

# Avaliação de Desempenho de Redes em Malha Sem Fio em Cenários de Cidades Inteligentes

Rui Guerra Falcão Moreno, Carina Teixeira de Oliveira

<sup>1</sup>Laboratório de Redes de Computadores e Sistemas (LAR)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

**Abstract.** *The Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) routing protocol is one of the protocols recommended by the IEEE 802.11s standard for Wireless Mesh Networks (WMNs). This work aims to perform a performance evaluation of the HWMP based on its two modes (reactive and reactive with proactive), in smart city scenarios. To analyze its performance, simulations were performed in the NS-3 simulator, making it possible to compare the two modes in scenarios with different numbers of data streams, different volumes of data and different types of applications. The results achieved can be used by network designers to implement or improve WMN in smart cities.*

**Resumo.** *O protocolo de roteamento Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) é um dos protocolos recomendados pelo padrão IEEE 802.11s para Redes em Malha Sem Fio (Wireless Mesh Networks - WMNs). Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação de desempenho do HWMP com base em seus dois modos (reativo e reativo com proativo), em cenários de cidades inteligentes. Para análise do seu desempenho, simulações foram realizadas no simulador NS-3 sendo possíveis a comparação entre os dois modos em cenários com variados números de fluxos de dados, variados volumes de dados e diferentes tipos de aplicações. Os resultados alcançados podem ser utilizados por projetistas de redes para a implantação ou melhoria de WMN em cidades inteligentes.*

## 1. Introdução

As Redes em Malha Sem Fio (*Wireless Mesh Networks* - WMNs) têm conquistado, de forma crescente, a atenção nos últimos anos em virtude de seu baixo custo, facilidade de implantação, robustez e cobertura de serviço confiável. De maneira geral, pode-se dizer que as WMNs são compostas por um conjunto de roteadores sem fio, chamados roteadores *mesh* (*mesh router*), que são interligados entre si para difusão *broadcast* e entrega de pacotes ao longo da topologia de múltiplos saltos, formando um *backbone* (*wireless mesh backbone*) [Parvin 2020]. Através desta tecnologia, é possível ofertar uma cobertura sem fio em banda larga para grandes áreas (como centros urbanos), sem grandes exigências em termos de infraestrutura. Além disso, é capaz de assegurar a conectividade em ambientes com dinamicidade das condições do meio sem fio e com usuários móveis. As WMNs têm sido implementadas em diversos tipos de ambientes, tais como residências, campus universitários, edifícios empresariais, sistemas de transporte inteligentes (*Intelligent Transportation Systems* – ITS) e, no contexto deste artigo, em cidades inteligentes (*smart cities*) [Ibrahim et al. 2022, Ali et al. 2022].

Segundo [Alrikabi and Ali Jasim 2021], uma cidade inteligente é aquela que faz uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), de serviços, de monitoramento e de gestão de forma mais consciente, interativa e eficiente. Conforme

[Washburn et al. 2009], uma cidade inteligente é capaz de agir de forma ágil à problemas relacionados ao transporte, à saúde, à educação, à segurança, à economia e aos demais problemas urbanos através do gerenciamento de diversos dispositivos espalhados pela cidade. No mais, em um ambiente de cidade inteligente é esperado um número crescente de dispositivos heterogêneos, tanto dos dispositivos “convencionais” (*laptops, smartphones* etc), mas principalmente de dispositivos no contexto de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT).

Neste trabalho, propõe-se o estudo das WMN como uma das infraestruturas de redes para cidades inteligentes. Em especial, avalia-se o desempenho dessas redes em diversos cenários de cidades inteligentes, de forma que, para a representatividade de um modelo de cidade inteligente, foram consideradas diversas topologias de redes com variados números de fluxos de dados, variados volumes de dados e diferentes tipos de aplicações. A avaliação tem como foco principal o comportamento dos modos *reativo* e *reativo com proativo* do protocolo de roteamento *Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP), que é um dos protocolos recomendados pelo padrão Mesh IEEE 802.11s [Hiertz et al. 2010]. Pretende-se que os resultados e discussões resultantes do trabalho de avaliação de desempenho possam ser utilizados por projetistas de redes para a implantação ou melhoria de WMN em cenários de cidades inteligentes.

## **2. Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)**

O padrão IEEE 802.11s utilizado pelas redes *mesh* objetiva, entre outros serviços das redes *mesh*, a seleção de caminhos, o encaminhamento, a interoperabilidade com redes externas e a segurança das informações [Hiertz et al. 2010]. O padrão IEEE 802.11s não restringe nenhum protocolo de roteamento para ser implementado por necessidades de aplicações especiais, mas recomenda o uso do *Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP) [Andreev and Boyko 2010]. É através deste protocolo que se permite a interoperabilidade entre os dispositivos de diferentes fabricantes.

Há dois modos que o HWMP pode atuar: modo reativo, baseado em caminhos por demanda; e modo proativo, baseado em árvore. Ambos os modos trabalham com o envio de mensagens de solicitação (*Path Request* - PREQ), de resposta (*Path Reply* - PREP) e de erro (*Path Error* - PERR) para seleção de caminho entre um ponto *mesh* origem a outro ponto *mesh* destino.

O modo sob demanda (reativo) concede aos roteadores *mesh* a comunicação entre si usando caminhos ponta a ponta. Independente de um *mesh Portal* (i.e., *gateway* com acesso à internet) estar configurado ou não, este modo sempre está disponível. Antes de enviar os pacotes de dados, o nó de origem envia uma mensagem *broadcast* de solicitação de transmissão PREQ, que a cada salto atualiza a métrica *Airtime Link Metric* (ALM). Essa métrica tem como objetivo medir a qualidade dos caminhos em função da probabilidade de perda de quadros estimada [Ibrahim et al. 2013]. Quando um nó recebe a mensagem, ele envia de volta uma mensagem de resposta (*Path Reply* - PREP) para o nó origem. Ao receber a resposta PREP, o nó origem toma conhecimento de todos os caminhos existentes na malha e escolhe qual caminho será mais vantajoso.

O modo proativo, baseado em árvore, mantém um caminho de árvore do *mesh Portal* para todos os outros nós através da atualização da tabela de rotas por meio das mensagens PREQ que cada nó possui. O mecanismo proativo PREQ pode ser visto como

uma funcionalidade adicional do modo sob demanda, diferindo através da determinação de um nó raiz (*mesh Portal*), ou seja, todos os caminhos terão que passar por este nó raiz. O acesso à Internet é um dos principais serviços em WMNs. Portanto, espera-se que os caminhos para o *mesh Portal* sejam utilizados com frequência, ou seja, mensagens de controle no modo proativo devem ser utilizadas com maior periodicidade [Dugaev and Siemens 2014, Bahr 2006].

### 3. Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta trabalhos que realizam avaliação de desempenho no contexto das WMN e/ou do HWMP. Os trabalhos são apresentados de maneira cronológica.

Os autores [Ibrahim et al. 2013] comparam o protocolo HWMP com o protocolo de roteamento de modo reativo *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV), em uma rede em malha sem fio. Para efeitos de comparação entre os protocolos de roteamento, foi utilizado o simulador NS-3. Os parâmetros taxa de entrega de pacotes, *throughput* e o atraso fim-a-fim foram considerados como métricas para avaliar quais dos protocolos é melhor. Os resultados mostram que o HWMP é mais apropriado para WMN. Apesar da avaliação de desempenho considerar diferentes números de nós, a quantidade de nós utilizada é baixa (9, 16, 25 e 36 nós). No presente trabalho, empregou-se 81 nós para análise do desempenho.

No trabalho [Nataraju et al. 2016], uma abordagem semelhante ao trabalho anterior realizou experimentos utilizando o simulador NS-3, mas gera a análise variando o tamanho de topologias em uma grade (com 9, 16, 25, 36 e 49 nós), o tamanho de pacotes (de 5K a 10K bytes) e o número de interfaces (1 a 4 interfaces), buscando encontrar o tamanho de pacote ideal para explorar melhores resultados das redes em malha sem fio. A estratégia de equipar os roteadores com múltiplas interfaces só se mostrou eficaz (melhorando a taxa de transferência, o atraso fim-a-fim e a entrega de pacotes) quando o tamanho de pacote é limitado a 2K bytes. O trabalho mostrou que, caso a área de cobertura exigida por uma aplicação seja pequena, o aumento do número de interfaces, com o intuito de obter melhores resultados na taxa de transferência, torna-se irrelevante.

O trabalho [Nayyar 2018] realiza uma avaliação comparativa dos protocolos de roteamento HWMP, AODV, *Destination-Sequenced Distance Vector* (DSDV), *Dynamic Source Routing* (DSR) e *Optimized Link State Routing* (OLSR) em um cenário de *Flying Ad hoc Networks* (FANETs). Uma FANET é uma rede ad hoc caracterizada pela formação de Veículos Aéreos Não Tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* - UAV). Os parâmetros de simulação foram os seguintes: tempo de simulação de 1500 segundos, área de simulação 800 m x 800 m, 20 nós e tamanho do pacote de 512 bytes. Os resultados mostraram que o protocolo HWMP supera em desempenho todos os outros protocolos baseados na análise da taxa de entrega, atraso fim-a-fim e *throughput*.

No trabalho de [Chethan and Basavaraju 2019], um melhoramento do protocolo de roteamento HWMP é proposto, sendo chamado de *Scalable Local Route Repair-Hybrid Wireless Mesh Protocol* (SLRR-HWMP). Para testes e análise dos resultados foi utilizado o simulador *Qualnet* com o intuito de comparar o funcionamento do HWMP com o SLRR-HWMP. Os parâmetros de simulações utilizados foram: 16, 20, 24, 28 e 32 nós; área de 1500 m x 1500 m; tempo de simulação de 300 s; tamanho de pacote de 512 bytes; taxa de pacote de 2 Mbps; e topologia randômica. Os resultados mostraram

que a técnica de reparo de rotas locais, utilizada pelo protocolo SLRR-HWMP, considera apenas os nós vizinhos para reparar uma rota localmente e, conseqüentemente, minimiza a sobrecarga, o tempo e o custo de controle dos caminhos. Segundo os autores, o SLRR-HWMP é avaliado melhor que o HWMP em termos de sobrecarga, *throughput* e de atraso.

## 4. Proposta

Nesta seção, são apresentados os resultados da proposta do artigo, que consiste em uma avaliação de desempenho das WMN em cenários de cidades inteligentes, sendo utilizado o simulador *Network Simulator 3* (NS-3) para realização dos experimentos.

A metodologia utilizada para elaboração da proposta é apresentada em 4 etapas. A Etapa 1 (Seção 4.1) consiste nos detalhes de preparação do *script* desenvolvido para automação da submissão das simulações no NS-3. A Etapa 2 (Seção 4.2) apresenta os detalhes das simulações propriamente ditas. A Etapa 3 (Seção 4.3) apresenta os *scripts* desenvolvidos para elaboração dos resultados (gráficos amigáveis) das simulações. Por último, a Etapa 4 (Seção 4.4) trata da análise dos resultados obtidos.

### 4.1. Etapa 1: Preparação do *script* de entrada para as simulações no NS-3

Antes de realizar as simulações propriamente ditas, foi pensado em desenvolver um *script* para automatizar o processo de submissão das simulações no NS-3.

Para exemplificar as inúmeras vantagens do uso do *script* desenvolvido antes da etapa de simulação, tem-se a Tabela 1, que mostra os parâmetros utilizados como entrada para as simulações realizadas neste trabalho. Pode-se perceber que alguns desses parâmetros possuem um valor único, tais como: raio, número de rodadas de simulação, número de roteadores e número de *gateways*. Já outros parâmetros podem assumir diversos valores, como é o caso do: número de fluxos de pacotes, o intervalo entre pacotes para cada fluxo e o tamanho do pacote.

**Tabela 1. Parâmetros de Entrada para as Simulações.**

Parâmetro	Descrição /Valor(es)
Interface PHY	IEEE 802.11a
Área para formação da topologia	Circular
Raio da área	300 metros
Tempo total de simulação	30 segundos
Número de rodadas de simulações	30
Número de roteadores <i>mesh</i> (nós)	81
Número de <i>gateways</i> na topologia	1
Número de fluxos	1, 10, 30, 50, 70
Intervalo entre pacotes para cada fluxo	0.01 s
Tamanho do pacote	32, 256, 1024 bytes

Assim, um dos aspectos que o *script* desenvolvido nessa etapa otimiza é a submissão automática da combinação de todos os valores da Tabela 1. Por exemplo, ao executar o *script* em questão, diversas entradas são dadas ao simulador NS-3, cada uma sendo uma combinação diferente de parâmetros. Essa característica torna o processo de

simulação mais rápido e reduz as chances de uma combinação de parâmetros não ser avaliada.

Um segundo aspecto relevante do *script* criado é em relação às topologias utilizadas para as simulações. Toda topologia usada na avaliação é gerada de forma aleatória pelo simulador de acordo com parâmetros como a área estabelecida e o número de roteadores *mesh* que devem ser dispostos de maneira uniforme na área em questão. Na Figura 1, temos um exemplo de umas das topologias gerada pelo simulador.

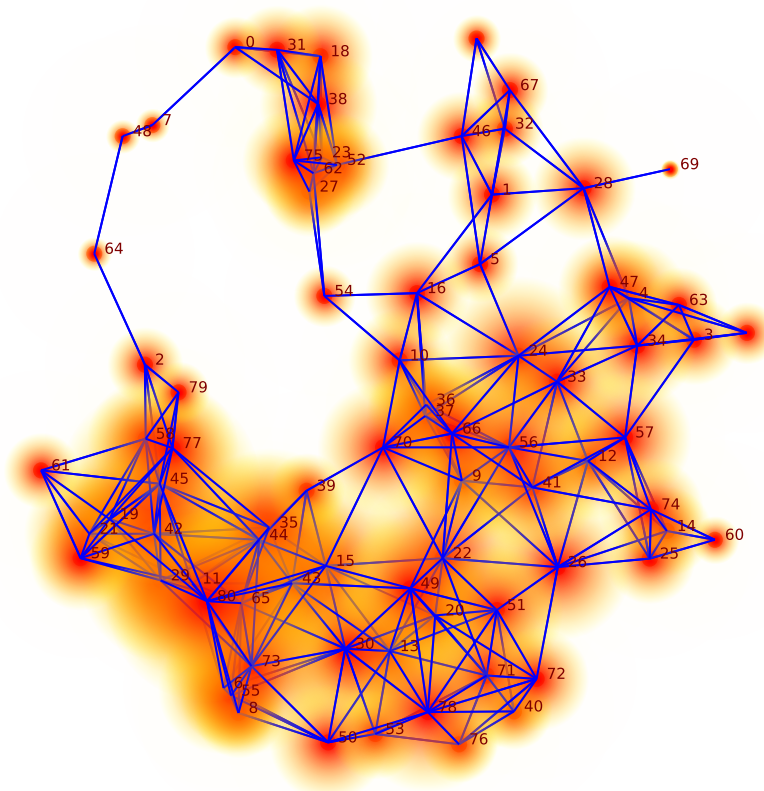


Figura 1. Exemplo de topologia *mesh* com 81 nós em um círculo de raio de 300m.

#### 4.2. Etapa 2: Simulações no NS-3

Para realizar as inúmeras simulações da avaliação de desempenho (combinação dos parâmetros da Tabela 1), fez-se necessária a utilização de uma máquina virtual Linux (*Standard B2s*) em nuvem na plataforma *Azure*. Todos os pré-requisitos de configuração exigidos pelo simulador NS-3 foram atendidos. O algoritmo escrito em C++ faz o uso de funções *helpers*, presentes nas bibliotecas padrões do simulador NS-3, para modelar e simular uma topologia de rede *mesh* sem fio com a utilização do protocolo HWMP. Conforme Seção 2, a métrica de tempo de transmissão (*Airtime Link Metric - ALM*) é utilizada para selecionar o melhor caminho.

O modo por padrão do módulo HWMP do simulador NS-3 é o modo Reativo, pois não necessita de um nó raiz (*root* ou *mesh Portal*) para ser configurado. Para ativação

do modo Reativo e Proativo (RP), é necessário configurar um nó como sendo raiz para transmitir solicitações PREQ de *broadcast* para formar uma árvore de caminhos. Assim sendo, no modo RP não há a necessidade de todos os nós conhecerem os caminhos para se transmitir pacotes entre o nó origem e nó destino. Dados estatísticos de transmissão de mensagens do protocolo de roteamento HWMP foram extraídos para serem analisados graficamente na etapa seguinte.

De maneira resumida, os passos que o algoritmo realiza são:

1. Configuração dos parâmetros de entrada (Tabela 1);
2. Formação do modelo de topologia e instalação da aplicação (UDP servidor e UDP cliente);
3. Inicialização de um monitor dos fluxos (*Flow Monitor*) e execução da simulação;
4. Estatística dos parâmetros a serem analisados são gerados no formato texto.

### 4.3. Etapa 3: Preparação de um *script* para exibição dos resultados das simulações em gráficos amigáveis

Para a preparação dos resultados, foi estruturado um *script* com base nos parâmetros de entrada do *script* da Etapa 1 (Seção 4.1). O *script* também realiza o cálculo de intervalo de confiança de 95% e gera os dados referentes a esse cálculo para plotagem.

Para a exibição de gráficos, é necessário fazer o uso de bibliotecas que possuem o recurso de plotagem. Uma delas é a conhecida biblioteca python chamada matplotlib, que é amplamente utilizada pela comunidade científica para plotagens de gráficos 2D e 3D, de imagens e de expressões matemáticas [Hunter 2007].

As métricas de avaliação utilizadas neste trabalho são [Moulema et al. 2014, Ibrahim et al. 2013]:

- Vazão Agregada (*Aggregate Throughput*): definida como o somatório de todos os *throughputs*, com a unidade de medida sendo megabits por segundo (Mbits/s ou Mbps).
- Taxa de Entrega (*Delivery Rate*) é a quantidade total de pacotes que saindo do nó origem chega ao nó destino com sucesso, medida em porcentagem.
- Atraso Médio (*Delay Mean*) é a média de tempo que pacotes levam ao serem transmitidos de um nó origem a um nó destino.
- Total de mensagens de controle de roteamento.

### 4.4. Etapa 4: Resultados

Nesta seção, serão mostrados, através de gráficos, os comportamentos do protocolo HWMP de forma a analisar quais parâmetros podem impactar no desempenho da rede *mesh*. Os gráficos gerados foram considerados no modo Reativo (R) e no modo Reativo e Proativo (RP) para cada métrica de avaliação vista na Seção 4.3. Realiza-se um comparativo entre esses dois modos nos gráficos seguintes.

Ao analisar a Figura 2(a), observa-se que tanto o modo R quanto o modo RP possuem vazões agregadas próximas para todos os tamanhos de pacote. Esse comportamento de proximidade entre os modos R e RP se reflete, também, para os gráficos de taxa de entrega e de média de atraso presentes nas Figuras 2(b) e 2(c), respectivamente.

No gráfico da taxa de entrega (Figura 2(b)), os pacotes com maior quantidade de bytes possuem uma menor taxa de entrega a medida que o número de fluxos aumenta. Isso porque as chances de ocorrerem falhas na transmissão são maiores em pacotes grandes que em pacotes menores. Essas falhas podem ser, por exemplo, por meio de colisões, por tempo expirado de vida do pacote ou por instabilidade da rede. Além disso, o modo R em baixo fluxo (1 e 10 fluxos) possui uma taxa de entrega superior ao modo RP. Uma das possíveis razões para esse comportamento pode ser compreendida ao se analisar os gráficos da Figura 3, que apresenta os totais das mensagens de controle enviadas pelos dois modos do HWMP. Nota-se que o número de mensagens de controle de roteamento do tipo PREP (Figura 3(b)) e PERR (Figura 3(c)) geradas pelo RP é significativamente maior que no modo R. Em outras palavras, no modo RP muitas oportunidades de transporte de dados são perdidas com o envio de mensagens de controle. No mais, ao analisar a Figura 3(a), percebe-se que as mensagens de controle PREQ geradas aumentam a medida que o número de fluxos aumentam, pois, com o aumento de fluxos, mais requisições de rotas são geradas pelo protocolo de roteamento.

Em relação ao atraso médio (Figura 2(c)), é esperado um maior atraso para pacotes maiores comparado aos pacotes menores, tendo em vista as possibilidades de falhas ocorrerem como citado anteriormente, além do atraso ser cada vez maior a medida que o número de fluxos aumenta, já que a rede se torna mais saturada e mais sujeita a ocorrência de congestionamentos.

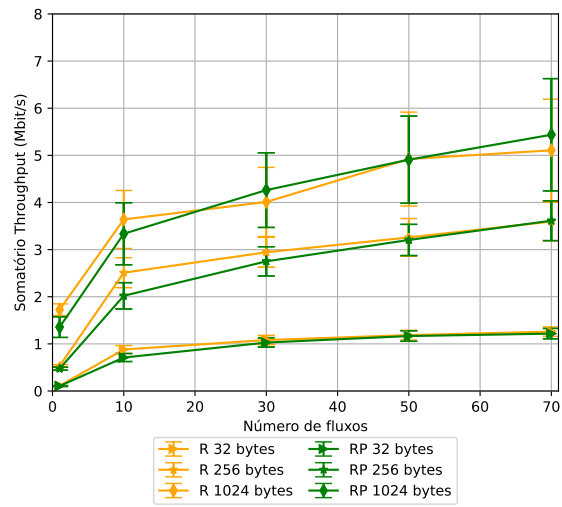
## 5. Considerações Finais

Este trabalho apresentou um estudo nas temáticas de cidades inteligentes, WMNs e HWMP. Em particular, as discussões foram realizadas a respeito da avaliação de desempenho realizada entre os dois modos de operação do HWMP em WMNs no cenário de cidades inteligentes.

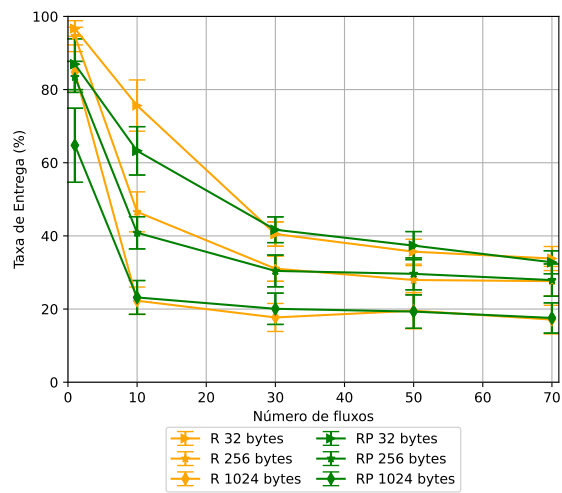
Para trabalhos futuros, novos valores e/ou parâmetros serão considerados, o que permitirá um maior ou menor grau de detalhamento dos cenários da avaliação de desempenho. Por exemplo, com novos valores, pensa-se em variar: o raio, número de roteadores *mesh*, intervalo entre pacotes e número de *gateways*. Sobre novos parâmetros, pensa-se em investigar: impacto da posição do(s) *gateway(s)* na rede e número médio de vizinhos.

## Referências

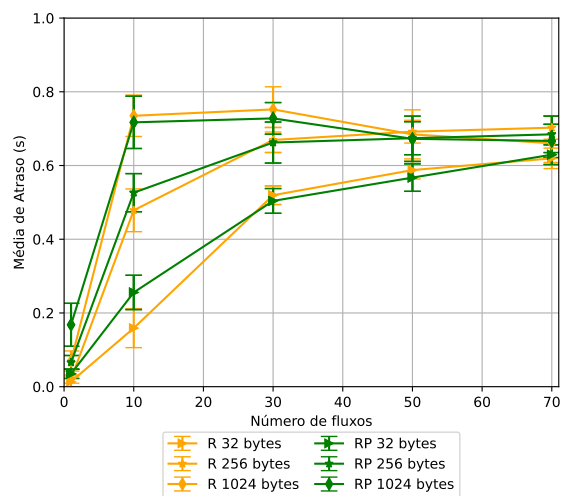
- [Ali et al. 2022] Ali, S., Pandey, M., and Tyagi, N. (2022). Sdfog-mesh: A software-defined fog computing architecture over wireless mesh networks for semi-permanent smart environments. *Computer Networks*, 211:108985.
- [Alrikabi and Ali Jasim 2021] Alrikabi, H. T. S. and Ali Jasim, N. (2021). Design and implementation of smart city applications based on the internet of things. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, 15(13):pp. 4–15.
- [Andreev and Boyko 2010] Andreev, K. and Boyko, P. (2010). Ieee 802.11 s mesh networking ns-3 model. In *3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, volume 43.
- [Bahr 2006] Bahr, M. (2006). Proposed routing for ieee 802.11s wlan mesh networks. In *Proceedings of the 2nd Annual International Workshop on Wireless Internet, WICON '06*, page 5–es, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.



(a) Vazão Agregada



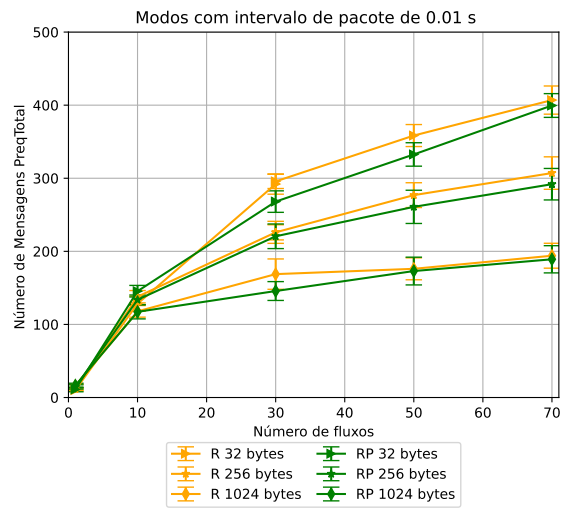
(b) Taxa de Entrega



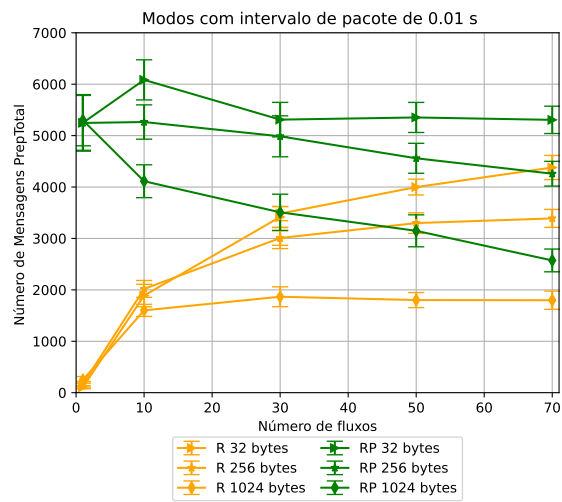
(c) Atraso Médio

Figura 2. Vazão agregada, taxa de entrega e atraso médio em função do número de fluxos.

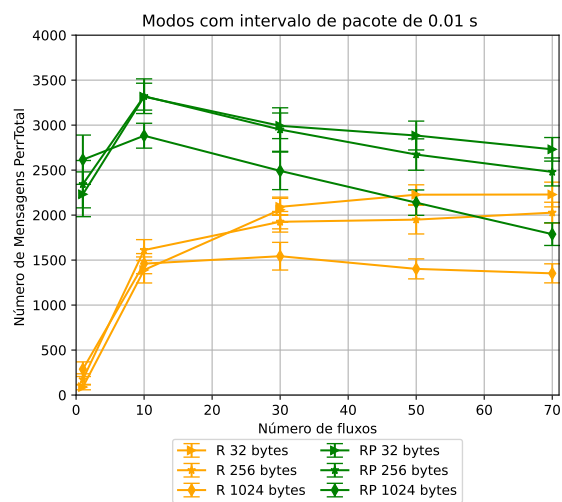




(a) Total de mensagens PREQ



(b) Total de mensagens PREP



(c) Total de mensagens PERR

Figura 3. Total de mensagens PREQ, PREP e PERR por nó em função do número de fluxos.

- [Chethan and Basavaraju 2019] Chethan, K. and Basavaraju, T. (2019). Scalable local route repair-hybrid wireless mesh protocol (slrr-hwmp) for ieee 802.11 s. *International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE)*, 8:173–184.
- [Dugaev and Siemens 2014] Dugaev, D. and Siemens, E. (2014). A wireless mesh network ns-3 simulation model: implementation and performance comparison with a real test-bed. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Innovations in IT, Volume Nr. 2*, pages 1–5. Bibliothek, Hochschule Anhalt, Anhalt University of Applied Sciences.
- [Hiertz et al. 2010] Hiertz, G. R., Denteneer, D., Max, S., Taori, R., Cardona, J., Berlemann, L., and Walke, B. (2010). Ieee 802.11s: The wlan mesh standard. *IEEE Wireless Communications*, 17(1):104–111.
- [Hunter 2007] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95.
- [Ibrahim et al. 2022] Ibrahim, A. S., Youssef, K. Y., Eldeeb, A. H., Abouelatta, M., and Kamel, H. (2022). Adaptive aggregation based iot traffic patterns for optimizing smart city network performance. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12):9553–9568.
- [Ibrahim et al. 2013] Ibrahim, I., Latiff, N. M. A., Yusof, S. K. S., Malik, N. N. N. A., and Ariffin, S. H. S. (2013). Performance comparison of aodv and hwmp routing protocols in wireless mesh networks. In *2013 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*, pages 116–120.
- [Moulema et al. 2014] Moulema, P., Yu, W., Xu, G., Griffith, D., Golmie, N., Lu, C., and Su, D. (2014). On effectiveness of mesh-based protocols for smart grid communication networks. *SIGAPP Appl. Comput. Rev.*, 14(2):59–70.
- [Nataraju et al. 2016] Nataraju, A., Maheshappa, H. D., and Devkate, A. (2016). Performance analysis of hwmp protocol for wireless mesh networks using ns3. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pages 1593–1598.
- [Nayyar 2018] Nayyar, A. (2018). Flying adhoc network (fanets): Simulation based performance comparison of routing protocols: Aodv, dsdv, dsr, olsr, aomdv and hwmp. In *2018 International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, pages 1–9.
- [Parvin 2020] Parvin, J. R. (2020). An overview of wireless mesh networks. In Khatib, M. and Alsadi, S., editors, *Wireless Mesh Networks*, chapter 1. IntechOpen, Rijeka.
- [Washburn et al. 2009] Washburn, D., Sindhu, U., Balaouras, S., Dines, R. A., Hayes, N., and Nelson, L. E. (2009). Helping cios understand “smart city” initiatives. *Growth*, 17(2):1–17.