

Equipe 8 - Relatório de Avaliação de Rede Sem Fio IEEE 802.11 em modo infraestruturado

Eduardo J. de S. Magalhães¹, Tales M. M. Pereira¹

¹Instituto de Ciência e Tecnologia (UNIFESP), São José dos Campos, Brazil

eduardo.magalhaes@unifesp.br, tales.miguel@unifesp.br

Resumo.

1. Introdução

As redes de computadores desempenham um papel fundamental na sociedade contemporânea, permitindo a comunicação e o compartilhamento de informações entre dispositivos em diferentes locais. A evolução das tecnologias de rede possibilitou o surgimento de diversas arquiteturas e padrões capazes de atender às crescentes demandas por mobilidade, desempenho e confiabilidade [Kurose and Ross 2017].

Assim, as redes sem fio surgem como uma solução eficiente e amplamente adotada, uma vez que eliminam a necessidade de cabeamento físico e oferecem maior flexibilidade na instalação, expansão e uso de dispositivos. Dentre as diversas tecnologias de comunicação sem fio existentes, os padrões definidos pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) têm sido amplamente utilizados por sua padronização [Tanenbaum and Wetherall 2011].

O padrão IEEE 802.11, conhecido como Wi-Fi, é a principal tecnologia utilizada para redes locais sem fio (WLANs). Criado pela Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), ele define uma série de especificações para comunicação de dados em diferentes frequências, taxas de transmissão e métodos de acesso, garantindo a conexão entre dispositivos de diferentes fabricantes. O modelo 802.11 abrange mecanismos de controle de acesso, autenticação, associação e gerenciamento de mobilidade, além de possuir múltiplas variantes, como os padrões 802.11a/b/g/n/ac/ax, cada uma oferecendo melhorias em desempenho, alcance e eficiência [IEEE 2022].

Com base no padrão estabelecido 802.11, este relatório propõe a realização diferentes simulações de topologia de uma Rede Sem Fio operando em modo infraestruturado. A partir dos resultados, busca-se analisar a eficiência e o comportamento do padrão em diferentes condições. Para os cenários de teste utilizaremos o protocolo TCP, protocolo UDP e casos em que estes dois protocolos estão atuando simultaneamente a fim observar como cada tipo de tráfego impacta o desempenho da rede. Teremos também a adição de mais clientes na rede e a adição de mobilidade para concluir a análise.

O presente relatório está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma breve revisão da literatura de alguns conceitos abordados pelos experimentos. Na Seção 3, é apresentada a descrição do exercício proposto, detalhando os objetivos e o formato da simulação. A Seção 4 aborda o processo de avaliação de desempenho, incluindo a metodologia considerada e os parâmetros utilizados nas simulações. A Seção 5 apresenta e discute os resultados obtidos para cada cenário analisado, subdivididos em: Atraso, Vazão e Perda de Pacotes. A Seção 6 descreve a divisão do trabalho entre os integrantes do grupo. Por fim, a Seção 7 apresenta as conclusões gerais do estudo.

2. Fundamentação Teórica

Nesta Seção, serão descritos os protocolos de rede abordados pelos experimentos. Também serão abordadas as métricas utilizadas como parâmetros de avaliação dos cenários.

2.1. Protocolos de Rede

2.1.1. Protocolo UDP

O Protocolo UDP (User Datagram Protocol) é um protocolo não orientado à conexão da camada de transporte do modelo TCP/IP. O UDP realiza apenas operações essenciais, fornecendo um serviço de multiplexação/demultiplexação entre processos de aplicação com verificação mínima de erros. O UDP recebe mensagens do processo da aplicação, anexa os campos de número de porta de origem e destino, e transmite o segmento resultante para a camada de rede, que encapsula esse segmento em um datagrama IP [Kurose and Ross 2017]. A camada de rede então realiza uma tentativa de entrega do segmento ao host destinatário. Se o segmento chegar ao destino, o UDP utiliza o número de porta para demultiplexar os dados ao processo correto da aplicação.

Uma característica fundamental do UDP é a ausência de estabelecimento de conexão, ou seja, não há *handshake* entre remetente e receptor da camada de transporte. Esse é o motivo de ser chamado de "não orientado à conexão". De forma simplória, o protocolo UDP não garante que as informações chegaram corretamente ao destinatário, já que não existe conexão entre eles. Em caso de erros, os pacotes serão apenas ignorados e a aplicação continuará a enviar os próximos normalmente. Esse protocolo é comumente utilizado em aplicações que não exigem confiabilidade na entrega dos pacotes, como em transmissões de vídeo ao vivo.

2.1.2. Protocolo TCP

O protocolo TCP (Transmission Control Protocol) é um protocolo orientado à conexão da camada de transporte do modelo TCP/IP. Diferentemente do UDP, o TCP fornece um serviço de entrega confiável, estabelecendo uma conexão entre o cliente e o servidor antes da transmissão de dados através de um *handshaking* de três vias [Kurose and Ross 2017]. O protocolo TCP envia dados e recebe uma confirmação de recebimento dos pacotes, garantindo então que o destinatário de fato recebeu corretamente todos os pacotes enviados na ordem esperada.

O TCP implementa controle de fluxo e controle de congestionamento, mecanismos ausentes no UDP. O controle de fluxo garante que o remetente não sobrecarregue o receptor, enquanto o controle de congestionamento limita a taxa de transmissão do TCP quando há congestionamento na rede. Essas características fazem do TCP um protocolo mais complexo, com maior overhead computacional e latência no estabelecimento da conexão, mas que oferece garantias robustas de entrega e integridade dos dados. Por ser considerado um protocolo de entrega confiável, o TCP é utilizado em larga escala nas abordagens atuais que exigem confiabilidade na entrega de dados, como envio de arquivos (FTP) e navegação web (HTTP).

2.2. Métricas de Avaliação

- **Atraso:** Tempo total decorrido entre o envio de um pacote pelo remetente até a chegada ao seu destinatário. O atraso é composto por quatro componentes: atraso de processamento (tempo necessário para examinar o cabeçalho do pacote e determinar a rota a ser seguida), atraso de fila (tempo de espera na fila de transmissão), atraso de transmissão (tempo necessário para colocar todos os bits do pacote no enlace) e o atraso de propagação (tempo necessário para o sinal percorrer o enlace físico todo) [Kurose and Ross 2017] . A soma desses componentes determina o atraso fim-a-fim do pacote.
- **Vazão:** Taxa de transmissão de dados numa rede. A vazão média é a quantidade total de dados transmitidos dividida pelo tempo total de transmissão. A vazão é limitada pelo enlace com menor capacidade no caminho entre origem e destino (enlace de gargalo), e também é afetada pelo congestionamento da rede.
- **Perda de Pacotes:** A perda de pacotes ocorre quando um pacote é descartado durante a transmissão, geralmente devido ao transbordamento de buffers em roteadores quando há congestionamento na rede. Quando a chegada de pacotes em um roteador excede a capacidade de processamento e armazenamento disponível, os pacotes são perdidos. A perda de pacotes é um parâmetro crítico de qualidade de serviço, pois afeta a confiabilidade da comunicação e o desempenho de protocolos da camada de transporte.

3. Descrição do exercício proposto

O exercício proposto refere-se a simulação de uma Rede sem Fio 802.11 no modo infraestruturado com um ponto de acesso (AP - *Access Point*). Este ponto de acesso deverá ser ligado a uma rede LAN com outros hosts que simulará a internet. Os dados da simulação devem apresentar a Vazão, Atraso e Perda de Pacotes dos dispositivos Wi-Fi que podem estar em movimento ou não em direção à borda da rede.

Para as simulações, a Rede sem Fio estará conectada a rede LAN através de um enlace de 100Mbps. Também consideraremos os seguintes tamanhos de quadro: 1024 bytes para conexões UDP e 1500 bytes para conexões TCP. A Figura 1 representa a visualização gráfica da simulação, realizada através da biblioteca *NetAnim* do simulador ns3.

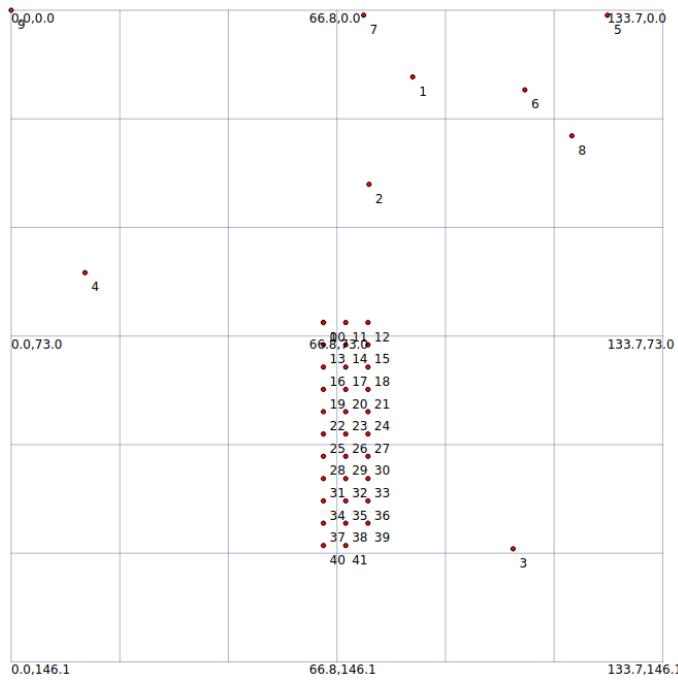


Figura 1 - Exemplo da topologia de rede

Fonte: Autor

4. Avaliação de desempenho

Nesta seção, será descrita a metodologia e os parâmetros de rede utilizados nas simulações dos cenários de teste. A partir destes, podemos analisar como as diferentes condições em uma rede pode afetar diversos índices de desempenho como Vazão, Atrasos e Perdas de Pacotes.

4.1. Metodologia

As simulações foram executadas utilizando o software Network Simulator 3 (NS-3) [NS] em um ambiente computacional configurado com o sistema operacional Ubuntu 24.04.3 LTS (x86_64), processador Intel i9-14900KF com 32 threads operando a 5.70 GHz, GPU NVIDIA GeForce RTX 4060 e 64 GiB de memória RAM. O NS-3 foi selecionado para este estudo por ter uma implementação da pilha de protocolos do padrão IEEE 802.11a. Para definir os cenários de teste, foram adicionadas à simulação três variáveis de linha de comando (*nWifi*, *protocol* e *mobility*), permitindo ajustar os parâmetros de cada execução diretamente no terminal, sem necessidade de modificar o código-fonte da simulação.

Nesta simulação, criamos dois ambientes distintos: uma rede LAN comutada por CSMA e uma rede Wi-Fi operando no padrão IEEE 802.11a. Essas duas redes são acessadas entre si através de um ponto de acesso (AP - Access Point). Para a rede LAN, os nós foram conectados por meio do módulo CSMA presente no NS-3. A taxa de dados do enlace LAN foi configurada para 100 Mbps, com o atraso de propagação ajustado para 2 ms e, para esta rede, utilizamos um número fixo de 10 hosts para todas simulações. Já para a rede Wi-Fi, os nós foram configurados através do módulo Wi-fi do NS-3 onde o ponto de acesso da rede é o cliente de ID 0, integrando as redes LAN e Wi-Fi. Para o meio físico da rede sem fio foi utilizado o modelo YansWifiPhy onde o delay de propagação foi

definido através do modelo `ConstantSpeedPropagationDelayModel` e o modelo de propagação utilizado foi o `FriisPropagationLossModel`, este com potência de transmissão de 5 dBm e sensibilidade de recepção definida em -80 dBm. A camada MAC foi configurada com o padrão IEEE 802.11a, utilizando o gerenciador de controle de taxa AARF, que define dinamicamente a taxa de transmissão de dados conforme a qualidade do enlace.

Inicialmente não foi definida uma dimensão limite, mas o comportamento interno do modelo `RandomWalk2dMobilityModel` gerava situações de *out of bounds* para cenários com 32 clientes contidos num *grid* 3x3 iniciando em (70,70), provavelmente devido à distância dos pontos. Visando contornar esta situação, o cenário adotado para as simulações tem dimensões limites de 200m X 200m. O servidor na rede LAN foi definido na coordenada (0,0) do cenário, enquanto o ponto de acesso está na coordenada (70,70). Ambos utilizando o modelo "`ConstantPositionMobilityModel`", que mantém a posição destes hosts fixa nestes pontos ao longo da simulação. Já os clientes Wi-Fi estão organizados em uma grade estruturada com largura de três nós por linha. O ponto inicial da grade foi estabelecido na coordenada (70, 70), a mesma posição do ponto de acesso. Os clientes são posicionados com espaçamentos de 5 metros tanto no eixo X quanto no eixo Y. Assim, os nós são distribuídos formando linhas horizontais de até três dispositivos por linha. Para o cenário em que há mobilidade entre os clientes sem fio, a variável comando *mobility* deve ser enviada com o valor 1. Dessa forma, os clientes serão configurados utilizando o modelo `RandomWalk2dMobilityModel`, que permitirá que os clientes se movam aleatoriamente dentro dos limites físicos de 200x200 metros durante o período da simulação, variando entre uma velocidade de 1.0 a 2.0 m/s (cerca de 3.6 a 7.2 km/h). Caso contrário, estes clientes serão configurados com posição fixa através do modelo `ConstantPositionMobilityModel`.

Por meio do módulo `InternetStackHelper`, a pilha de protocolos de Internet foi instalada nos nós da LAN e nos clientes Wi-Fi, permitindo comunicação IP entre todos os dispositivos. Os endereços IPv4 foram atribuídos às interfaces onde a rede LAN utilizou o bloco 10.1.1.0, enquanto o ponto de acesso e os clientes Wi-Fi receberam endereços da sub-rede 192.168.0.0. O número de clientes utilizados na simulação é definido através da variável de comando *nWifi*, que deve ser enviada no momento de execução da simulação.

Para gerar o tráfego entre os clientes Wi-Fi e o servidor na rede LAN, foram configuradas aplicações diferentes conforme o protocolo selecionado através da variável de comando *protocol*. Toda a comunicação ocorre a partir das estações Wi-Fi em direção ao servidor localizado no último nó da LAN, utilizando a porta 9 ou a porta 10 no caso do cenário misto.

Caso a variável *protocol* esteja configurada como 0, o protocolo selecionado é o UDP. Nesse caso, o servidor é configurado utilizando um `PacketSink` (setado para `UdpSocket` através da classe `PacketSinkHelper`), responsável por receber os pacotes enviados. Cada estação Wi-Fi executa um cliente baseado no `OnOffHelper`, que transmite pacotes UDP a uma taxa constante de 5 Mbps, com tamanho de 1024 bytes. As aplicações iniciam em 1 segundo e permanecem ativas até 60 segundos, garantindo geração contínua de tráfego durante toda a simulação.

Caso a variável *protocol* esteja configurada como 1, o protocolo selecionado é o TCP. O servidor também utiliza o *PacketSink* nesse caso (com socket TCP), enquanto os clientes Wi-Fi executam a aplicação *BulkSendHelper*. Essa aplicação envia dados continuamente (pois *MaxBytes* = 0) com o tamanho de segmento fixado em 1500 bytes , permitindo avaliar o comportamento do congestionamento e controle de fluxo do TCP.

No caso em que a variável está configurada como 2, metade dos clientes Wi-Fi são configurados para utilizar UDP e a outra metade utilizará TCP. As configurações das redes se mantém as mesmas já citadas, entretanto 50% dos clientes serão UDP e 50% TCP. Vale ressaltar que, nesta configuração, os protocolos TCP e UDP estão compartilhando o mesmo servidor na rede LAN.

Toda a captação de dados foi realizada utilizando o módulo *FlowMonitor*, uma ferramenta capaz de registrar métricas como atraso, *jitter*, taxa de entrega e perda de pacotes das conexões de rede. Cada experimento foi executado cinco vezes e o resultado obtido foi a média aritmética entre eles. Eses resultados foram salvos e posteriormente tratados no arquivo *plot_results.py*, de modo a garantir uma análise consistente e confiável do comportamento da rede. Esse arquivo também é responsável pela plotagem dos gráficos utilizados neste relatório.

4.2. Parâmetros

Cada cenário gera um arquivo .xml como resultado. Esse arquivo é nomeado concatenando os seguintes parâmetros: "flow_protocol_mobility_nWifi.xml" Tomando como exemplo um cenário de 8 clientes em mobilidade sob o protocolo TCP, temos o arquivo *flow_tcp_mobile_8.xml*.

A Tabela 1 indica os parâmetros utilizados para os cenários investigados.

Table 1 - Parâmetros de simulação para os cenários investigados

Parâmetro	Valor
Tempo de simulação	60 s
Número de clientes	1, 2, 4, 8, 16 e 32
Tamanho do cenário	200 m × 200 m
Padrão de comunicação WiFi	IEEE 802.11a
Potência de transmissão	5 dBm
Sensibilidade de recepção	-80 dBm
Velocidade dos clientes no cenário estático	0 m/s
Velocidade dos clientes no cenário móvel	1.0 a 2.0 m/s (3.6 a 7.2 km/h)
Modelo de mobilidade para nós estáticos	ConstantPositionMobilityModel
Modelo de mobilidade para nós móveis	RandomWalk2dMobilityModel
Taxa de dados LAN	100 Mbps
Taxa de dados das aplicações	5 Mbps
Tamanho do pacote UDP	1024 bytes
Tamanho do segmento TCP	1500 bytes
Número de antenas no AP	1
Gerenciador de taxa WiFi	AARF
Aplicações	OnOff (UDP), BulkSend (TCP), Misto

5. Resultados

5.1. Atraso

A Figura 2 compara o atraso médio fim a fim no cenário estático. Pode se observar um pico acentuado de atraso para os fluxos UDP e Misto (UDP+TCP) quando há entre 2 e 4 clientes, chegando a valores superiores a 1400 ms. Esse comportamento é característico do bufferbloat: como o UDP envia pacotes indiscriminadamente, as filas nos nós e no AP enchem rapidamente, aumentando muito o tempo de espera na fila antes da transmissão. O TCP, por sua vez, mantém o atraso baixo e estável (cerca de 200 ms), pois seu algoritmo de controle limita o envio de novos pacotes antes que a confirmação (ACK) dos anteriores chegue, evitando a superlotação das filas.

Ao analisar a Figura 3, com mobilidade, o padrão de picos se mantém, mas nota-se uma variação mais errática no pico do fluxo Misto (UDP+TCP), atingindo valores ligeiramente superiores aos do cenário estático (cerca de 1550 ms com 4 clientes). Isso indica que a movimentação dos nós, somada à baixa potência, pode estar introduzindo retransmissões na camada de enlace ou variabilidade/redução na qualidade do link, o que aumenta o tempo de permanência dos pacotes nas filas.

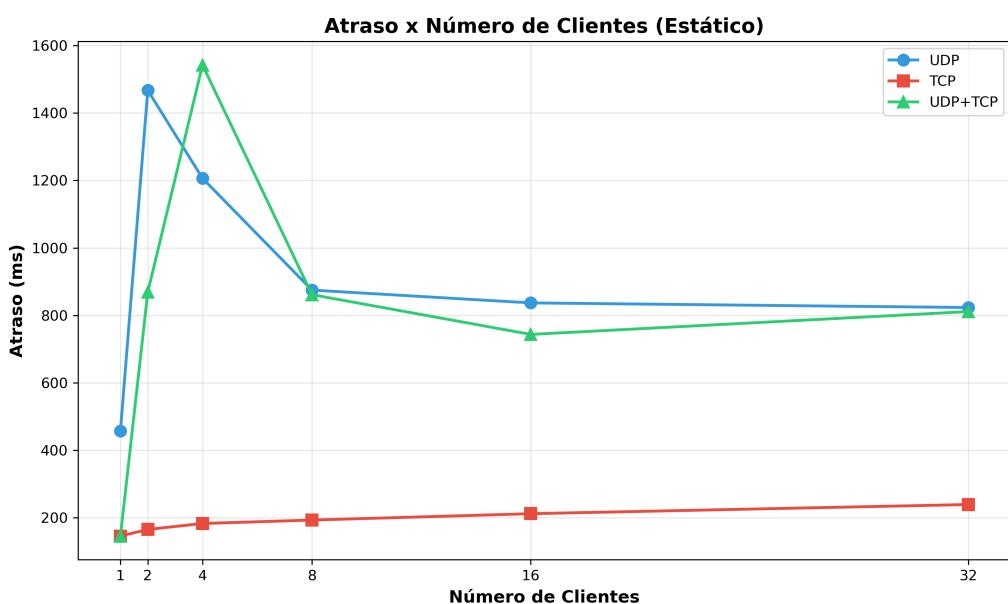


Figura 2 - Cenário sem mobilidade

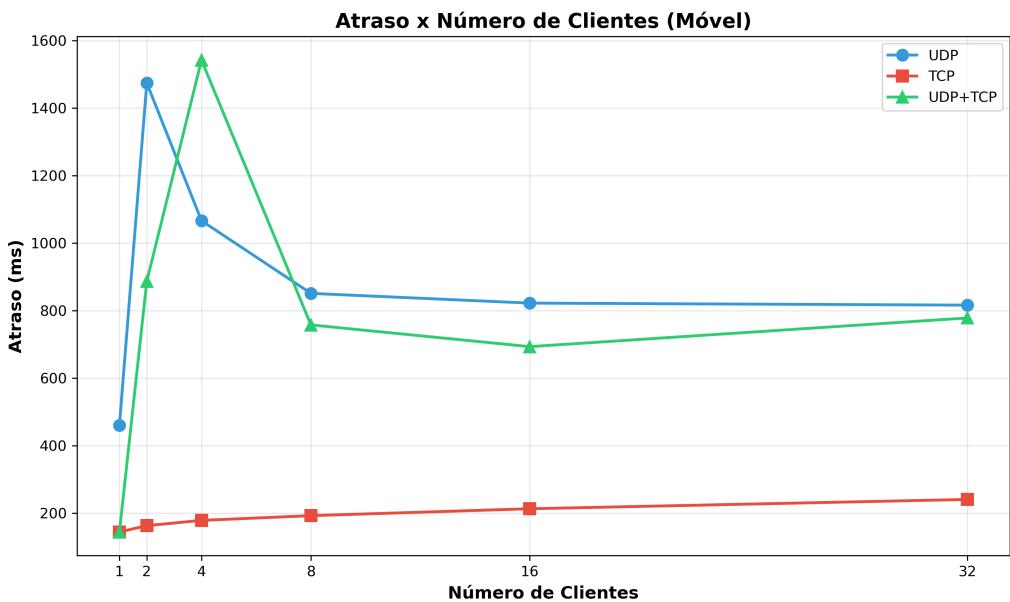


Figura 3 - Cenário com mobilidade

5.2. Vazão

A Figura 4 apresenta os resultados de vazão média (Mbps) em função do número de clientes num cenário estático. É possível notar que o protocolo UDP mantém uma vazão agressiva e quase constante, próxima a 3.5 Mbps, independentemente do aumento de clientes, ocupando toda a banda disponível. Em contrapartida, a vazão do TCP sofre uma degradação linear conforme a rede cresce, caindo de aproximadamente 2.1 Mbps para cerca de 1.8 Mbps com 32 clientes. Isso ocorre devido ao mecanismo de controle de congestionamento do TCP, que reduz a janela de transmissão ao detectar colisão ou perda.

O gráfico da Figura 5, referente ao cenário móvel, exibe um comportamento muito similar ao estático, mesmo com a redução da potência de transmissão. Isso sugere que, neste cenário de alta densidade, o gargalo principal é o acesso ao meio (CSMA/CA) e a saturação da rede, e não a degradação do sinal por distância. O TCP continua sendo penalizado pela disputa de meio, enquanto o UDP, por não possuir controle de fluxo, satura o canal sem reduzir sua taxa de envio.

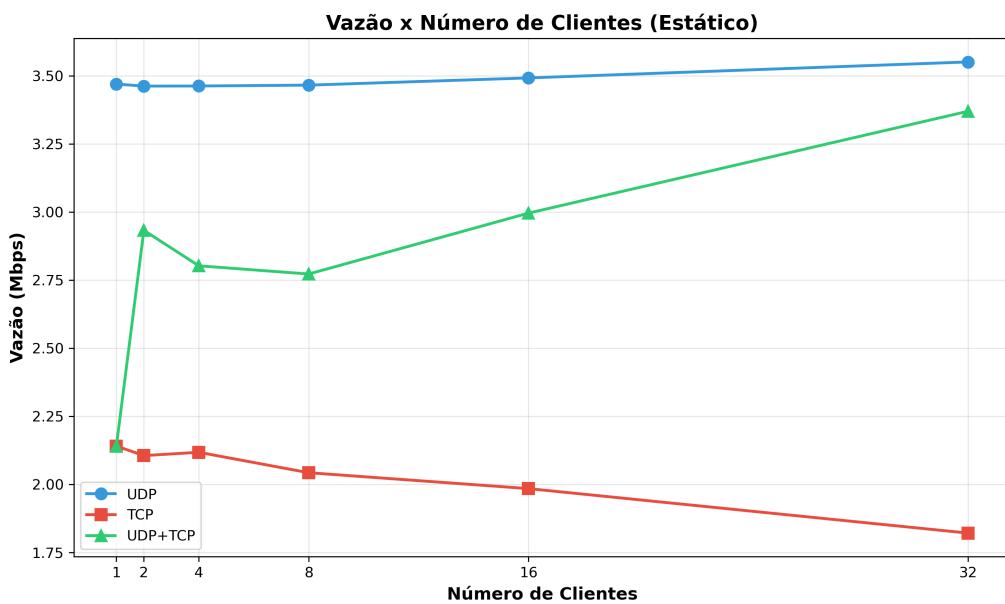


Figura 4 - Cenário sem mobilidade

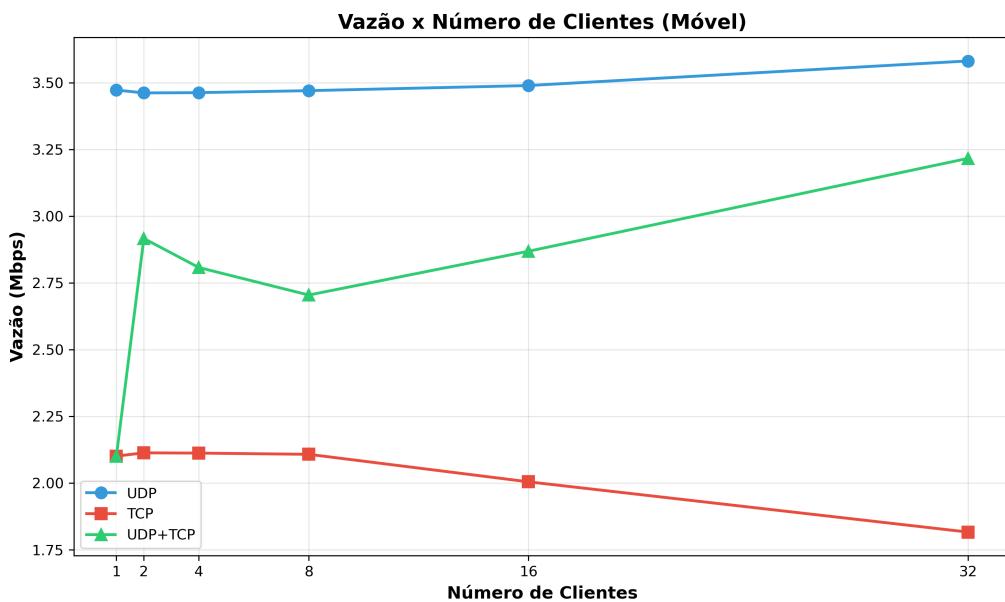


Figura 5 - Cenário com mobilidade

5.3. Perda de pacotes

A Figura 6 evidencia o comportamento de "melhor esforço" do UDP: a perda de pacotes cresce vertiginosamente com o aumento de clientes, saltando de cerca de 30% com 1 cliente para quase 80% com 8 clientes, e mais de 80 com 16 clientes. Isso confirma a saturação observada na análise de vazão; a maior parte dos dados enviados pelo UDP está sendo descartada por estouro de buffer ou colisões sucessivas. O TCP, entretanto, mantém taxas de perda inferiores a 10%, demonstrando a eficácia de seu mecanismo de confiabilidade.

Na Figura 7, o cenário móvel apresenta curvas praticamente idênticas às do estático. Apesar da mobilidade e menor potência, a perda dominante continua sendo causada pelo congestionamento da rede (perda por fila/colisão) e não por perda de sinal (perda por propagação). O fato da perda do TCP aumentar ligeiramente (aproximando-se mais de 10% no final da curva) em comparação ao estático sugere que a mobilidade está causando pequenas instabilidades adicionais, mas o comportamento macroscópico da rede ainda é ditado pelo excesso de tráfego UDP no meio compartilhado.

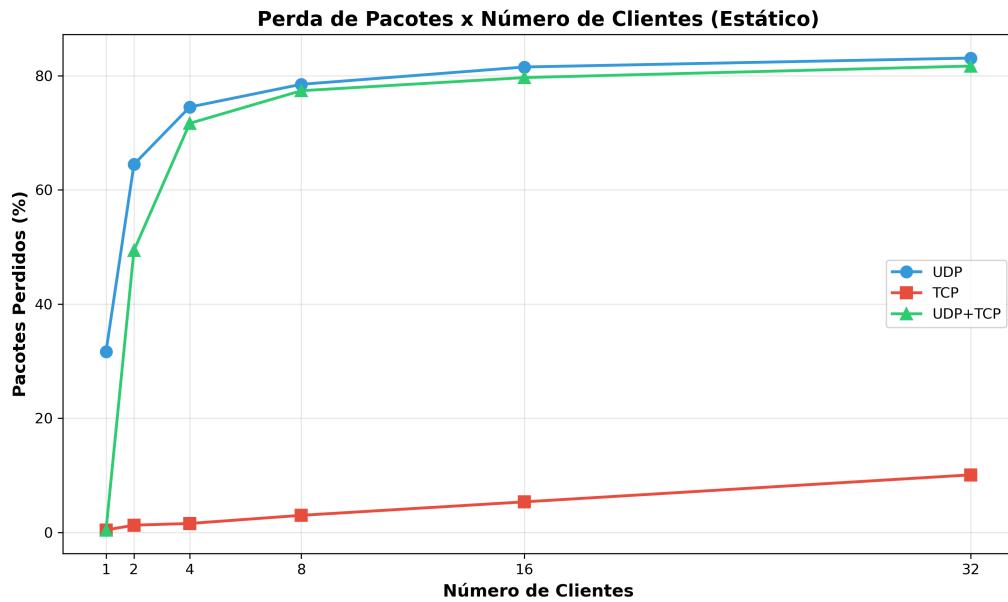


Figura 6 - Cenário sem mobilidade

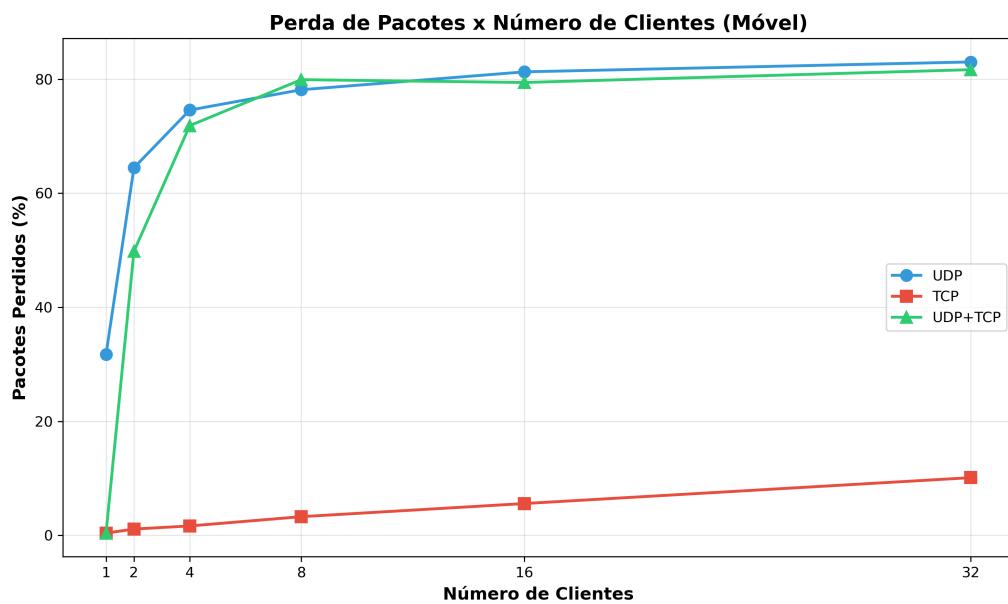


Figura 7 - Cenário com mobilidade

5.4. Conclusão

Com base nos resultados discutidos na Seção 5, pode-se concluir que o tipo de protocolo de transporte influencia diretamente o desempenho da rede, superando até mesmo os efeitos da mobilidade no cenário avaliado. Os clientes operando com tráfego UDP apresentaram as maiores taxas de vazão, saturando o canal de comunicação à custa de elevadíssimas taxas de perda de pacotes e picos de atraso expressivos, causados pelo encharcamento das filas de transmissão (bufferbloat) e pela ausência de mecanismos de controle de fluxo.

Em contrapartida, o tráfego TCP demonstrou um comportamento conservador. Embora sua vazão sofra degradação linear com o aumento do número de clientes (devido ao compartilhamento do meio e aos mecanismos de prevenção de congestionamento), o protocolo garantiu confiabilidade na entrega, mantendo as taxas de perda de pacotes em níveis aceitáveis e o atraso estável, mesmo sob alta carga.

Sobre o impacto na mobilidade: para o padrão de tráfego intenso, as distâncias configuradas e a potência da rede definida, o congestionamento da rede (colisões e filas cheias) atua como o principal fator limitante. No entanto, a introdução da mobilidade com potência reduzida trouxe instabilidades pontuais, evidenciadas por variações mais instáveis no atraso e um ligeiro aumento na perda de pacotes para fluxos TCP, indicando que a variação da qualidade do sinal começa a competir com o congestionamento como causa de degradação.

Para uma análise mais aprofundada sobre os impactos da mobilidade, seria interessante analisar com mais afinco a influência da distância e da potência de transmissão da rede para diferentes cenários. A perda de pacotes possivelmente seria mais acentuada num cenário com distância suficientemente grande e potência de transmissão limitada.

Por fim, os resultados mostram-se coerentes entre si: à medida que a quantidade de clientes aumenta, a disputa pelo meio físico leva à perda do desempenho para fluxos não controlados (UDP) e à redução de capacidade para fluxos controlados (TCP), validando as compensações teóricas esperadas entre vazão, latência e confiabilidade.

6. Divisão do trabalho

Ambos os autores participaram ativamente de todas as discussões, planejamentos e do desenvolvimento de todos os entregáveis desta atividade. Para uma análise mais específica, iremos atribuir as atividades a quem atuou por mais tempo em cada etapa:

O aluno Eduardo J. de S. Magalhães foi responsável pelo desenvolvimento do arquivo de simulação (`equipe_8_2s2025.cc`). O aluno Tales M. M. Pereira foi responsável por desenvolver o script `run_simulations.sh`, que executa uma vez todas as combinações planejadas, e pelo script `plot_results.py`, que plota os gráficos aqui utilizados. Os cenários expostos neste relatório foram executados cinco vezes no computador pessoal do aluno Tales M. M. Pereira, e o relatório foi escrito pelos dois autores.

References

- IEEE (2022). Ieee standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11-2020/Cor 1-2022 (Corrigendum to IEEE Std 802.11-2020 as amended by IEEE Std 802.11ax-2021, IEEE Std 802.11ay-2021, and IEEE Std 802.11ba-2021)*, pages 1–18.
- Kurose, J. F. and Ross, K. W. (2017). *Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down*. Pearson, 7 edition.
- NS. Ns-3 documentation. <https://www.nsnam.org/documentation/>. Accessed: 2025-11-10.
- Tanenbaum, A. S. and Wetherall, D. (2011). *Redes de Computadores*. Pearson, 5 edition.