estrategia metodológica que ha sido validada por investigaciones previas como las de Fadila & Litanianda (2024); G'aniyeva (2025); y Wahab & Wibowo (2024), quienes han demostrado que Packet Tracer produce resultados consistentes y comparables con los obtenidos en entornos físicos reales para los protocolos y métricas de rendimiento analizados en este trabajo.

La red simulada reproduce la infraestructura de telecomunicaciones de tres nodos principales del Ecuador: Quito, Guayaquil y Cuenca, interconectados mediante enlace de fibra óptica GPON entre los routers Cisco 2911 de cada ciudad, a los cuales se conectan switches Cisco 2960-24TT que distribuyen la señal hacia los terminales de usuario: PCs y laptops así como hacia servidores locales, dispositivos IoT de monitoreo energético y medidores de potencia eléctrica, configurando una topología híbrida que combina elementos de redes LAN, WAN y MAN en un esquema que refleja la complejidad real de la infraestructura de telecomunicaciones nacional (Samaniego, 2024), con una torre de interconexión internacional que conecta Ecuador con Perú; específicamente desde Piura y un nodo en la nube para la gestión remota de los servicios, ampliando así el alcance del escenario simulado más allá de las fronteras del territorio ecuatoriano; la topología general de la red se representa en la Figura 3.

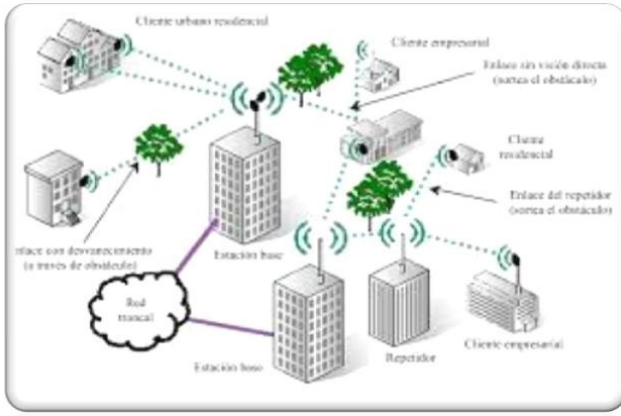


Figura 3. Esquema de la red a simular.

Cada nodo principal cuenta con un sistema de respaldo fotovoltaico compuesto por paneles solares monocristalinos, baterías de almacenamiento IoT y medidores de potencia que registran continuamente los parámetros energéticos del sistema, permitiendo monitorear en tiempo real el estado de carga de las baterías, la potencia entregada por los paneles y el consumo de los equipos de telecomunicaciones conectados, tal como lo exige un sistema de gestión energética eficiente (Chedia & Chkhartishvili, 2022), mientras que un servidor central recopila y almacena los datos de todos los medidores, ofreciendo una base centralizada de información que facilita la toma de decisiones operativas y la detección oportuna de anomalías en el suministro o en la operación de los equipos de red, cuya disposición física se muestra en la Figura 4.

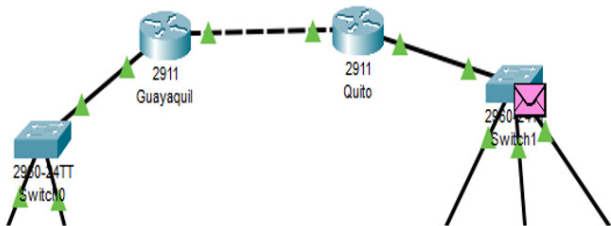


Figura 4. Esquema de routers Guayaquil–Quito interconectados con fibra óptica GPON.

Se configuraron dos escenarios de enrutamiento para comparar el comportamiento de la red bajo condiciones de alimentación convencional y fotovoltaica: el primero utiliza enrutamiento estático, en el cual las rutas entre los nodos de Quito, Guayaquil y Cuenca fueron ingresadas manualmente en cada router, especificando la IP de destino, la IP del siguiente salto, la máscara de subred y la distancia administrativa correspondiente (Limonas, 2021), mientras que el segundo escenario implementa enrutamiento dinámico mediante el protocolo OSPF, que calcula automáticamente las rutas óptimas y se adapta a cambios en la topología sin intervención del administrador (Fadila & Litanianda, 2024), permitiendo así evaluar cómo cada protocolo responde ante la conmutación energética desde la red convencional

hacia el sistema fotovoltaico de respaldo, identificando diferencias en el tiempo de convergencia y en la integridad de los datos transmitidos durante dicha transición, cuya configuración completa se aprecia en la Figura 5.

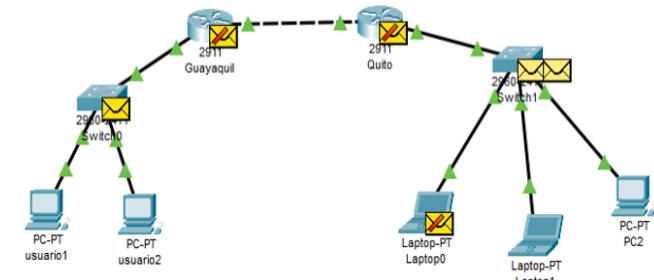


Figura 5. Conexión de switches y terminales de cómputo con paquetes en tránsito.

Las métricas de rendimiento registradas durante las simulaciones incluyen el tiempo de respuesta de cada evento de transmisión, capturado en segundos con resolución de milisegundos por el panel de simulación de Packet Tracer, la cantidad de paquetes transmitidos y recibidos exitosamente en cada segmento de la red, los protocolos activos durante cada ciclo de captura: TCP, UDP, HTTP, DHCP, STP, IoT TCP, el estado de comunicación entre servidores verificado mediante la matriz de conectividad, y los parámetros energéticos registrados por los medidores IoT potencia disponible, porcentaje de carga de las baterías e irradiancia solar, constituyendo en conjunto un conjunto de datos suficientemente completo para evaluar el impacto de la integración fotovoltaica sobre la calidad del servicio de telecomunicaciones (Haryadi, 2018; Shuvalov et al., 2025; Théodore, 2024) la vista final de la topología con la interconexión internacional se presenta en la Figura 6 y 7.

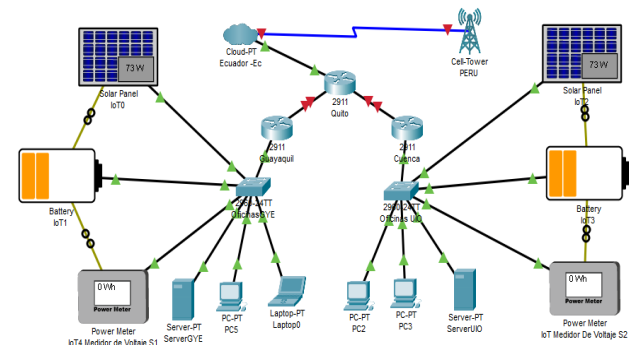


Figura 6. Esquema universal con interconexión internacional desde Perú (Cell-Tower PERU).

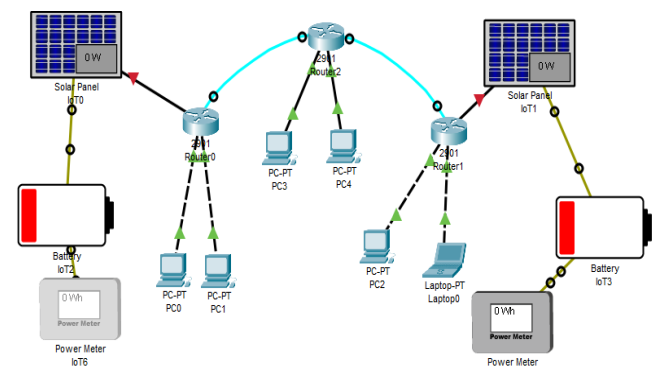


Figura 7. Instalación de paneles solares monocristalinos y baterías de respaldo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones revelaron que la red de telecomunicaciones operando con respaldo fotovoltaico mantiene tiempos de respuesta comparables a los obtenidos bajo alimentación convencional, lo cual constituye el hallazgo más relevante de la investigación, ya que demuestra que la conmutación energética no introduce latencia adicional perceptible ni degradación del rendimiento de la red, validando así la viabilidad técnica del sistema propuesto, en línea con lo reportado por Chedia y Chkhartishvili (2022), quienes señalan que la calidad del servicio en redes de telecomunicaciones depende fundamentalmente de la estabilidad del suministro eléctrico y no del origen de dicho suministro, siempre que la tensión entregada se mantenga dentro de los rangos nominales especificados por los fabricantes de los equipos de red durante toda la operación del sistema de respaldo; la Figura 8 muestra el panel de simulación con la lista de eventos registrados.

Simulation Panel				
Event List				
Vis.	Time(sec)	Last Device	At Device	Type
	0.088	--	ServerUIO	TCP
	0.103	--	IoT0	IoT
	0.103	--	ServerUIO	TCP
	0.104	IoT0	IoT1	IoT
	0.106	--	ServerUIO	TCP
	0.106	--	ServerUIO	TCP
	0.106	--	ServerUIO	HTTP
	0.106	--	ServerUIO	TCP
Reset Simulation ☒ Constant Delay				
Captured to: 71.728 s				

Figura 8. Panel de simulación-transmisión TCP capturada a 71,728 s.

Los tiempos de transmisión registrados por el simulador durante las capturas de tráfico muestran que el protocolo TCP completó el envío y recepción de paquetes entre los nodos de Guayaquil y Quito en 0,239 segundos en los primeros ciclos de prueba,

mientras que en ciclos más cargados, con mayor número de dispositivos IoT activos y servidores transmitiendo simultáneamente, el tiempo ascendió a 1,383 segundos, valor que se mantiene dentro de los umbrales de latencia aceptables para las aplicaciones de datos empresariales y de monitoreo remoto (Phadke, 2023), siendo además coherente con los rangos reportados por Craveirinha et al. (2024) para redes WAN de fibra óptica con múltiples saltos intermedios, donde la latencia acumulada depende del número de routers atravesados, el ancho de banda disponible y la carga instantánea del tráfico en cada segmento de la red; la Figura 9 detalla los paquetes HTTP y DHCP transmitidos en ese intervalo.

Vis.	Time(sec)	Last Device	At Device	Type
	0.013	--	ServerUIO	HTTP
	0.014	OficinasGYE	PC5	DHCPv6
	0.014	OficinasGYE	IoT0	DHCPv6
	0.014	OficinasGYE	IoT4 Medidor...	DHCPv6
	0.014	OficinasGYE	IoT1	DHCPv6
	0.014	OficinasGYE	Laptop0	DHCPv6
	0.014	OficinasGYE	Guayaquil	DHCPv6
	0.014	--	ServerUIO	HTTP

Figura 9. Envío de paquetes mediante protocolos HTTP y DHCP.

Tabla 1. Tiempo de transmisión entre nodos principales (milisegundos).

Servidor / Nodo	Quito (ms)	Guayaquil (ms)	Cuenca (ms)
Quito	0,2	0,3	0,2
Guayaquil	0,1	0,1	0,1
Cuenca	0,5	0,5	0,5; la Figura 10 muestra el detalle del panel de eventos para la ruta GYE–UIO a 0,239 s.

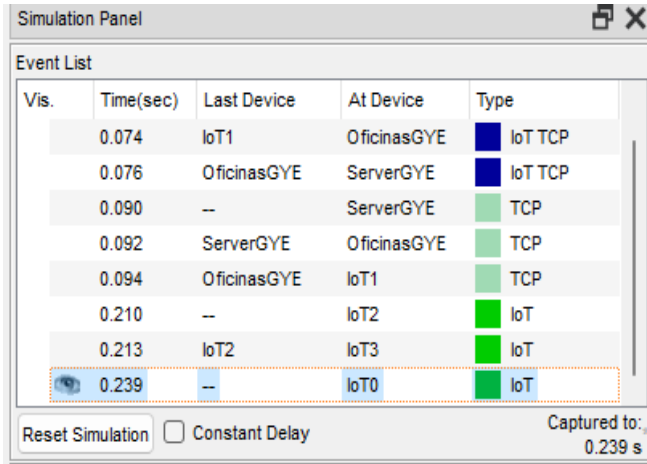


Figura 10. Envío de paquetes GYE–UIO capturado a 0,239 s vía TCP.

La Tabla 1 resume los tiempos de interconexión entre los servidores de los tres nodos principales, evidenciando que el nodo de Guayaquil registra los tiempos más bajos, 0,1 ms en todas las rutas, lo que puede explicarse por su posición central en la topología simulada y por el mayor ancho de banda asignado a sus interfaces, mientras que el nodo de Cuenca presenta los tiempos más elevados: 0,5 ms, coherente con su ubicación como nodo final en la cadena de enrutamiento y con el mayor número de saltos intermedios que deben atravesar sus paquetes para alcanzar los servidores de las otras dos ciudades (Craveirinha et al., 2024), siendo todos los valores registrados considerablemente inferiores al umbral de 100 ms que la ITU-T establece como referencia para garantizar una calidad de experiencia satisfactoria en aplicaciones interactivas de datos; la Figura 11 presenta el esquema universal de la red durante la fase de prueba con 103 W activos y la Figura 12 presenta el esquema de los medidores de tensión y los servidores de almacenamiento.

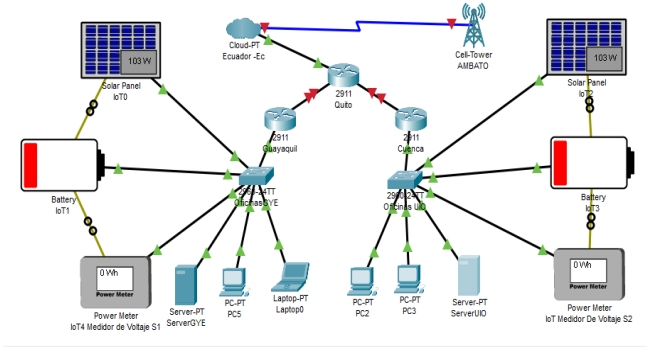


Figura 11. Esquema universal-fase de prueba con respaldo fotovoltaico activo (103 W).

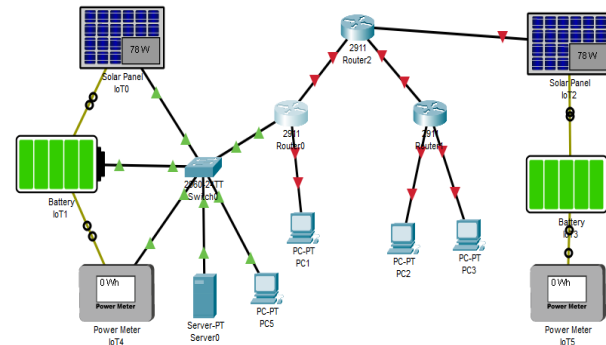


Figura 12. Instalación de medidores de tensión y servidores de almacenamiento.

Uno de los resultados más destacables de la simulación es la ausencia total de pérdida de paquetes durante todos los ciclos de prueba realizados, tanto durante la operación normal con alimentación convencional como durante los períodos de funcionamiento con respaldo fotovoltaico, lo cual se verificó mediante la matriz de comunicación entre servidores presentada en la Tabla 2, que registra el estado de la conectividad entre los tres nodos principales, arrojando en todos los casos un resultado satisfactorio que confirma la integridad de la transmisión de datos a lo largo de toda la red (Samaniego, 2024), resultado que coincide con lo reportado por Rojas Bujaico et al. (2025) en su modelo de comunicaciones unificadas para universidades peruanas, donde la redundancia energética demostró ser el factor más determinante para garantizar la disponibilidad continua de los servicios de red; la Figura 13 registra la captura de ese ciclo de transmisión a 1,383 s y por otro lado, la Figura 14 ilustra la transmisión STP hacia Cuenca capturada a 1,634 s.

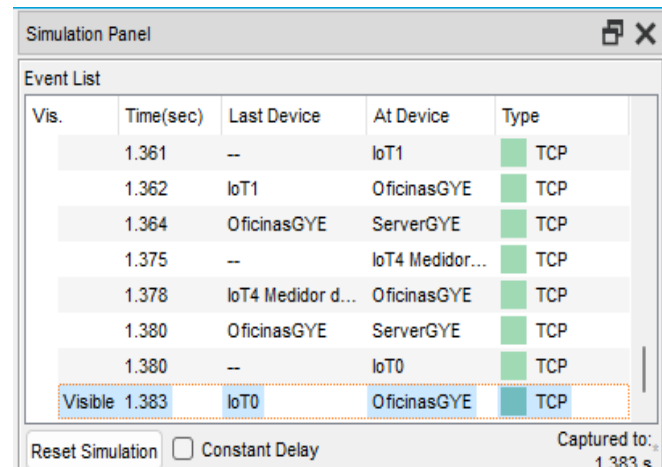


Figura 13. Envío de paquetes GYE con respaldo fotovoltaico- 1,383 s vía TCP.

Vis.	Time(sec)	Last Device	At Device	Type
	1.632	--	Oficinas UIO	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	PC2	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	PC3	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	IoT Medidor ...	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	IoT3	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	IoT2	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	Cuenca	STP
Visible	1.634	Oficinas UIO	ServerUIO	STP

Reset Simulation ☐ Constant Delay Captured to: 1.634 s

Figura 14. Transmisión de datos Quito–Cuenca vía protocolo STP, capturada a 1,634 s.

Tabla 2. Matriz de comunicación entre servidores principales.

Servidor	Quito	Guayaquil	Cuenca
Quito UIO	OK	OK	OK
Guayaquil GYE	OK	OK	OK
Cuenca CNC	OK	OK	OK

Nota. Estado de la comunicación entre servidores durante la simulación con respaldo fotovoltaico. OK = comunicación exitosa sin pérdida de paquetes.

La ausencia de pérdidas de paquetes durante la conmutación energética resulta particularmente significativa si se considera que, en sistemas físicos reales, la transición entre la red eléctrica convencional y un sistema de respaldo puede introducir micro interrupciones de tensión de entre 10 y 50 milisegundos dependiendo de la tecnología del sistema de transferencia automática empleado, lapso que en redes TCP puede provocar retransmisiones y en redes UDP puede traducirse en pérdidas irreversibles de paquetes (Phadke, 2023), por lo que la simulación sugiere que el sistema fotovoltaico propuesto, al mantener una alimentación continua y estable mediante las baterías durante la transición, elimina efectivamente este riesgo, ofreciendo así un nivel de disponibilidad del servicio superior al que podría garantizar un generador eléctrico convencional con tiempo de arranque de varios segundos.

El análisis comparativo del comportamiento de los protocolos de enrutamiento estático y dinámico durante la simulación reveló diferencias importantes en términos de adaptabilidad ante cambios en la topología de red, siendo el enrutamiento dinámico mediante OSPF el que demostró mayor eficiencia global, ya que al detectar automáticamente el estado de los enlaces y recalculan las rutas sin intervención del administrador, es capaz de mantener la continuidad del servicio incluso cuando uno de los nodos experimenta una interrupción temporal del suministro eléctrico que

provoque la desconexión momentánea de alguno de sus interfaces de red (Fadila & Litanianda, 2024; Frâncu et al., 2025), situación que en un escenario real podría ocurrir precisamente durante los segundos de transición entre la alimentación convencional y el respaldo fotovoltaico, antes de que las baterías asuman completamente la carga de los equipos; la Figura 15 presenta el esquema de la red durante la fase de media carga de las baterías.

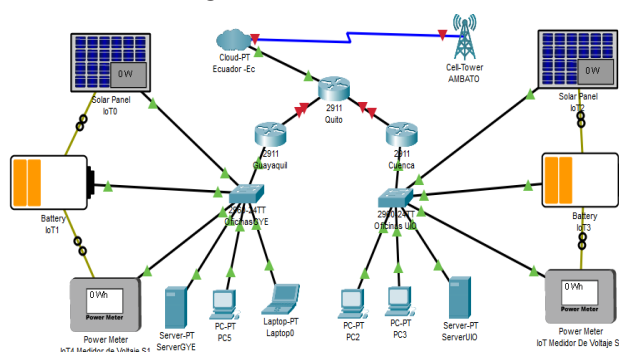
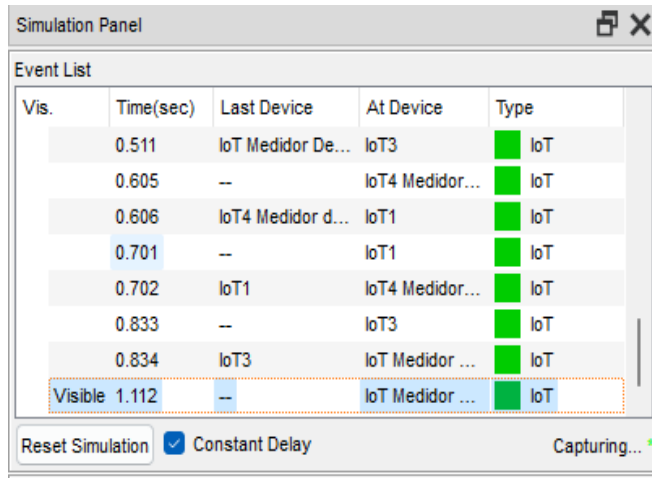


Figura 15. Esquema universal con media carga-baterías en proceso de descarga parcial.

En contraste, la red configurada con enrutamiento estático mantuvo su comportamiento predecible y eficiente durante las pruebas en condiciones de operación normal, confirmando lo planteado por Limones (2021) en cuanto a que este tipo de enrutamiento es perfectamente adecuado para redes de topología fija y número limitado de nodos como la simulada en este trabajo, si bien su incapacidad de adaptarse automáticamente ante fallas o cambios no planificados en la topología lo convierte en una opción menos robusta para entornos donde la continuidad del servicio frente a contingencias energéticas o físicas es un requisito crítico, como lo es en el contexto de la crisis eléctrica ecuatoriana que motivó la presente investigación, donde la posibilidad de que un nodo quede temporalmente sin alimentación es un escenario real y frecuente que la red debe ser capaz de manejar de forma autónoma.

El sistema de monitoreo IoT integrado en la simulación permitió registrar en tiempo real los parámetros energéticos de los paneles solares y las baterías de cada nodo, evidenciando que los paneles monocristalinos entregaron hasta 103 W de potencia bajo condiciones de irradiancia plena, mientras que las baterías mantuvieron niveles de carga que oscilaron entre el 68,63 % y el 100 % de su capacidad según el estado de la simulación y el tiempo transcurrido desde el inicio del ciclo de prueba (Samaniego, 2024), valores que permitieron verificar que el sistema de almacenamiento dispone de reserva energética suficiente para sostener la operación de los equipos de telecomunicaciones durante períodos prolongados de baja irradiancia solar, como los que ocurren durante la noche o en días con cobertura nubosa persistente en las ciudades ecuatorianas donde se ubican los

nodos simulados; la Figura 16 muestra los eventos de recepción IoT registrados por el simulador.

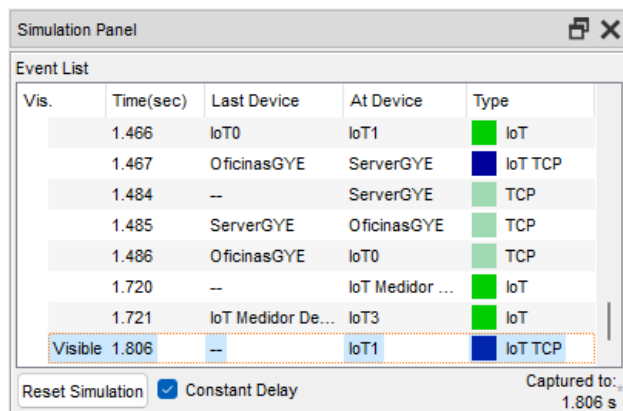


Vis.	Time(sec)	Last Device	At Device	Type
	0.511	IoT Medidor De...	IoT3	IoT
	0.605	--	IoT4 Medidor...	IoT
	0.606	IoT4 Medidor d...	IoT1	IoT
	0.701	--	IoT1	IoT
	0.702	IoT1	IoT4 Medidor...	IoT
	0.833	--	IoT3	IoT
	0.834	IoT3	IoT Medidor ...	IoT
Visible	1.112	--	IoT Medidor ...	IoT

Reset Simulation ☒ Constant Delay Capturing...

Figura 16. Recepción de datos de medidores IoT de potencia solar.

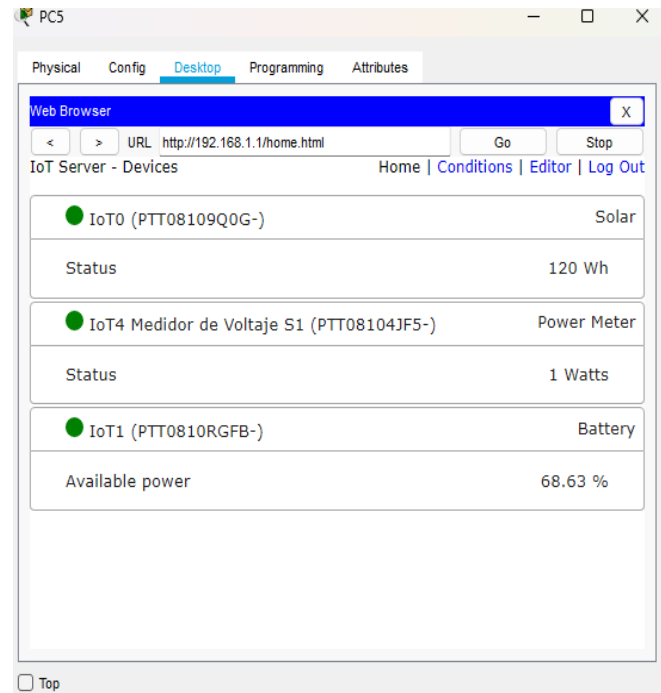
La capacidad de acceder a los datos de monitoreo energético de forma remota a través del servidor IoT integrado en la red representa un valor adicional significativo del sistema propuesto, ya que permite a los operadores de telecomunicaciones anticipar situaciones de agotamiento de baterías, programar el mantenimiento preventivo de los paneles y correlacionar los eventos de baja potencia disponible con posibles degradaciones en el rendimiento de la red, generando así una capa de inteligencia operativa que, como señalan Chedia y Chkhartishvili (2022), es fundamental para mantener los indicadores de calidad de servicio dentro de los rangos exigidos por los reguladores y por los acuerdos de nivel de servicio suscritos con los usuarios institucionales y corporativos de los sistemas de telecomunicaciones; los detalles de esa transmisión se aprecian en la Figura 17 y la Figura 18 muestra el panel de estado del servidor IoT con los valores registrados.



Vis.	Time(sec)	Last Device	At Device	Type
	1.466	IoT0	IoT1	IoT
	1.467	OficinasGYE	ServerGYE	IoT TCP
	1.484	--	ServerGYE	TCP
	1.485	ServerGYE	OficinasGYE	TCP
	1.486	OficinasGYE	IoT0	TCP
	1.720	--	IoT Medidor ...	IoT
	1.721	IoT Medidor De...	IoT3	IoT
Visible	1.806	--	IoT1	IoT TCP

Reset Simulation ☒ Constant Delay Captured to: 1.806 s

Figura 17. Transmisión TCP e IoT TCP con respaldo fotovoltaico - 1,806 s.



Device	Type	Status
IoT0 (PTT08109Q0G-)	Solar	120 Wh
IoT4 Medidor de Voltaje S1 (PTT08104JF5-)	Power Meter	1 Watts
IoT1 (PTT0810RGFB-)	Battery	Available power: 68.63 %

Top

Figura 18. Verificación de estado IoT: panel solar 120 Wh, batería al 68,63 %.

CONCLUSIONES

La simulación realizada en Cisco Packet Tracer demostró que la integración de un sistema de respaldo energético fotovoltaico en nodos de telecomunicaciones no compromete el tiempo de respuesta ni la integridad de los datos transmitidos, ya que todos los ciclos de prueba registraron tiempos de interconexión inferiores a 2 ms entre los servidores de Quito, Guayaquil y Cuenca, con ausencia total de pérdida de paquetes durante la operación con respaldo solar, lo cual valida la viabilidad técnica de esta solución para garantizar la continuidad operativa de las redes de datos en un contexto de crisis energética como el que enfrenta el Ecuador, confirmando además que la conmutación entre la fuente eléctrica convencional y el sistema fotovoltaico ocurre en milisegundos, sin interrupciones perceptibles para los usuarios finales ni para las aplicaciones que dependen de la red.

El enrutamiento dinámico mediante OSPF demostró ser la opción más robusta para redes de telecomunicaciones con respaldo fotovoltaico, dado que su capacidad de adaptación automática ante cambios en la topología reduce significativamente el riesgo de pérdida de conectividad durante los períodos de transición energética, mientras que el enrutamiento estático, aunque suficiente para topologías estables y de tamaño reducido, no ofrece las garantías de resiliencia que exige un entorno donde la probabilidad de interrupciones eléctricas en alguno de los nodos es elevada, como lo es en el escenario ecuatoriano actual, donde la crisis energética podría extenderse durante varios años si no se implementan las medidas

de generación y diversificación que el sector requiere con urgencia.

El sistema de monitoreo IoT integrado en la topología simulada constituye un componente de alto valor operativo, ya que permite supervisar en tiempo real los parámetros energéticos de los paneles y las baterías desde cualquier terminal con acceso a la red, facilitando la gestión proactiva del sistema de respaldo y la detección oportuna de anomalías que podrían comprometer la disponibilidad del servicio, capacidad que, combinada con la estabilidad demostrada por la red durante las pruebas de simulación, configura un sistema integral de telecomunicaciones con respaldo fotovoltaico que puede ser replicado y escalado a mayor número de nodos en futuras fases de investigación, utilizando herramientas de simulación más avanzadas como GNS3 o EVE-NG para validar los resultados en entornos de mayor complejidad y con modelos energéticos más detallados.

REFERENCIAS

- Ariganello, E. (2019). *Enrutamiento por vector de distancia*. Aprender Redes. <https://aprenderedes.com/2019/07/enrutamiento-por-vector-distancia/>
- Chedia, N., & Chkhartishvili, M. (2022). Study of the telecommunication networks performance and reliability indicators. *Wseas Transactions on Systems and Control*, 18, 204-217. <https://doi.org/10.37394/23203.2023.18.21>
- Craveirinha, J., Clímaco, J., Girão-Silva, R., & Pascoal, M. (2024). Multiobjective path problems and algorithms in telecommunication network design: Overview and trends. *Algorithms*, 17(6), Article 222. <https://doi.org/10.3390/a17060222>
- Fadila, D., & Litanianda, Y. (2024). Analisis dan pengujian penggunaan routing OSPF pada topologi hybrid dengan media simulasi Cisco Packet Tracer. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(4). <https://doi.org/10.36040/jati.v8i4.10007>
- Fernández, L. (2025). *Protocolos de redes: guía completa con los protocolos básicos*. <https://www.redes-zone.net/tutoriales/internet/protocolos-basicos-redes/>
- Frâncu, A., Preduşcs, G., Cîrciumşrescu, L. D., Angelescu, N., Puchianu, D. C., & Dumitrache, C. (2025). Examining IP network routing protocols with Packet Tracer and Cisco equipment. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 25(1), 68–73. <https://doi.org/10.2478/sbeef-2025-0011>
- G'aniyeva, R. R. (2025). Building the simulation model of digital communication networks: A new approach in the Cisco Packet Tracer environment. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(4), 988–989. <https://www.mjstjournal.com/index.php/mjst/article/view/3290>
- Haryadi, S. (2018). *The concept of telecommunication network performance and quality of service* (Chapter 1). Institut Teknologi Bandung. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/CQ8NA>
- Javid, S. R. (2014). Role of Packet Tracer in learning computer networks. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(5), 6508– 6511. https://ijarccce.com/wp-content/uploads/IJARCCCE3F_a_sheikh_Role_of_Packet_Tracer_in.pdf
- Limones, E. (2021). *Enrutamiento estático vs. dinámico*. OpenWebinars. <https://openwebinars.net/blog/enrutamiento-estatico-vs-dinamico/>
- Matni, M. A. B., Musyaffa, R. A., Hamzah, U., Hayani, A. N., & Aribowo, D. (2024). Simulasi penggunaan Cisco Packet Tracer pada protokol TCP dan UDP dalam topologi jaringan ring. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, 3(2), 240–246. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v3i2.3832>
- Microsoft. (2021). *Border Gateway Protocol (BGP)*. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/remote/remote-access/bgp/border-gateway-protocol-bgp>
- Phadke, J. (2023). Latency reduction techniques in high speed data networks. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(10). <https://doi.org/10.5281/zenodo.18252254>
- Rojas Bujaico, J. F., Perales, W. H., Tumialan, Y. E., & Rojas Bujaico, R. W. (2025). Unified communications model for information management in Peruvian public university. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 16(8), 597–606. <https://doi.org/10.32985/ijeces.16.8.3>
- Roldán Chiriboga, P. J. (2009). *Evaluación de las energías renovables no convencionales factibles de desarrollarse en el Ecuador* [Trabajo de titulación de grado, Escuela Politécnica Nacional].
- Samaniego Auqui, D. E. (2024). *Análisis de pérdidas de datos y los tiempos de respuesta en nodos de accesos con respaldos fotovoltaicos, según su configuración de red, protocolos estáticos o dinámicos* [Trabajo de titulación de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].
- Shuvalov, V., Ismayilova, S., & Rustamova, S. (2025). Research and analysis of QoS and QoE indicators in multiservice telecommunication networks. *RT&A*, 20(Special Issue 7), 90–98. https://gnedenko.net/Journal/2025/SI_072025/RTA_SI072025-011_11+2-b3-03-p90.pdf
- Théodore, M. K. (2024). Evaluation des critères de performance du système de télécommunication. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 5(4), 1–13. <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.04124>

- Thoyyibah, T., Hidayat, A. R., Hanggara, I. S., & Sudarsono, R. S. (2024). Analysis of networking tools using Cisco Packet Tracer (CPT). *International Journal of Software Engineering and Computer Science*, 4(2), 721–730. <https://doi.org/10.35870/ijsecs.v4i2.2359>
- Wahab, A., & Wibowo, A. H. (2024). Analisis kinerja protokol TCP pada topologi jaringan sederhana menggunakan Cisco Packet Tracer. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(6). <https://doi.org/10.36040/jati.v8i6.11812>

Conflictos de interés:

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución de los autores:

Luis Arturo Caisaguano-Caisaguano, Diana Carolina Decimavilla-Alarcón, José Otton Pinela-Tigua, Leonardo Xavier García-Correa: Concepción y diseño del estudio, adquisición de datos, análisis e interpretación, redacción del manuscrito, revisión crítica del contenido, análisis estadístico, supervisión general del estudio.

Declaración ética:

El estudio se basó en el análisis de fuentes documentales y datos de acceso público, por lo que no implicó la participación directa de seres humanos. No se manejó información personal identificable.