

***Natasha Almeida da Silva**

Graduanda do curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, pela FATEC Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, Brasil.

ORCID: 0009-0001-7240-4149

E-mail:

almeidanatasha1210@gmail.com

****Anabelle Ackel de Moraes**

Graduanda do curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, pela FATEC Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, Brasil.

ORCID: 0009-0009-9285-6781

E-mail:

anabellemoraes28@gmail.com

*****Ana Carolina Tamie Yoshimura**

Graduanda do curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, pela FATEC Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, Brasil.

ORCID: 0009-0007-6502-6200

E-mail:

anacyoshimura@gmail.com

******Mariangela Ferreira Fuentes Molina**

Graduada em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Itajubá. Especialista em gerenciamento de Projetos pela Universidade de Mogi das Cruzes.

Professora na Fatec Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, Brasil.

ORCID: 0009-0005-7602-3115

E-mail:

mariangela.molina@cps.sp.gov.br

ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO DE ENERGIA E DESEMPENHO NA TRANSIÇÃO DO IPV4 PARA IPV6 EM DISPOSITIVOS IOT DE BAIXO CONSUMO

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.22678802

RESUMO

Este estudo realizou uma análise comparativa entre os protocolos IPv4 e IPv6, a fim de avaliar a eficiência energética e o desempenho quando implementados em dispositivos IoT de baixo consumo energético. A pesquisa foi conduzida mediante análise documental e estudo experimental utilizando as ferramentas Microsoft Azure, protocolo broker MQTT Mosquitto em uma máquina virtual Ubuntu 22.04 LTS e a biblioteca Python paho-mqtt, utilizando o modelo ESP8266. No experimento, 10 mensagens MQTT, simulando pequenos pacotes de informação enviados entre dispositivos, foram transmitidas a cada segundo nos cenários IPv4 e IPv6, registrando a latência e o consumo energético estimado mediante parâmetros elétricos típicos do dispositivo (3,3V e 80mA). Complementarmente, foram realizados testes com diferentes tamanhos de payload (32, 128 e 512 bytes) e dois perfis de tráfego, normal e intensificado, a fim de verificar se essas variações modificam o desempenho relativo entre os protocolos. Os resultados do IPv6 demonstraram menor consumo energético total e menor latência média em comparação ao IPv4. Em geral, o IPv6 mostrou-se mais adequado para dispositivos IoT de baixo consumo energético, devido ao seu processamento eficiente, maior capacidade de endereçamento e compatibilidade com redes LPWAN, embora essa vantagem não se tenha mantido de forma constante em todas as configurações de payload e perfil de tráfego avaliadas. Enquanto o IPv4 foi considerado menos eficiente decorrente de seu espaço reduzido de endereços, necessitando utilizar NAT e aumentando o processamento, além da ausência de suporte às tecnologias como o 6LoWPAN e SCHC, essenciais para operar em redes LPWAN. Conclui-se que o uso de protocolos adequados nos dispositivos IoT de baixo consumo é primordial para sua evolução, apontando implicações para o avanço de soluções que garantem uma comunicação de baixo custo energético e sugerindo a evolução em eficiência de energia, segurança e escalabilidade como caminho para estudos futuros.

Palavras-Chave: Eficiência Energética; Internet das Coisas (IoT); IPv4; IPv6; Protocolos de Internet.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND PERFORMANCE IN THE TRANSITION FROM IPV4 TO IPV6 IN LOW-POWER IoT DEVICES

ABSTRACT

This study conducted a comparative analysis between the IPv4 and IPv6 protocols in order to evaluate energy efficiency and performance when implemented in low-power IoT devices. The research was carried out through documentary analysis and an

experimental study using Microsoft Azure, MQTT broker protocol Mosquitto on an Ubuntu 22.04 LTS virtual machine, and the Python library paho-mqtt using the ESP8266 model. In the experiment, 10 MQTT messages, simulating small data packets exchanged between devices, were transmitted every second under both IPv4 and IPv6 scenarios, with latency and estimated energy consumption recorded based on typical electrical parameters of the device (3.3V and 80mA). Additionally, tests were conducted using different payload sizes (32, 128, and 512 bytes) and two traffic profiles, normal and intensified, to determine whether these variations alter the relative performance of the protocols. The results showed that IPv6 achieved lower total energy consumption and lower average latency compared to IPv4. Overall, IPv6 proved to be more suitable for low-power IoT devices due to its efficient processing, larger addressing capacity, and compatibility with LPWAN networks, although this advantage was not consistently maintained across all the payload configurations and traffic profiles evaluated. Otherwise, IPv4 was considered less efficient due to its limited address space, requiring the use of NAT and increasing processing overhead, as well as lacking support for technologies such as 6LoWPAN and SCHC, which are essential for operation in LPWAN networks. It is concluded that the use of appropriate protocols in low-power IoT devices is crucial for their evolution, highlighting implications for the advancement of solutions that ensure low-energy communication and suggesting improvements in energy efficiency, security, and scalability as directions for future research.

Keywords: Energy Efficiency; Internet of Things (IoT); IPv4; IPv6; Internet Protocols.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONSUMO DE ENERGÍA Y RENDIMIENTO EN LA TRANSICIÓN DEL IPv4 AL IPv6 EN DISPOSITIVOS IoT DE BAJO CONSUMO

RESUMEN

Este estudio realizó un análisis comparativo entre los protocolos IPv4 e IPv6, con el objetivo de evaluar la eficiencia energética y el rendimiento cuando son implementados en dispositivos IoT de bajo consumo energético. La investigación fue desarrollada mediante análisis documental y estudio experimental utilizando las herramientas Microsoft Azure, el protocolo broker MQTT Mosquitto en una máquina virtual Ubuntu 22.04 LTS y la biblioteca Python paho-mqtt utilizando el modelo ESP8266. En el experimento, se transmitieron 10 mensajes MQTT por segundo, simulando pequeños paquetes de información enviados entre dispositivos, en escenarios IPv4 e IPv6, registrándose la latencia y el consumo energético estimado mediante parámetros eléctricos típicos del dispositivo (3,3V y 80mA). Además, se realizaron pruebas con diferentes tamaños de carga útil (32, 128 y 512 bytes) y dos perfiles de tráfico, normal e intensificado, para verificar si estas variaciones modifican el rendimiento relativo entre los protocolos. Los resultados obtenidos con IPv6 demostraron un menor consumo energético total y una menor latencia promedio en comparación con IPv4. En general, IPv6 se mostró más adecuado para dispositivos IoT de bajo consumo energético debido a su procesamiento eficiente, mayor capacidad de direccionamiento y compatibilidad con redes LPWAN, aunque esta ventaja no se mantuvo de forma consistente en todas las configuraciones de carga útil y perfiles de tráfico evaluados. Mientras tanto, IPv4 fue considerado menos eficiente debido a su reducido espacio de direcciones, requiriendo el uso de NAT y aumentando el procesamiento, además de la ausencia de soporte para tecnologías como 6LoWPAN y SCHC, esenciales para operar en redes LPWAN. Se concluye que el uso de protocolos adecuados en dispositivos IoT de bajo consumo es fundamental para su evolución, señalando implicaciones para el avance de soluciones que garanticen una

comunicación de bajo costo energético y sugiriendo el desarrollo de mejoras en eficiencia energética, seguridad y escalabilidad como líneas para futuros estudios.

Palabras clave: Eficiencia Energética; Internet de las Cosas (IoT); IPv4; IPv6; Protocolos de Internet.

INTRODUÇÃO

A rápida expansão da Internet das Coisas (IoT) tem evidenciado limitações do protocolo IPv4, especialmente no que se refere ao espaço de endereçamento e à eficiência energética em dispositivos de baixo consumo (Bento *et al.*, 2025). O IPv6 apresenta-se como uma alternativa capaz de superar essas limitações, oferecendo um espaço de endereçamento ampliado de 128 bits, mecanismos de autoconfiguração e cabeçalhos simplificados, o que pode reduzir a necessidade da tradução de endereços de rede (NAT, do inglês *Network Address Translation*) e melhorar o desempenho em redes embarcadas (Abdullahi; Souza, 2017).

O interesse desta pesquisa é contribuir para a compreensão dos impactos dessa transição na IoT, área de grande relevância pela digitalização crescente e a busca por soluções tecnológicas eficientes e sustentáveis (Piątkowski; Puślecki; Walkowiak, 2024). O objetivo é analisar os efeitos da migração para o IPv6 em termos de eficiência energética e desempenho, com foco em dispositivos de Internet das Coisas (IoT) de baixo consumo energético, contribuindo para o desenvolvimento de soluções que suportem o crescimento da IoT de forma sustentável e eficiente.

O foco é comparar o consumo energético e a latência durante a transmissão de dados nos protocolos IPv4 e IPv6, em cenários simples e com configurações idênticas. Além do capítulo introdutório, este trabalho aborda em sua segunda seção Referencial Teórico, que fundamenta a pesquisa com base em dados da literatura. Posteriormente, é mostrada a seção de Material e Métodos, que detalha os procedimentos de revisão e de simulação do trabalho. Em seguida, apresenta-se a seção de Condução de Pesquisa, Resultados e Discussão, finalizando com a Conclusão, destacando as implicações e recomendações para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Protocolos da camada de rede IPV4 e IPV6

A comunicação implementada em dispositivos IoT é estabelecida por camadas de conexão de rede. Dentro dessa estrutura, a camada responsável pelo roteamento de pacotes engloba os protocolos IPv4 e IPv6, pertencentes à camada de rede da pilha *Transmission Control Protocol / Internet Protocol* (TCP/IP) (Smetana, 2012). Dessa forma, quando uma requisição é feita, o TCP ordena e a divide em segmentos, e os protocolos IPv4 ou IPv6 adiciona o cabeçalho IP. Em seguida, a camada de enlace empacota os datagramas em quadros e os transporta ao dispositivo de destino. Esse processo garante a entrega dos pacotes de forma estruturada, contudo, cada versão do protocolo IP cumpre essa função de maneiras distintas (Amvame-nze, 2006).

Sendo assim, cada versão possui um limite de geração de endereços únicos, o protocolo versão 4 (IPv4) tem a capacidade de 32 bits, enquanto o IPv6 possui 128 bits. Visto isso, cada protocolo tende a organizar e distribuir seus identificadores de maneira distinta (Portela *et al.*, 2024).

No caso do IPv4, a geração de endereços opera com dois tipos principais, os endereços privados, destinados ao uso em redes internas e os endereços públicos, que estabelecem conexão com a internet, os quais, devido às limitações, são possibilitados pela técnica de tradução de endereços, NAT. Sendo assim, para suprir essas limitações, foi desenvolvido o IPv6, contendo configurações de endereços como local, global e de privacidade (Smetana, 2012).

2.2 Transição do IPv4 para o IPv6

Como citado anteriormente, os endereçamentos IPv4 são limitados e escassos atualmente, uma vez que trabalham com 32 bits, cerca de 4,3 bilhões de endereços. Além disso, outro fator contribuinte foi a má distribuição do modelo de alocação adotado nas primeiras décadas da internet, gerando desperdícios de blocos e crescimento das tabelas de roteamento (INATEL; HUAWEI; ANATEL, 2024).

Com as novas exigências tecnológicas, foi iniciado o projeto *Internet Protocol Next generation* (IPng) para o desenvolvimento do IPv6, versão que, além de atender às

demandas de endereçamentos públicos, atende a outras necessidades para compreender os avanços dos dispositivos (Muniz *et al.*, 2017).

Apesar das vantagens, IPv4 e IPv6 são estruturalmente incompatíveis, sendo necessária a realização de uma transição gradual, utilizando mecanismos para a coexistência das duas versões de IP. Assim, a maioria dos dispositivos atuais adota ambos os protocolos simultaneamente. Dessa forma, as principais técnicas utilizadas para possibilitar a coexistência dos IPs são pilha dupla, túneis e tradução (Muniz *et al.*, 2017).

2.3 Dispositivos IoT de baixo consumo

Os dispositivos IoT de baixo consumo possuem circuitos e arquiteturas de sistema com objetivo de minimizar o consumo energético e prolongar a vida útil da bateria (Signoretti, 2021). Para exemplificar, podem ser citados Apple AirTag, que utiliza *Bluetooth Low Energy* (BLE) e opera por longos períodos com bateria mínima e sensores residenciais Zigbee, projetados para funcionar por anos com pequenas baterias em automação doméstica.

Em virtude disso, a maior parte desses dispositivos não pode depender de fontes de energia constantes, tornando-se necessário que seus sensores aguentem por longos períodos de tempo e que seus microcontroladores mantenham os aparelhos em modo de suspensão durante o máximo de tempo possível. Tecnologias *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN) permitem a conexão e comunicação desses dispositivos em grandes áreas com consumo extremamente baixo de energia (Dumay *et al.*, 2023).

Os dispositivos IoT de baixo consumo energético enfrentam limitações de *hardware* significativas, sobretudo na memória e no seu poder de processamento. Essas limitações decorrem da necessidade dos dispositivos de operarem por longos períodos com baterias de baixa capacidade, exigindo processamento e gerenciamento de memória eficientes e com poucos recursos (Signoretti, 2021).

Geralmente, o maior consumo de energia desses aparelhos é gasto em comunicação, representando até 60% dependendo da aplicação. Por isso, métodos de compressão de dados como Huffman, Lempel-Ziv (LZ) e *Static Context Header Compression* (SCHC) são estratégias promissoras para otimizar o uso de energia nesses dispositivos (Signoretti, 2021). A compressão de dados consiste em técnicas que eliminam informações redundantes e

reduzem o tamanho dos pacotes, diminuindo o tempo em que o dispositivo fica ativo para a transmissão, e consequentemente reduz o gasto de energia (Piątkowski; Puślecki; Walkowiak, 2024).

A utilização de redes com baixo gasto energético e longo alcance é um recurso essencial para os dispositivos IoT de baixo consumo energético. Entre elas, sobressaem-se o *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) que possui um consumo de energia extremamente baixo, mas é sujeito a interferências por utilizar bandas não licenciadas, e o *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT) que é capaz de transmitir pacotes com carga útil mais robusta que o LoRaWAN e com maior confiabilidade por operar em espectro licenciado (Dumay *et al.*, 2023).

2.4 Eficiência energética nos dispositivos de baixo consumo

O IPv6 oferece uma estrutura simplificada de cabeçalho, função de autoconfiguração de endereços e suporte aprimorado para multicast e anycast entre outros recursos, proporcionando assim diversos elementos que economizam energia comparados com o IPv4. Entretanto, os endereços do IPv6 são grandes para serem usados por dispositivos de baixo consumo em redes LPWAN, nas quais o tamanho impacta diretamente na autonomia energética, portanto é necessário utilizar métodos de compressão como o SCHC (El Gatte; El Abbassi; Mouhib, 2025).

O SCHC comprime cabeçalhos de endereços IPv6, por meio de regras estáticas previamente definidas no transmissor e no receptor. Em vez de enviar todos os campos presentes no cabeçalho, o dispositivo envia apenas um *RuleID* e os bits necessários para reconstruir o pacote. Caso o pacote comprimido ainda seja maior que o limite máximo da rede LPWAN, o SCHC é capaz de fragmentar o pacote em partes menores. Ao chegar no destino, o *RuleID* e os bits enviados permitem a reconstrução do cabeçalho original. Isso reduz significativamente o tamanho dos pacotes transmitidos e consome menos energia. O método foi aceito como padrão pela *Internet Engineering Task Force* (IETF), que é a principal organização responsável por padronizar os protocolos de rede (Dumay *et al.*, 2023).

Apesar de o IPv4 apresentar um cabeçalho menor que o IPv6, o que resultaria em menor gasto energético para transmitir pacotes, ele se torna inadequado pela falta de

escalabilidade para atender a IoT moderna e por depender de NAT, resultando em maior latência e mais gasto energético na transmissão. Além disso, a utilização de técnicas de compressão e as redes LPWAN disponíveis para dispositivos que utilizam IPv6, torna esse tipo de protocolo mais vantajoso que o IPv4 (El Gatte; El Abbassi; Mouhib, 2025).

2.5 Desempenho da rede nos dispositivos de baixo consumo energético

Apesar do cabeçalho do IPv6 ter um tamanho maior em bytes, sua estrutura é simplificada quando comparada ao IPv4, contendo apenas oito campos fixos, dispensando o campo de *checksum* do cabeçalho de rede e substituindo os campos opcionais do IPv4 por cabeçalhos de extensão (Portela et al., 2024). Essas alterações implementadas no IPv6 otimizam a taxa de encaminhamento de pacotes e reduzem a carga de processamento em roteadores (Nwakeze et al., 2025).

Ademais, o espaço abundante de endereços do IPv6 elimina a necessidade do NAT, mecanismo do qual o IPv4 depende para suprir sua escassez de endereços. No entanto, o uso de NAT causa *overhead* de tradução e complexidade adicional em cada pacote (Dumay et al., 2023). Devido à capacidade do IPv6 de oferecer um único endereço a cada dispositivo, a comunicação ocorre de forma direta, sem intermediários, reduzindo a latência e otimizando o desempenho da rede em dispositivos IoT de baixo consumo energético (Nwakeze et al., 2025).

O *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks* (RPL), desenvolvido pela IETF para o IPv6, foi projetado para redes com topologias dinâmicas e enlaces instáveis, aspectos comuns em ambientes de IoT de baixo consumo energético. A finalidade deste protocolo é otimizar indicadores de desempenho como a taxa de entrega de pacotes e a latência entre origem e destino, a despeito de perdas frequentes de sinal (Sobral et al., 2019).

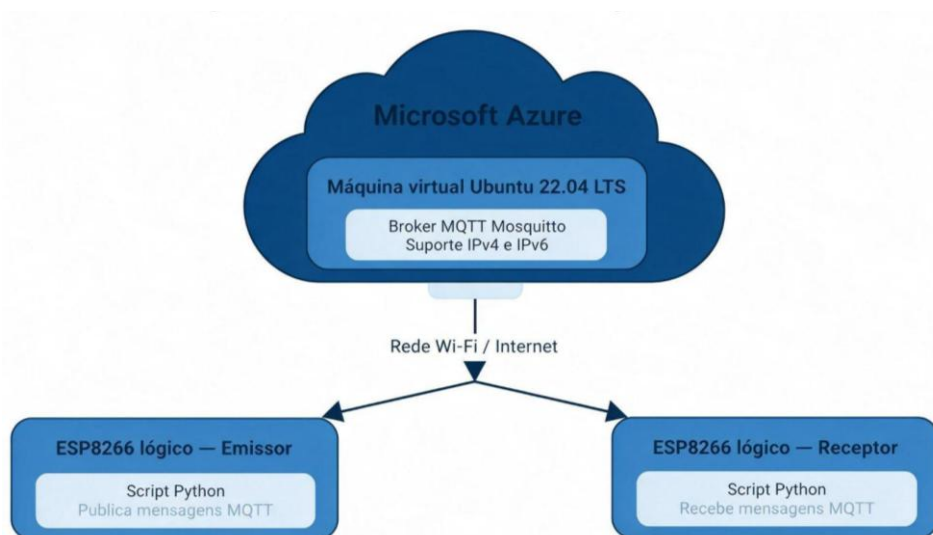
A própria existência do RPL para o IPv6 representa uma superioridade em relação ao IPv4, que não possui protocolo voltado para redes dinâmicas e instáveis (Sobral et al., 2019). Além disso, as diferenças estruturais do IPv6, como o cabeçalho simplificado e a dispensa do NAT, o tornam uma opção com melhor desempenho de rede. Esses ganhos de desempenho, contudo, vêm acompanhados de um maior custo energético, destacando que a superioridade do IPv6 sujeita-se ao equilíbrio desses dois fatores (Bento et al., 2025).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa adota uma abordagem mista, combinando revisão bibliográfica e experimentação prática em ambiente simulado. As simulações foram realizadas com dispositivos ESP8266 lógicos, representados por scripts em Python, em um ambiente controlado na plataforma Microsoft Azure. Para a execução dos testes, utilizou-se uma máquina virtual Ubuntu 22.04 LTS, configurada com o broker MQTT Mosquitto e suporte aos protocolos IPv4 e IPv6. Os scripts foram desenvolvidos com a biblioteca paho-mqtt para realizar a publicação, a recepção e a comparação das mensagens transmitidas.

A arquitetura do ambiente experimental é apresentada na Figura 1. A máquina virtual hospedada no Microsoft Azure executou o broker Mosquitto, responsável por receber e encaminhar as mensagens MQTT entre o emissor e o receptor lógicos. A comunicação foi avaliada por meio dos protocolos IPv4 e IPv6, mantendo-se as configurações equivalentes nos dois cenários.

Figura 1. Arquitetura do Ambiente Experimental.



Fonte: Os autores (2026).

O escopo da investigação restringe-se à análise do impacto da transição do IPv4 para o IPv6 em dispositivos IoT de baixo consumo energético, utilizando como referência o modelo ESP8266. O estudo concentra-se na comparação de dois parâmetros principais, a

latência da comunicação e o consumo energético estimado durante a transmissão de dados. Na análise das condições de tráfego, também foram considerados diferentes tamanhos de *payload* e intervalos entre mensagens, mantendo-se constantes o broker Mosquitto, o QoS e o número de mensagens em cada comparação.

Aspectos como escalabilidade, segurança, comparação com outros serviços de comunicação e distância física entre emissor e receptor não foram abordados, devido ao uso de dispositivos lógicos em ambiente virtualizado e às limitações de tempo e recursos experimentais. Dessa forma, a distância física, a intensidade do sinal Wi-Fi e o consumo elétrico real dos módulos permanecem como possibilidades para trabalhos futuros com dispositivos ESP8266 físicos.

4 CONDUÇÃO DA PESQUISA

A condução da pesquisa envolveu inicialmente uma revisão bibliográfica realizada por meio da consulta de artigos científicos, livros, revistas especializadas e outras fontes acadêmicas relevantes. Essa revisão permitiu embasar teoricamente os conceitos essenciais e as diferenças técnicas entre o IPv4 e o IPv6 no contexto de Internet das Coisas, além de fundamentar a importância da migração para o IPv6 para garantir maior escalabilidade e segurança. Com essa base teórica estabelecida, a pesquisa avançou para a fase experimental, na qual foram realizados testes práticos de comunicação.

A configuração do ambiente experimental foi realizada em uma máquina virtual Ubuntu 22.04 LTS hospedada no Microsoft Azure, acessada remotamente via protocolo SSH com autenticação por chave pública. Na máquina virtual, foram instalados os pacotes necessários, incluindo o broker MQTT Mosquitto e a biblioteca Python paho-mqtt para desenvolvimento dos scripts de publicação e assinatura que simulavam dispositivos IoT de baixo consumo. O serviço Mosquitto, que funciona como um intermediário responsável por receber, filtrar e encaminhar mensagens entre dispositivos comunicantes em redes IoT (O'Connor, 2022 apud Grotta, 2025), foi habilitado para funcionar tanto em ambientes IPv4 quanto IPv6, conforme as necessidades do experimento.

O experimento consistiu na publicação de mensagens MQTT no tópico "esp8266/teste", que funciona como um canal hierárquico de comunicação, responsável por

organizar e direcionar as mensagens entre publicadores e assinantes, conforme destacado por Souza e Camargo (2020). Foi utilizado como base o modelo ESP8266 para simular um dispositivo IoT típico de baixo consumo. Para medir a latência da comunicação, foram registrados os instantes exatos de envio e recepção de cada mensagem. Em seguida, a avaliação da eficiência energética envolveu a estimativa do consumo de energia associada à transmissão dessas mensagens, permitindo a análise do impacto do protocolo utilizado.

A medição detalhada da latência e da eficiência energética no experimento foi realizada com scripts em Python desenvolvidos para o emissor e o receptor do protocolo MQTT. No script emissor, as mensagens foram publicadas com um intervalo de 1 segundo entre os envios, e cada mensagem continha seu número sequencial e o registro exato do momento do envio. No script do receptor, foi registrado o momento da recepção de cada mensagem, e a latência foi calculada medindo a diferença entre o registro de tempo do momento de recebimento e o registro de tempo do momento de envio, convertida para milissegundos, conforme apresentado na Equação Latência Média (1).

$$\text{Latência (ms)} = (T_{\text{recepção}} - T_{\text{envio}}) \times 1000 \quad (1)$$

Para estimar o consumo energético associado à transmissão, o script utilizou o valor de 80 mA (miliamperes) e 3,3 V (volts), ambos considerados valores típicos para o módulo ESP8266. Para o cálculo final da energia consumida em miliJoules foi utilizada a Equação Consumo Energético (2).

$$CE = (I/1000) \times V \times t \times 1000 \quad (2)$$

Onde 'I' é a corrente em miliAmperes (mA), V é a tensão elétrica em Volts e t é o intervalo de tempo de transmissão (latência) em segundos. Esses valores foram acumulados para todas as mensagens para obter o consumo energético total.

Ao final da execução do receptor, foram calculadas e exibidas as métricas de latência média, mínima e máxima, além do consumo energético total para as 10 mensagens transmitidas, refletindo a eficiência da comunicação no protocolo utilizado e no dispositivo

simulado. Essa metodologia garantiu uma avaliação quantitativa e simulada da latência e da eficiência energética no contexto da comunicação MQTT entre dispositivos IoT simulados pelo módulo ESP8266.

Além da versão do protocolo IP, fatores relacionados à configuração da comunicação MQTT podem influenciar o desempenho da rede. O *payload*, isto é, o conteúdo útil transportado dentro da mensagem MQTT, interfere na quantidade de dados processados e transmitidos (Dizdarevic *et al.*, 2018). Da mesma forma, o intervalo entre as mensagens influencia a ocupação do canal e o processamento das mensagens pelo servidor MQTT. Segundo Souza *et al.* (2020), o nível de QoS (*Quality of Service*) estabelece uma relação entre desempenho e confiabilidade, pois define as garantias de entrega das mensagens. O QoS 0, utilizado neste experimento, corresponde à entrega "no máximo uma vez", onde a mensagem é enviada sem confirmação ou retransmissão, apresentando menor sobrecarga de comunicação, mas podendo não chegar ao destino em caso de perda na rede. Por essa razão, essa configuração é adequada a cenários que priorizam baixa latência e nos quais a perda eventual de uma mensagem é aceitável.

Além da configuração inicial utilizada no experimento, foram realizados outros testes com diferentes tamanhos de *payload* e dois perfis de tráfego, mantendo o broker Mosquitto, o QoS 0 e os demais parâmetros constantes. Foram escolhidos *payloads* de 32, 128 e 512 bytes para representar, respectivamente, mensagens pequenas, intermediárias e maiores, permitindo observar se o aumento do volume de dados modifica a latência e o consumo energético estimado. Após a inclusão das informações necessárias para identificar cada mensagem durante o experimento, os tamanhos totais transmitidos foram de aproximadamente 198, 296 e 680 bytes, respectivamente. Os intervalos avaliados foram de 1 segundo, correspondente ao perfil normal, e 0.1 segundo, correspondente ao perfil de tráfego mais intenso. Em cada combinação, foram transmitidas dez mensagens e não houve perda registrada.

Todos os procedimentos do experimento foram registrados por meio dos conteúdos dos terminais de comando, contendo os comandos executados e os resultados obtidos. Esses registros permitiram a verificação transparente e detalhada do processo experimental, garantindo a possibilidade de reprodução do experimento em ambientes semelhantes.

Assim, a condução da pesquisa buscou assegurar um rigor técnico e científico adequado para a análise comparativa entre os protocolos IPv4 e IPv6 em dispositivos IoT de baixo consumo. Os resultados efetivos da experimentação, serão apresentados na seção subsequente do artigo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio de uma simulação da comunicação entre dois módulos ESP8266, utilizando os protocolos IPv4 e IPv6. As simulações recriaram um cenário típico de troca de mensagens por meio do protocolo MQTT, permitindo medir a latência e estimar o consumo energético associado à comunicação entre os dois dispositivos.

Tabela 1. Comparação entre IPv4 e IPv6.

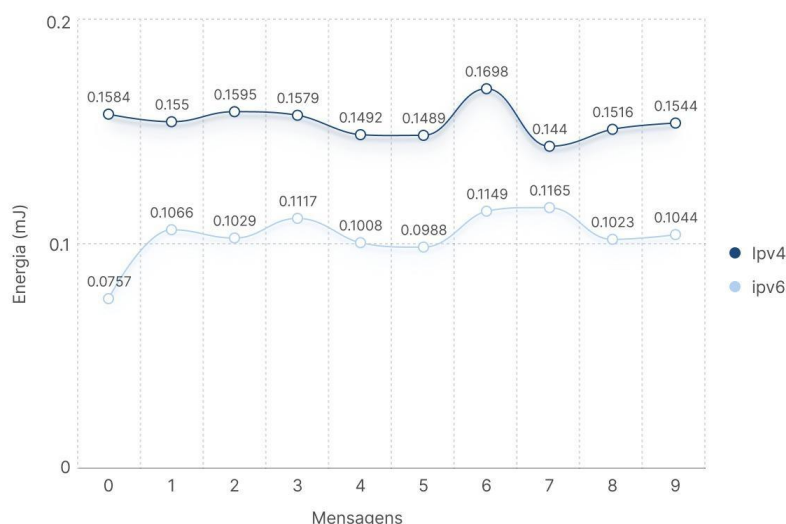
Métrica	IPv4	IPv6
Latência média (ms)	0.59	0.39
Latência mínima (ms)	0.55	0.29
Latência máxima (ms)	0.64	0.44
Consumo energético total (mJ)	1.5488	1.0346
Consumo médio por mensagem (mJ)	≈0.1549	≈0.1035
Variabilidade da latência	Maior dispersão	Menor dispersão
Arquitetura IP	Utiliza NAT e DHCP	Suporta autoconfiguração SLAAC e sem NAT

Fonte: Os autores (2025).

Os dados simulados da comunicação entre os dois módulos ESP8266 sugerem maior eficiência do IPv6 sobre o IPv4 em ambientes IoT de baixo consumo. Analisando a Tabela 1, é possível perceber uma redução da latência média em cerca de 34% com o IPv6, indicando uma comunicação mais ágil e eficiente, essencial para aplicações que demandam respostas rápidas. Além disso, a latência mínima significativamente menor no IPv6 reflete sua capacidade de operar com menor tempo de espera em condições ideais, favorecendo maior eficiência.

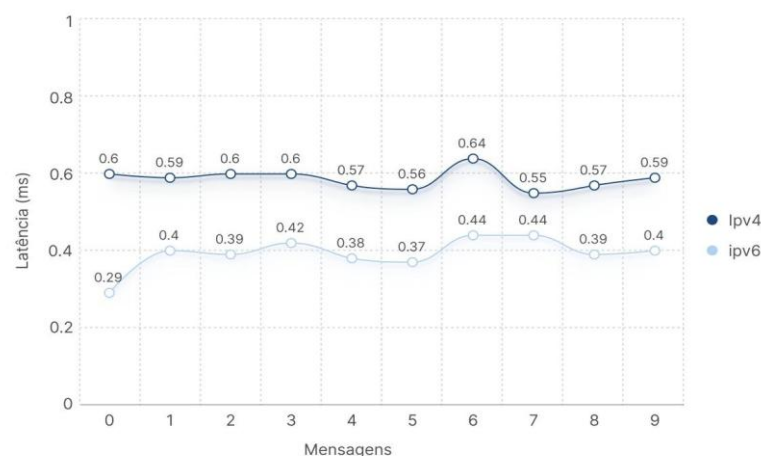
Observa-se que o IPv6 apresenta valores absolutos de latência menores quando comparado ao IPv4, tanto na latência mínima (0.29 ms) quanto na máxima (0.44 ms), enquanto no IPv4 esses valores correspondem a 0.55 ms e 0.64 ms, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 1. Destaca-se ainda que não houve sobreposição entre os resultados observados nos dois protocolos, uma vez que a maior latência registrada no IPv6 (0.44 ms) permaneceu inferior à menor latência observada no IPv4 (0.55 ms). Esse comportamento indica que o IPv6 apresentou tempos de resposta menores em todas as medições realizadas no experimento, reforçando a consistência de seu melhor desempenho no cenário analisado.

Figura 2. Comparação do Consumo Energético Estimado entre IPv4 e IPv6.



Fonte: Os autores (2026).

Figura 3. Comparação da Latência Média entre IPv4 e IPv6



Fonte: Os autores (2026).

De acordo com as Figuras 2 e 3 e com a comparação da Tabela 1, no âmbito energético, o IPv6 demonstrou consumir aproximadamente 33% menos energia no total quando comparado ao IPv4, um ganho crítico para dispositivos IoT, que dependem de baterias limitadas e necessitam prolongar sua autonomia. É percebido também pela Tabela 1, que o consumo médio por mensagem no IPv6 é significativamente menor (≈ 0.1035 mJ) que no IPv4 (≈ 0.1549 mJ), indicando que a diferença observada se manteve ao longo da comunicação. Ressalta-se que esses valores foram estimados a partir da latência, utilizando 3,3 V e 80 mA, e não correspondem a uma medição elétrica direta nos módulos ESP8266.

Essa possível economia energética, ocorre apesar do cabeçalho do IPv6 ser maior do que o do IPv4, pois o IPv6 reduz a necessidade de NAT e permite mecanismos de autoconfiguração como *Stateless Address Autoconfiguration* (SLAAC), reduzindo o tempo de processamento e transmissão. O IPv4, ao depender dessas operações adicionais, apresenta um consumo energético maior, resultado do esforço extra para gerenciar os endereços e transmitir os dados.

A seguir, são apresentados os cenários obtidos com diferentes tamanhos de *payload* e perfis de tráfego. Na Tabela 2 logo abaixo, é indicado que o impacto da carga útil e do intervalo de transmissão varia conforme o protocolo e a configuração analisada, não apresentando uma relação linear única entre tamanho da mensagem e latência. Os payloads solicitados de 32, 128 e 512 bytes resultaram em mensagens totais de aproximadamente

198, 296 e 680 bytes, respectivamente. No perfil de tráfego de 1 segundo, o *payload* real de 680 bytes, produziu maior impacto no IPv4, elevando sua latência média para 0.8994 ms e atingiu o maior valor máximo, de 2.6967 ms, enquanto o IPv6 manteve latências médias próximas nos três tamanhos avaliados, entre 0.5899 ms e 0.6076 ms.

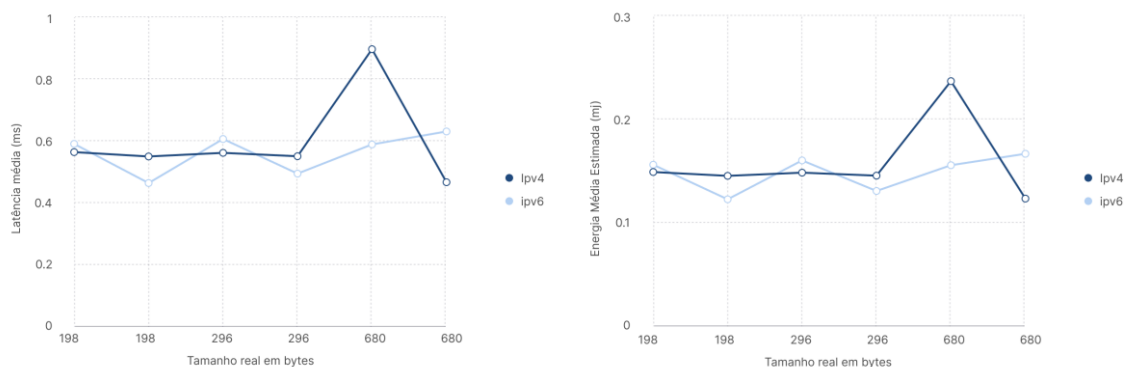
Tabela 2. Comparação do desempenho do IPv4 e IPv6 sobre diferentes tamanhos de *payload* e perfis de tráfego.

Protocolo	Payload	Intervalo	Latência Média	Latência Mínima	Latência Máxima	Energia Estimada
IPv4	198	1.0	0.5649	0.5144	0.6196	0.1491
IPv4	198	0.1	0.5507	0.4271	0.7191	0.1454
IPv4	296	1.0	0.5625	0.4816	0.5973	0.1485
IPv4	296	0.1	0.5515	0.4631	0.7707	0.1456
IPv4	680	1.0	0.8994	0.5291	2.6967	0.2374
IPv4	680	0.1	0.4671	0.3966	0.5718	0.1233
IPv6	198	1.0	0.5917	0.5603	0.6372	0.1562
IPv6	198	0.1	0.4644	0.3874	0.5582	0.1226
IPv6	296	1.0	0.6076	0.5227	0.7159	0.1604
IPv6	296	0.1	0.4951	0.4216	0.6283	0.1307
IPv6	680	1.0	0.5899	0.5319	0.6558	0.1557
IPv6	680	0.1	0.6320	0.5018	0.9299	0.1668

Fonte: Os autores (2026).

No intervalo de 0.1 segundo, as latências permaneceram inferiores a 0.64 ms em quase todas as condições, com exceção da maior variação observada no IPv6 para o *payload* de 680 bytes, cuja latência máxima alcançou 0.9299 ms. Como não houve perda de mensagens, as diferenças entre os perfis foram observadas principalmente no tempo e na estabilidade da comunicação. Dessa forma, os resultados indicam que não há uma relação linear entre o tamanho do *payload* e a latência. A influência do volume de dados depende da interação com o protocolo utilizado e com o intervalo de publicação, uma vez que o mesmo *payload* apresentou comportamentos distintos nas diferentes condições de tráfego avaliadas.

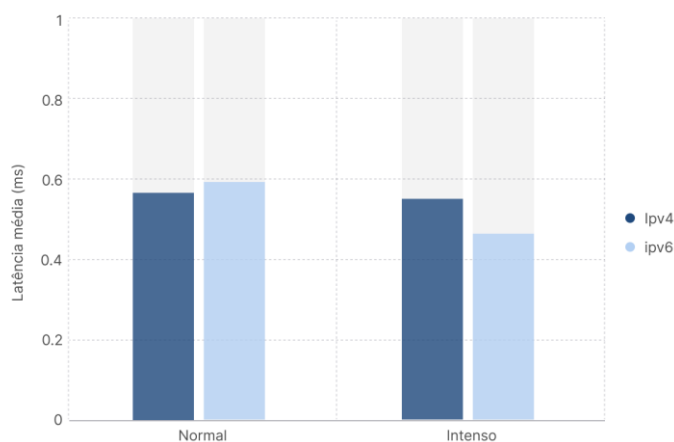
Figura 4. Latência Média e Energia Estimada Média em função do tamanho do *payload* para IPv4 e IPv6.



Fonte: Os autores (2026).

A Figura 4 apresenta dois painéis, o primeiro compara a latência média e o segundo compara a energia média estimada dos protocolos IPv4 e IPv6 para mensagens de aproximadamente 198, 296 e 680 bytes. Como o consumo energético foi estimado com base no tempo de transmissão, a energia acompanha a variação da latência. Observa-se que o IPv4 apresentou aumento expressivo da latência e da energia estimada para mensagens de 680 bytes transmitidas com intervalo de 1 segundo, enquanto o IPv6 manteve valores mais estáveis nessa condição.

Figura 5. Latência Média nos diferentes Perfis de Tráfego.



Fonte: Os autores (2026).

A Figura 5 evidencia que a frequência de publicação não produz um efeito uniforme sobre os protocolos, pois sua influência depende do tamanho da mensagem. No perfil de tráfego normal, o aumento do *payload* afetou principalmente o IPv4, que apresentou maior latência e maior dispersão para mensagens de 680 bytes. No perfil de tráfego intensificado, essa diferença deixou de ocorrer da mesma forma, onde o IPv4 apresentou redução da latência média para o maior *payload*, enquanto o IPv6 apresentou aumento da variabilidade nessa condição. Esse comportamento sugere que, no ambiente virtualizado avaliado, a relação entre tamanho da mensagem, frequência de transmissão e latência não é linear, ela resulta da interação entre o processamento do sistema, a transmissão MQTT e as condições momentâneas da rede.

Portanto, mesmo simulando a comunicação típica entre dois ESP8266 lógicos, o IPv6 destacou-se como o protocolo mais eficiente e adequado às demandas modernas da IoT, apresentando, melhor desempenho e maior economia energética. Embora os resultados obtidos sobre diferentes configurações, indiquem que essa vantagem pode variar conforme o tamanho do *payload*, a frequência de transmissão e as condições do serviço MQTT, com os benefícios estruturais do IPv6, como maior capacidade de endereçamento, autoconfiguração e menor dependência de NAT, tornam-no uma alternativa estratégica para a escalabilidade, a sustentabilidade e a evolução das redes de dispositivos conectados, superando as limitações do IPv4.

6 CONCLUSÃO

Este estudo analisou os protocolos IPv4 e IPv6 na comunicação entre dispositivos IoT de baixo consumo, simulados logicamente pelos módulos ESP8266, buscando verificar diferenças de desempenho e eficiência energética. Na situação inicial avaliada, a hipótese de que o IPv6 proporciona menor latência e menor consumo energético estimado foi confirmada, uma vez que esse protocolo apresentou os menores valores médios, mínimos e máximos de latência. Entretanto, a análise sob diferentes tamanhos de *payload* e perfis de tráfego demonstrou que essa vantagem não se manteve em todas as configurações, indicando que o desempenho relativo depende das características da comunicação MQTT e das condições do ambiente avaliado. Esses resultados destacam o potencial do IPv6 para

ampliar a eficiência e a autonomia de dispositivos IoT, sem desconsiderar a necessidade de selecionar a configuração mais adequada para cada aplicação. A implantação do IPv6 em ambientes reais requer planejamento, testes e monitoramento contínuo, e o trabalho oferece uma base para pesquisas futuras sobre escalabilidade, segurança, consumo energético medido diretamente e desempenho em diferentes condições de rede. O trabalho oferece uma base sólida para futuras pesquisas que possam explorar a escalabilidade, segurança e integração do IPv6 em contextos mais amplos, além de auxiliar profissionais na implementação consciente e otimizada do protocolo.

REFERÊNCIAS

ABDULLAHI, Habibu. **Implementação de IPv6 nos Sistemas Internet das Coisas (IoT)**. Orientador: Marcos Fernando de Souza. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Politécnico, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313557660_Implementacao_de_IPv6_nos_Sistemas_Internet_das_Coisas_IoT. Acesso em: 27 out. 2025.

AMVAME-NZE, Georges Daniel. **Reconfiguração dinâmica de agentes móveis IPv4 em redes sem fio Ad Hoc**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/6895>. Acesso em: 14 out. 2025.

BENTO, Augusto Koshiyama; KIM, Benjamim Yong Jin; CABRAL, Gabriel Moreira; SILVA, Rodrigo Cardoso. **Desafios do Uso de IPv6 em Dispositivos IoT**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://adelpha.api.mackenzie.br/server/api/core/bitstreams/22169e5d-67d3-4f30-9d8c77b7c3f86e84/content>. Acesso em: 27 out. 2025

DIZDAREVIĆ, Jasenka; CARPIO, Francisco; JUKAN, Admela; MASIP-BRUIN, Xavi. A survey of communication protocols for Internet-of-Things and related challenges of fog and cloud computing integration. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 51, n. 6, p. 1-29, 2018. DOI: 10.1145/3292674. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1804.01747>. Acesso em: 20 ago. 2026.

DUMAY, Marion; AL HAJ HASSAN, Hussein; SURBAYROLE, Philippe; ARTIS, Thibaut; BARTHEL, Dominique; PELOV, Alexander. Enabling extremely energy-efficient end-to-end secure communications for smart metering internet of things applications using static context header compression. **Applied Sciences**, [S.l.], v. 13, n. 21, p. 11921, out. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/21/11921>. Acesso em: 25 out. 2025.

EL GATTE, Oumayma; EL ABBASSI, Ahmed; MOUHIB, Omar. Comparison between IPv4 and IPv6 in order to economize the energy for the wireless sensor network. *In*: FARHAOUI,

Yousef; HERAWAN, Tutut; IMOIZE, Agbotiname Lucky; EL ALLAOU, Ahmad (org.). **Intersection of artificial intelligence, data science, and cutting-edge technologies: from concepts to applications in smart environment: ICAISE'2024**. Cham: Springer, 2025. v. 1397, p. 172–178. (Lecture Notes in Networks and Systems).

GROTTA, Alexandre. **Aprendizagem Baseada em DevOps no Ensino Superior de Sistemas de Informação**. 2025. Tese (Doutorado em Sistemas de Informação) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100131/tde-29032025-215513/publico/Alexandre_Grotta_Tese-versao_final.pdf. Acesso em: 27 out. 2025.

INATEL; HUAWEI; ANATEL. **IPv6 no Brasil**: artigo técnico. Santo Antônio do Pinhal: Inatel, 2024. Disponível em: <https://inatel.br/cxsc/documents/artigo-tecnico-sobre-o-IPv6-no-brasil.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.

MUNIZ, Angelo Henrique Alves; FOREST, Fernando; CECÍLIA, Gabriel Antunes; SILVA, Gabriel de Paula; PONTES, Luiz Gustavo Razzano de; MUNIZ, Mário Sérgio de Almeida; CRUZ, Renato Araujo; SABINO, Eliney. Estudo de caso: transição do protocolo IPv4 para IPv6. **Revista Gestão em Foco**, [S. l.], ed. 9, 2017. Disponível em: https://portal.unisepe.com.br/unifia/wp-content/uploads/sites/10001/2018/06/055_estudo8.pdf. Acesso em: 17 jul. 2025.

NWAKEZE, Osita Miracle; OBOTI, Nwamaka Peace; OMOROGIE, Michael; EZEKIEL-ODIMGBE, Chinenye Love; IBEH, Sylvarine Chinsasa. **Performance evaluation of IPv4 vs IPv6 in wireless networks**. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences, [S.l.], v. 16, n. 3, p. 399-409, set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.16.3.1362>. Acesso em: 20 ago. 2026.

PIĄTKOWSKI, Dominik; PUŚLECKI, Tobiasz; WALKOWIAK, Krzysztof. Study of the impact of data compression on the energy consumption required for data transmission in a microcontroller-based system. **Sensors**, [S.l.], v. 24, n. 1, p. 224, jan. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/224>. Acesso em: 27 out. 2025.

PORTELA, Sebastião Ivaldo Carneiro; SANTOS, Jorge Alberto dos; LUCENA DE SOUZA, Gilmar Severino; OLIVEIRA, Hélder Line. **Protocolo de rede IPv4 e IPv6**: aspectos conceituais e uma análise comparativa genérica. São Paulo: SEES, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54021/seesv6n1-031>. Acesso em: 13 out. 2025.

SIGNORETTI, Gabriel Lucas Albuquerque Maia. **Um algoritmo online e evolutivo para compressão automática de dados em cenários de IoT**. 2021. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

SMETANA, George Marcel M. A. **IPv4 e IPv6**. 2012. Artigo técnico – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37081060/ArtigoIP-libre.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025. Acesso em: 13 out. 2025.

SOBRAL, José V. V.; RODRIGUES, Joel J. P. C.; RABÊLO, Ricardo A. L.; AL-MUHTADI, Jalal; KOROTAEV, Valery. **Routing protocols for low power and lossy networks in Internet of**

Things applications. Sensors, [S.l.], v. 19, n. 9, p. 2144, maio 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/9/2144>. Acesso em: 20 ago. 2026.

SOUZA, José Eduardo de; CAMARGO, Edson Tavares de; SPANHOL, Fabio Alexandre; SOUZA, Alvaro Ricieri Castro e. Uma avaliação do Broker Mosquitto no contexto de Internet das Coisas. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 25., 2020, Toledo. **Anais eletrônicos [...]**. Toledo: UTFPR, 2020. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2020/paper/download/6659/2548>. Acesso em: 27 out. 2025.