

SimDTN: um simulador de código aberto para redes móveis sem fio tolerantes a atrasos e desconexão

Rodrigo Freitas Silva ^{[1]*}, Marcelo Otone Aguiar ^[2], Helder de Amorim Mendes ^[3]

^[1] rodrigo.f.silva@ufes.br, ^[2] marcelo.aguiar@ufes.br, ^[3] helder.mendes@ufes.br, Departamento de Computação, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre, Espírito Santo, Brasil

* autor correspondente

Resumo

Este artigo apresenta o SimDTN, um novo simulador para redes móveis sem fio tolerantes a atrasos e desconexões. O objetivo principal é disponibilizar à comunidade científica um simulador alternativo, de código aberto, capaz de implementar alguns dos principais algoritmos de roteamento, modelos de mobilidade, regras de borda e métricas de conectividade. O SimDTN possibilita a simulação do comportamento de dispositivos móveis dentro de uma área pré-definida, cujos movimentos dos nós podem ser gerados por meio de modelos de mobilidade previamente estabelecidos ou por movimentações reais capturadas via GPS. As simulações permitem o uso dos seguintes modelos de mobilidade sintéticos: Random Waypoint, Random Walk e Smooth Random. Quando os nós alcançam os limites da área de simulação, as regras de borda disponíveis incluem Bounce, Delete and Replace e Wrap Around. O simulador implementa protocolos de roteamento como Primeiro Contato, Prophet, Epidêmico e Spray and Wait, os quais têm como objetivo maximizar a taxa de entrega de dados na rede, minimizar o atraso de transmissão fim a fim e limitar a sobrecarga de dados. Após o término das simulações, com base na topologia da rede, são gerados resultados referentes às seguintes métricas de conectividade: grau médio, quantidade de nós isolados, coeficiente de clusterização médio, número de componentes conexas e duração média dos enlaces. Além disso, o SimDTN gera automaticamente representações gráficas a partir dos dados obtidos nas simulações. Os resultados apresentados neste estudo derivam da análise de desempenho dos protocolos de roteamento implementados em uma topologia de rede veicular, cujos movimentos foram obtidos a partir de traços reais capturados via GPS na cidade de Muriaé, no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil. Por fim, destaca-se que o SimDTN permite a inclusão de novos protocolos de redes e a abertura direta de traços capturados de movimentações reais, tornando-o adequado para a avaliação de topologias de movimentação e novos algoritmos. Com base em pesquisas realizadas com alunos, professores e pesquisadores que utilizam o simulador, concluiu-se que ele apresenta uma interface simples, intuitiva e didática, sendo bem aceito pela comunidade acadêmica.

Palavras-chave: conectividade; modelos de mobilidade; regras de borda; roteamento; simulador de rede sem fio.

SimDTN: an open-source simulator for delay- and disconnection-tolerant mobile wireless networks

Abstract

This article presents SimDTN, a new simulator for delay-tolerant and disruption-tolerant wireless mobile networks. The primary objective is to provide the scientific community with an alternative open-source simulator capable of implementing key routing algorithms, mobility models, boundary rules, and connectivity metrics. SimDTN enables the simulation of mobile device behavior within a predefined simulation area, where node movements can be generated using predefined mobility models or real movement traces captured via GPS. The simulations support using synthetic mobility models such as Random Waypoint, Random Walk, and Smooth Random. When nodes reach the simulation area boundaries, the boundary rules include Bounce, Delete and Replace, and Wrap Around. The simulator implements routing protocols such as First Contact, Prophet, Epidemic, and Spray and Wait, which aim to maximize data delivery rates, minimize end-to-end transmission delays, and limit data overhead. Upon the completion of simulations, based on the network topology, results are generated for connectivity metrics such as average degree, the number of isolated nodes, average clustering

coefficient, the number of connected components, and average link duration. Additionally, SimDTN automatically generates graphical representations from the data obtained during the simulations. The results presented in this study are derived from the performance analysis of the implemented routing protocols in a vehicular network topology, whose movements were obtained from real traces captured via GPS in Muriaé, located in Minas Gerais, southeastern Brazil. Finally, it is noteworthy that SimDTN allows the addition of new network protocols and the direct import of real movement traces, making it suitable for evaluating movement topologies and new algorithms. Based on feedback collected from students, professors, and researchers currently using the simulator, it was concluded that SimDTN features a simple, intuitive, and didactic interface, making it well-regarded by the academic community.

Keywords: *connectivity; mobility models; border rules; routing; wireless network simulator.*

1 Introdução

Nos últimos anos, o número de usuários de dispositivos móveis sem fio tem apresentado um crescimento acentuado. Equipamentos como smartphones, *tablets* e centrais multimídia veiculares tornaram-se parte integral da vida cotidiana (Parasuraman *et al.*, 2017; Teodorescu, Durnoi e Vargas, 2023). O crescimento das redes móveis sem fio exerce um impacto significativo tanto em ambientes urbanos quanto rurais, embora de formas distintas devido às particularidades de cada região. De maneira geral, o aumento exponencial de dispositivos conectados resulta em uma demanda crescente por infraestrutura, o que intensifica a necessidade de novas tecnologias. Consequentemente, o rápido aumento de dispositivos conectados à Internet gera um elevado volume de mensagens transmitidas durante as trocas de informações, o que pode ocasionar diversos problemas na transmissão e no recebimento dos dados (Akhtar *et al.*, 2019).

Nesse contexto, pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento e à avaliação de novos protocolos de rede com o objetivo de melhorar a qualidade dos serviços prestados aos usuários em redes móveis sem fio. De maneira geral, esses protocolos de comunicação buscam maximizar a taxa de entrega de dados, minimizar o atraso fim a fim na transmissão, limitar a sobrecarga de dados na rede, evitar estouros de *buffers*, impedir o descarte prematuro de pacotes por nós intermediários e reduzir o consumo de energia nos dispositivos (Khan; Bilal; Othman, 2018; Quessada *et al.*, 2022).

As dificuldades enfrentadas pelos pesquisadores para avaliar protocolos de rede em ambientes reais estão relacionadas, principalmente, aos altos custos envolvidos, considerando a variedade limitada de dispositivos comerciais disponíveis para testes. Por esse motivo, a maioria dos estudos utiliza simulações (Almeida *et al.*, 2018). Nesse cenário, novos simuladores têm sido continuamente desenvolvidos e apresentados na literatura, sendo amplamente empregados para validar e implementar algoritmos de redes. Esses simuladores têm como objetivo principal representar de forma fidedigna as movimentações (*traces*) dos nós e as transmissões de dados entre eles.

Atualmente, os principais simuladores de redes móveis sem fio descritos na literatura são: Opportunistic Network Environment (The ONE) (Chhabra; Vashishth; Sharma, 2018), Simulation of Urban MObility (SUMO) (Monga; Mehta, 2022), OMNeT++ (Varga; Hornig, 2008) e Network Simulator 3 (ns-3) (Ceballos *et al.*, 2021). A escolha apropriada de um simulador de redes é essencial para garantir a credibilidade dos resultados obtidos. Portanto, é fundamental avaliar os méritos e as limitações de cada simulador antes de utilizá-lo para validar algoritmos específicos.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar um simulador alternativo para redes móveis sem fio tolerantes a atrasos e desconexões, denominado SimDTN (Simulator for Delay Tolerant Networking). O SimDTN diferencia-se dos demais simuladores de rede descritos na literatura por apresentar uma interface simples, intuitiva e didática, gerar graficamente os resultados após as simulações, além de permitir, de forma nativa, a execução de protocolos de roteamento, como Primeiro Contato, Prophet, Epidêmico e *Spray and Wait*; modelos de mobilidade, como *Random Waypoint*, *Random Walk* e *Smooth Random*; e utilizar regras de borda, como *Bounce*, *Delete and Replace* e *Wrap Around*, quando os nós ultrapassam os limites da área de simulação.

A validação do SimDTN foi realizada por meio da análise dos resultados obtidos em simulações, considerando a execução dos algoritmos de roteamento incorporados e utilizando uma topologia de rede baseada em movimentações veiculares reais, obtidas via GPS. As movimentações reais foram baseadas em dados de mobilidade urbana coletados pelos autores deste estudo, por meio

de GPS, em 25 ônibus durante um dia completo de circulação em uma cidade de porte médio localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Ao final do dia, cada ônibus gerou um trace contendo sua posição (latitude e longitude) a cada segundo. Todos os 25 *traces* foram combinados em um único arquivo e inseridos no SimDTN, a fim de representar as movimentações dos ônibus. Dessa forma, as análises consideraram as comunicações ponto a ponto (*peer-to-peer* – P2P) dos ônibus em uma rede DTN veicular.

Destaca-se que a disponibilização do SimDTN como um produto alternativo permite a pesquisadores e estudantes implementar e validar novos protocolos de rede sem a necessidade de uma infraestrutura real, que pode ser complexa e de alto custo, reduzindo assim os investimentos nos experimentos. Além disso, o SimDTN pode ser utilizado como uma ferramenta didática para o ensino de conceitos de redes de computadores, bem como para avaliar a segurança e o desempenho de redes sob diferentes topologias.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, apresenta-se a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho. A Seção 3 discute os trabalhos relacionados aos simuladores de redes. Na Seção 4, detalha-se a metodologia utilizada para a criação e análise do SimDTN. A Seção 5 aborda e analisa os resultados obtidos nas simulações realizadas com base em movimentações veiculares reais. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

2 Fundamentação teórica

Quando os nós de uma rede estão associados a uma estação-base, considera-se que operam em modo de infraestrutura. Por meio dessa estação-base, os nós têm acesso aos serviços básicos da rede. Em contrapartida, em redes *ad hoc* (*Mobile Ad Hoc Networks* – MANET), os nós sem fio não dispõem de infraestrutura centralizada para conexão. Nesse caso, os próprios nós devem prover serviços, como roteamento, atribuição e tradução de endereços, entre outros. Além disso, os nós só podem transmitir dados para outros dispositivos dentro do alcance de seus enlaces. Redes Veiculares Ad Hoc (*Veicular Ad Hoc Networks* – VANETs) constituem uma categoria específica de redes *ad hoc* em que os nós móveis correspondem a veículos (Kurose; Ross, 2021).

Uma rede móvel *ad hoc* apresenta características específicas que devem ser consideradas no desenvolvimento de seus protocolos. Exemplos incluem: topologia dinâmica, enlaces com largura de banda limitada, necessidade de conservação de energia, perdas de pacotes por estouro de buffer, altas taxas de erros de bits e enlaces intermitentes de curta duração (Paranjothi; Khan; Zeadally, 2020; Raza *et al.*, 2016). Por outro lado, essas redes oferecem vantagens, como mobilidade dos equipamentos, flexibilidade de instalação, redução de custos com infraestrutura, escalabilidade, possibilidade de instalação em áreas de difícil acesso, além de segurança, confiabilidade e robustez (Agrawal *et al.*, 2023).

Os protocolos de comunicação empregados em redes móveis *ad hoc* devem ser projetados para garantir eficiência, promovendo a cooperação entre os nós. Esses protocolos possibilitam a comunicação entre dispositivos móveis por meio de regras e procedimentos específicos. Adicionalmente, simuladores de redes que utilizam tais protocolos devem ser confiáveis e precisos, de modo a capturar transmissões de dados em enlaces de curta duração, caracterizados por conexões temporárias entre os nós da rede.

Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (*Delay-Tolerant Networking* – DTN) constituem uma classe de redes *ad hoc* projetadas para cenários com atrasos prolongados e frequentes desconexões. Esses ambientes são desafiadores, pois apresentam dificuldades em manter comunicação fim a fim com baixa latência e mínimas perdas de pacotes. Portanto, os protocolos destinados a DTNs devem operar adequadamente mesmo em situações de desconexões inesperadas e atrasos na transmissão de dados (Koukis; Safouri; Tsaoussidis, 2024). As DTNs veiculares, um subgrupo de DTNs, são redes nas quais os nós móveis correspondem a veículos. Suas principais características incluem atrasos longos e variáveis no recebimento de pacotes, conectividade esparsa e intermitente, alta latência e elevadas taxas de erro. Frequentemente, essas redes não apresentam conectividade fim a fim (Silva, 2020).

Dada a dificuldade em obter *traces* reais de pessoas e veículos em movimentação no dia a dia, possíveis componentes de uma rede sem fio, muitos pesquisadores recorrem a movimentações sintéticas para simular amostras reais de deslocamento. Os modelos de mobilidade sintéticos descrevem padrões comportamentais de movimentação de dispositivos em redes móveis, sendo

amplamente utilizados para avaliar o desempenho de protocolos de comunicação. Um modelo eficaz deve reproduzir os padrões de movimentação dos dispositivos móveis, de forma que variações de velocidade, aceleração e mudanças de direção ocorram de maneira similar ao que se observa no mundo real. Assim, a modelagem dos movimentos consiste na criação de padrões que representem características esperadas da movimentação de usuários reais. Entretanto, grande parte dos modelos de mobilidade sintéticos presentes na literatura tende a simplificar as características de um movimento real, visando facilitar sua representação, modelagem e implementação. Entre os modelos mais utilizados, destacam-se: *Random Waypoint*, *Random Walk*, *Smooth Random*, *Random Direction* e *Gauss-Markov*.

As simulações realizadas pelo SimDTN ocorreram em um espaço limitado e previamente definido, onde os movimentos se restringem à área de simulação. Contudo, alguns modelos de mobilidade permitem que os nós ultrapassem os limites dessa área, o que demanda a definição de ações específicas, conhecidas como regras de borda. De acordo com Bettstetter (2001) e Roy (2011), as regras mais comuns encontradas na literatura são: *Bounce*, *Delete and Replace* e *Wrap Around*.

As métricas de conectividade, que representam indicadores usados para medir a qualidade e a eficiência da comunicação em uma rede móvel, descrevem as propriedades topológicas da rede em cenários de mobilidade. Essas métricas permitem análises detalhadas das posições dos nós ao longo das simulações, sendo fundamentais para compreender o comportamento da rede e promover o desenvolvimento ou aprimoramento de protocolos de roteamento. Exemplos de métricas incluem grau do nó, número de nós isolados, número de componentes conexas, coeficiente de clusterização e duração do enlace (Mryglod *et al.*, 2018).

Os protocolos de roteamento tradicionais em VANETs enfrentam limitações devido à ausência de conexões ponto a ponto (P2P). Esses problemas podem ser mitigados com protocolos de roteamento para DTNs, que lidam com atrasos prolongados, interrupções e minimizam a sobrecarga de dados.

Os protocolos de roteamento tradicionais em redes veiculares ad hoc (VANETs) enfrentam limitações devido à ausência de conexões P2P. Tais problemas podem ser mitigados com o uso de protocolos de roteamento específicos para as DTNs, os quais lidam com atrasos prolongados, interrupções e minimizam a sobrecarga de dados.

Os protocolos de roteamento em DTNs são classificados em duas categorias: encaminhamento e replicação. A diferença entre essas categorias está no momento da transmissão do pacote de um nó para outro. Nos protocolos baseados em encaminhamento, quando um nó estabelece contato com outro, o pacote é transmitido e, posteriormente, apagado do *buffer* do nó remetente. Esses protocolos priorizam a transmissão seletiva de pacotes, utilizando métricas como o tempo médio de contato e a frequência de contatos para determinar os nós mais adequados e os momentos mais propícios para o encaminhamento.

Por outro lado, os protocolos baseados em replicação realizam a cópia dos pacotes em todas as oportunidades de transmissão, mantendo o pacote original no buffer enquanto houver espaço disponível. Essa abordagem busca maximizar as chances de entrega do pacote ao destino, uma vez que múltiplos nós da rede podem armazenar cópias do pacote original. Contudo, essa técnica pode sobrecarregar a capacidade de armazenamento da rede devido ao excesso de cópias de pacotes (Abdalla; Salamah, 2022; Hom; Good; Yang, 2017). Entre os protocolos representativos, destacam-se Primeiro Contato, Prophet e MaxProp (encaminhadores), e Epidêmico, *Spray and Wait* e *Spray and Focus* (replicadores) (Ahmed; Omar; Hassan, 2016; Singha *et al.*, 2020; Sohail *et al.*, 2023).

3 Trabalhos relacionados

Em Gomez *et al.* (2023), são analisadas algumas das principais plataformas de redes utilizadas na literatura científica. O estudo discute desafios, limitações e perspectivas futuras, apresentando uma visão geral dos simuladores, seus recursos e os experimentos compatíveis com cada um. O objetivo é fornecer suporte a pesquisadores e educadores na escolha da plataforma mais adequada às suas necessidades experimentais.

O ONE é uma ferramenta de simulação de código aberto desenvolvida por Keränen, Ott e Kärkkäinen (2009) em Java, com o propósito de simular redes DTN de forma realista. Trata-se de uma das plataformas mais amplamente utilizadas na literatura para esse tipo de rede. Sua versão mais

recente é a ONE v1.6.0, lançada em 2015. O simulador oferece as ferramentas necessárias para o funcionamento da rede, permitindo simular situações específicas de mobilidade e transmissão de dados. Antes de realizar as simulações, é necessário construir manualmente um cenário por meio da edição de um arquivo de configuração base, o que pode dificultar seu uso. Esses cenários podem incluir elementos como grupos de nós, eventos, protocolos de roteamento, modelos de movimentação e mapas, configurados conforme a necessidade.

Por padrão, o ONE implementa modelos de mobilidade como *Random Waypoint*, *Random Walk*, *Random Movement*, *Map Constrained Random Movement* e *Human Behavior-Based Movement*. Contudo, o simulador não permite configurar diretamente a regra de borda dos modelos sintéticos. Apesar da dificuldade, é possível adicionar novos padrões de movimento ou carregar movimentos reais a partir de arquivos em formato específico (Zanaj; Belegu; Rista, 2019).

Os protocolos de roteamento disponíveis no simulador ONE incluem *Direct Delivery*, Epidêmico, Primeiro Contato, *Spray-and-Wait*, MaxProp e Prophet. As simulações geram resultados como o número de pacotes entregues, o atraso médio e o número médio de saltos. Entretanto, não é possível analisar essas métricas em maior detalhe, como por nó ou em intervalos de tempo, o que dificulta a interpretação dos resultados. Adicionalmente, o ONE não oferece a geração de resultados gráficos, o que representa uma limitação significativa. Nesse caso, os gráficos precisam ser gerados por meio de ferramentas externas, o que acarreta um aumento no trabalho dos usuários do simulador.

O SUMO, desenvolvido pelo Centro Aeroespacial Alemão em 2000, visa oferecer baixo consumo de memória, facilidade de extensão e alta velocidade de simulação. Sua última versão, SUMO v1.2.0, foi lançada em 2019. Este simulador realiza simulações microscópicas, distinguindo veículos, pedestres e transporte público, além de permitir a modelagem de temporização de semáforos e análises variadas, como emissão de poluentes e planos de sinalização semafórica. As redes rodoviárias e os dados de tráfego devem ser importados ou gerados em formatos específicos para uso no simulador, cuja interação se dá majoritariamente por linha de comando, utilizando arquivos XML para entradas e saídas (Monga; Mehta, 2022).

Apesar de sua ampla aplicabilidade em simulações de tráfego, o SUMO não oferece suporte para simulações detalhadas de transferência de dados entre nós, impedindo a avaliação de algoritmos de comunicação P2P ou de métricas de conectividade relacionadas à topologia da rede. Isso é considerado um limitante para avaliação de determinadas características da rede.

O OMNeT++ (v5.5.1, 2019) é um simulador modular orientado a eventos discretos, com suporte à configuração de redes infraestruturadas e ad-hoc. Desenvolvido em C++ e de código aberto, permite modelar cenários baseados na troca de mensagens entre módulos. Além disso, oferece recursos para modelagem de tráfego e multiprocessamento, sendo amplamente utilizado por comunidades acadêmicas e industriais (Varga; Hornig, 2008). O módulo INET do OMNeT++ suporta modelos de mobilidade como *Random Walk*, *Random Waypoint* e Gauss-Markov (Viridis; Kirsche, 2019). Entretanto, ele é limitado na implementação de protocolos de roteamento específicos para MANETs e apresenta resultados apenas em arquivos texto, dificultando análises detalhadas.

O NS, atualmente em sua versão NS-3.38 (2023), é um simulador de código aberto amplamente utilizado para a simulação de redes. Trata-se de um simulador de uso geral, adequado tanto para redes com fio quanto para redes sem fio. Desenvolvido pelo projeto VINT, o NS suporta diversos tipos de roteamento, incluindo unicast e multicast, além de oferecer ferramentas para a modelagem de cenários de redes LAN, MAN e WAN. Protocolos como AODV, DSR e DSDV são implementados especificamente para redes ad hoc. Ademais, o NS possibilita variações no tráfego de pacotes e oferece suporte a múltiplas camadas da pilha de protocolos (Ceballos *et al.*, 2021). O NS-3 se diferencia dos demais simuladores por permitir a integração e análise de arquivos gerados por ferramentas de captura de pacotes, como Wireshark e tcpdump.

Os simuladores mencionados anteriormente são amplamente reconhecidos na comunidade acadêmica e utilizados de maneira expressiva em pesquisas científicas com o propósito de propor, comparar e validar novos protocolos para redes móveis. Diversos fatores explicam sua popularidade e a alta frequência de citações em publicações científicas. Khan; Bilal; Othman (2012) e Gomez *et al.* (2023) realizaram comparações entre os principais simuladores de redes abordados na literatura, destacando suas vantagens e limitações. De modo geral, as principais limitações desses simuladores incluem: (1) a configuração realizada por meio de arquivos ou linhas de comando, o que dificulta sua

utilização; (2) a ausência de suporte para entrada direta de *traces* reais obtidos via GPS; (3) a falta de geração automática de gráficos como resultado das simulações; (4) a impossibilidade de análise da topologia da rede com base em métricas tradicionais de conectividade; e (5) a incapacidade de examinar resultados detalhados ao longo da linha do tempo, considerando aspectos como a topologia da rede, a geração de dados e as transmissões entre os nós.

4 Metodologia

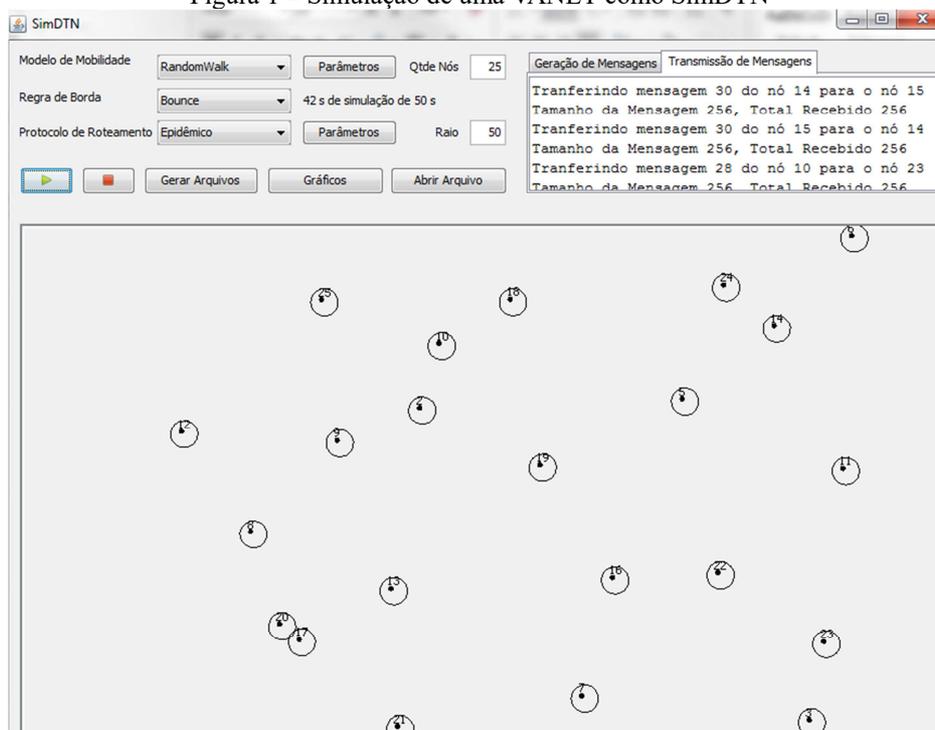
Nesta seção, o SimDTN é descrito em detalhes, abordando os modelos de mobilidade implementados, as regras de borda e os protocolos de roteamento disponíveis durante as simulações, assim como as parametrizações desses modelos e protocolos. Além disso, são explicadas as formas de interpretação das métricas de dados resultantes das simulações realizadas. Por fim, é apresentado um estudo de caso utilizando o SimDTN.

4.1 O SimDTN

A solução proposta neste trabalho consiste na implementação de uma nova plataforma de simulação para DTNs, denominada SimDTN. Trata-se de um software de livre distribuição e código aberto, desenvolvido na linguagem de programação Java, com o objetivo de mitigar deficiências observadas nos simuladores de redes atuais. O software foi registrado no INPI sob o número BR512017000395-5 em nome dos autores deste estudo, em parceria com a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Encontra-se disponível para uso e permite, inclusive, a adição de novos protocolos e funcionalidades.

O SimDTN (vide Figura 1) simula o comportamento de dispositivos móveis em uma área previamente definida, cujos movimentos podem ser gerados por meio de modelos de mobilidade predefinidos ou de movimentações reais obtidas via GPS. Os nós utilizam um protocolo de roteamento para simular a transmissão de mensagens na rede. O software oferece uma interface gráfica amigável, intuitiva e de fácil manuseio, possibilitando a visualização, em tempo real, da mobilidade dos nós, da geração de mensagens e das respectivas transmissões de dados por nó na rede.

Figura 1 – Simulação de uma VANET como SimDTN



Fonte: arquivo dos autores

O usuário pode configurar iterativamente todos os parâmetros da simulação, como o tempo total, a quantidade de nós, as velocidades máximas e mínimas, os tempos de deslocamento e pausa, a

área de simulação, o raio dos nós, os tamanhos dos pacotes gerados, os tempos de geração de mensagens, os tamanhos dos *buffers*, as taxas de transmissão dos enlaces, entre outros. Adicionalmente, o SimDTN permite a escolha do modelo de mobilidade, da regra de borda e do protocolo de roteamento utilizados na simulação.

Uma das características mais relevantes do SimDTN é a redução do tempo total de simulação, o que permite a avaliação de diferentes parâmetros de forma ágil e eficiente, sem a necessidade de longos períodos de espera pelos usuários. De forma interativa, os usuários podem analisar as movimentações dos nós, suas respectivas áreas de transmissão e as transferências de dados entre eles.

A emissão de relatórios e a geração automática de gráficos representam outra funcionalidade crucial, pois facilitam a análise dos resultados obtidos. Esses recursos permitem a comparação de parâmetros da simulação e do desempenho dos protocolos avaliados, auxiliando pesquisadores em tomadas de decisão. O SimDTN oferece gráficos que apresentam, por instante de tempo simulado, informações como velocidade média, aceleração média, tempos de pausa, mudanças de direção, grau médio, quantidade de nós isolados, coeficiente de clusterização médio, número de componentes conexas, duração média dos enlaces, entre outros. Além disso, é possível gerar gráficos relacionados ao desempenho dos protocolos de roteamento, como taxa e tempo médio de entrega dos pacotes e número médio de saltos, destacando-se pela entrega automatizada dessas informações aos usuários.

4.2 Modelos de mobilidade

Os modelos de mobilidade sintéticos implementados no SimDTN incluem: *Random Waypoint*, *Random Walk* e *Smooth Random*. A seguir, descreve-se a metodologia que orienta o comportamento desses modelos. Além dos modelos tradicionais, o SimDTN permite a criação e inserção de novos padrões de movimentação pelo usuário.

O modelo *Random Waypoint* é amplamente utilizado para avaliar protocolos de roteamento em redes sem fio, devido à sua simplicidade. Nesse modelo, cada nó escolhe, aleatoriamente, um ponto na área de simulação e se move até ele com uma velocidade constante, também escolhida aleatoriamente. Ao chegar ao destino, o nó permanece em pausa por um intervalo de tempo predeterminado. Esse processo se repete continuamente até o final da simulação (Bettstetter; Hartenstein; Pérez-Costa, 2002; Soltani *et al.*, 2020).

No modelo *Random Walk*, os nós são inseridos aleatoriamente na área de simulação, e uma direção e velocidade são selecionadas de maneira aleatória dentro de intervalos predefinidos. O movimento ocorre por um período de tempo também escolhido aleatoriamente, repetindo-se até o término da simulação (Masuda; Porter; Lambiotte, 2017; Zheng *et al.*, 2013).

O modelo *Smooth Random* busca representar padrões de movimento mais suaves e realistas, levando em consideração correlações entre velocidade e direção. Nesse modelo, a velocidade é ajustada gradualmente, e as mudanças de direção ocorrem de forma suave, priorizando valores preferenciais (Zhao; Wang, 2006).

Modelos de mobilidade sintéticos frequentemente desconsideram correlações temporais entre velocidade e direção, o que pode gerar movimentos não realistas. Para superar essa limitação, o SimDTN permite o uso de *traces* externos, obtidos de movimentações reais via GPS ou gerados por *scripts* criados pelo usuário.

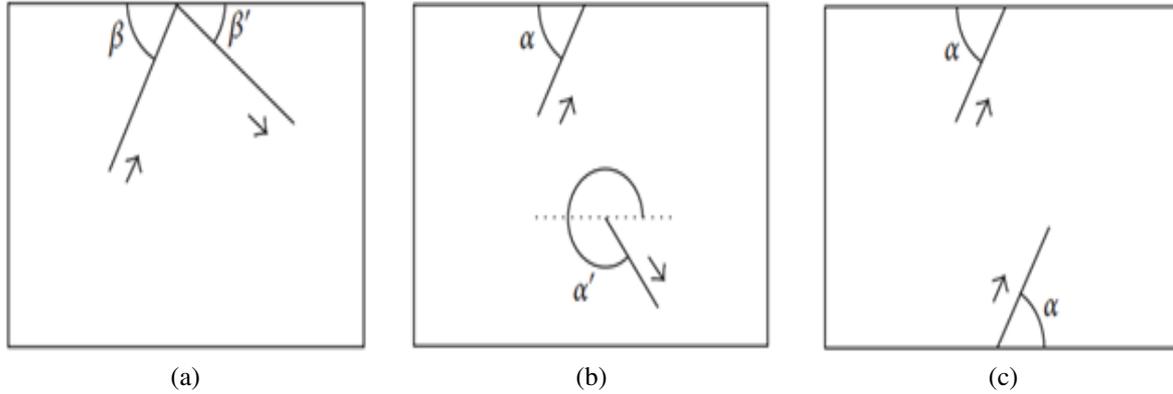
4.3 Regras de borda

O SimDTN implementa as regras de borda denominadas *Bounce*, *Delete and Replace* e *Wrap Around*, descritas por Campos e Moraes (2007) e Roy (2011), conforme segue:

- *Bounce*: reflete o movimento do nó de volta para o interior da área de simulação. Mantendo a mesma velocidade. O ângulo de reflexão β' se torna $-\beta$, onde β representa o ângulo de incidência;
- *Delete and replace*: remove o nó da área de simulação e o reposiciona aleatoriamente, atribuindo-lhe nova velocidade e direção aleatórias;
- *Wrap around*: espelha o movimento do nó para a borda oposta, sentido e velocidade.

A Figura 2 ilustra as ações correspondente às regras de borda implementadas no SimDTN.

Figura 2 – Estratégias de regras de borda. (a) *Bounce*. (b) *Delete and replace*. (c) *Wrap around*.



Fonte: Campos e Moraes (2007)

4.4 Análise da conectividade

Após as simulações, o SimDTN gera resultados para métricas de conectividade com base na topologia dinâmica da rede ao longo do tempo de simulação. As métricas incluem grau médio, quantidade de nós isolados, coeficiente de clusterização médio, número de componentes conexas e duração média dos enlaces (Diestel, 2017; Pasta; Zaidi, 2017).

A análise foi conduzida com base na metodologia de Bezerra (2009), representando a topologia da rede no instante de tempo t como um grafo não direcionado $G(t) = \{V, E(t)\}$, em que:

- $V = \{v_i\}$: conjunto de vértices, correspondendo aos nós móveis;
- $E(t) = \{e_{i,j}(t)\}$: conjunto de arestas, representando os enlaces de comunicação.

As posições dos nós i no instante t são $x_i(t)$ e $y_i(t)$. Um enlace é estabelecido entre i e j se ambos estiverem dentro do raio R de alcance, calculando-se a distância euclidiana $D_{i,j}(t)$.

Definem-se as métricas de conectividade:

- **Grau de um nó $G_i(t)$** : número de conexões P2P de um nó i no instante t .

$$G_i(t) = \sum_{j \in V} e_{i,j}(t) \quad (1)$$

- **Grau médio $GM(t)$** : média de conexões P2P em uma rede com V nós.

$$GM(t) = \frac{\sum_{i \in V} (G_i(t))}{V} \quad (2)$$

- **Nós isolados $I(t)$** : quantidade de nós sem conexões P2P no instante de tempo t .

$$I(t) = \sum_i G_i(t), \forall G_i(t) = 0 \quad (3)$$

- **Coefficiente de clusterização $C_i(t)$** : conectividade dos nós adjacentes a um nó i em um instante de tempo t , em que $E(i, t)$ é o número de arestas (enlaces) entre os vizinhos de i .

$$C_i(t) = \frac{E(i, t)}{G_i(t)(G_i(t) - 1)} \quad (4)$$

- **Coefficiente de clusterização médio $CM(t)$** : média dos coeficientes de clusterização.

$$CM(t) = \frac{\sum_{i \in V} C_i(t)}{V} \quad (5)$$

- **Número de componentes conexas:** quantidade de grupos de nós interligados no instante t .
- **Duração do enlace:** tempo durante o qual dois nós permanecem conectados.

$$D_{i,j}(t) = t_2 - t_1, \text{ enquanto } e_{i,j}(t) \text{ existe} \quad (6)$$

- **Duração média dos enlaces:** razão entre a soma do tempo de todos os enlaces de transmissão pela quantidade total de conexões realizadas ao longo do tempo de simulação.

4.5 Protocolos de roteamento

O SimDTN implementa os seguintes protocolos de roteamento: Primeiro Contato e Prophet, como protocolos de encaminhamento; e Epidêmico e *Spray and Wait*, como protocolos de replicação. A seguir, descrevem-se as metodologias de funcionamento de cada um desses roteamentos. Ressalta-se que o simulador permite a inserção de novos padrões de roteamento, conforme a necessidade dos usuários.

- **Primeiro Contato:** neste protocolo, o nó de origem encaminha o pacote ao primeiro nó com o qual estabelece contato. Este, por sua vez, retransmite o pacote ao próximo nó encontrado, e assim sucessivamente, até que o pacote alcance o destino;
- **Prophet:** o roteamento baseia-se na premissa de que os nós não se movem aleatoriamente, mas sim de maneira previsível. Dessa forma, considera-se que os movimentos de um dado nó podem ser previstos com base na repetição de padrões comportamentais de mobilidade. Utiliza-se uma métrica denominada previsibilidade de entrega ($P_{i,j}$) para estimar a probabilidade de um nó i entregar o pacote ao destino j . O valor de ($P_{i,j}$) aumenta sempre que os nós i e j se encontram e diminui à medida que deixam de se encontrar, sendo controlado por uma constante de envelhecimento k . Quando dois nós estabelecem conexão, verifica-se qual deles possui o maior valor de ($P_{i,j}$), e a decisão sobre o encaminhamento do pacote é tomada com base nesse parâmetro (Lee *et al.*, 2015; Sok; Tan; Kim, 2013);
- **Epidêmico:** o principal objetivo é maximizar a taxa de entrega de pacotes aos nós de destino. O roteamento é baseado na teoria dos algoritmos epidêmicos, na qual dois nós repassam seus respectivos pacotes sempre que estão em contato. Assim, ao estabelecerem uma conexão, os nós replicam e encaminham pacotes um ao outro. Quanto maior o número de cópias de um pacote distribuídas, maior a probabilidade de entrega e menor o atraso. No entanto, o aumento no número de cópias eleva o risco de sobrecarga dos *buffers*, o que pode resultar no descarte de pacotes (Garg *et al.*, 2018);
- **Spray and Wait:** o objetivo desse protocolo de roteamento é gerar um número reduzido de cópias dos pacotes, garantindo que a quantidade de transmissões seja controlada. O roteamento ocorre em duas fases. Na primeira fase (*Spray*), para cada pacote gerado no nó de origem, criam-se L cópias, que são distribuídas individualmente para $L - 1$ nós subsequentes encontrados. Caso o nó de destino não seja alcançado durante essa fase, inicia-se a fase *Wait*, em que os L nós que detêm as cópias do pacote repassam-no somente ao nó de destino. Esse protocolo busca limitar o número de transmissões, assegurando maior controle e eficiência no uso dos recursos da rede (Spyropoulos; Psounis; Raghavendra, 2008).

O desempenho dos protocolos de roteamento é avaliado por meio de métricas específicas, que permitem a formulação de conclusões sobre o comportamento dos protocolos analisados. Nesse sentido, o SimDTN gera resultados para as seguintes métricas:

- **Taxa de entrega (%):** razão entre os pacotes entregues ao destino e o total de pacotes gerados na rede, ou seja, a porcentagem de pacotes gerados que chegaram efetivamente ao seu destino;

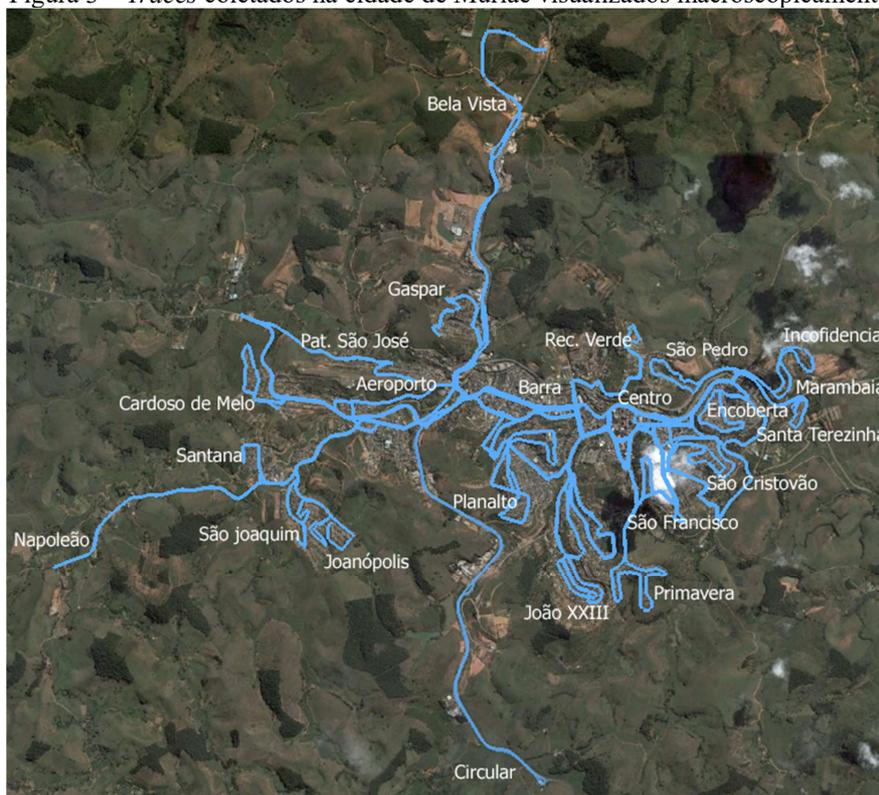
- **Atraso médio:** tempo médio necessário para que um pacote chegue ao seu destino, normalmente expresso em segundos;
- **Número de saltos:** quantidade de vezes que um pacote precisou ser repassado a outro nó até alcançar o destino final.

4.6 Área de estudo

O SimDTN foi empregado para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento e a topologia da rede por meio de simulações que utilizaram movimentações reais capturadas via GPS. Contudo, é importante destacar que, caso os usuários não disponham de movimentações reais, as simulações podem ser realizadas por meio de *traces* sintéticos, gerados por modelos de mobilidade parametrizados com o objetivo de reproduzir os dados reais coletados.

Os *traces* reais foram coletados pelos autores deste trabalho na cidade de Muriaé, Minas Gerais, Brasil (Figura 3). Muriaé é uma cidade com aproximadamente 120 mil habitantes. Os *traces* compreendem todos os trajetos realizados pelas 15 linhas de ônibus urbanos da empresa Coletivo Muriaeense ao longo de um dia de funcionamento (das 5:40 às 23:30 horas). Nesse contexto, um trajeto refere-se ao percurso de um ônibus desde o ponto inicial da linha à qual pertence até o ponto final dessa mesma linha. Ao todo, foram identificados 32 trajetos distintos realizados por 25 ônibus.

Figura 3 – *Traces* coletados na cidade de Muriaé visualizados macroscopicamente



Fonte: elaborado pelos autores

Foi montada, então, uma rede de transmissão P2P, formando uma DTN veicular cujos nós são os ônibus públicos da cidade, capazes de receber e enviar pacotes de dados pela rede. Os *traces* utilizados neste trabalho também serviram como base de dados nas pesquisas de Silva (2010), Campos, Moraes e Silva (2010) e Silva *et al.* (2020).

O dispositivo GPS utilizado para capturar os registros das movimentações dos ônibus foi o Apontador G8, fabricado pelo Grupo Unicoba. Por meio desse dispositivo, as posições geográficas dos ônibus em tempo real foram registradas em arquivo a cada intervalo de 2 segundos. Durante a coleta dos dados, em nenhum momento foi identificada perda de sinal entre o GPS e os satélites. Como

nenhum movimento atípico foi observado, não foi necessário realizar correções posteriores em laboratório (Silva, 2010).

5 Resultados e discussões

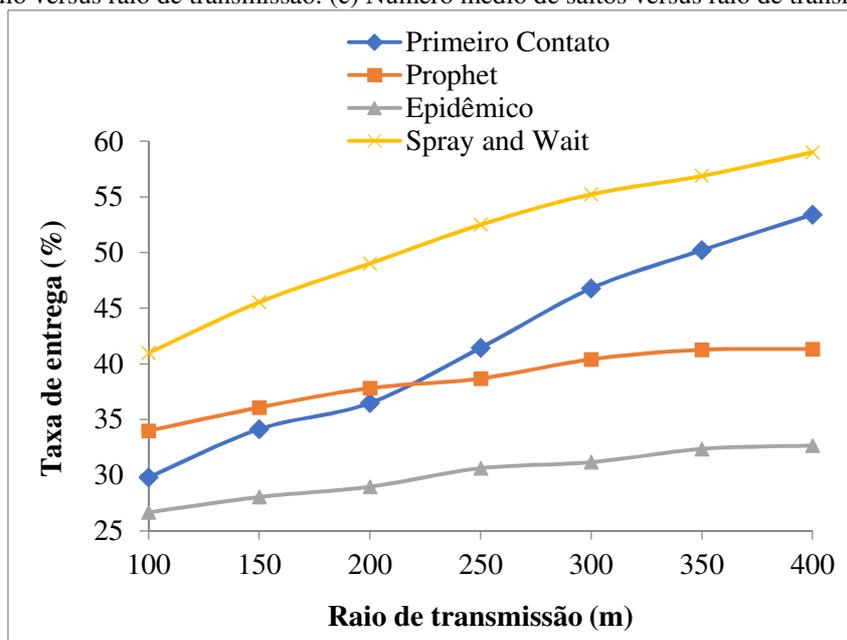
Após a análise das movimentações capturadas, observou-se que a velocidade dos ônibus variou entre 2 e 83 km/h, a aceleração entre -2,77 e 3,32 m/s², o ângulo das mudanças de direção entre 0 e 178°, e os tempos de pausa entre 1 e 168 segundos. Em termos médios, os ônibus em circulação apresentaram os seguintes resultados: velocidade de 23 km/h, aceleração de 0,03 m/s², mudança de direção média de 7° e tempo de pausa médio de 7 segundos. A área total de movimentação correspondeu a 9 × 8 km.

As simulações via SimDTN ocorreram tomando como referência 6 horas de movimentações (de 8 às 14 horas) da DTN veicular formada. Levou-se em consideração que cada um dos 25 ônibus continham até 35 usuários móveis gerando, cada, 3 MB de dados por hora. Nesse caso, cada ônibus servia como uma estação de transmissão para seus usuários, transmitindo os dados P2P com uma taxa de transmissão máxima de 11Mbps e *buffer* de armazenamento de 100 MB. As mensagens geradas na rede foram do tipo TCP com tamanhos variando entre 40 e 1500 bytes. Tais parâmetros foram baseados nas configurações de simulação adotadas em Yang *et al.* (2015).

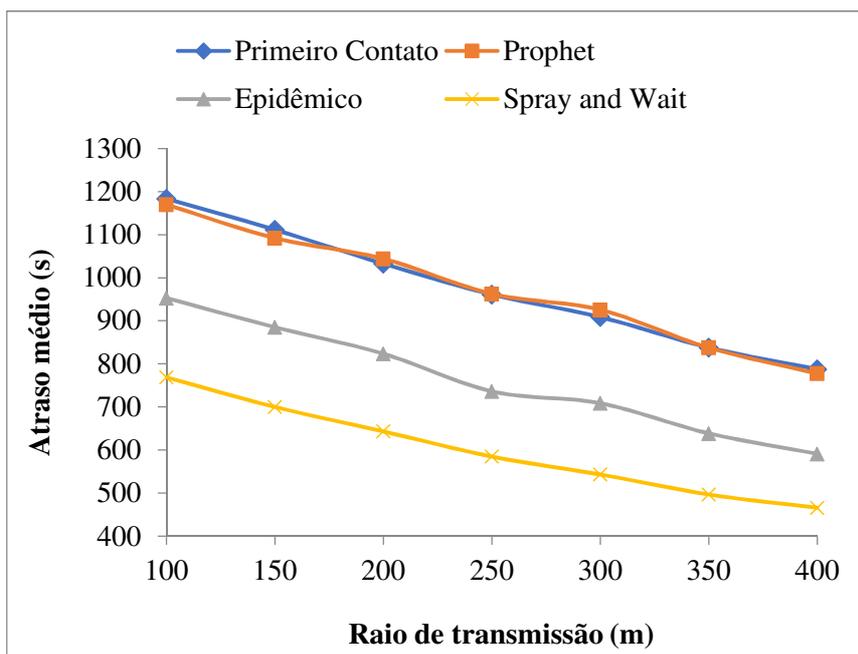
As simulações realizadas utilizando o SimDTN foram baseadas em 6 horas de movimentações (das 8 às 14 horas) da DTN veicular formada. Considerou-se que cada um dos 25 ônibus transportava até 35 usuários móveis, os quais geravam, individualmente, 3 MB de dados por hora. Cada ônibus atuava como uma estação de transmissão para seus usuários, utilizando uma taxa máxima de transmissão de 11 Mbps e um *buffer* de armazenamento de 100 MB. As mensagens geradas na rede foram configuradas no protocolo TCP, com tamanhos variando entre 40 e 1.500 bytes, seguindo os parâmetros adotados em Yang *et al.* (2015).

Os resultados dos protocolos de roteamento analisados, após 10 rodadas de simulação, são apresentados na Figura 4. Avaliaram-se a taxa de entrega (Figura 4a), o atraso médio (Figura 4b) e o número médio de saltos (Figura 4c), considerando raios de transmissão que variaram de 100 a 400 metros. A constante de envelhecimento configurada no protocolo Prophet foi de 30 segundos, enquanto o número de cópias no protocolo *Spray and Wait* foi fixado em 6.

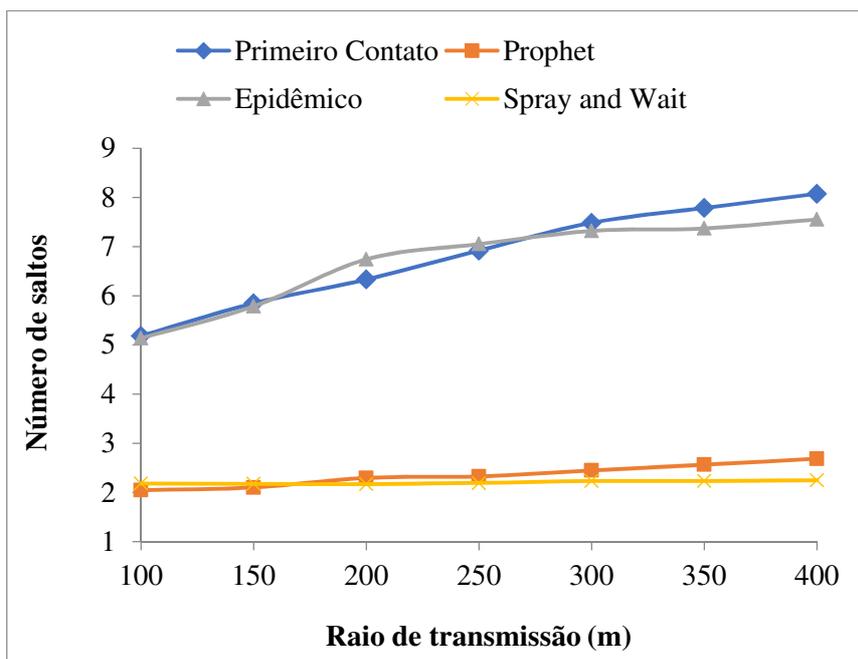
Figura 4 – Desempenho dos protocolos de roteamento. (a) Taxa de entrega versus raio de transmissão. (b) Atraso médio versus raio de transmissão. (c) Número médio de saltos versus raio de transmissão.



(a)



(b)



(c)

Fonte: dados da pesquisa

O protocolo *Spray and Wait* apresentou os melhores resultados, entregando o maior número de mensagens no menor intervalo de tempo, alcançando uma taxa de entrega de 59% para um raio de 400 metros. Esse desempenho pode ser atribuído à criação de um número limitado de cópias de mensagens, permitindo sua propagação enquanto evita exclusões decorrentes do estouro do *buffer* nos nós da rede. Por outro lado, o protocolo Epidêmico obteve as menores taxas de entrega, atingindo apenas 32% para o mesmo raio de transmissão, com uma média de 7 saltos por mensagem. Esse resultado é decorrente do elevado número de pacotes perdidos devido ao estouro do *buffer*.

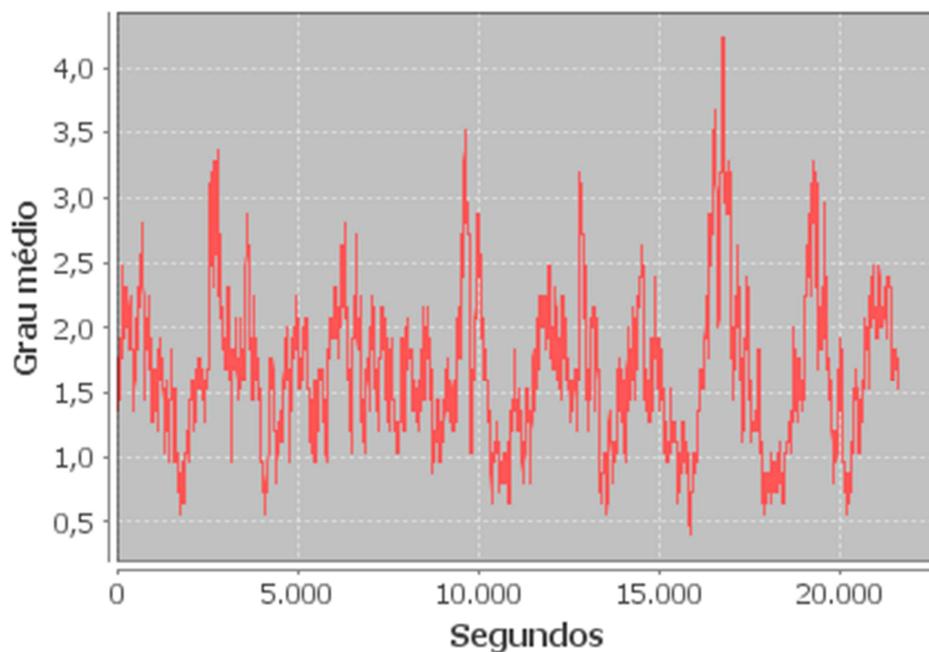
É importante destacar que, caso o experimento tivesse sido conduzido com nós possuindo maior capacidade de armazenamento (*buffer*) ou mesmo *buffer* ilimitado, o protocolo Epidêmico provavelmente teria apresentado os melhores resultados, uma vez que maximizaria a probabilidade de

entrega ao gerar inúmeras mensagens repetidas na rede. Contudo, na prática, é sabido que os nós de uma rede possuem capacidade de armazenamento limitada.

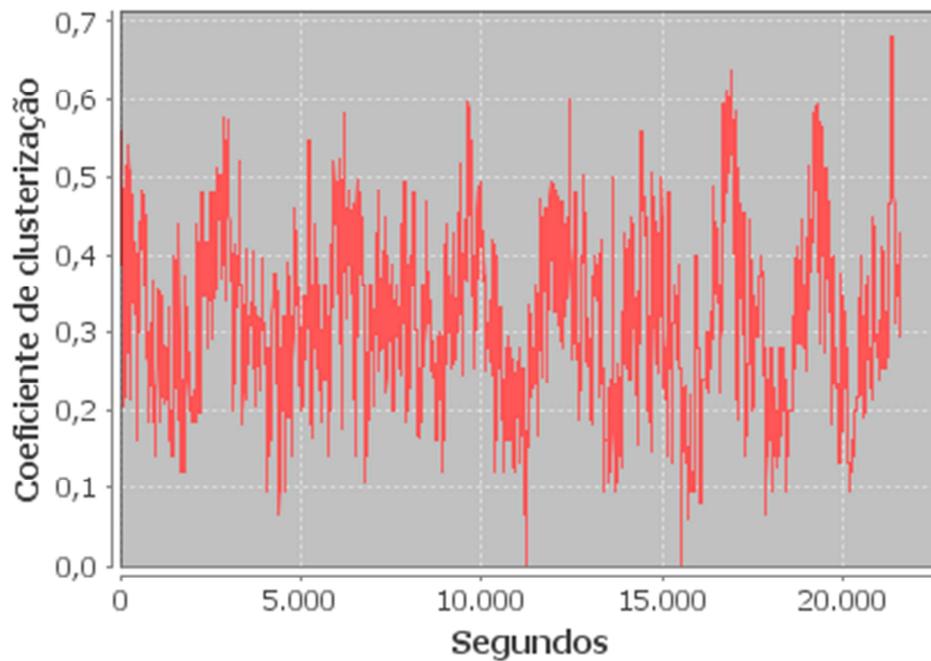
Os protocolos Prophet e Primeiro Contato apresentaram desempenhos intermediários, atingindo taxas de entrega de até 41% e 53%, respectivamente, para um raio de 400 metros. Ambos os protocolos registraram atrasos médios próximos a 778 segundos, os maiores entre os protocolos avaliados. Esse comportamento deve-se ao fato de serem protocolos encaminhadores, que não replicam pacotes de dados na rede, reduzindo as chances de entrega das mensagens aos respectivos destinatários. Entretanto, os protocolos diferenciaram-se no número de saltos, limitado a 3 no Prophet, enquanto o Primeiro Contato encaminhou, em média, a mesma mensagem até 8 vezes. Essa diferença decorre da característica probabilística do Prophet, que só repassa as mensagens quando o próximo nó apresenta maior probabilidade de entregá-las ao destinatário.

Os gráficos que representam a topologia da rede são apresentados na Figura 5, na qual se analisam as métricas grau médio (Figura 5a), coeficiente de clusterização médio (Figura 5b) e número de nós isolados (Figura 5c). Tais figuras foram geradas como exemplo pelo SimDTN, considerando um raio de 400 metros e o protocolo Epidêmico. Ressalta-se que o simulador permite a geração de outros gráficos com base nos demais protocolos de roteamento e raios de transmissão configurados. Ao todo, a rede produziu 382.053 enlances, com um tempo de transmissão médio inferior a 1 segundo.

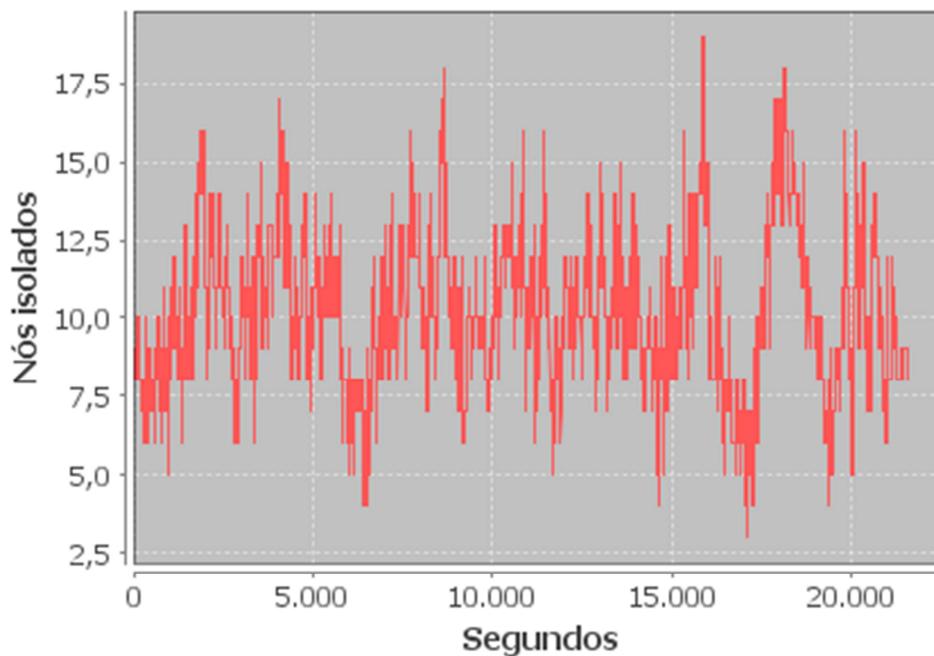
Figura 5 – Resultados da topologia da rede ao longo da simulação. (a) Grau médio. (b) Coeficiente de clusterização. (c) Número de nós isolados



(a)



(b)



(c)

Fonte: dados da pesquisa obtidos diretamente do SimDTN

O grau médio dos nós foi 1,63, enquanto o grau máximo observado foi 9. Esses resultados indicam que, na maior parte do tempo, há nós na rede em comunicação, transmitindo mensagens. Em determinados momentos, o grau de um nó é elevado, o que pode ser atribuído à concentração de ônibus em uma mesma parada aguardando passageiros ou estacionados nos intervalos de descanso, sem movimentação.

O coeficiente de clusterização variou entre 0 e 1, com uma média de 0,315 ao longo das simulações. Em média, 10,2 nós estavam isolados em cada instante de tempo, com um número máximo de 19 e mínimo de 3 nós isolados. Isso indica que pelo menos 3 ônibus permaneceram desconectados da rede em todos os momentos, geralmente devido à realização de trajetos em linhas

periféricas, distantes do centro. Considerando os pares de transmissão, o número de componentes conexas variou entre 4 e 18, com uma média de 9,98.

Por fim, o SimDTN tem sido utilizado como ferramenta auxiliar no ensino das disciplinas de "Redes de Computadores" e "Tópicos Especiais em Redes de Computadores I" no CCENS/UFES, nos cursos de Bacharelado em Ciência da Computação e Sistemas de Informação. Até o momento, 122 estudantes utilizaram a ferramenta, cuja avaliação obteve uma média de 8,4 pontos em questionários aplicados ao final das disciplinas. A título de comparação, estudantes também são incentivados a utilizar outros simuladores, como ONE, SUMO, OMNeT++ e NS. Contudo, a percepção docente indica maior dificuldade de uso desses simuladores devido a fatores como configuração complexa, limitações em métricas analisáveis ou necessidade de ferramentas adicionais para gerar gráficos.

6 Conclusão

O desenvolvimento e as simulações realizadas com o SimDTN permitiram evidenciar diversas contribuições do sistema para o estudo de redes *ad-hoc*. O SimDTN oferece um ambiente de aprendizado alternativo, no qual é possível realizar simulações de maneira interativa, utilizando uma interface simples, intuitiva e didática. Esse aspecto tem sido bem aceito por estudantes, professores e pesquisadores da UFES. O simulador implementa os principais modelos de mobilidade, protocolos de roteamento, métricas de conectividade e regras de borda empregados em redes *ad-hoc* contemporâneas, além de possibilitar a adição de novos protocolos e a abertura direta de *traces* capturados de movimentações reais. Esse recurso torna o SimDTN uma ferramenta eficaz para a análise de movimentações reais e para a avaliação de novos algoritmos de rede.

Adicionalmente, destaca-se a capacidade do SimDTN de gerar automaticamente gráficos durante as simulações, o que facilita a interpretação dos resultados. A utilização de *traces* reais demonstrou potencial para proporcionar análises mais precisas dos protocolos de rede avaliados, abordando algumas das limitações observadas em outros simuladores descritos na literatura. Entre os protocolos de roteamento analisados, o *Spray and Wait* foi identificado como o mais adequado para implementação em uma DTN veicular, apresentando desempenho superior nas métricas avaliadas. Assim, sugere-se a adoção desse protocolo de roteamento para redes com recursos limitados. Por fim, verificou-se que a topologia de uma rede de transmissão veicular real apresenta contatos escassos entre os nós, com enlaces geralmente de curta duração, o que reforça os desafios intrínsecos ao cenário estudado.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a implementação, no SimDTN, de outros protocolos de roteamento, a possibilidade de criação de mapas diretamente no simulador e a adição de novos gráficos, a fim de viabilizar a comparação de resultados de um ou mais roteamentos parametrizados de diferentes maneiras. Além disso, recomenda-se testar o SimDTN em outros experimentos envolvendo roteamento, como, por exemplo, cenários baseados na mobilidade humana, ou em condições adversas, com muitos nós se comunicando simultaneamente ou em redes com transmissões extremamente escassas.

Financiamento

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – projeto 12469/2024 –, da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) – Processo E-26/150.024/2009 – e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (bolsa de estudo de mestrado), pelo financiamento parcial da pesquisa.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

SILVA, R. F.: obtenção dos dados; implementação do simulador; concepção da pesquisa; geração dos resultados. **AGUIAR, M. O.:** interpretação dos dados e dos resultados da pesquisa. **MENDES, H. A.:** revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

- ABDALLA, A. M.; SALAMAH, S. H. Performance comparison between delay-tolerant and non-delay-tolerant position-based routing protocols in VANETs. **International Journal of Communications, Network and System Sciences**, v. 15, n. 1, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4236/ijcns.2022.151001>.
- AGRAWAL, R.; FAUJDAR, N.; ROMERO, C. A. T.; SHARMA, O.; ABDULSAHIB, G. M.; KHALAF, O. I.; MANSOOR, R. F.; GHONEIM, O. A. Classification and comparison of ad hoc networks: a review. **Egyptian Informatics Journal**, v. 24, n. 1, p. 1-25, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.10.004>.
- AHMED, K. K.; OMAR, M. H.; HASSAN, S. Survey and comparison of operating concept for routing protocols in DTN. **Journal of Computer Science**, v. 12, n. 3, p. 141-152, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3844/jcssp.2016.141.152>.
- AKHTAR, N.; KHAN, M. A.; ULLAH, A.; JAVED, M. Y. Congestion avoidance for smart devices by caching information in MANETS and IoT. **IEEE Access**, v. 7, p. 71459-71471, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2918990>.
- ALMEIDA, T. T.; GOMES, L. C.; ORTIZ, F. M.; RIBEIRO JUNIOR, J. G.; COSTA, L. H. M. K. IEEE 802.11p performance evaluation: simulations vs. real experiments. *In*: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC), 21., 2018, Maui. **Proceedings [...]**. Maui: IEEE, 2018. p. 3840-3845. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569676>.
- BETTSTETTER, C. Mobility modeling in wireless networks: categorization, smooth movement, and border effects. **ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review**, v. 5, n. 3, p. 55-66, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1145/584051.584056>.
- BETTSTETTER, C.; HARTENSTEIN, H.; PÉREZ-COSTA, X. Stochastic properties of the random waypoint mobility model: epoch length, direction distribution, and cell change rate. *In*: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON MODELING ANALYSIS AND SIMULATION OF WIRELESS AND MOBILE SYSTEMS (MSWiM '02), 2002, Atlanta. **Proceedings [...]**. Atlanta: ACM, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1145/570760.570761>.
- BEZERRA, R. L. **Análise da conectividade em redes móveis utilizando dados obtidos da mobilidade humana**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://cos.ufrj.br/index.php/pt-BR/publicacoes-pesquisa/details/15/2654>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- CAMPOS, C. A. V.; MORAES, L. F. M. A Markovian model representation of individual mobility scenarios in ad hoc networks and its evaluation. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2007, n. 1, 035946, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1155/2007/35946>.
- CAMPOS, C. A.; MORAES, L. F.; SILVA, R. F. Caracterização da mobilidade veicular e o seu impacto nas redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC), 28., 2010, Gramado. **Anais [...]**. Porto Alegre: SBRC, 2010. p. 585-598, Disponível em: <https://ce-resd.sbc.org.br/sbrc/2010/041.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- CEBALLOS, H. Z.; AMARIS, J. E. P.; JIMÉNEZ, H. J.; RINCÓN, D. A. R.; ROJAS, O. A.; TRIVIÑO, J. E. O. **Wireless network simulation: a guide using ad hoc networks and the ns-3 simulator**. Nova York: Apress, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6849-0>.

CHHABRA, A.; VASHISHTH, V.; SHARMA, D. K. Hands-on ONE simulator: opportunistic network environment. *In: AHMAD, K.; UDZIR, N. I.; DEKA, G. C. (eds.). Opportunistic networks: mobility models, protocols, security, and privacy. Boca Raton : Taylor & Francis, 2018. p. 280-303. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429453434-16>.*

DIESTEL, R. **Graph theory**. Berlin: Springer, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53622-3>.

GARG, P.; KUMAR, H.; JOHARI, R.; GUPTA, P.; BHATIA, R. Enhanced epidemic routing protocol in delay tolerant networks. *In: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING AND INTEGRATED NETWORKS (SPIN), 5., 2018, Noida. Proceedings [...]. Noida: IEEE, 2018. p. 396-401. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPIN.2018.8474132>.*

GOMEZ, J.; KFOURY, E. F.; CRICHIGNO, J.; SRIVASTAVA, G. A survey on network simulators, emulators, and testbeds used for research and education. **Computer Networks**, v. 237, 110054, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110054>.

HOM, J.; GOOD, L.; YANG, S. A survey of social-based routing protocols in delay tolerant networks. *In: 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (ICNC), 2017, Silicon Valley. Proceedings [...]. Silicon Valley: IEEE, 2017. p. 788-792. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCNC.2017.7876231>.*

KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation. *In: INTERNATIONAL ICST CONFERENCE ON SIMULATION TOOLS AND TECHNIQUES, 2., 2009, Rome. Proceedings [...]. Rome: ICST, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2009.5674>.*

KHAN, A. R.; BILAL, S. M.; OTHMAN, M. A performance comparison of open source network simulators for wireless networks. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL SYSTEM, COMPUTING AND ENGINEERING, 2012, Penang. Proceedings [...]. Penang: IEEE, 2012. p. 34-38. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCSC.2012.6487111>.*

KHAN, A.; ALI, I.; GHANI, A.; KHAN, N.; ALSAQER, M.; RAHMAN, A. U.; MAHMOOD, H. Routing protocols for underwater wireless sensor networks: taxonomy, research challenges, routing strategies and future directions. **Sensors**, v. 18, n. 5, 1619, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051619>.

KOUKIS, G.; SAFOURI, K.; TSAOUSSIDIS, V. All about Delay-Tolerant Networking (DTN) contributions to future internet. **Future Internet**, v. 16, n. 4, 129, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi16040129>.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down**. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2021.

LEE, H.-J.; NAM, J.-C.; SEO, W.-K.; CHO, Y.-Z.; LEE, S.-H. Enhanced PROPHET routing protocol that considers contact duration in DTNs. *In: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION NETWORKING (ICOIN), 2015, Cambodia. Proceedings [...]. Cambodia: IEEE, 2015. p. 523-524. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2015.7057961>.*

MASUDA, N.; PORTER, M. A.; LAMBIOTTE, R. Random walks and diffusion on networks. **Physics Reports**, v. 716-717, p. 1-58, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.07.007>.

MONGA, R.; MEHTA, D. Sumo (Simulation of Urban Mobility) and OSM (Open Street Map) implementation. *In: 2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM MODELING &*

ADVANCEMENT IN RESEARCH TRENDS (SMART), 11., 2022, Moradabad. **Proceedings [...]**. Moradabad: IEEE, 2022. p. 534-538. <https://doi.org/10.1109/SMART55829.2022.10046720>.

MRYGLOD, O.; BERCHE, B.; HOLOVATCH, Y.; KENNA, R. Complex-network approach for visualizing and quantifying the evolution of a scientific topic. *In*: OSINSKA, V.; OSINSKI, G. (ed.). **Information Visualization Techniques in the Social Sciences and Humanities**, 2018. p. 106-120. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-4990-1.ch007>.

PARANJOTHI, A.; KHAN, M. S.; ZEADALLY, S. A survey on congestion detection and control in connected vehicles. **Ad Hoc Networks**, v. 108, 102277, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102277>.

PARASURAMAN, S.; SAM, A. T.; YEE, S. W. K.; CHUON, B. L. C.; REN, L. Y. Smartphone usage and increased risk of mobile phone addiction: a concurrent study. **International Journal of Pharmaceutical Investigation**, v. 7, n. 3, p. 125-131, 2017. DOI: https://doi.org/10.4103/jphi.JPHI_56_17.

PASTA, M. Q.; ZAIDI, F. Topology of complex networks and performance limitations of community detection algorithms. **IEEE Access**, v. 5, p. 10901-10914, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2714018>.

RAZA, N.; AFTAB, M. U.; AKBAR, M. Q.; ASHRAF, O.; IRFAN, M. Mobile ad-hoc networks applications and its challenges. **Communications and Network**, v. 8, n. 3, p. 131-136, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4236/cn.2016.83013>.

ROY, R. R. **Handbook of mobile ad hoc networks for mobility models**. Boston: Springer, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6050-4>.

QUESSADA, M. S.; LIEIRA, D.; PEREIRA, R.; GOTTSFRITZ, E.; MENEGUETTE, R. Generation of real datasets for network simulation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, n. 2, p. 233-240, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9661462>.

SILVA, R. F.; BRAGA, P.; MENDES, H.; AGUIAR, M. Adaptive: an adaptive routing protocol for vehicle delay-tolerant networks. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 2, p. 223-231, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9085274>.

SILVA, R. F. **Caracterização da mobilidade veicular e o seu impacto nas redes veiculares tolerantes a atrasos e desconexões**. 107 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Sistema e Computação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.ravel.ufrj.br/caracterizacao-mobilidade-veicular-seu-impacto-nas-redes-veiculares-tolerantes-atrasos-desconexoes>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SINGHA, S.; JANA, B.; JANA, S. H.; MANDAL, N. K. A survey to analyse routing algorithms for opportunistic network. **Procedia Computer Science**, v. 171, p. 2501-2511, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.271>.

SOHAIL, M.; LATIF, Z.; JAVED, S.; BISWAS, S.; AJMAL, S.; IQBAL, U.; RAZA, M.; KHAN, A. U. Routing protocols in Vehicular Adhoc Networks (VANETs): a comprehensive survey. **Internet of Things**, v. 23, 100837, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100837>.

SOLTANI, M. D.; PURWITA, A. A.; ZENG, Z.; CHEN, C.; HAAS, H.; SAFARI, M. An orientation-based random waypoint model for user mobility in wireless networks. *In*: 2020 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS WORKSHOPS (ICC

WORKSHOPS), 2020, Dublin. **Proceedings [...]**. Dublin: IEEE, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145333>.

SOK, P.; TAN, S.; KIM, K. PRoPHET routing protocol based on neighbor node distance using a community mobility model in delay tolerant networks. *In: 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND COMMUNICATIONS & 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED AND UBIQUITOUS COMPUTING*, 10., 2013, Zhangjiajie. **Proceedings [...]**. Zhangjiajie: IEEE, 2013. p. 1233-1240. DOI: <https://doi.org/10.1109/HPCC.and.EUC.2013.175>.

SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 16, n. 1, p. 77-90, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNET.2007.897964>.

TEODORESCU, C. A.; DURNOI, A.-N. C.; VARGAS, V. M. The rise of the mobile internet: tracing the evolution of portable devices. **Proceedings of the International Conference on Business Excellence**, v. 17, n. 1, p. 1645-1654, 2023. DOI: <https://doi.org/10.2478/picbe-2023-0147>.

VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the OMNeT++ simulation environment. 2008. *In: INTERNATIONAL ICST CONFERENCE ON SIMULATION TOOLS AND TECHNIQUES FOR COMMUNICATIONS NETWORKS AND SYSTEMS*, 1., 2008, Marseille. **Proceedings [...]**.Marseille: ICST, 2008. DOI: <https://doi.org/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2008.3027>.

VIRDIS, A.; KIRSCH, M. (Eds.). **Recent Advances in Network Simulation: the OMNeT++ environment and its ecosystem**. Cham: Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12842-5>.

YANG, J.; QIAO, Y.; ZHANG, X.; HE, H.; LIU, F.; CHENG, G. Characterizing user behavior in mobile internet. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing**, v. 3, n. 1, p. 95-106, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2381512>.

ZANAJ, B; BELEGU, M.; RISTA, A. Simulating the mobile network behavior by applying DTN in ONE simulator of the use case of a real town communication. *In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODERN POWER SYSTEMS (MPS)*, 8., 2019, Cluj-Napoca. **Proceedings [...]**. Cluj-Napoca: IEEE, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759750>.

ZHAO, M.; WANG, W. Design and applications of a smooth mobility model for mobile ad hoc networks. *In: 2006 IEEE MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE (MILCOM 2006)*, 2006, Washington. **Proceedings [...]**.Washington: IEEE, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2006.302531>.

ZHENG, Z.; WANG, H.; GAO, S.; WANG, G. Comparison of multiple random walks strategies for searching networks. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2013, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/734630>.