

QoS-OPP: Estratégia de Planejamento de Trajetória Orientada a Qualidade de Serviço *

Alessandro A. Milan, Natalia C. Fernandes, Dianne S. V. Medeiros

¹Laboratório MídiaCom - TET/PPGEET
Universidade Federal Fluminense - UFF
Niterói, RJ - Brasil

{alessandromilan, nataliacf, diannescherly}@id.uff.br

Abstract. *The increase in the number of autonomous vehicles challenges telecommunications operators and public administration, requiring solutions that ensure traffic safety and fluidity, and that support the heterogeneous demand of network applications. In this scenario, Intelligent Transportation Systems, integrated with 5G networks, play a fundamental role in traffic management and user mobility. Trajectory planning emerges as a solution to the challenges of urban mobility in the connected vehicle ecosystem, ensuring trajectories comply with traffic laws and the requirements of network applications executed by the vehicles. This article proposes the Quality of Service-Oriented Trajectory Planning strategy, which considers historical data on channel quality to define the best trajectory that meets the QoS required by the applications. The proposal is evaluated in a case study in a neighborhood of Niterói/RJ through simulations that reflect local traffic laws and the 5G network that serves the region. The results show an increase of up to 18% in throughput while reducing delay by up to 54%.*

Resumo. *O aumento no número de veículos autônomos desafia as operadoras de telecomunicações e a gestão pública, exigindo soluções que garantam a segurança e a fluidez do trânsito, e que suportem a demanda heterogênea das aplicações de rede. Neste cenário, os Sistemas de Transporte Inteligentes (Intelligent Transportation Systems - ITS), integrados às redes 5G, desempenham papel fundamental na gestão do trânsito e na locomoção dos usuários. O planejamento de trajetórias emerge como uma solução para os desafios da mobilidade urbana no ecossistema de veículos conectados, garantindo trajetos que respeitem as leis de trânsito e os requisitos das aplicações de rede executadas pelos veículos. Este artigo propõe a estratégia de Planejamento de Trajetória Orientada a Qualidade de Serviço (Quality of Service-Oriented Path Planning - QoS-OPP), que considera dados históricos da qualidade do canal para definir a melhor trajetória que atende à QoS exigida pelas aplicações. A proposta é avaliada em um estudo de caso em um bairro de Niterói/RJ por meio de simulações que refletem as leis de trânsito locais e a rede 5G que atende à região. Os resultados mostram um aumento de até 19% na vazão, enquanto reduz o atraso em até 54%.*

*Este trabalho foi parcialmente financiado com recursos da RNP, CNPq, CAPES, FAPERJ.

1. Introdução

A mobilidade urbana tem se tornado um dos principais desafios para a gestão pública de metrópoles e grandes cidades [Gohar e Nencioni, 2021]. O uso intensivo e amplamente disseminado de dispositivos com alta mobilidade em tarefas diárias tem fomentado o desenvolvimento e a implantação de novas tecnologias para a coordenação e gerenciamento dos sistemas de transporte. Neste cenário, os Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems* - ITS) desempenham papel fundamental, integrando a conectividade, automação e controle para garantir segurança e eficiência no trânsito. Uma das principais atribuições dos ITS é a definição da trajetória dos meios de transporte. O ITS viabiliza a coexistência de veículos com diferentes níveis de automação que têm a movimentação restrita a determinadas ruas e avenidas. Essa automação depende da confiabilidade e atendimento dos requisitos mínimos de Qualidade de Serviço (*Quality of Service* - QoS) de diferentes aplicações executadas nos veículos.

Neste cenário, as redes móveis de quinta geração (5G) desempenham papel relevante por concentrar evoluções tecnológicas das gerações legadas, além da implementação de tecnologias consolidadas da computação, permitindo atender aos requisitos das aplicações de rede no ecossistema de ITS. Pode-se definir três grandes casos de uso atendidos pelas redes 5G que se relacionam às condições mínimas para o funcionamento correto e seguro das aplicações. A Banda Larga Móvel Aprimorada (*Enhanced Mobile Broadband* - eMBB) atende aplicações que exigem um alto fluxo de dados, de *Upload* ou *Download*, entre o dispositivo móvel (*User Equipment* - UE) e o servidor da aplicação. O cenário de Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (*Ultra-reliable low-latency communication* - uRLLC) implementa soluções para aplicações de alta criticidade que necessitam de uma conexão confiável, estável e extremamente rápida para tomadas de decisão em tempo real. Já o cenário de Comunicação Massiva do Tipo Máquina (*Massive Machine-type Communication* - mMTC) concentra aplicações que necessitam de um grande número de dispositivos conectados com a rede [Carvalho Neto et al., 2023].

Embora as redes 5G possuam robustez e confiabilidade para o atendimento aos requisitos de QoS para diversas aplicações, a flutuação da concentração de cargas de trabalho em regiões e em horários distintos impõe desafios relevantes para a definição da trajetória dos veículos no ITS. Essa definição deve respeitar o conjunto de leis estabelecidas pelos órgãos reguladores de trânsito e depende diretamente da localização dos pontos de acesso da infraestrutura das redes 5G para atender aos requisitos de QoS das aplicações. Uma abordagem amplamente proposta na literatura é a instalação de Pico-Células, Fento-Células ou o uso de Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) para ampliar a área de cobertura das redes 5G e aprimorar o atendimento das regiões com maior concentração de dispositivos [Zhao et al., 2021]. Entretanto, essa abordagem gera escassez de espectro e um aumento significativo da interferência no sinal de comunicação [Agarwal et al., 2022]. Além disso, tais regiões continuam com o trânsito congestionado, aumentando o risco de acidentes, enquanto em outras regiões a infraestrutura pode permanecer subutilizada. Neste sentido, o planejamento de trajetória no ITS se beneficia de uma abordagem orientada a QoS que considere as leis de trânsito da região e os recursos da infraestrutura nos trajetos possíveis para os veículos.

Este trabalho propõe a estratégia de Planejamento de Trajetória Orientada a QoS (*Quality of Service-Oriented Path Planning* - QoS-OPP) para determinar os trajetos a

serem percorridos por veículos, visando um compromisso entre a QoS oferecida no trajeto e o tempo de deslocamento. Para tal, propõe-se o Coeficiente de Atendimento do Percurso (*Path-Serving Coefficient* - PSC), uma métrica que considera informações históricas das condições do canal no trajeto e a distância física entre os pontos do percurso e a posição das antenas. A proposta é avaliada em um estudo de caso realizado em Icaraí, um bairro na cidade de Niterói/RJ. São realizadas simulações que refletem o funcionamento da rede 5G que atende a região e as regulamentações locais de trânsito. A vazão média, atraso, *jitter* e perda de pacotes do percurso escolhido são comparadas aos dos demais trajetos. Os resultados mostram um aumento de 19% na vazão média e uma diminuição de 54% no atraso médio em relação ao caminho mais curto, e um aumento de 11% na vazão média e diminuição de 28% no atraso médio em relação a uma estratégia de escolha aleatória.

O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 elenca os trabalhos relacionados. A Seção 3 detalha a estratégia proposta. A Seção 4 apresenta os experimentos e resultados. A Seção 5 finaliza o artigo, denotando as principais descobertas e direcionando os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O planejamento de trajetória de veículos autônomos, incluindo Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), é tema bastante explorado na literatura. Os métodos tradicionais para a definição de trajetória de veículos autônomos baseiam-se na localização do veículo, em mapas *offline* e em algoritmos de prevenção de colisões. Com a localização obtida pelo Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) e auxílio de mapas da região, a trajetória do veículo é calculada. Durante o percurso, sensores são responsáveis por interagir com o ambiente e gerar dados sobre objetos estáticos e em movimento que coexistem com os veículos [Reda et al., 2024]. Os dados são processados pela Unidade de Controle Eletrônico (UCE), que identifica o risco de colisão e atua no controle do automóvel [Taslimasa et al., 2023]. O tempo de coleta de dados, processamento e identificação de riscos é crucial para garantir a segurança e prevenção de acidentes.

Embora o processamento local reduza o tempo de resposta, a incerteza na integridade dos dados, acesso limitado na percepção do contexto em que o veículo está inserido e a incerteza na trajetória dos outros automóveis prejudicam a tomada de decisão pelas UCEs [Xiong et al., 2023]. A direção autônoma assistida pela Comunicação Veículo-para-Veículo (V2V) e Veículo-para-Infraestrutura (V2I) representa grande avanço no compartilhamento em tempo real de dados sobre as condições da via, emissão de alertas de segurança e antecipação de manobras. Além disso, a comunicação V2I fornece aos veículos informações da previsão do tempo e condições do trânsito na região, ao passo que coordena a movimentação dos veículos e fornece infraestrutura para acesso à rede e processamento de requisições [Taslimasa et al., 2023].

Diversos trabalhos propõem estratégias para a alocação eficiente de recursos da infraestrutura baseados em Algoritmo Húngaro [Thakur e Palit, 2025] e Aprendizado por Reforço profundo Multiagente [Liu e Deng, 2025]. O trabalho proposto por Akhter et al. usa o Multiplicador de Lagrange para otimizar a potência de transmissão de comunicação V2V e V2I em redes móveis 5G, buscando maximizar a taxa de transferência enquanto respeita os requisitos mínimos de QoS [Akhter et al., 2024]. Os resultados denotam um aumento de cerca de 80% na taxa de transferência dos veículos que se comunicam por

V2V em cenários de alta mobilidade. Além disso, a proposta mantém a superioridade sobre outras propostas do estado-da-arte com diferentes potências de transmissão.

Raza *et al.* propõem o algoritmo MACTER, uma estratégia para o Descarregamento de Tarefas e Alocação de Recursos Baseado em Eficiência Computacional Sensível ao Movimento, que modela o problema de processamento em redes 5G habilitadas pela Computação de Borda Multiacesso (*Multi-Access Edge Computing* - MEC) como um jogo de disputa de recursos [Raza *et al.*, 2021]. A abordagem proposta melhora a decisão relativa ao processamento local ou uso da MEC, aumentando a eficiência computacional (bits/Joule) em cerca de 75% em determinados cenários. Embora os trabalhos conduzidos por Akhter *et al.* e Raza *et al.* alcancem resultados expressivos no atendimento aos requisitos de QoS com a otimização no uso de recursos disponíveis, o aumento no número de veículos e na velocidade de locomoção aumenta o uso de recursos de comunicação e a interferência gerada pelos dispositivos, impactando diretamente no desempenho da rede.

Pouca atenção é dada para a definição de trajetória de veículos autônomos orientada a QoS. O trabalho conduzido por Ullah *et al.* traz luz a essa estratégia, propondo o planejamento de trajetória de veículos atendidos pela rede 6G baseado em uma modificação do algoritmo de Dijkstra [Ullah *et al.*, 2025]. Os autores modelam a região de interesse como um grafo conexo $G(V, E)$, onde V denota o cruzamento entre ruas e E denota as ruas e avenidas. Calcula-se a Relação Sinal-Ruído Mais Interferência (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* - SINR) nos pontos de recepção das ruas e identifica-se a eficiência espectral em cada ponto. O peso de cada aresta é equivalente à eficiência mínima não negativa do trajeto. Ullah *et al.* utilizam a estratégia Máximo-Mínimo (Max-Min) para definir a trajetória que maximiza a menor eficiência espectral. Embora o trabalho conduzido por Ullah *et al.* denote a relevância da definição de trajetória de veículos autônomos considerando a QoS do trajeto, a abordagem proposta tem limitações relevantes de aplicação em cenários reais, visto que a otimização Max-Min é NP-Difícil. A otimização se baseia somente na SINR mínima do percurso, não considerando outras Informações de Estado de Canal (*Channel State Information* - CSI), relevantes para a comunicação. Para redes 5G e além, indicadores como o Indicador de Qualidade do Canal (*Channel Quality Indicator* - CQI) auxiliam na definição de estratégias de codificação e uso do canal. Além disso, os autores não modelam o tráfego de fundo proveniente do atendimento a regiões específicas, consequentemente, desconsiderando a banda disponível e a interferência dos outros dispositivos. Os autores também consideram um cenário de cobertura ideal, que não reflete a localização de instalação das redes móveis e negligencia a distância entre transmissor e receptor, que impacta diretamente na propagação do sinal.

Diferentemente dos trabalhos na literatura, a estratégia proposta neste artigo considera em conjunto os indicadores de estado do canal, a distância entre os dispositivos de comunicação e a capacidade de atendimento disponível da rede móvel para definir a melhor trajetória de veículos autônomos em ITSs, levando em consideração a necessidade de atendimento à QoS das aplicações.

3. Estratégia de Planejamento de Trajetória Orientada a Qualidade de Serviço (QoS-OPP)

A estratégia QoS-OPP proposta neste artigo busca o trajeto que apresenta o melhor custo-benefício entre o tempo de percurso e a qualidade de serviço oferecida, com base em

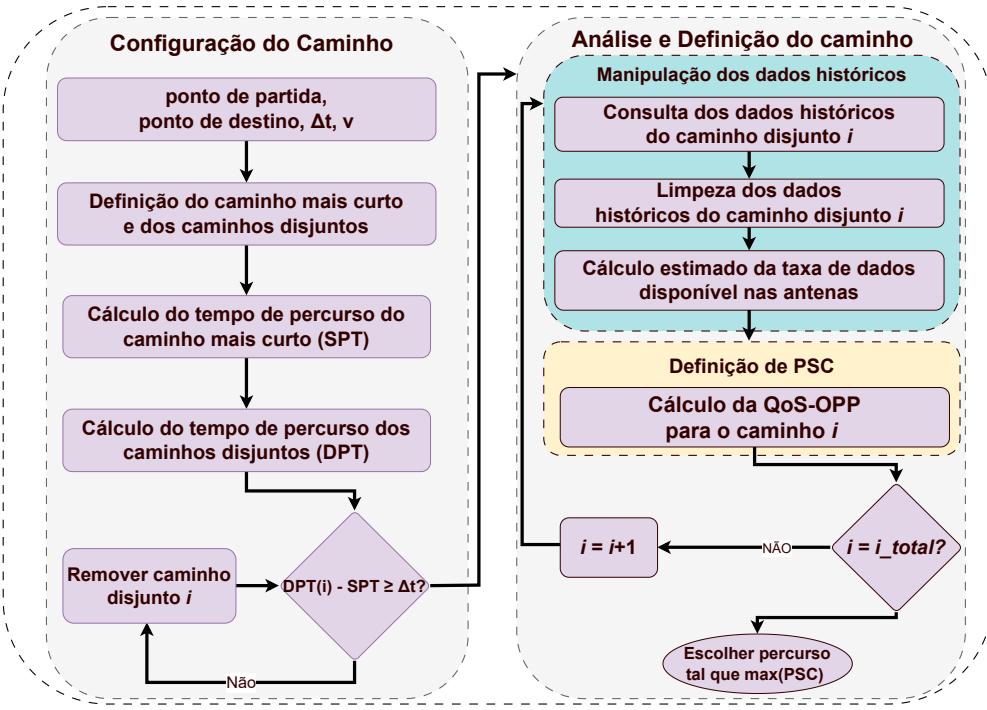


Figura 1. Fluxograma da estratégia QoS-OPP. A etapa de **Configuração do Caminho** define os parâmetros para o cálculo do caminho mais curto e dos caminhos disjuntos, restringindo-os em um tempo máximo adicional. Na etapa de **Análise e Definição do Caminho**, ocorre a consulta e a manipulação de dados históricos para cálculo do PSC.

dados históricos e a distância entre o veículo e as antenas. A estratégia proposta utiliza o conceito de caminho mais buscado e caminho candidato. Considera-se que o caminho mais buscado entre uma origem e um destino é o caminho mais curto, visto que há uma tendência de movimentação pelos caminhos mais curtos em grandes cidades e metrópoles [Milan et al., 2022]. Os caminhos candidatos são os caminhos disjuntos ao caminho mais curto. A Figura 1 mostra o fluxograma do algoritmo desenvolvido para executar a estratégia QoS-OPP. A estratégia é dividida em duas etapas, **Configuração do Caminho** e **Análise e Definição do Caminho**. A primeira etapa é responsável por identificar o caminho mais curto e os caminhos disjuntos, além de validar os caminhos quanto à preferência do usuário em relação ao tempo adicional tolerado. A segunda etapa é dividida em uma fase de **Manipulação de Dados Históricos**, que busca e trata os dados históricos das condições do canal de comunicação em cada trecho do caminho, e uma fase de **Definição de Coeficiente de Atendimento do Percurso** (*Path-Serving Coefficient* - PSC), que utiliza os dados históricos e estimativas para calcular o PSC, uma métrica proposta neste trabalho.

Na etapa de **Configuração do Caminho**, busca-se a partir de um ponto de partida o caminho mais curto e os caminhos disjuntos até um ponto de destino. Os caminhos disjuntos são parametrizados com base no tempo extra tolerado, Δt , e na velocidade do veículo, v . Com os pontos de partida e destino, é possível identificar o caminho mais curto entre os dois pontos e os caminhos disjuntos. Cada trajeto é composto pelo conjunto de ruas que se conectam desde o ponto de partida ao ponto de destino, respeitando o sentido

das ruas. A velocidade v do veículo e o tempo extra Δt limitam o número de caminhos disjuntos analisados, ao passo que garantem a satisfação do usuário quanto ao aumento no tempo do trajeto. Deste modo, todos os caminhos disjuntos cuja diferença entre o tempo de trajeto do percurso disjunto e o tempo de trajeto do caminho mais curto é maior que o parâmetro Δt são rejeitados.

Os caminhos disjuntos são utilizados na etapa de **Análise e Definição do Caminho**. Na fase de **Manipulação dos dados históricos** é feita uma consulta aos dados históricos em cada trecho do caminho analisado, considerando as medidas de SINR, CQI e a distância entre o veículo e a antena que atende o UE, por exemplo, a célula de serviço. A SINR sofre flutuações em todo o período de conexão entre o UE e a célula de serviço, apresentando valores que prejudicam a análise estatística e dificultam a determinação do PSC. Nesse sentido, na fase de Manipulação dos dados excluem-se os valores de SINR do percurso considerados pontos discrepantes. Para realizar essa exclusão, busca-se a mediana dos valores de SINR e calcula-se o primeiro (Q1), o segundo (Q2) e o terceiro (Q3) quartis. São considerados pontos discrepantes os valores abaixo de $Q1 - 1.5 * IQR$ ou acima de $Q3 + 1.5 * IQR$, onde IQR é o Intervalo Interquartis $Q3 - Q1$ [Chandola et al., 2009].

Por fim, ainda na fase de Manipulação dos Dados Históricos calcula-se a largura de banda aproximada disponível em cada antena que atende a trajetória candidata considerando o tráfego de usuários já conectados. A largura de banda disponível em cada antena pode ser estimada com base na diferença entre a capacidade de transmissão da antena e a largura de banda já utilizada. A capacidade de transmissão, C , pode ser obtida pelo Teorema de Shannon-Hartley, que relaciona a faixa de frequências disponível para o canal, B , dada em Hertz, e a SINR, na escala linear, conforme Equação 1. Uma vez calculada a capacidade de transmissão das antenas do percurso, é definida a largura de banda disponível em cada antena que atende o caminho disjunto [Shannon, 1948].

$$C \approx B * \log_2(1 + SINR) \quad (1)$$

Na fase de **Definição do PSC** analisa-se cada caminho disjunto quanto ao PSC. Para determinar o PSC, propõe-se a Equação 2, que se baseia nos dados históricos de SINR, CQI e distância, d , alcançados por usuários que passaram por algum trecho em comum do trajeto analisado. Neste artigo, esses dados são obtidos a partir da simulação de movimentação de veículos em cada trecho da região. A Largura de Banda Disponível (*Available Bandwidth* - ABW) em cada antena reflete o estado percebido pela rede e informado ao usuário durante a definição do trajeto. Na Equação 2, os pesos α , β , σ e γ são determinados a partir da correlação entre a variável multiplicada e a vazão experimentada em execuções históricas. Neste artigo, considera-se que o ITS armazena as condições do canal e a vazão alcançada no caminho percorrido pelos veículos. Vale ressaltar que o PSC é definido para cada percurso, logo, o percurso escolhido é o de maior PSC.

$$PSC = (\alpha * SINR) + \left(\beta * \frac{1}{CQI} \right) + (\sigma * d) + (\gamma * ABW) \quad (2)$$

A Equação 2 denota a capacidade de atendimento do percurso analisado, refletindo as métricas que impactam diretamente na comunicação entre o UE e a célula de serviço, além das condições de atendimento da rede. Os pesos da Equação 2 são definidos a partir

do Coeficiente de Correlação de Pearson [Zhu et al., 2019] entre a variável multiplicada e a vazão alcançada no caminho. Valores negativos indicam uma correlação inversa e valores positivos indicam uma relação direta. Desse modo, obtém-se a vazão alcançada em trajetos anteriores e calcula-se o coeficiente para cada variável. Os pesos obtidos são $\alpha \approx 0,7$, $\beta \approx -0,83$, $\sigma \approx -0,63$ e $\gamma \approx 0,73$.

As métricas SINR e CQI são importantes para a medição da qualidade do sinal de comunicação e definição do esquema de modulação e codificação, a fim de aumentar a eficiência no uso do canal. A *SINR* indica a proporção da potência do sinal da célula de serviço recebida no UE em relação à interferência das demais antenas somadas ao ruído térmico [Hadj-Kacem et al., 2020]. Além disso, é usada como um dos parâmetros de troca para uma célula de serviço com condições de canal melhores. Uma SINR maior tende a melhorar a qualidade da comunicação, contribuindo positivamente para o PSC. Dessa forma, espera-se que caminhos com maior SINR tenham uma melhor capacidade de atendimento aos usuários. A SINR apresenta flutuações características em todo o período de conexão, principalmente em ambientes externos. Uma vez removidas as flutuações, pode-se utilizar medidas de tendência central para o cálculo do PSC. Essa métrica é calculada utilizando a média dos valores de SINR após a remoção dos pontos discrepantes.

O *CQI* é o indicador de informação de estado do canal que permite que a antena de serviço defina o melhor esquema de modulação e codificação dadas as condições do enlace de comunicação. Além disso, o CQI permite que a antena tome decisões acerca do agendamento no domínio da frequência, definindo os instantes de comunicação com cada usuário [Kumar e Mehta, 2020]. Um CQI elevado permite o uso de modulações mais eficientes, o que também tende a produzir comunicações com melhor qualidade. Por exemplo, um CQI igual a 15 indica a possibilidade de uso da modulação 256-QAM, com aproximadamente 98,57% de sinal útil e 7% de informações para correção de erro. Por outro lado, um CQI igual a 1 indica a pior condição de canal, suportando a modulação QPSK com apenas 7,6% de sinal útil [ETSI, 2018]. Logo, quanto melhor o CQI no caminho, maior a chance de a comunicação ter mais qualidade. Utiliza-se o menor valor de CQI do percurso no cálculo do PSC. Como o termo contribui negativamente para o cálculo do PSC, devido ao sinal do peso atribuído, é necessário utilizar o inverso do CQI, de forma a reduzir menos o PSC quando o CQI for maior.

O sinal de radiofrequência é extremamente sensível à distância entre o UE e a antena de serviço, de forma que quanto maior a distância, maior é a atenuação. Assim, a distância d entre o UE e a antena de serviço interfere diretamente na variação da força do sinal percebido no receptor. Isso faz com que caminhos mais longos tendam a ter uma menor qualidade na comunicação. Como distâncias maiores contribuem para uma piora do PSC, o termo contribui negativamente para o cálculo da métrica. Na equação proposta, a distância d é a média das variações de distância de todo o percurso.

Por fim, a largura de banda disponível, *ABW* das antenas denota a taxa máxima de dados que a antena é capaz de disponibilizar ao usuário, respeitando os limites característicos do transmissor e do canal. Para definição da *ABW*, é determinada a capacidade máxima de cada antena que atende ao percurso, considerando o maior valor de SINR esperado em cada antena para o cálculo da Equação 1. Além disso, o ITS consulta a vazão média de cada trecho do caminho. Desse modo, a variável *ABW* é o maior valor resultante da diferença entre a capacidade máxima da antena e a vazão média alcançada na respec-

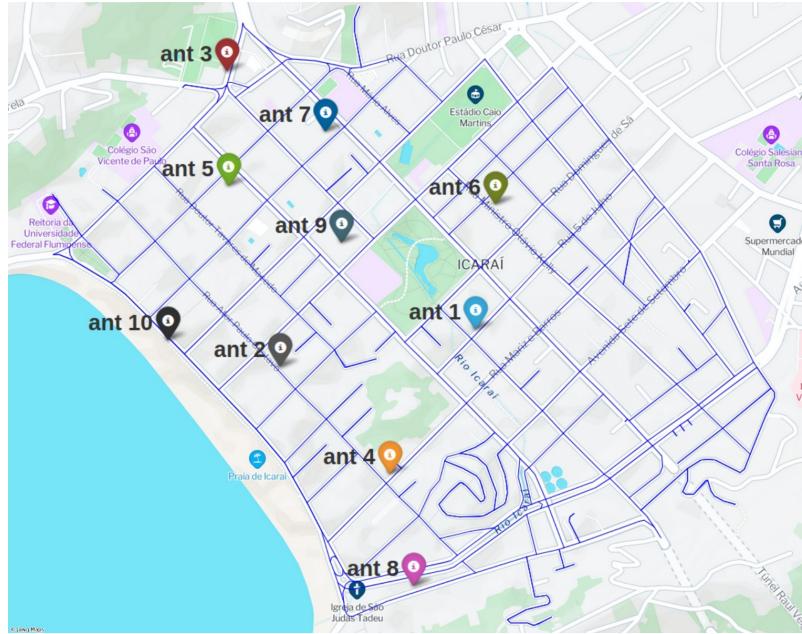


Figura 2. Região de interesse e posição das antenas. Uma das redes 5G que atende o bairro de Icaraí, em Niterói, é formada por antenas da operadora Telefônica Brasil S.A. A localização das antenas seguem dados da ANATEL.

tiva antena. Como uma maior largura de banda disponível no caminho é melhor para a comunicação do dispositivo, há uma contribuição positiva desse indicador para o PSC.

4. Discussão e Análise dos Resultados

A estratégia proposta é avaliada em um ambiente simulado. Utiliza-se um contêiner docker com o sistema operacional Ubuntu 20.04 (x86-64) executando o simulador OMNETPP 6.0.2, configurado com os módulos Simu5G 1.2.2 e INET 4.5 [Nardini et al., 2020]. As linguagens C++ e NED são usadas para filtragem e registro de *logs*. A linguagem Python 3.8, com as bibliotecas Networkx 3.1 e OSMNX 1.7.1, é usada para cálculo dos caminhos e do PSC. A Figura 2 mostra a região de interesse utilizada na avaliação e a localização das antenas. A região de interesse contempla majoritariamente o bairro de Icaraí, em Niterói, atendido pelas antenas de rede 5G da operadora Telefônica Brasil S.A, dentre outras operadoras. As posições e alturas das antenas seguem dados da ANATEL. Cada antena é configurada com 2 GHz de frequência de portadora, 8 dbi de ganho, 35 dbm de potência de transmissão, canal de comunicação com 20 MHz. Adota-se o modelo de propagação de dois raios (TwoRayGroundModel) e a interferência inter antenas no *downlink* e *uplink*.

O UE representa um veículo conectado autônomo e é configurado com uma velocidade de 30 km/h, executando uma aplicação de Taxa de Bits Constante (*Contant Bit Rate* - CBR) que envia um pacote de 512 bits a cada 0,3ms. Além disso, as simulações são realizadas considerando-se um tempo extra Δt limitado a 15 minutos. Para modelar a concentração de dispositivos em regiões específicas, são definidos diferentes valores de tráfego de fundo. O tráfego de fundo simula usuários que disputam os recursos físicos das antenas, além de Usuários Geradores de Interferência (UGI), que disputam apenas recursos de processamento das antenas e geram interferência no canal de comunicação. As

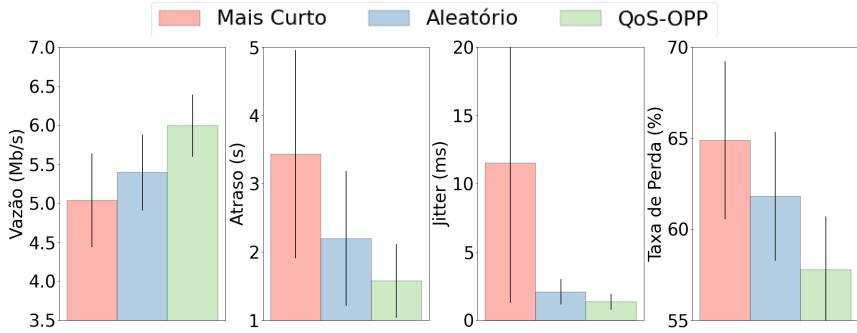


Figura 3. Vazão, atraso, jitter e taxa de perda de pacotes. Observa-se um aumento significativo na vazão, além de uma redução drástica no jitter, no atraso e na taxa de perda de pacotes. Isso mostra que as antenas que não atendem os caminhos mais curtos possuem recursos ociosos e mais espectro disponível, beneficiando os veículos que são atendidos por elas.

Antenas 1 e 6 atendem pontos para prática de esportes, como o Complexo Caio Martins, e a principal avenida para conexão com outros bairros. A Antena 10 atende a principal via de acesso ao bairro e parte da praia de Icaraí. As Antenas 1, 6 e 10 apresentam tráfego de fundo de 100 Mbps, além de 20 AGIs na Antena 10 e 15 nas Antenas 1 e 6 gerando 149,99 Mbps por AGI. A Antena 2 apresenta tráfego de fundo de 50 Mbps e 10 AGIs gerando 149,99 Mbps cada. As Antenas 3, 4, 5, 7, 8 e 9 apresentam 14,64 Mbps de tráfego de fundo e 10 AGIs em cada antena gerando 149,99 Mbps por AGI.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos considerando-se o caminho mais buscado e a estratégia de escolha aleatória sob 86 simulações com pontos de partida e destino tomados aleatoriamente. O intervalo de confiança apresentado é de 95%. A Figura 3 mostra o resultado de caminhos que são atendidos por antenas diferentes dos caminhos mais curtos. Observa-se o aumento expressivo na média da vazão experimentada pelo usuário e uma redução no atraso, no jitter e na taxa de perda de pacotes. Especificamente, observa-se um aumento de 19% para a vazão em relação ao caminho mais curto e 11% em relação ao caminho escolhido aleatoriamente. Isso ocorre devido à interferência experimentada pelos usuários em regiões bastante movimentadas. Os veículos que são atendidos por células de serviço que não atendem a regiões movimentadas encontram recursos ociosos e maior disponibilidade de espectro para comunicação. O grande fluxo de dispositivos atenua severamente o sinal, reduzindo a eficiência do canal de comunicação. Com mais atenuação, aumenta-se a possibilidade de erros de transmissão. Além disso, a degradação no sinal faz com que os pacotes encaminhados aguardem um tempo maior para serem enviados ao destino, refletindo no aumento do atraso.

A Figura 4 mostra os níveis de SINR ao longo de 4 trajetórias possíveis entre o mesmo ponto de partida e destino. O Caminho Mais Curto é servido pelas Antenas 1 e 4. O Caminho Disjunto 1, pelas Antenas 6, 1 e 4. O Caminho de Escolha Aleatória, pelas Antenas 6, 1 e 4. Já o caminho selecionado pela estratégia QoS-OPP é servido pelas Antenas 1, 4 e 8. Apesar de o Caminho de Escolha Aleatória alcançar níveis superiores de SINR entre $t = 45$ e $t = 80$, é notório que o caminho proposto pela QoS-OPP alcança níveis ainda maiores e por mais tempo, entre $t = 110$ e $t = 210$. Além de viabilizar o serviço até $t = 230$. Isso permite um aumento expressivo na qualidade da comunicação e na vazão. Mesmo com as flutuações características devido à atenuação do

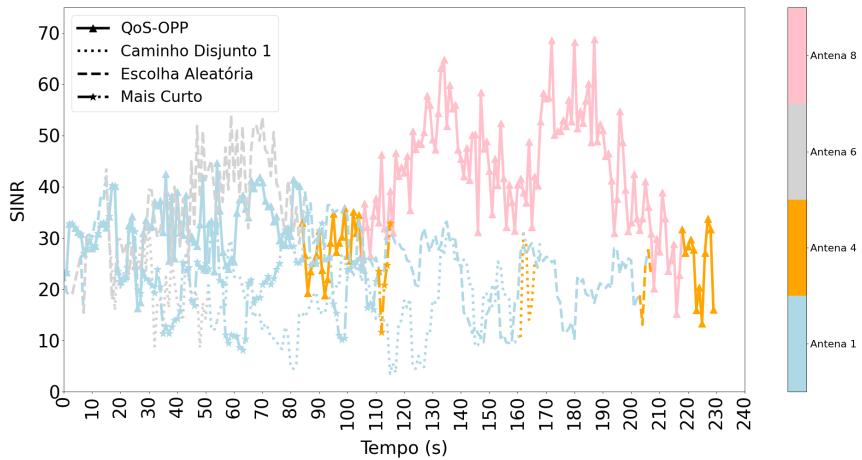


Figura 4. Níveis de SINR ao longo da trajetória do veículo. Os maiores níveis de SINR refletem melhores condições do canal de comunicação na trajetória. Embora as flutuações ainda ocorram, os períodos com maior SINR permitem a entrega dos pacotes de maneira mais fluida.

sinal e interferência, o caminho definido se beneficia de recursos ociosos da rede. Além disso, se manter conectado em uma mesma célula de serviço por mais tempo evita o aumento no atraso de recebimento dos pacotes e diminui a carga de trabalho nos enlaces de comunicação entre as antenas.

A Figura 5 denota a vazão instantânea percebida pelo veículo em todos os caminhos no percurso entre o mesmo par origem-destino utilizado na avaliação mostrada na Figura 4. A estratégia QoS-OPP define a trajetória do veículo que aumenta cerca de 253% a vazão instantânea em relação a vazão do caminho mais curto em $t = 114$. Em comparação com a Figura 4, ficam evidentes os impactos das variações na qualidade do sinal na vazão instantânea alcançada pelo usuário. Nos períodos de queda na qualidade do sinal, os pacotes ficam retidos na célula de serviço que atende ao usuário, e aguardam melhores condições do canal para serem transmitidos, reduzindo a vazão instantânea. Eventualmente, com a movimentação do UE, ele se conecta à célula de serviço com condições melhores de transmissão. Nesse período, o sistema móvel encaminha os pacotes da célula de serviço antiga para a nova e os pacotes podem ser transmitidos. Este encaminhamento ocupa recursos dos enlaces de *backhaul* e de processamento das células de serviço, que monitoram o canal de comunicação, ao passo que tentam transmitir alguns pacotes mesmo com menor eficiência.

5. Conclusão

A solução para os problemas de mobilidade urbana em grandes cidades e metrópoles passa pela implementação de um ITS eficiente. Contudo, o aumento no número de veículos conectados desafia as redes de telecomunicações para atender aos requisitos mínimos de QoS das aplicações. Nesse cenário, este trabalho propôs a QoS-OPP, uma estratégia para o Planejamento de Trajetória Orientada a QoS que busca definir o trajeto de um veículo que melhor atende aos requisitos de QoS das aplicações, considerando também o tempo necessário para percorrer o trajeto. Para escolher o melhor trajeto, este artigo propôs o PSC, que utiliza dados históricos da qualidade do canal, a distância entre o dispositivo e a célula de serviço, e a capacidade disponível para transmissão na rede.

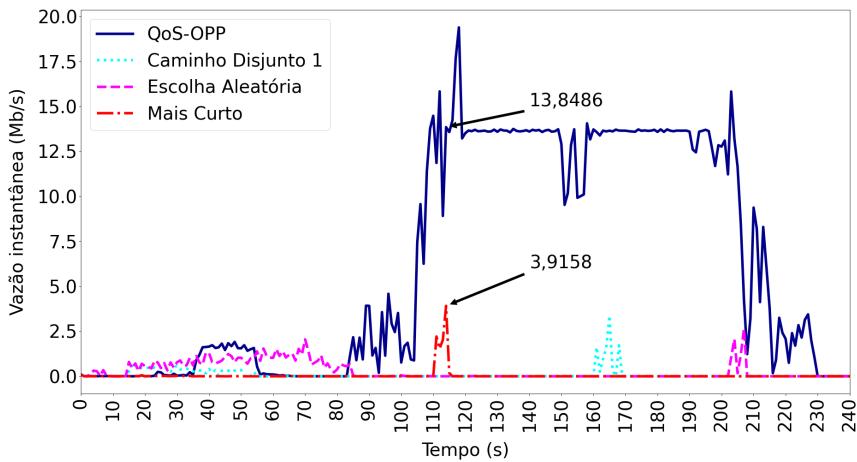


Figura 5. Vazão instantânea ao longo de diferentes caminhos com mesmo ponto de partida e destino. A QoS-OPP escolhe o caminho com maior vazão instantânea em relação aos demais caminhos. As melhores condições do canal na maior parte da trajetória escolhida permitem a entrega de pacotes encaminhados anteriormente em momentos em que o UE era atendido por antenas com condições piores.

móvel, para atribuir um nível de qualidade a cada trajeto. O trajeto com maior PSC é escolhido pela QoS-OPP. O impacto na qualidade da comunicação ao se utilizar o trajeto escolhido pela proposta foi avaliado em um estudo de caso no bairro de Icaraí, em Niterói. Para isso, foram comparadas métricas de avaliação de desempenho da comunicação ao utilizar o trajeto mais curto, um trajeto escolhido aleatoriamente e o trajeto escolhido pela proposta. Observou-se um aumento de 19% na vazão e uma redução de 50% no atraso de transmissão em relação aos caminhos mais curtos e um aumento de 11% na vazão e redução de 28% no atraso em relação a estratégia de escolha aleatória. Como trabalhos futuros vislumbra-se o aprimoramento do cálculo da PSC, para considerar recursos de processamento e armazenamento em disco, além de considerar o agendamento no uso dos recursos físicos das antenas.

Referências

- Agarwal, B., Togou, M. A., Marco, M. e Muntean, G.-M. (2022). A comprehensive survey on radio resource management in 5g hetnets: Current solutions, future trends and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4):2495–2534.
- Akhter, J., Hazra, R., Mihovska, A. e Prasad, R. (2024). A novel resource sharing scheme for vehicular communication in 5g cellular networks for smart cities. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*.
- Carvalho Neto, F., Milan, A., Fernandes, N. e Guimarães, A. (2023). *Aplicações Críticas Habilidades pela Tecnologia 5G: Oportunidades, Tendências e Desafios*, p. 153–209. SBC.
- Chandola, V., Banerjee, A. e Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 41(3):1–58.
- ETSI (2018). 5G; NR; Physical layer procedures for data. Technical Specification (TS) 38 214, European Telecommunications Standards Institute. Version 15.3.0.

- Gohar, A. e Nencioni, G. (2021). The role of 5g technologies in a smart city: The case for intelligent transportation system. *Sustainability*, 13(9):5188.
- Hadj-Kacem, I., Braham, H. e Jemaa, S. B. (2020). Sinr and rate distributions for down-link cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(7):4604–4616.
- Kumar, V. e Mehta, N. B. (2020). Exploiting correlation with wideband cqi and making differential feedback overhead flexible in 4g/5g ofdm systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20(4):2579–2591.
- Liu, Z. e Deng, Y. (2025). Resource allocation strategy for vehicular communication networks based on multi-agent deep reinforcement learning. *Vehicular Communications*, p. 100895.
- Milan, A. A., Fernandes, N. C. e Medeiros, D. S. (2022). A monte carlo approach for antenna blocking probability estimation in mobile networks. Em *2022 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, p. 146–150. IEEE.
- Nardini, G., Sabella, D., Stea, G., Thakkar, P. e Virdis, A. (2020). Simu5g—an omnet++ library for end-to-end performance evaluation of 5g networks. *IEEE Access*, 8:181176–181191.
- Raza, S., Wang, S., Ahmed, M., Anwar, M. R., Mirza, M. A. e Khan, W. U. (2021). Task offloading and resource allocation for iov using 5g nr-v2x communication. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(13):10397–10410.
- Reda, M., Onsy, A., Haikal, A. Y. e Ghanbari, A. (2024). Path planning algorithms in the autonomous driving system: A comprehensive review. *Robotics and Autonomous Systems*, 174:104630.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3):379–423.
- Taslimasa, H., Dadkhah, S., Neto, E. C. P., Xiong, P., Ray, S. e Ghorbani, A. A. (2023). Security issues in internet of vehicles (iov): A comprehensive survey. *Internet of Things*, 22:100809.
- Thakur, K. P. e Palit, B. (2025). A qos-aware uplink spectrum and power allocation with link adaptation for vehicular communications in 5g networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 22(1):592–604.
- Ullah, I., El Sayed, H., Dowhuszko, A. A., Khan, M. A. e Hämäläinen, J. (2025). Trajectory planning of autonomous vehicles to ensure target qos requirements in 6g mobile networks. *IEEE Access*.
- Xiong, L., Zhang, Y., Liu, Y., Xiao, H. e Tang, C. (2023). Integrated decision making and planning based on feasible region construction for autonomous vehicles considering prediction uncertainty. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(11):4515–4523.
- Zhao, C., Liu, J., Sheng, M., Teng, W., Zheng, Y. e Li, J. (2021). Multi-uav trajectory planning for energy-efficient content coverage: A decentralized learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(10):3193–3207.
- Zhu, H., You, X. e Liu, S. (2019). Multiple ant colony optimization based on pearson correlation coefficient. *Ieee Access*, 7:61628–61638.