

Análise da Capacidade de Entrega de uma Rede Oportunista no Transporte Público Urbano

Thiago A. Herek¹, Anelise Munaretto¹, Mauro S. P. Fonseca¹, Hermes I. Del Monego¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Curitiba – PR – Brasil

Abstract. *In this work, we present an extensive mobility model, using the data and traces of the real environment, representing all urban public transport lines of the city of Curitiba-PR, with the objective of analyzing the viability of its use as a platform for the construction of a VDTN. We used the simulator One and two traffic models, representing useful applications in the context of a VDTN. The simulations show that using only urban public transport vehicles in the city, it is possible to obtain expressive delivery rates and reach up to 99% of the vehicles.*

Resumo. *Neste trabalho, é apresentado um modelo de mobilidade projetado para a representação do transporte público urbano da cidade de Curitiba-PR, utilizando-o como plataforma na construção de uma rede veicular tolerante a atrasos e desconexões com o objetivo de analisar a viabilidade e os limites da rede. O simulador One em conjunto com dois modelos de tráfego foram utilizados, a fim de representar aplicações úteis no contexto de uma VDTN. As simulações realizadas demonstram que é possível obter taxas de entrega expressivas e atingir até 99% da frota, utilizando apenas os veículos do transporte público urbano da cidade.*

1. Introdução

As pesquisas em redes utilizando os meios de transporte surgiram pela demanda por aplicações de entretenimento e das necessidades de um sistema de trânsito mais inteligente, seguro e integrado. As redes veiculares ad-hoc (VANET's) são a resposta para essa demanda. Tais redes são compostas basicamente por veículos, os quais são responsáveis por viabilizar a comunicação entre V2V (veículo/veículo) e V2I (veículo/infraestrutura), atuando também como roteadores para a construção de uma rede auto-organizada [Michoud et al. 2012].

A construção de uma rede veicular depende principalmente de determinado número de agentes capazes de se comunicar utilizando a mesma tecnologia de transmissão sem fio, bem como os mesmos conjuntos de protocolos de rede e de roteamento. Neste cenário, ainda que todos os veículos de uma cidade estivessem aptos para essa comunicação – considerando as limitações de alcance dos sistemas dedicados de curta distância –, os possíveis membros dessa rede poderiam se encontrar dispersos em um ambiente com baixa densidade e conectividade.

A baixa densidade ocorre facilmente em autoestradas, entretanto o fenômeno citado também pode ser verificado na área urbana. Em algumas circunstâncias, é possível constatar um decréscimo da taxa de tráfego dos veículos. Essa redução pode acontecer

durante a madrugada, em finais de semana ou feriados, em bairros isolados e, ainda, na combinação destes e de outros fatores. Por outro lado, existem situações que proporcionam um aumento na densidade de veículos, como se observa em dias úteis, em horários de início ou encerramento do período laboral ou letivo, centros das cidades, em dias de shows ou eventos esportivos, etc.

Todas essas eventualidades que geram mudanças na quantidade de veículos que circulam nas cidades podem ocorrer de forma simultânea, alterando rapidamente as características e a conectividade da rede. Neste aspecto, as VANET's podem ser consideradas a classe mais dinâmica das redes móveis ad-hoc (MANET's), uma vez que a sua alta mobilidade e suas variações extremas de densidade tornam mais frequentes as mudanças de topologia [Luo et al. 2008]. Por esta razão, os protocolos de roteamento concebidos para as MANET's não oportunistas mostram-se, muitas vezes, inadequados para este contexto.

Na arquitetura de rede tolerante a atraso e desconexões (DTN's), as referidas alterações de densidade e os inevitáveis períodos de desconexões seriam admitidos. As DTN's utilizam o mecanismo conhecido como *store-carry-and-forward*, permitindo que os roteadores armazenem o conteúdo da transmissão, transportando este dado até que seja possível encaminhá-lo a outro roteador intermediário e, assim por diante, até que o dado chegue ao destino. Esta característica acrescenta a capacidade da rede ser tolerante a desconexões e viabiliza o uso de aplicações tolerantes a atraso [Ahmed et al. 2015].

Em um ambiente urbano, a frota de ônibus do transporte público pode ser utilizada para fornecer os membros principais de uma rede veicular oportunista. A vantagem de estar sob o controle de uma única organização, normalmente o governo municipal, favorece o esforço da implementação e permite o uso de diversas aplicações úteis para a administração e para os usuários, sem os custos de outras redes tais como as celulares (3G/4G).

Dentre essas aplicações, a rede oportunista pode ser utilizada para o monitoramento da frota ou mesmo no monitoramento ambiental, utilizando os veículos como plataformas de sensoriamento, bem como possibilitam o envio de informações úteis aos motoristas e passageiros (notícias, previsão do tempo, anúncios, etc). No âmbito dos sistemas de transporte inteligente (ITS), a estrutura ainda pode ser utilizada para otimização do controle de tráfego, avisos de congestionamentos, comunicação com sistemas de sinalização de trânsito, alertas de acidente e outras aplicações de segurança.

Desse modo, o principal objetivo deste trabalho é o estudo da viabilidade do uso do transporte público como plataforma para uma rede veicular tolerante a atrasos e desconexões (VDTN). O simulador One [Keränen et al. 2009] e os dados reais da cidade de Curitiba-PR foram utilizados na construção de um cenário de simulação abrangente, no qual foram empregadas algumas aplicações úteis e viáveis no ambiente de uma VDTN.

O conteúdo subsequente deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, são apresentados os trabalhos relacionados ao tema. A Seção 3 dispõe a construção do modelo de mobilidade, utilizando o traçado e demais dados reais do município de Curitiba-PR. A Seção 4 discute as aplicações viáveis no contexto VDTN e expõe as utilizadas na simulação com o modelo de mobilidade proposto. A Seção 5 analisa os resultados obtidos no estudo. Por fim, na Seção VI, são tecidas as conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

Diversos estudos anteriores a este trabalho exploram o uso do transporte urbano como plataforma para a construção de uma rede veicular tolerante a atrasos e desconexões.

O trabalho de [Huang et al. 2007] emprega a frota de táxis da cidade de Shanghai-China, para a construção de um ambiente VANET virtual, nomeada pelos autores como *Shanghai Urban Vehicular Network* ou (SUVnet). Os dados da frota de táxi, com mais de 4000 veículos, foram coletados por meio de um módulo GPS. Informações como a posição, a quantidade de veículos e velocidades foram utilizados para a construção do modelo de mobilidade realístico SUVnet. Adicionalmente, os autores apresentam os resultados de simulações utilizando o protocolo de roteamento Epidêmico, no qual confrontam os resultados obtidos do SUVnet com outros dois modelos de mobilidade: *Random Way Point* e *Simulation of Urban MObility* (SUMO) [Krajzewicz et al. 2012]. Em cada modelo foram obtidos resultados diferentes, sendo que a taxa de entrega obtida no modelo SUVnet apresentou-se inferior aos outros dois.

Os autores argumentam que, mesmo com o uso de um simulador complexo como o SUMO, deve-se ter cautela, pois os resultados obtidos com esses modelos podem não ser tão próximos da realidade como esperado.

Também em Shanghai, os pesquisadores [Sede et al. 2008] utilizam-se do transporte público da cidade para a construção de uma rede DTN, batizada pelos autores de BusNet. Os dados para a construção da rede foram coletados de aproximadamente 700 veículos equipados com GPS.

Na cidade do Rio de Janeiro, [Dias and Costa 2016] analisam a possibilidade da criação de redes tolerantes a atraso, utilizando dados reais do transporte público da cidade por meio de um comparativo do volume de transferência de dados entre determinadas regiões com o uso do meio físico (pendrive) e das redes sem-fio (802.11g).

Uma pesquisa extensa sobre a construção de ambientes veiculares em larga escala é realizado por [Uppoor et al. 2014]. O trabalho também apresenta um cenário sintético/realista para a cidade de Köln-Alemanha baseado nos dados disponibilizados pelo Instituto de Sistemas de Transporte do Centro Aeroespacial Alemão. Os autores também enfatizam o cuidado necessário na construção de modelos de mobilidade para avaliar cenários de rede DTN.

Diversos estudos advertem sobre a construção de modelos totalmente sintéticos, visto que estes podem não representar adequadamente o ambiente real, o que pode comprometer as avaliações de desempenho da rede.

Este estudo apresenta um ambiente de simulação abrangente, utilizando dados reais do tráfego, afim de proporcionar a avaliação do uso de veículos do transporte público para a construção de uma rede oportunista. Na Seção 3, são apresentados os detalhes do modelo de mobilidade.

3. Modelo de Mobilidade

O modelo de mobilidade é parte fundamental para uma avaliação confiável dos resultados das simulações. O estudo realizado por [Uppoor et al. 2014] descreve grande parte dos aspectos que devem ser considerados na modelagem. Neste trabalho, dados reais foram

utilizados para a construção de um modelo amplo, representando toda a rede de transporte público urbano da cidade.

Curitiba abrange uma área de aproximadamente 435 Km², é uma das maiores cidades do Brasil, sendo a maior do sul do País, com uma população total estimada de aproximadamente 1.893.000 habitantes [IBGE 2017]. O sistema viário contém 4.325Km de vias pavimentadas, das quais 1.183Km são cobertas pela rede de transporte coletivo, que possui +250 linhas e 1280 veículos em operação (os quais percorrem em média 303.707 Km por dia) [URBS 2017, IPUCC 2017].

No âmbito de uma VDTN, avaliando exclusivamente o transporte público urbano, muitas características colaboram para a construção de uma rede oportunista, tais como:

Cobertura e Capilaridade: Acesso a várias regiões da cidade, facilitando a entrega/transmissão de um dado de/para um bairro isolado, enquanto uma grande quantidade de veículos circulam por várias regiões simultaneamente;

Conectividade: O traçado compartilhado entre as linhas, paradas de ônibus e os terminais favorecem os encontros entre os veículos;

Relevância: O sistema transporta muitas pessoas que podem ser agentes de consumo e também fornecedores de informações para a rede;

Ainda que seja possível encontrar fontes de dados de outras cidades, escolhemos a cidade de Curitiba por ser considerada referência no Sistema de Transporte Público do país e também utilizada como modelo para outras cidades do mundo. O município também foi apontado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente em 2011, como uma das capitais com mais expressiva utilização do sistema de transporte público coletivo [ONU 2011].

Neste estudo, representamos todo o cenário do transporte público da cidade, apresentando todas as características reais de cada linha de ônibus. Dados como posição dos veículos, traçado das linhas e localização dos pontos foram fornecidos pela Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba (URBS) [URBS 2017].

O modelo do sistema de transporte público de Curitiba opera com faixas de horário que refletem na quantidade de veículos e linhas em operação. A Tabela 1 apresenta informações como distribuição de frota, quantidade de veículos, faixa de horário e velocidade de algumas dessas faixas, considerando aquelas que apresentam uma maior densidade de veículos durante todo o dia.

As faixas de horário P1 (5h30 às 8h30) e P3 (16h31 às 19h30) mostram maior concentração de veículos, em partes, por se tratar dos períodos de início e término do horário comercial e letivo, momentos que geram aumento na demanda por transporte.

Tabela 1. Faixas de Horários e Distribuição da Frota

Faixa	P1	P2	P3	P4
Período	05h30 - 8h30	11h31 - 14h00	16h31 - 19h30	22h31 - 23h00
Qtde. de Veículos	1280	807	1226	624
Qtde. de Linhas	268	245	262	245
Vel. Km/h	10,6 a 47,1	11,4 a 47,9	9,4 a 40,4	11,2 a 35,0

A velocidade apresentada na Tabela 1 demonstra a velocidade média operacional

mínima e máxima observadas em todas as linhas em suas respectivas faixa de horário. No ambiente de simulação, utilizamos a velocidade média correspondente a cada linha, bem como a quantidade média de veículos em operação em cada uma delas.

Para representar a malha viária do transporte público, convertemos e importamos o traçado de todas as linhas para um formato reconhecido pelo ONE (linhas identificadas na Figura 1).

Assim como qualquer rede viária, no transporte público, alguns trechos são compartilhados entre uma ou várias linhas que se cruzam, formando uma malha totalmente interligada. Esta característica favorece uma rede oportunista, haja vista que propicia o encontro entre os veículos e, conseqüentemente, as eventuais trocas de informação no contexto de uma VDTN. Neste sentido, sua rerepresentação é essencial para o modelo de mobilidade, portanto foi reproduzida de forma integral no ambiente de simulação.

Na Figura 1, temos do lado esquerdo a representação do traçado de todas as linhas de ônibus em operação.

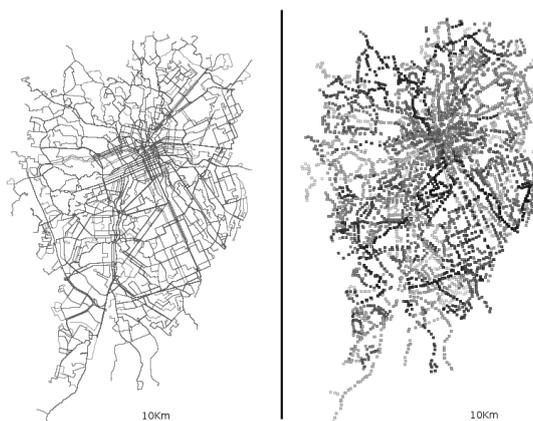


Figura 1. Do lado esquerdo, o traçado de todas as linhas do transporte público urbano de Curitiba. Do lado direito, a posição dos pontos de parada.

O sistema de transporte da cidade possui +6800 pontos de ônibus e o tempo médio de parada, de acordo com levantamentos fornecidos pela [URBS 2017], é de aproximadamente 15 segundos. No ambiente real, os veículos percorrem todos os pontos, porém realizam a parada somente caso algum passageiro solicitar o embarque ou desembarque.

Atualmente, não estão disponíveis informações que indicam a quantidade média de pontos em que os veículos de cada linha realizaram os embarques/desembarques. Em vista disso, consideramos como tempo de parada possível qualquer intervalo entre 0 e 15 segundos, que na prática é definido de forma aleatória para cada ponto, de acordo com as sementes utilizadas no simulador One.

A Figura 1, no lado direito, retrata a posição de todos os pontos de ônibus e, como esperado, revela um traçado muito próximo do apresentado do lado esquerdo da imagem. Por fim, as características do ambiente real utilizadas no modelo podem ser resumidas a seguir, considerando individualmente cada linha de ônibus:

- O traçado real;
- A posição real de cada ponto de parada;

- O número real de veículos para a faixa de horário;
- A velocidade operacional.

No ambiente de simulação VDTN, o modelo de mobilidade tem como propósito simular o movimento e reproduzir os contatos possíveis entre veículos, onde cada um percorre o seu caminho, transportando, re-encaminhando ou gerando dados previamente definidos. O modelo de tráfego também é parte importante para a avaliação, assim é necessário aplicar um padrão que represente uma aplicação factível para este tipo de cenário. Na próxima seção, apontamos algumas aplicações viáveis e apresentamos aquelas utilizadas nas avaliações deste trabalho.

4. Aplicações

Em um contexto de rede veicular oportunista, no qual possuímos interrupções constantes e um atraso relativamente alto, o uso de determinadas aplicações muitas vezes é inviável. Aplicações que necessitam de transmissões com baixa latência tais como o VOIP, a videoconferência, o acesso a vídeos e páginas web seriam inadequadas nessa situação.

Considerando as particularidades da arquitetura de redes oportunistas, ainda que alguns serviços não sejam viáveis, muitos outros são possíveis de serem utilizados por meio do uso de uma estrutura já existente, evitando assim o uso de redes convencionais dispendiosas, como a 3G/4G.

Aplicações para o auxílio da segurança, como avisos antecipados de acidentes, congestionamentos e outras condições adversas de tráfego, são um exemplo. O uso em sistemas de condução autônoma para sistemas de transportes inteligentes, na comunicação V2V ou com dispositivos de sinalização para a coordenação do trânsito, também é frequentemente citado em pesquisas na área [Tornell et al. 2013, Nasir et al. 2014, Jiang and Du 2015, de Souza et al. 2015].

Neste trabalho, definimos dois modelos de tráfego para a avaliação do uso do transporte público como plataforma para um rede oportunista. Nas subseções a seguir, detalhamos as características de cada uma delas.

4.1. Monitoramento de Frota

O monitoramento da frota é utilizado por diversas empresas de transporte. Os dados utilizados nesta pesquisa, por exemplo, foram obtidos por meio do monitoramento dos veículos que fazem uso de redes celulares para a transferência das informações. Entretanto, a contratação deste tipo de serviço pode gerar custos elevados. Em Curitiba-PR, entre março/16 e fevereiro/17, foram gastos aproximadamente R\$ 882.000,00 com os serviços de rede celular para tal fim.

Nesta aplicação, cada veículo precisa informar frequentemente dados importantes, a saber: posição geográfica, velocidade, consumo de combustível, temperatura do motor, entre outras informações. Consideramos que uma mensagem com essas informações é enviada por todos os ônibus de uma linha com destino a sua central, utilizando um volume de dados entre 1KB e 5KB. Para este modelo de tráfego, avaliamos o comportamento da rede com intervalos de envio de 15 a 1200 segundos, com um tempo de vida (TTL) de 90 minutos para todos os casos.

Dadas as limitações computacionais, não foi possível usar todas as linhas como origem de tráfego, o que tornaria a simulação inviável pelo tempo de processamento. Dessa forma, selecionamos as linhas 021, 304 e 505 como geradoras de dados, embora todos os 1280 veículos continuem presentes na simulação, servindo como intermediários para o transporte das mensagens no contexto de uma VDTN. A Figura 2 destaca o traçado das linhas geradoras de tráfego e a posição dos pontos de destinos das mensagens.

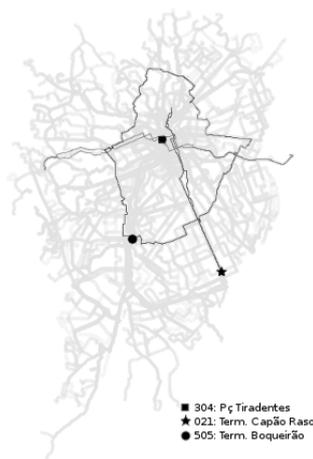


Figura 2. Linhas utilizadas para envio de dados: 304, 021 e 505 com traçado em destaque. Os terminais de destino dos dados, estão representados por símbolos sobre cada traçado.

Os pontos de destino foram determinados após análise dos itinerários. Para tanto, identificamos em cada linha utilizada como fonte o melhor ponto para a entrega dos dados. Os pontos foram classificados tendo em vista sua utilização, definindo, assim, que o melhor “ponto destino” é aquele utilizado pelo maior número de linhas. Essa estratégia se baseia na dinâmica de uma VDTN, pois quanto maior o número de veículos que passam pelo destino, maior será a possibilidade de entrega das mensagens. A Tabela 2 apresenta o resumo do modelo de tráfego.

4.2. Avisos e Notícias

O envio de informações úteis aos passageiros também é uma aplicação relevante no cenário do transporte público. Informações atualizadas como notícias, previsão do tempo, avisos de qualquer natureza com destino aos motoristas, cobradores e aos usuários podem ser enviados aos veículos da frota utilizando a rede oportunista.

Neste modelo de tráfego, um ponto único de origem foi determinado após análise do itinerário de todas as linhas. Assim sendo, identificamos que uma praça na área central da cidade (Praça Tiradentes) é um dos pontos com maior concentração de linhas, sendo considerada aqui o ponto com melhores oportunidades para a propagação das mensagens. A Figura 2 mostra a localização da praça utilizada nesta aplicação.

Uma mensagem com tamanho fixo de 50KB contendo dados com avisos e notícias foi enviada para todos os 1280 veículos em circulação. Para determinar a capacidade da rede, utilizamos periodicidades de envio de 30, 90 e 180 minutos, com um tempo de vida (TTL) de 180min em todos os casos. A Tabela 2 revela um resumo das características do modelo de tráfego citado, que intitulamos de *Avisos e Notícias*.

Tabela 2. Resumo das Aplicações Monitoramento e Avisos/Notícias

Aplicação	Monitoramento	Avisos/Notícias
Origem	Linhas: 021, 505 e 304	Praça Tiradentes
Destino	Term. Capão Raso, Boqueirão e Pç Tiradentes	1280 Veículos (Toda Frota)
Tamanho da Mensagem	1 a 5KB	50KB
Taxa de Envio	15 a 1200 segundos	30 a 180 minutos
TTL	90 minutos	180 minutos
Buffer	50MB	250MB

Na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos com cada aplicação.

5. Avaliação de Desempenho

Para todas as simulações dessa avaliação de desempenho, utilizamos as características do transporte público referentes à faixa de horário P1 (ver Tabela 1). O principal motivo para a escolha dessa faixa deve-se ao fato de esse período apresentar a maior quantidade de veículos no ambiente, o que favorece o número de encontros (consequentemente maior trocas de mensagens), correspondendo assim ao melhor caso entre os cenários.

Os dados utilizados para a construção das características do ambiente foram obtidas a partir dos registros de movimentos dos veículos, observados no período de 23 a 26 de maio de 2017, entre as 5h30min e as 24h.

Com base no modelo obtido a partir desses dados e nos modelos de tráfego expostos na Tabela 2, avaliamos o comportamento da rede com o protocolo de roteamento epidêmico e alcances de comunicação entre veículos de 200m a 1Km.

O protocolo de roteamento epidêmico apresentado por [Vahdat and Becker 2000], faz a disseminação de várias cópias do pacote na rede, aumentando a probabilidade de o dado ser entregue ao destino. Embora alguns problemas sejam criados por essa estratégia – a título de exemplo as múltiplas cópias, entregas fora de ordem, o alto uso dos buffers, entre outros –, escolhemos este protocolo por dispor de altas taxas de entrega, permitindo a avaliação da viabilidade no uso do transporte público de Curitiba na construção de uma VDTN. Do mesmo modo, os buffers estão dimensionados para suportar o armazenamento necessário gerado pelo protocolo e por cada modelo de tráfego sem impactar negativamente na rede.

Ao todo foram executadas 30 simulações para cada condição, ou seja, para cada raio de alcance entre 200m e 1Km e frequência de envio de dados, sendo que os resultados expressos nesta seção correspondem à média das 30 execuções com intervalo de confiança de 95%. A Tabela 3 contém as configurações utilizadas na simulação.

Nas subseções 5.1 e 5.2, são apresentados os resultados obtidos com o uso das aplicações *Monitoramento de frota* e *Avisos e Notícias*.

5.1. Resultados: Monitoramento

Nesse cenário de simulação, avaliamos a transmissão dos dados, seguindo o modelo exposto na Subseção 4.1, portanto utilizamos três linhas como origem (021, 304 e 505), representando uma aplicação de monitoramento da frota. Produzimos simulações com raio de alcance de 200m a 1Km e frequências de envio de 15 a 1200 segundos. Os resultados para as taxas de entrega em cada condição podem ser verificados na Figura 3.

Tabela 3. Parâmetros das Simulações

Parâmetro	Valor
Simulador	One
Tempo de Simulação	10800 segundos
Cenário	Trans. público urbano de Curitiba
Num. Veículos	1280
Velocidade	10Km/h ~ 47Km/h
Aplicação	Monitoramento / Avisos
Raio de Alcance	200m, 350m, 500m, 750m e 1Km
Taxa de Transmissão	11Mb/s
TTL	90min / 180min
Tamanho do Buffer	50MB / 250MB

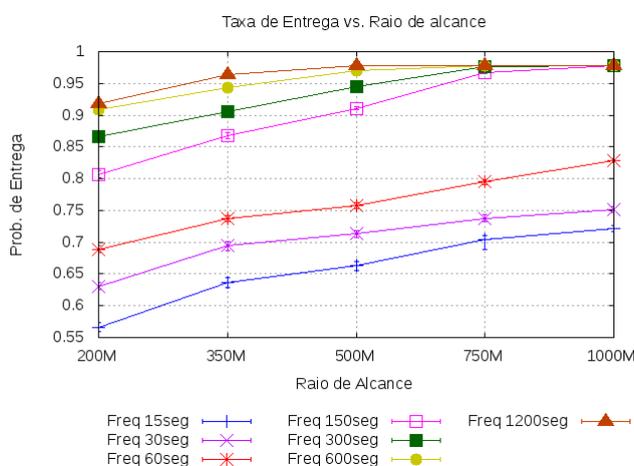


Figura 3. Resultados da taxa de entrega, para a aplicação *Monitoramento*, com frequências de comunicação de 15 a 1200 segundos e alcances de 200m a 1Km. O eixo Y representa a taxa de entrega das mensagens, enquanto o eixo X exibe o raio de comunicação dos veículos.

A taxa de entrega apresenta resultados melhores à medida que o alcance da comunicação entre veículos é ampliado. A elevação do raio de alcance possibilita um maior número de encontros entre os veículos, o que favorece a troca de mensagens e a entrega ao destino.

A Figura 3 também revela resultados melhores para a taxa de entrega, ao passo que o intervalo de transmissão é ampliado. Este comportamento decorre principalmente do atraso presente na rede. Uma vez que um maior período para a geração dos dados é utilizado, o número de mensagens transmitidas na rede é reduzido, permitindo que a quantidade de mensagens entregues em relação às mensagens geradas seja ampliada. Tal situação também pode ser verificada nas Figuras 4 e 5.

Na Figura 4(a), os resultados com intervalos de envio menores (15s), apresentam maior atraso e menor taxa de entrega comparados ao cenário com periodicidades de envio maiores – 1200s, Figura 4(c). Atrasos menores também são alcançados à medida que o raio de comunicação é ampliado.

É possível afirmar que os cenários cujo alcance seja superior podem realizar a entrega das mensagens com menor atraso e, portanto, entregar um número maior de mensagens no mesmo intervalo de tempo. Nas Figuras 5(a), 5(b) e 5(c), a relação entre as

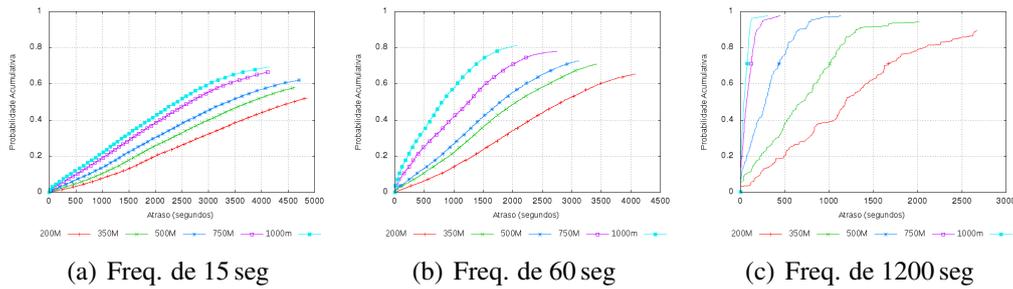


Figura 4. Probabilidade Acumulativa de Entrega vs Atraso, para os intervalos de envio de 15s, 60s e 1200s e alcances de comunicação de 200m à 1000m. O eixo X apresenta o atraso em segundos. No eixo Y temos a probabilidade acumulativa de mensagens entregues.

mensagens entregues e geradas é melhor evidenciada.

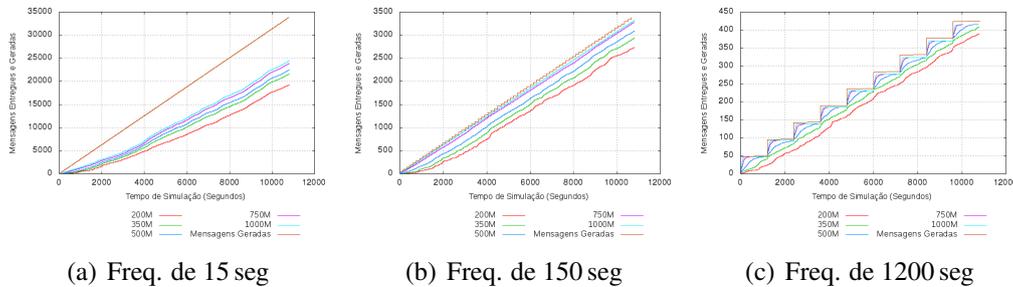


Figura 5. Mensagens entregues e geradas durante o tempo de simulação para intervalos de comunicação de 15s, 150s e 1200s e alcance de comunicação de 200m à 1Km. O eixo X representa o tempo de simulação e o eixo Y o número de mensagens entregues e geradas.

As figuras acima exibem as mensagens geradas e entregues no tempo de simulação. Ao passo que o intervalo de geração das mensagens é estendido de 15s para 1200s e o alcance da comunicação é ampliado de 200m para 1Km, a quantidade de mensagens entregues aproxima-se do volume de mensagens geradas.

Nas figuras 6(a), 6(b) e 6(c), é apresentada a distribuição do números de saltos utilizados para a entrega das mensagens. O eixo Y indica a frequência das ocorrências, enquanto o eixo X apresenta a quantidade de saltos utilizados. Nesse caso, a primeira coluna à esquerda representa apenas um salto. Os resultados mostram que, à medida que o raio de alcance é estendido, um número maior de saltos é utilizado para a entrega.

Em uma VDTN, os saltos representam o número de veículos utilizados para o transporte e encaminhamento da mensagem ao seu destino. Logo, a primeira coluna da figura 6 indica que o próprio veículo utilizado como origem realizou a entrega da mensagem.

Considerando que cada linha utilizada na simulação possui como destino um ponto dentro do seu percurso (ver figura 2), esses eventos ocorrem nos momentos em que os veículos se encontram próximos ao ponto de destino. Ainda assim, na figura 6(a), também é possível verificar maior uso de múltiplos saltos para a entrega, mesmo nos cenários desfavoráveis como o raio de alcance de 200m, revelando o uso efetivo da

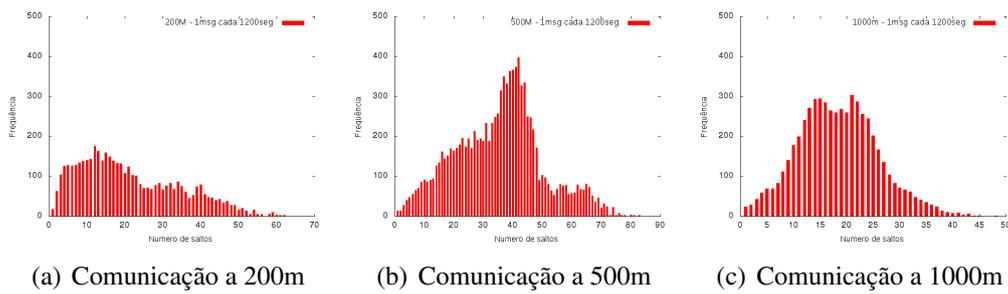


Figura 6. Distribuição do número de saltos para a entrega das mensagens. Geração das mensagens a cada 1200 segundos e alcance de comunicação de 200m à 1Km. O eixo Y apresenta a frequência das ocorrências, enquanto o eixo X apresenta o número de veículos utilizados para a entrega.

VDTN para os transportes das mensagens.

5.2. Resultados: Avisos e Notícias

Nesta seção, avaliamos o comportamento do ambiente na transmissão de dados utilizando modelo de tráfego detalhado na Seção 4.2. Esse modelo representa o envio de mensagens de avisos, notícias e outras informações úteis que podem ser transmitidas aos motoristas e passageiros, utilizando apenas um ponto como origem de tráfego e todos os 1280 veículos da frota como destino.

Foram realizadas simulações com raio de alcance de 200m a 1000m e periodicidades de comunicação de 30 min, 90 min e 180 min. Os resultados para as taxas de entrega em cada condição são apresentadas na figura 7.

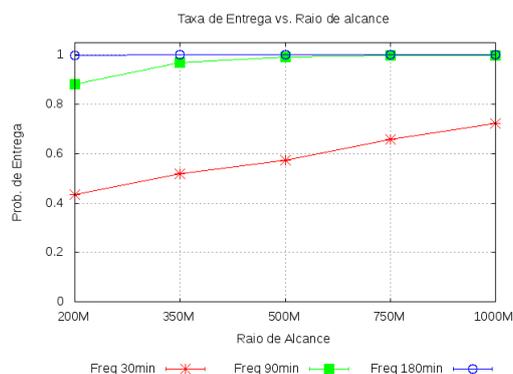


Figura 7. Resultados da taxa de entrega, para a aplicação *Avisos e Notícias*, com transmissão das mensagens a partir da Praça Tiradentes e destino a todos os 1280 ônibus, utilizando intervalos de comunicação de 30 min, 90 min e 180 min e alcances de 200m à 1000m.

O comportamento para a taxa de entrega expõe a mesma característica observada na Subseção 5.1, ou seja, melhores resultados são exibidos à medida que o alcance da comunicação é ampliado ou o intervalo de transmissão de dados é reduzido. O aumento do raio de alcance favorece o número de contatos e trocas das mensagens, que consequentemente contribui para sua entrega ao destino. Contudo, a limitação da frequência de envio dos dados produz melhores efeitos para taxa de entrega neste cenário.

Na figura 7, os resultados para o alcance de 200m passam de 43% para aproximadamente 100% de probabilidade de entrega, com a mudança da taxa de envio de 30 min para 180 min. A redução do número de transmissões melhora a proporção de mensagens entregues em relação às mensagens enviadas e, assim como observado na Subseção 5.1, essa proporção é afetada principalmente pelo atraso na rede.

No contexto de uma VDTN, a latência é um fator limitante para o envio dos dados, visto que, quanto maior o atraso observado, menor será a capacidade de a rede realizar a entrega das mensagens no mesmo intervalo de tempo. Nas figuras 8(a) a 8(c), podemos visualizar as probabilidades acumulativas da entrega em relação ao atraso.

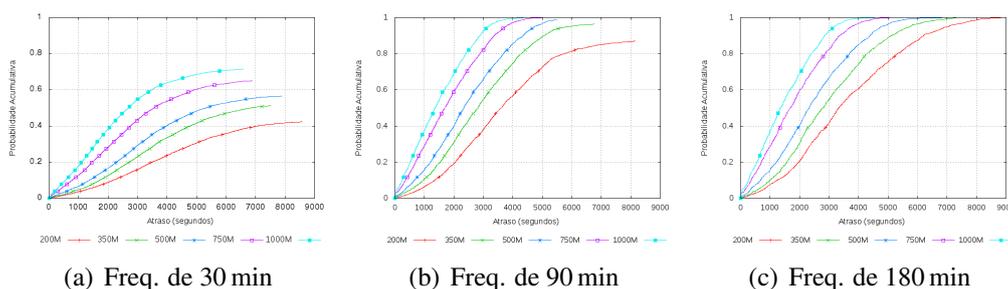


Figura 8. Probabilidade Acumulativa de Entrega vs Atraso. O eixo X identifica o atraso e o eixo Y a probabilidade acumulativa de mensagens entregues.

Considerando as figuras 8(a), 8(b) e 8(c) juntamente com as 4(a), 4(b) e 4(c), que evidenciam o atraso de cada aplicação avaliada neste trabalho, nota-se que o modelo de tráfego *Avisos e Notícias* apresenta uma latência superior. O fato de este modelo de tráfego enviar uma mensagem para cada veículo impõe dificuldades na entrega das mensagens para os veículos que circulam por bairros periféricos, distantes do ponto de origem da mensagem. No entanto, mesmo em um ambiente com grande atraso, como observado na figura 8(a), ainda é possível constatar o alcance e conectividade da VDTN.

A Tabela 4 apresenta o percentual médio alcançável da frota, o que expressa a parcela de veículos atingidos por ao menos uma mensagem durante o tempo de simulação de 3 horas.

Tabela 4. Frota Acessível

Raio de Comunicação	Taxa de Envio	% Frota Acessível
200m	30 min	98,82% ± 0,16
	90 min	99,95% ± 0,02
	180 min	99,96% ± 0,02
750m	30 min	100% ± 0,01
	90 min	100% ± 0,00
	180 min	100% ± 0,00

Os resultados denotados na Tabela 4 indicam um alcance de até 98,82% da frota, com intervalo de transmissão de 30min e até 99,96% para o intervalo de 180min, ambos com raio de alcance de 200m.

As figuras 9(a) a 9(c) apresentam as mensagens geradas e entregues durante o tempo de simulação e mostram que, à medida que o intervalo de geração das mensagens é estendido de 30 min para 180 min e o alcance da comunicação é ampliado, as mensagens entregues aproximam-se do volume de mensagens geradas.

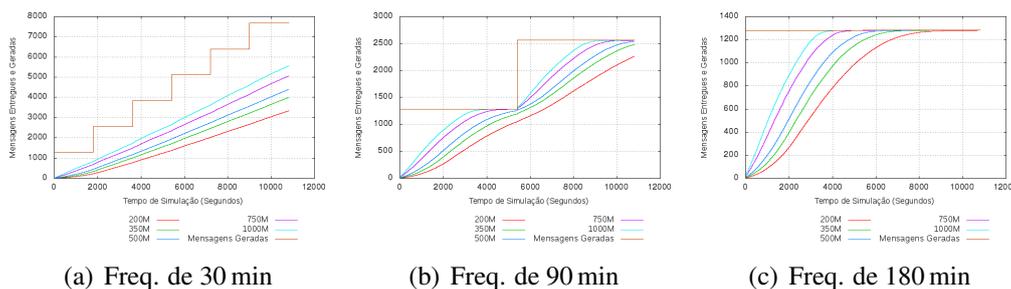


Figura 9. Mensagens entregues e geradas durante o tempo de simulação.

6. Conclusão

Neste trabalho, apresentamos a modelagem de um ambiente abrangente, utilizando dados e traçados reais, com o objetivo de avaliar o uso e os limites do transporte público urbano de Curitiba-PR, como plataforma para a construção de uma VTDN.

Analizamos duas aplicações úteis no contexto de uma rede veicular, empregando o protocolo de roteamento epidêmico. Os resultados mostram que uma VTDN composta apenas por veículos do transporte público da cidade é capaz de apresentar taxas de entrega superiores a 99%, atingindo até 99% da frota, mesmo que sejam aplicados alcances de comunicação conservadores como 200 metros, conforme exposto nas discussões da Subseção 5.2.

Na Subseção 5.1, os resultados para o modelo de tráfego *monitoramento* com alcance de 200m e envio de informações a cada 1200 seg constatam taxas de entrega superiores a 90% e atraso médio de aproximadamente 20 min.

A avaliação de uma rede VTDN deve considerar não apenas a taxa de entrega, mas principalmente o atraso explicitado, haja vista que as mensagens geradas no final da simulação não dispõem do tempo necessário para a entrega ao seu destino. Com base nos resultados apontados, entendemos que o uso do transporte público para a construção de uma VTDN é factível, tendo em vista que é possível atingir toda a frota, enviando mensagens de um único ponto. Assim, permite-se a transmissão de informações úteis aos usuários ou às centrais de controle, valendo-se de uma infraestrutura já existente, sem a necessidade de utilizar redes onerosas como 3G/4G. No entanto, como em qualquer VTDN, o ambiente possui limitações e as aplicações devem ser planejadas para admitir o atraso existente na rede.

Em trabalhos futuros, visto que há oportunidades de aperfeiçoamentos, pretende-se propor otimizações nos protocolos de roteamento com uso de técnicas para o aproveitamento das características do transporte público no intuito de aprimorar o uso da rede, permitindo o emprego de aplicações mais exigentes nestes ambientes.

Referências

- Ahmed, S. H., Kang, H., and Kim, D. (2015). Vehicular delay tolerant network (vtdn): Routing perspectives. In *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 898–903.
- de Souza, A. M., Guidoni, D., Botega, L. C., and Villas, L. A. (2015). Co-op: Uma solução para a detecção, classificação e minimização de congestionamentos de

- veículos utilizando roteamento cooperativo. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-(SBRC)*.
- Dias, D. S. and Costa, L. H. M. (2016). Análise da capacidade de dados de uma rede de ônibus urbanos. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-(SBRC)*.
- Huang, H. Y., Luo, P. E., Li, M., Li, D., Li, X., Shu, W., and Wu, M. Y. (2007). Performance evaluation of suvnet with real-time traffic data. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6):3381–3396.
- IBGE (2017). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IPUCC (2017). Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba.
- Jiang, X. and Du, D. H. (2015). Bus-vanet: a bus vehicular network integrated with traffic infrastructure. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7(2):47–57.
- Keränen, A., Ott, J., and Kärkkäinen, T. (2009). The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In *SIMUTools '09: Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, New York, NY, USA. ICST.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., and Bieker, L. (2012). Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3&4):128–138.
- Luo, P., Huang, H., Shu, W., Li, M., and Wu, M. Y. (2008). Performance evaluation of vehicular dtn routing under realistic mobility models. In *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 2206–2211.
- Michoud, R., Orozco, A. M., and Llano, G. (2012). Mobile ad-hoc routing protocols survey for the design of vanet applications. In *2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS)*, pages 1–6.
- Nasir, M. K., Shah, S. A. A., Qureshi, M. A., Oche, M., and Noor, R. M. (2014). Adapting geographical dtn routing for enhanced connectivity in partitioned vanets on highways. In *Region 10 Symposium, 2014 IEEE*, pages 105–110. IEEE.
- ONU (2011). *Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication*. United Nations Environment Programme.
- Sede, M., Li, X., Li, D., Wu, M. Y., Li, M., and Shu, W. (2008). Routing in large-scale buses ad hoc networks. In *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 2711–2716.
- Tornell, S. M., Calafate, C. T., Cano, J.-C., and Manzoni, P. (2013). Assessing the effectiveness of dtn techniques under realistic urban environments. In *Local Computer Networks (LCN), 2013 IEEE 38th Conference on*, pages 573–580. IEEE.
- Uppoor, S., Trullols-Cruces, O., Fiore, M., and Barcelo-Ordinas, J. M. (2014). Generation and analysis of a large-scale urban vehicular mobility dataset. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(5):1061–1075.
- URBS (2017). Companhia de Urbanizacao da Cidade de Curitiba.
- Vahdat, A. and Becker, D. (2000). Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical report.