

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 padre 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 strobos 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.

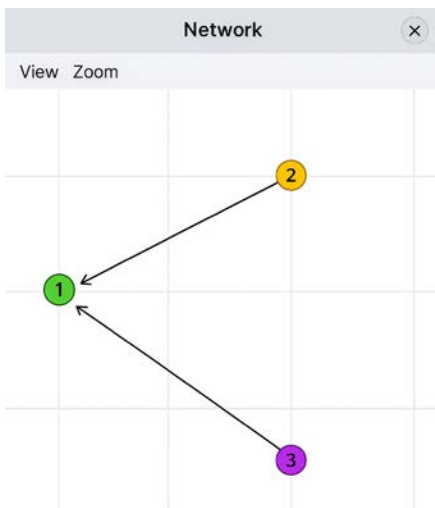


Fig. 1. Escenario doméstico simulado con tres nodos en Cooja

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: T_0 (RPL estándar con potencia fija de -10 dBm) y T_1 (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 $sat(\cdot)$ 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).

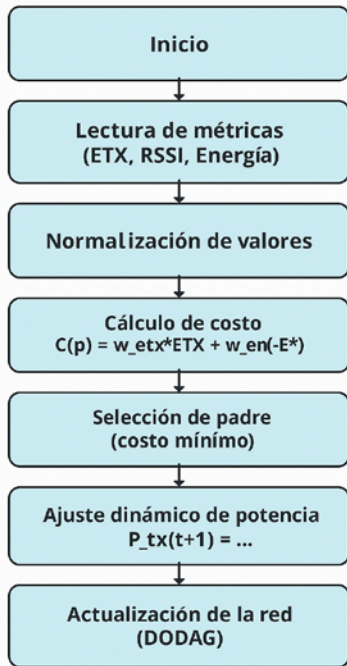


Fig. 2. Diagrama de flujo del algoritmo adaptativo

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.

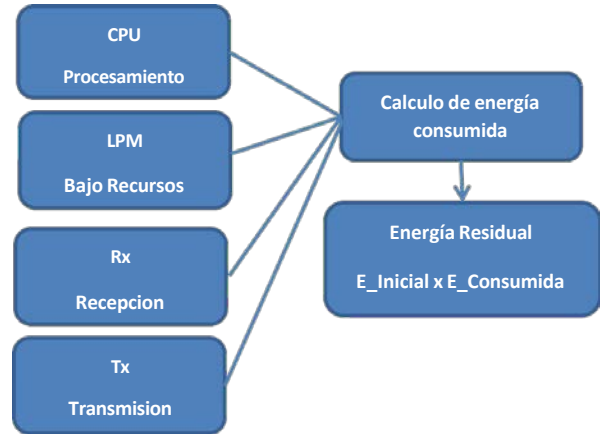


Fig. 3. Esquema de medición de energía residual

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 padre 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 padre 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.

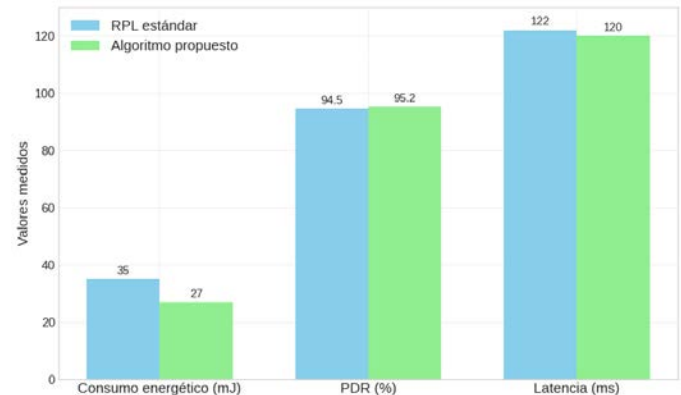


Fig. 4. Comparación de métricas de rendimiento entre RPL estándar y el algoritmo propuesto

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 padre 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.

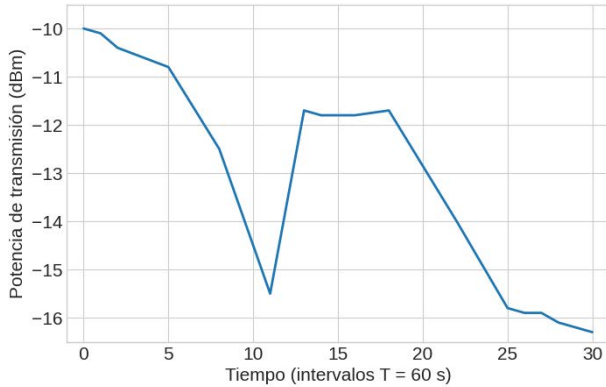


Fig. 5. Evolución de la potencia de transmisión (Ptx) del controlador adaptativo

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.

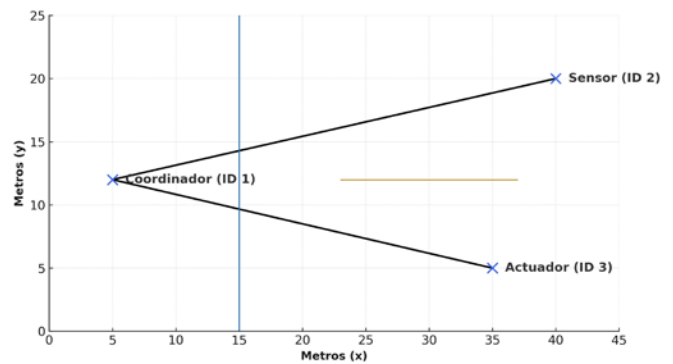


Fig. 6. Organización jerárquica de la red bajo RPL

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

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.

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 ($w_{ETX} = 0.6$) 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. Abdelgawad, 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/rfc6550.
- [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>
- [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