

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

THIAGO ALEXANDRE HEREK

**ANÁLISE DE UMA REDE OPORTUNISTA NO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO E PROPOSTA DE NOVOS PROTOCOLOS DE
ROTEAMENTO ADAPTADOS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

THIAGO ALEXANDRE HEREK

**ANÁLISE DE UMA REDE OPORTUNISTA NO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO E PROPOSTA DE NOVOS PROTOCOLOS DE
ROTEAMENTO ADAPTADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Telecomunicações e Redes.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Anelise Munaretto

Co-orientador: Prof. Dr. Hermes Del Monego

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

H542a Herek, Thiago Alexandre
2018 Análise de uma rede oportunista no transporte público urbano e proposta de novos protocolos de roteamento adaptados / Thiago Alexandre Herek.-- 2018.
84 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telecomunicações e Redes, Curitiba, 2018.
Bibliografia: f. 71-74.

1. Redes veiculares ad hoc (Redes de computadores).
2. Transporte urbano - Curitiba (PR). 3. Computação tolerante a falhas. 4. Protocolos de roteamento (Protocolos de redes de computadores). 5. Redes ad hoc (Redes de computadores). 6. Redes de computação - Protocolos. 7. Simulação (Computadores). 8. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Fonseca, Anelise Munaretto, orient. II. Del Monego, Hermes Irineu, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 796

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Análise de uma Rede Oportunista no Transporte Público Urbano e Proposta de Novos Protocolos de Roteamento Adaptados**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Thiago Alexandre Herek**, no dia 13 de abril de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Telecomunicações e Redes, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Anelise Munaretto Fonseca - Presidente – (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Luis Henrique Maciel Kosmalski Costa - (UFRJ)

Prof(a). Dr(a). Mauro Sérgio Pereira Fonseca - (PUCPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 13 de abril de 2018.

RESUMO

HEREK, T.. ANÁLISE DE UMA REDE OPORTUNISTA NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO E PROPOSTA DE NOVOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO ADAPTADOS. 85 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Esta dissertação apresenta um modelo de mobilidade projetado para a representação de todo o transporte público urbano da cidade de Curitiba-PR. O modelo foi construído por meio do uso de dados reais e oferece melhores condições de avaliação da capacidade do ambiente como plataforma para a construção de uma VDTN e para o aprimoramento de protocolos de roteamento específicos para esse tipo de cenário. O trabalho também apresenta e avalia os protocolos *Spray and Wait Bus* e *Prophet-bus* como modificações dos protocolos originais *Spray and Wait* e *Prophet*. Os protocolos propostos utilizam-se das características do ambiente para melhor aproveitamento dos contatos, com o objetivo de aprimorar métricas tais como a taxa de entrega, o atraso e a sobrecarga. No protocolo *Prophet-Bus*, são alterados os mecanismos de atualização e envelhecimento da previsibilidade de entrega, modificando o comportamento destas funções nos veículos que possuem contato com o destino ao longo de seu percurso; já no protocolo *Spray and Wait Bus*, são acrescentadas decisões de encaminhamento inexistentes no protocolo original, explorando da mesma forma as características do transporte público urbano. Resultados obtidos com o Simulador One utilizando um modelo de tráfego que representa uma aplicação de monitoramento de frota, em conjunto com o modelo de mobilidade e os protocolos propostos, apresentam em primeira análise taxas de entrega de até 100% em algumas configurações do ambiente. O resultado demonstra a viabilidade do uso da mobilidade dos veículos do transporte público urbano da cidade para o transporte eficaz de informações. Os resultados também demonstram que os protocolos propostos são capazes de apresentar taxas de entrega mais elevadas, e menor sobrecarga em todas as condições testadas em comparação aos protocolos originais.

Palavras-chave: Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos, Redes Ad-hoc oportunistas, Protocolo de Roteamento

ABSTRACT

HEREK, T.. ANALYSIS OF AN OPPORTUNISTIC NETWORK IN URBAN PUBLIC TRANSPORT AND PROPOSAL OF NEW ADAPTIVE ROUTING PROTOCOLS. 85 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

This dissertation presents a mobility model designed for the representation of all urban public transport in the city of Curitiba-PR. The model is built using real data and offers better conditions of evaluation of the capacity of the environment as a platform for the construction of a VDTN and for the improvement of routing protocols specific to this type of scenario. The work also presents and evaluates the *Spray and Wait-Bus* and *Prophet-bus* protocols, as modifications of the original *Spray and Wait* and *Prophet* protocols. The proposed protocols use the characteristics of the environment to make better use of the contacts, in order to improve metrics such as delivery rate, delay and overload. In the Prophet-Bus protocol, the mechanisms of updating and aging of the delivery predictability are changed, altering the behavior of these functions in the vehicles that have contact with the destination along its route, already in the protocol Spray-and-Wait-Bus, are added routing decisions, nonexistent in the original protocol, exploring in the same way the characteristics of urban public transportation. Results obtained with Simulator One, using a traffic model representing a fleet monitoring application, together with the mobility model and the proposed protocols, first present delivery rates of up to 100% in some configurations of the environment. This result demonstrates the feasibility of using the mobility of urban public transport vehicles in the city for the efficient transportation of information. The results also demonstrate that the proposed protocols are capable of presenting higher delivery rates and lower overhead in all conditions tested compared to the original protocols.

Keywords: Vehicular Delay and Tolerant Network, Opportunistic Ad-hoc Network, Routing Protocol

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Arquiteturas VANET's.	17
FIGURA 2	– Arquitetura WAVE.	18
FIGURA 3	– Espectro e canais DSRC	19
FIGURA 4	– Pilha de protocolos de um nó DTN.	23
FIGURA 5	– Formato do Agregado.	23
FIGURA 6	– Transferência de Custódia	26
FIGURA 7	– Classificação dos Protocolos	29
FIGURA 8	– Processo de Inundação do Protocolo Epidêmico	32
FIGURA 9	– Decisão de Encaminhamento do Prophet	33
FIGURA 10	– $P_{\text{encounter}}$: função do intervalo de tempo entre as atualizações	34
FIGURA 11	– Estratégia de pulverização normal do protocolo Spray and Wait	36
FIGURA 12	– Estratégia de pulverização binária do protocolo Spray and Wait	37
FIGURA 13	– Traçado do itinerário das linhas do transporte público urbano de Curitiba-PR.	40
FIGURA 14	– Cobertura do transporte público em Curitiba-PR.	41
FIGURA 15	– Correção da posição dos pontos de ônibus.	41
FIGURA 16	– Pontos de parada do transporte público de Curitiba-PR.	42
FIGURA 17	– Posições de um veículo no decorrer do tempo.	43
FIGURA 18	– Localização do ponto utilizado como destino das mensagens no mapa da cidade de Curitiba-PR.	45
FIGURA 19	– Mecanismo de envelhecimento do Protocolo <i>Prophet</i>	48
FIGURA 20	– Fluxograma da proposta de alteração do Protocolo Prophet-Bus.	50
FIGURA 21	– Fluxograma da proposta de alteração do Protocolo Spray and Wait Bus.	52
FIGURA 22	– Taxa de entrega dos protocolos Prophet e Prophet-Bus para 15min, 45min e 90min.	56
FIGURA 23	– Taxa de entrega dos protocolos Prophet e Prophet-Bus.	56
FIGURA 24	– Atraso médio dos protocolos Prophet e Prophet-Bus para 15min, 45min e 90min.	57
FIGURA 25	– Atraso médio para os protocolos Prophet e Prophet-Bus.	58
FIGURA 26	– Sobrecarga dos protocolos Prophet e Prophet-Bus para 15min, 45min e 90min.	58
FIGURA 27	– Sobrecarga média dos protocolos Prophet e Prophet-Bus.	59
FIGURA 28	– Taxa de entrega dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus para 15min, 45min e 90min.	60
FIGURA 29	– Taxa de entrega dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus. .	61
FIGURA 30	– Atraso médio dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus para 15min, 45min e 90min.	62
FIGURA 31	– Atraso médio para os protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus.	62
FIGURA 32	– Sobrecarga dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus para 15min, 45min e 90min.	63
FIGURA 33	– Sobrecarga média dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus.	64
FIGURA 34	– Taxa de entrega para os protocolos Spray and Wait Bus e Prophet-Bus. .	64

FIGURA 35	– Atraso médio para os protocolos Spray and Wait Bus e Prophet-Bus. . . .	65
FIGURA 36	– Sobrecarga média para os protocolos Spray and Wait Bus e Prophet-Bus.	66
FIGURA 37	– Mapa da probabilidade média de entrega por linha com Protocolo <i>Prophet-Bus</i>	84
FIGURA 38	– Mapa da probabilidade média de entrega por linha com Protocolo <i>Spray and Wait-Bus</i>	84
FIGURA 39	– Mapa da probabilidade média de atraso por linha com Protocolo <i>Prophet-Bus</i>	85
FIGURA 40	– Mapa da probabilidade média de atraso por linha com Protocolo <i>Spray and Wait-Bus</i>	85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Parâmetros e valores recomendados pela RFC 6693	33
TABELA 2	–	Faixas de Horários e Distribuição da Frota	43
TABELA 3	–	Resumo do Modelo de Tráfego	45
TABELA 4	–	Parâmetros das Simulações	54
TABELA 5	–	Parâmetros dos Protocolos	54
TABELA 6	–	Dados das Linhas 1 a 165	76
TABELA 7	–	Dados das Linhas 166 a 266	77
TABELA 8	–	Dados das Linhas 270 a 393	78
TABELA 9	–	Dados das Linhas 461 a 542	79
TABELA 10	–	Dados das Linhas 545 a 641	80
TABELA 11	–	Dados das Linhas 642 a 720	81
TABELA 12	–	Dados das Linhas 721 a 916	82
TABELA 13	–	Dados das Linhas 917 a Z03	83

LISTA DE SIGLAS

VANET	<i>Vehicular Ad hoc Network</i> – Rede Ad Hoc Veicular
DTN	<i>Delay Tolerant Network</i> – Redes Tolerante a Atraso
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i> – Veículo para Veículo
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i> – Veículo para Infraestrutura
V2P	<i>Vehicle-to-Passenger</i> – Veículo para Passageiro
RSU	<i>Road Side Unit</i> – Unidades de Beira de Estrada
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
WAVE	<i>Wireless access in vehicular environments</i> – Acesso sem fio para ambientes veiculares
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communications</i> – Comunicação Dedicada de Curta Distância
FCC	<i>U.S. Federal Communication Commission</i>
ITS	<i>Intelligent Transport System</i> – Sistema Inteligente de Transporte
IPNSIG	InterPlaNetary Internet Special Interest Group
DTNRG	Delay-Tolerant Networking Research Group
IRTF	Internet Research Task Force
ADU	<i>Application Data Units</i> – Unidade de Dados de Aplicativos
EID	<i>Endpoint Identifier</i> – Identificador de Ponto Final
URI	<i>Uniform Resource Identifier</i> – Identificador Uniforme de Recursos
IANA	<i>Internet Assigned Numbers Authority</i> – Autoridade para Atribuição de Números da Internet
DTN	<i>Disruption/Delay Tolerant Network</i> – Rede Tolerante a Atraso
VDTN	<i>Vehicular Delay and Tolerant Network</i> – Rede Veicular Tolerante a Atraso
One	<i>Opportunistic Network Environment</i> – Ambiente de Rede Oportunista
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i> – Notação de Objeto JavaScript
WKT	Well-known text
GIS	<i>Geographic Information System</i> – Sistema de Informação Geográfica
FIFO	<i>First In, First Out</i> – Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO	16
2.1	REDES VEICULARES AD HOC	16
2.1.1	Arquiteturas de Comunicação	16
2.1.2	Camada Física	17
2.1.3	Aplicações	19
2.2	REDES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES	20
2.2.1	Arquitetura	21
2.2.2	Camada de Agregação	23
2.2.3	Transferência de Custódia	25
2.3	REDES VEICULARES OPORTUNISTAS	27
2.4	ROTEAMENTO EM DTN	28
2.4.1	Inundação	28
2.4.2	Determinista e Estocástico	29
2.4.3	Baseado em Informações	29
2.4.4	Baseado em Incentivos	30
2.5	PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DTN	31
2.5.1	Epidêmico	31
2.5.2	Prophet	32
2.5.3	First Contact	35
2.5.4	Spray and Wait	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	CENÁRIO	38
3.2	MODELO DE MOBILIDADE	39
3.2.1	Importação do Cenário	39
3.2.2	Extração de Dados Estatísticos	42
3.3	MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS	44
4	PROTOCOLOS APRIMORADOS	47
4.1	PROPHET-BUS	47
4.2	SPRAY AND WAIT BUS	50
5	AValiação DE DESEMPENHO	53
5.1	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	54
5.2	PROPHET VS PROPHET-BUS	55
5.3	SPRAY AND WAIT VS SPRAY AND WAIT BUS	60
5.4	SPRAY AND WAIT BUS VS PROPHET-BUS	64
6	CONCLUSÃO	67
7	TRABALHOS FUTUROS	70
7.1	SUPRESSÃO DE ENCAMINHAMENTO E LIMPEZA DO BUFFER	70

7.2	GESTÃO DE PRIORIDADE DA FILA	70
7.3	ARQUITETURA COM RSU'S	71
	REFERÊNCIAS	72
	Anexo A – DADOS DAS LINHAS	76
	B – MAPAS DE ENTREGA E ATRASO	84

1 INTRODUÇÃO

Os automóveis são o meio de locomoção mais utilizado em todo o mundo, transportando bilhões de pessoas diariamente. No Brasil, em 2017, foi estimada uma frota de 96 milhões de veículos, resultado de um crescimento expressivo a cada ano (DENATRAN, 2017). Em grandes centros urbanos, esse número excessivo de automóveis causa diversos problemas como congestionamentos, acidentes e poluição. Tais transtornos são agravados principalmente em cidades, onde as políticas públicas priorizam o meio de transporte individual em detrimento do transporte coletivo.

As redes fundamentadas nos meios de transporte tornaram-se objeto de diversas pesquisas, sendo o efeito das atuais demandas por aplicações de entretenimento e da necessidade de um sistema de trânsito mais seguro, integrado e inteligente. A rede ad-hoc veicular (VANET) representa uma proposta promissora a qual é composta principalmente por veículos responsáveis por viabilizar a comunicação entre veículo-e-veículo e veículo-e-infraestrutura, agindo também como roteadores para a construção de uma rede auto-organizada (MICHLOUD et al., 2012).

Os veículos participantes dessas redes veiculares devem ser capazes de se comunicarem utilizando a mesma tecnologia de transmissão sem-fio, bem como os mesmos conjuntos de protocolos de rede. Nesse contexto, ainda que todos os automóveis de uma cidade estivessem aptos para essa comunicação – considerando as limitações de alcance das transmissões sem fio e os obstáculos presentes no meio urbano –, os membros viáveis dessa rede poderiam encontrar-se dispersos em um ambiente sem conectividade, apresentando uma conexão intermitente, criando diversas redes dispersas e isoladas.

Nessa perspectiva, os protocolos de roteamento concebidos para as redes móveis não oportunistas, muitas vezes, mostram-se inadequados para o contexto de uma rede veicular. Embora sejam capazes de se adaptar às mudanças de topologia, dependem principalmente de uma rota ativa para o encaminhamento do dado, ou seja, é necessário que os roteadores utilizados como próximo salto estejam ao alcance para a comunicação sem fio, mantendo uma conexão fim-a-fim. Do contrário, o dado será descartado.

Na arquitetura de rede tolerante a atraso e desconexões (DTN), a alta mobilidade dos veículos e as desconexões são admitidas. Utilizando o mecanismo conhecido como *store-carry-and-forward*, as DTN's possibilitam que os roteadores armazenem o conteúdo da transmissão, transportando esse dado até que seja possível encaminhá-lo a outro roteador intermediário e assim por diante, até que o dado chegue ao destino. Assim, mesmo que um agente da rede não tenha contato imediato com outro, pode-se utilizar a sua mobilidade e os possíveis encontros com outros agentes para o repasse dos dados. Essa característica habilita a capacidade de a rede ser tolerante a desconexões e permite o uso de aplicações tolerantes a atraso (AHMED et al., 2015).

Os veículos presentes em uma cidade são compostos basicamente por automóveis leves e pesados de propriedade particular e por veículos do transporte público como metrô e ônibus. A implantação de uma rede veicular em uma cidade é dependente da renovação de grande parte dessa frota, com capacidade de comunicação sem fio ou da implantação dos dispositivos na frota existente, o que pode estender o esforço de implementação em vários anos.

Os veículos do transporte público, por outro lado, estão sob controle de uma única organização, o que favorece o esforço de implementação de uma rede veicular e permite o uso de diversas aplicações tolerantes a atraso, úteis para a administração pública e aos usuários, sem os custos de outras redes de dados como a celular 3G/4G. Além disso, possuem características particulares de tráfego que também contribuem para isso, como traçados pré-definidos, pontos de parada e padrões de velocidade.

Dentre esses veículos, os ônibus, em especial, estão presentes em todos os espaços das cidades, dos bairros centrais aos periféricos, o que também promove o seu uso como membros de uma rede oportunista. Nesse sentido, este trabalho sugere o uso desses veículos como plataforma para a construção de uma rede veicular tolerante a atrasos e desconexões (VDTN).

1.1 MOTIVAÇÃO

O transporte público possui diversas particularidades que o tornam uma solução promissora para a construção de redes veiculares (ACER et al., 2011). Entre as características que favorecem o seu uso, considerando especialmente as linhas de ônibus, podemos citar:

Relevância: Transportam milhares de pessoas diariamente, que podem ser agentes de consumo e também fornecedores de informações para uma rede.

Cobertura: É naturalmente projetado para a cobertura de grande parte das cidades, utilizando muitos veículos simultaneamente, o que facilita a entrega/transmissão de um dado

de/para um bairro isolado.

Conectividade: O traçado compartilhado e a integração entre as linhas, paradas de ônibus e os terminais favorecem os encontros entre os veículos e as trocas de mensagens.

Predisposição: O controle da frota por parte dos órgãos públicos e a independência de infraestrutura adicional colaboram para o esforço de implementação.

Mesmo com as diversas propriedades que contribuem para a sua utilização, não há garantias de uma conexão fim-a-fim que permitam o uso de protocolos baseados em redes não oportunistas. Portanto, diversos trabalhos exploram a sua aplicabilidade na construção de redes VDTN, onde os ônibus do transporte público são utilizados (SEDE et al., 2008; MONTEIRO et al., 2015; ACER et al., 2011; DIAS; COSTA, 2016).

Em alguns estudos, os cenários utilizados nas simulações e avaliações representam apenas uma porção da frota de veículos existentes ou pequenas partes de uma cidade. No entanto, no contexto de uma rede VDTN, o uso de cenários completos são indispensáveis para uma avaliação confiável dos resultados, uma vez que os carros e os traçados não representados podem afetar os encontros entre os veículos e seus efeitos, interferindo no desempenho e análise dos protocolos e também da viabilidade dos próprios cenários. Por esta razão, a presente dissertação propõe a construção de um modelo amplo que considere todas as linhas e veículos do transporte público urbano da cidade de Curitiba-PR.

O modelo proposto é utilizado no estudo da viabilidade do uso dos ônibus para a construção de uma rede veicular, que pode proporcionar o meio para o fornecimento de aplicações úteis destinadas à administração pública e aos usuários. Além disso, este trabalho também tem como motivação a proposta de alterações em alguns protocolos, beneficiando-se das características do ambiente, a fim de buscar o aprimoramento de algumas métricas.

1.2 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a construção e a aplicação de um modelo de mobilidade representando o transporte público urbano da cidade de Curitiba-PR, abrangendo todas as linhas e ônibus em operação, no intuito de fornecer um cenário completo para a avaliação de seu uso na construção de uma rede VDTN.

Além disso esta dissertação visa o aprimoramento dos protocolos *Prophet e Spray and Wait*, explorando as características do transporte público para a melhoria de métricas como taxa de entrega, atraso e sobrecarga.

Em particular, o presente estudo propõe-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Extrair as informações e as estatísticas necessárias para a construção de um modelo de mobilidade que represente o transporte público, utilizando os dados do traçado real de cada ônibus;
- Identificar as características do cenário que podem ser utilizadas para o aprimoramento dos protocolos de roteamento;
- Desenvolver alterações em protocolos de roteamento que utilizem as características do cenário;
- Realizar estudos via simulações para avaliação do desempenho dos protocolos, utilizando o modelo de mobilidade proposto;
- Explorar a viabilidade do uso do transporte público urbano como plataforma para a construção de uma VDTN.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação está organizada em sete capítulos. Apresentada a introdução no capítulo 1, o segundo capítulo descreve os conceitos das redes veiculares, oportunistas e protocolos de roteamento incluindo seus principais desafios. O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, além dos detalhes de construção do modelo de mobilidade representando o transporte público da cidade. O quarto capítulo descreve os protocolos *Prophet-Bus* e *Spray and Wait-Bus* propostos nesta dissertação. No quinto capítulo são apresentados os parâmetros de simulação, métricas de desempenho, seguidos da avaliação dos protocolos *Prophet-Bus* e *Spray and Wait-Bus*, bem como dos originais utilizados como base para o desenvolvimento. O sexto capítulo revela as conclusões e, finalmente, no sétimo capítulo são suscitadas algumas propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Este capítulo tece uma revisão de literatura acerca dos temas abordados neste trabalho. A seguir, serão exibidos os conceitos das redes veiculares e oportunistas. Por fim, conclui-se o capítulo com a apresentação dos principais protocolos de roteamento oportunistas.

2.1 REDES VEICULARES AD HOC

No início de 1970, o projeto *Packet Radio Network* iniciou estudos no contexto de um ambiente militar para investigar a viabilidade do uso de redes via rádio na comunicação entre computadores e hosts móveis, dando início à exploração das redes móveis ad hoc (KAHN, 1977). Atualmente, o acesso a dispositivos portáteis com capacidade para comunicação sem fio tem incentivado as pesquisas em redes dinâmicas e auto-organizadas, conhecidas como *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs).

As MANET's são redes dinâmicas e auto-organizáveis, nas quais os nós se comunicam por meio de ondas de rádio sendo responsáveis pelo roteamento da rede, sem a necessidade de uma infraestrutura pré-existente (ISMAIL; JA'AFAR, 2007).

O uso do conceito das MANET's no ambiente veicular configura o que é usualmente chamado de *Vehicle Ad Hoc Networks* (VANET's) (MICHOUUD et al., 2012), em que os veículos são os principais agentes da rede e também fazem o papel de roteadores em uma comunicação de rede sem-fio.

2.1.1 ARQUITETURAS DE COMUNICAÇÃO

Nas VANET's, os veículos podem se comunicar via rádio, por meio de quatro arquiteturas diferentes: *Vehicle-to-Vehicle* (V2V); *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I); Híbrida e *Vehicle-to-Passenger* (V2P) (KAKKASAGERI; MANVI,).

Na arquitetura V2V, os veículos realizam a comunicação entre si utilizando apenas os vizinhos ao alcance, onde todos são responsáveis pelo roteamento, encaminhando os dados por

meio de múltiplos saltos até o destino. Neste caso, não há qualquer infraestrutura de apoio, sendo uma rede auto-organizada, autogerenciável e dependente da alta densidade de veículos nas vias, o que muitas vezes não é obtido. A representação dessa arquitetura é ilustrada na figura 1a.

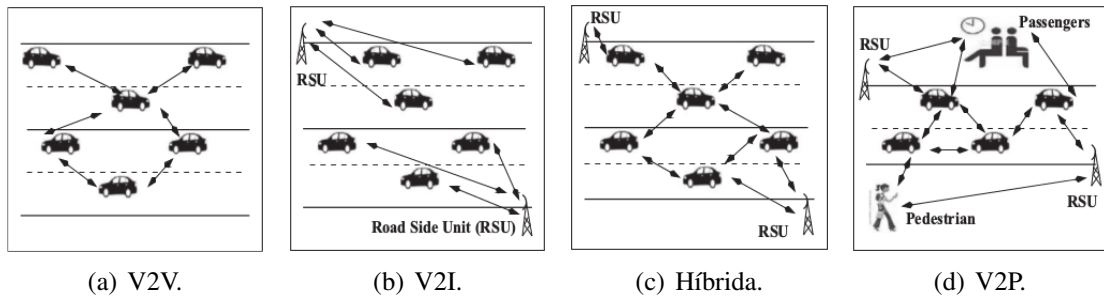


Figura 1: Arquiteturas VANET's.

Fonte: (KAKKASAGERI; MANVI,).

A arquitetura V2I utiliza dispositivos fixos conhecidos como *Road Side Unit* (RSU) para prover a infraestrutura centralizada e a comunicação na rede. Nessa arquitetura, todo o tráfego é direcionado para as RSU's, conforme apresentado na figura 1b. O uso da V2I pode ampliar a conectividade e fornecer acesso a outras redes, como a Internet, além de viabilizar aplicações que necessitam de informações originalmente inexistentes no ambiente veicular. Entretanto, depende de um grande número de dispositivos para se obter uma cobertura efetiva, o que pode aumentar consideravelmente o custo e tornar inviável a sua implantação.

Na arquitetura híbrida, as estruturas V2V e V2I são combinadas. A quantidade de unidades RSU's pode ser reduzida, provendo o acesso a redes externas, ampliando o alcance ou fornecendo cobertura em locais com baixa densidade, enquanto os veículos ainda possuem comunicação direta com seus vizinhos. É possível visualizar a representação dessa arquitetura na figura 1c.

Já na arquitetura V2P, acrescentam-se os passageiros e os pedestres como membros de uma rede veicular híbrida, conforme ilustrado na figura 1d. A arquitetura citada amplia a conectividade e a densidade da rede, permitindo a comunicação direta entre passageiros, veículos e pedestres que poderiam se conectar à rede veicular por meio de dispositivos pessoais.

2.1.2 CAMADA FÍSICA

O grupo de trabalho 1609 (*Dedicated Short Range Communication Working Group*) do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) desenvolve a arquitetura para a pilha de

protocolo exclusivamente adaptada para ambientes VANET's, conhecida como WAVE (*Wireless access in vehicular environments*), composta por cinco padrões principais: IEEE 802.11p, IEEE 1609.1, IEEE 1609.2, IEEE 1609.4 e IEEE 1609.4 conforme ilustrado na figura 2 (GRAFLING et al., 2010).

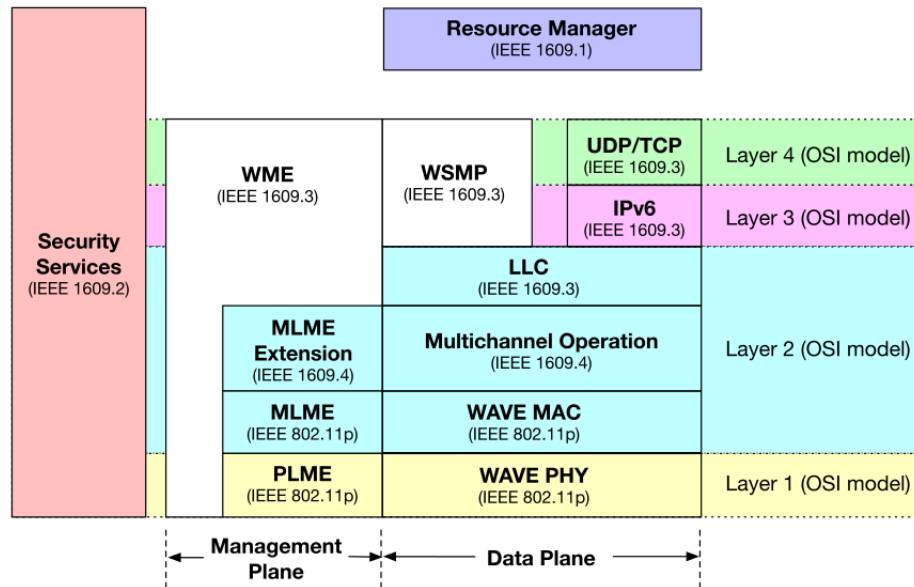


Figura 2: Arquitetura WAVE.

Fonte: (AWANG et al., 2017).

O padrão 802.11p é desenvolvido com base no 802.11a para sustentar a comunicação sem fio ad hoc em ambientes V2V e V2I, definindo a operação da camada física e do controle de acesso ao meio (MAC). O padrão também incorpora as definições das Comunicações dedicadas de curta distância – sigla em inglês (DSRC) definida pela *U.S. Federal Communication Commission* (FCC) (AWANG et al., 2017).

O DSRC descreve a alocação do espectro dedicado para comunicação veicular, definindo uma largura de 75MHz que abrange do 5.850 GHz até 5.925 GHz, em que os primeiros 5 MHz são reservados para evitar sobreposição das comunicações adjacentes. Conforme mostrado na figura 3, o espectro restante é dividido em 7 canais de 10MHz, reservando o canal 178 para comunicações de controle e os canais nas extremidades 172 e 184, para aplicações de segurança, enquanto os demais estão disponíveis para os outros serviços (JIANG; DELGROSSI, 2008).

No padrão IEEE 1609.4, é definida a utilização dos múltiplos canais, especificando as potências de transmissão e priorização para cada um deles. A título de exemplo, o canal 178 de controle possui uma potência de transmissão máxima maior, enquanto os canais de aplicações

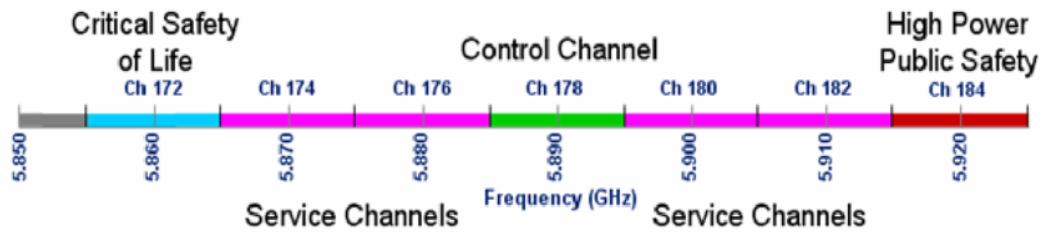


Figura 3: Espectro e canais DSRC

Fonte: (AWANG et al., 2017)

174,176,180 e 184 possuem definições de potência menores.

As camadas 3 (rede) e 4 (transporte) são especificadas no padrão IEEE 1609.3 que fornece suporte aos serviços de endereçamento, roteamento e conectividade sem fio entre os dispositivos da rede veicular. No padrão IEEE 1609.2, questões de segurança como formato e processamento das mensagens são definidas, incluindo métodos para proteger mensagens de gerenciamento. Finalmente no padrão IEEE 1609.1 são definidas a coordenação da comunicação entre veículos e as unidades RSU, utilizando aplicativos WAVE, conhecidos como gerenciador de recursos (AWANG et al., 2017).

2.1.3 APLICAÇÕES

O objetivo principal da VANET é prover a comunicação confiável entre veículos, permitindo que troquem informações entre si, a fim de fornecer suporte a diversas aplicações.

A proposta da (ITS) (*Intelligent Transport systems*) baseia-se na melhoria da segurança viária e da mobilidade urbana utilizando principalmente a rede VANET para a gestão, monitoramento e cooperação entre veículos e sistemas inteligentes de sinalização de trânsito.

Além do contexto ITS, a VANET também fornece oportunidades para o desenvolvimento de diversas aplicações destinadas diretamente aos passageiros. A variedade dessas aplicações permite que sejam classificadas em três categorias, de acordo com suas funcionalidades: segurança, eficiência e informações (MICHOUD et al., 2012).

Na âmbito da segurança, aplicações de avisos antecipados de acidentes, condições adversas das estradas ou ambientais, notificações e alertas de sinalização podem ser utilizados para auxiliar o condutor a tomar ações antecipadas e evitar acidentes. Estes recursos também podem ser utilizados nas recentes pesquisas e no desenvolvimento da condução autônoma, auxiliando os veículos em avisos antecipados de mudanças de faixa, redução de velocidade e conversões,

em colaboração com os demais veículos autônomos, além do auxílio nas tomadas de decisão, garantindo a segurança dos passageiros.

Ainda referente à segurança, o rastreamento dos veículos pode auxiliar na segurança pessoal e a reduzir os problemas inerentes às grandes metrópoles brasileiras, como assaltos e sequestros, embora o rastreamento também possa trazer problemas de privacidade.

Na área da eficiência, a gestão do tráfego com a integração das sinalizações de trânsito, planejamento da rota e notificações de congestionamentos oferece suporte na otimização da mobilidade urbana e no uso eficiente da rede viária, reduzindo o tempo gasto no trânsito, o consumo de combustível e consequentemente a poluição presente nas grandes cidades.

As VANET's ainda abrem oportunidades no campo de anúncios comerciais e entretenimento. Serviços comerciais podem ser anunciados, utilizando informações do contexto como localização e condições do veículo para a oferta de oficinas de manutenção, postos de combustíveis, estacionamentos, entre outros. Para a comodidade e entretenimento dos passageiros, locais de alimentação próximos, auxílio médico, pontos turísticos, notícias, redes sociais e demais mídias também podem ser fornecidos aos usuários da rede.

As diversas aplicações possíveis para as VANET's impõem desafios relacionados a sua conectividade, algumas podem ser viáveis e úteis apenas na comunicação direta com os vizinhos imediatos, enquanto muitas outras precisam percorrer toda a rede, sendo repassadas de veículo a veículo até o destino.

Independentemente da arquitetura utilizada em uma rede veicular, as condições inerentes ao tráfego urbano impedem que as redes veiculares sejam totalmente conectadas e possuam ao menos uma conexão fim-a-fim entre todos os nós da rede. Nesse aspecto, diversas pesquisas sugerem o uso da arquitetura DTN para resolver os problemas de conectividade intermitente e disruptiva. Na seção 2.2, são elucidadas as características dessa arquitetura e demais detalhes relativos ao seu funcionamento.

2.2 REDES TOLERANTES A ATRASOS E DESCONEXÕES

O conceito da DTN foi inicialmente idealizado para atender às demandas de conexões interplanetárias, caracterizadas pela alta latência e frequentes interrupções. O grupo de pesquisa *InterPlanetary Internet Special Interest Group* (IPNSIG) foi criado no intuito de definir uma arquitetura para esses ambientes, permitindo a interoperabilidade com as redes terrestres (MCMAHON; FARRELL, 2009).

Após a formação do grupo IPNSIG, foi discutida a inclusão de outras redes desafiadoras, que compartilham das mesmas características. Ao observar a gama de aplicações DTN possíveis, foi criado no ano de 2002 o grupo de pesquisa *Delay-Tolerant Networking Research Group* (DTNRG), integrante da *Internet Research Task Force* (IRTF), formado com o objetivo de viabilizar a comunicação sem fio em ambientes terrestres com alto atraso, nos quais a conectividade contínua fim-a-fim também não é esperada (FALL; FARRELL, 2008).

Atualmente, a utilidade de uma DTN no contexto terrestre é possivelmente maior, comparado ao uso inicial interplanetário. Warthman (2012) resume algumas utilidades da abordagem DTN:

- Agências espaciais: Comunicação com estações espaciais;
- Militar: Comunicação e controle com veículos aéreos não tripulados, monitoramento de cargas, busca e salvamento;
- Comercial: Rastreamento de veículos (caminhões, navios, aeronaves), monitoramento destinado à agricultura;
- Serviço Público: Comunicação em desastres, busca e salvamento, cidades inteligentes, transportes inteligentes, redes inteligentes de geração e distribuição de energia;
- Monitoramento Ambiental: Migração de animais, condições atmosféricas, eventos sísmológicos, monitoramento de poluição.

Em todos esses ambientes, a conexão intermitente inviabiliza o uso dos protocolos tradicionais, assim o grupo de trabalho DTNRG define uma nova arquitetura para a DTN, criando uma nova camada para a pilha de protocolos. Essa arquitetura é apresentada na próxima subseção.

2.2.1 ARQUITETURA

A arquitetura da DTN é definida principalmente na RFC 4838 (CERF et al., 2007), em conjunto com as especificações do protocolo de agregação, definidas na RFC 5050 (SCOTT; BURLEIGH, 2007), provendo um método para interconexão entre duas redes heterogêneas e para a solução de uma variedade de problemas existentes em determinados ambientes (VOYI-ATZIS, 2012).

A principal motivação para o desenvolvimento da DTN está nas limitações dos protocolos existentes, que foram projetados considerando os princípios da arquitetura da Internet (MCMAHON; FARRELL, 2009), os quais são resumidos a seguir:

- Existência de uma rota fim-a-fim entre a origem e o destino, durante uma sessão de comunicação;
- As retransmissões baseadas no tempo e no retorno dos receptores atendem as necessidades de reparação dos erros;
- A baixa perda dos dados ponta a ponta;
- Todos os roteadores e estações finais suportam os protocolos TCP/IP;
- Os aplicativos não precisam tratar e considerar o desempenho da rede;
- A troca de pacotes é uma abstração eficaz para a interoperabilidade e desempenho.

A arquitetura DTN foi projetada para atenuar a maioria desses requisitos, considerando também as condições das redes terrestres que apresentam alta latência e conexões intermitentes. Para isso a RFC 4838, utiliza as seguintes premissas:

- Faz o uso de uma mensagem de tamanho variável como abstração de comunicação, para auxiliar a rede a realizar boas seleções de rota;
- Emprega o armazenamento na rede para suportar operações de *store-and-forward*, suportando o armazenamento por longos períodos para casos em que não haja rota disponível, não exigindo caminhos fim-a-fim confiáveis;
- Utiliza uma sintaxe que oferece suporte a uma ampla gama de padrões de nomeação e de endereçamento, melhorando a interoperabilidade;
- Fornece suporte para definir o tempo de vida útil dos dados, permitindo que a rede melhore a entrega e atenda às necessidades dos aplicativos;
- Oferece mecanismos de segurança para proteger a infraestrutura contra o uso não autorizado.

A técnica de comutação de mensagens fim-a-fim utiliza uma camada de sobreposição chamada de *bundle layer* ou camada de agregação, apresentada na figura 4.

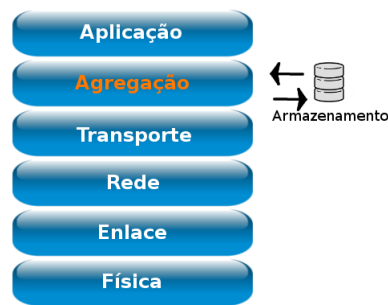


Figura 4: Pilha de protocolos de um nó DTN.

A *bundle layer* fica localizada acima da camada de transporte e abaixo da camada de aplicação (CERF et al., 2007), o que garante a interoperabilidade de comunicação entre regiões diferentes que podem ou não utilizar protocolos distintos, além de ser responsável pelo armazenamento persistente das mensagens trocadas entre os nós. Na subseção 2.2.2, são apresentados os detalhes da camada.

2.2.2 CAMADA DE AGREGAÇÃO

As aplicações compatíveis para a DTN enviam mensagens com um tamanho arbitrário, chamadas de *Application Data Units* (ADU). As ADU's normalmente são transferidas a aplicativos em unidades completas, sendo transformadas pela camada de agregação em uma ou mais unidades chamadas de “agregado”, que também podem ser fragmentadas durante a transmissão e recombinadas em qualquer parte da rede, formando novamente um agregado.

Um agregado é formado por um ou mais blocos de dados. O bloco primário está presente em cada agregado ou fragmento, os demais blocos contêm, além da carga útil dos aplicativos, extensões que são opcionais. A figura 5 exibe um exemplo de agregado contendo 3 blocos.

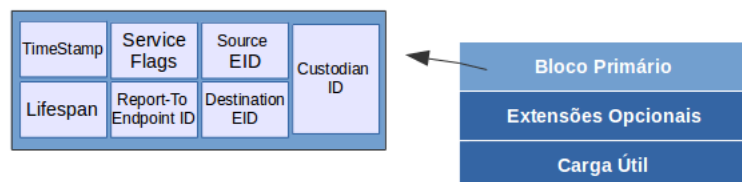


Figura 5: Formato do Agregado.

O bloco primário é obrigatório e, conforme ilustrado na figura 5, armazena as informações essenciais que identificam a origem e o destino da mensagem, entre outras não menos impor-

tantes. A seguir, temos um resumo das informações presentes neste bloco.

- **TimeStamp:** Uma concatenação do tempo de criação (data e hora) do agregado com um número sequencial, garantindo um número exclusivo para cada ADU com origem da mesma fonte.
- **Lifespan:** Tempo de vida útil da mensagem. Quando um agregado armazenado na rede alcançar a sua vida útil, ele pode ser descartado.
- **Service Flags:** Define as opções e classe de prioridade.
- **Source EID:** Endereço do nó fonte.
- **Destination EID:** Endereço do nó de destino.
- **Report-To Endpoint ID:** Endereço para onde relatórios devem enviados como avisos de retorno e funções de rastreamento de rota.
- **Custodian EID:** Endereço do atual nó que mantém o agregado sob custódia.

O *Endpoint Identifier* (EID) é um nome expresso com base na sintaxe *Uniform Resource Identifier* (URI) definida na RFC 3986 (BERNERS-LEE et al., 2005). O EID identifica de forma exclusiva cada nó na rede DTN e permite o uso de uma ampla gama de padrões de nomeação e de endereçamento, seguindo a sintaxe abaixo:

```
<esquema>:<parte específica do esquema>
```

Os nomes para o esquema são definidos e mantidos pela *Internet Assigned Numbers Authority* (IANA). A parte específica do esquema pode definir as características como região, identificação do nó e aplicação. Exemplo: `dtn://host.utfpr.edu.br/app`.

A prioridade para a entrega das ADU's, informada no bloco primário, é definida em três classes e diferencia o tráfego com base na definição realizada pela aplicação. Essas classes são definidas como:

- **Bulk:** Os agregados definidos com essa classe são entregues utilizando o melhor esforço. Nenhum pacote dessa classe será enviado até que todos os pacotes de outras classes com destino ao mesmo endereço e origem da mesma fonte tenham sido enviados.
- **Normal:** Os agregados dessa classe possuem prioridade de envio em relação às mensagens classificadas como *Bulk*.

- **Expedited:** A maior prioridade definida. Mensagens dessa classe são enviadas antes que qualquer outra classe.

Ainda que as classes de prioridade especifiquem a preferência de entrega para as mensagens destinadas ao mesmo nó e com origem da mesma fonte, variações podem ser realizadas dependendo da política de encaminhamento de um nó em particular. Desse modo a prioridade pode ou não ser aplicada da mesma forma. Em alguns nós, por exemplo, mensagens *Expedited* podem ser sempre encaminhadas antes de qualquer outra, independente de sua origem ou destino. Essas variações podem afetar a probabilidade e o tempo de entrega de cada mensagem (SCOTT; BURLEIGH, 2007; VENDRAMIN, 2012).

2.2.3 TRANSFERÊNCIA DE CUSTÓDIA

Em qualquer rede com muitos roteadores, seja na Internet ou a rede interna de uma empresa, os pacotes recebidos para roteamento são armazenados em *buffer* até que os pacotes no topo da fila sejam atendidos e encaminhados para o próximo salto ou destino, seguindo os protocolos de roteamento estabelecidos.

Em uma rede totalmente conectada e estável, essas decisões de roteamento são extremamente rápidas. Se o próximo salto não estiver disponível, o pacote é descartado. Portanto, a capacidade do buffer desses roteadores não é muito grande, uma vez que esses pacotes não devem permanecer na memória por muito tempo (BENAMAR et al., 2014).

Nas redes oportunistas, não é possível realizar encaminhamentos rápidos, pois os contatos são estabelecidos em janelas de oportunidades e quase sempre estão indisponíveis imediatamente, sendo necessária a utilização de outra abordagem para a transferência dos dados.

Em uma DTN, quando um nó precisa enviar uma mensagem, esta é armazenada até que um contato com outro nó seja realizado. Nessa oportunidade, a mensagem é encaminhada e armazenada e assim sucessivamente, transferida nó a nó, até chegar ao seu destino ou ser excluída ao atingir seu tempo máximo de vida.

A figura 6 ilustra a transferência de mensagens no contexto de um ambiente VDTN, no qual o veículo A deseja enviar uma mensagem ao veículo C, mas não há uma rota imediata. Nesse exemplo, a mobilidade dos veículos no decorrer do tempo, permite que os contatos momentâneos entre os veículos A-B e B-C sejam utilizados para a entrega das mensagens ao destino.

As técnicas utilizadas nesse processo são conhecidas como *store-carry-and-forward* e

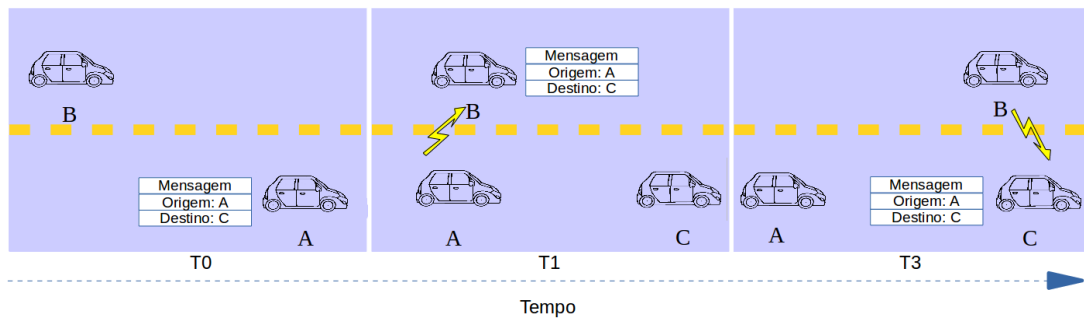


Figura 6: Transferência de Custódia

Fonte: Adaptado de (VENDRAMIN, 2012)

Transferência de Custódia (SCOTT; BURLEIGH, 2007; BENAMAR et al., 2014). O processo de Transferência de Custódia não é obrigatório, mas pode ser executado quando solicitado pelo nó custodiante e também aceito pelo nó vizinho. A transferência da custódia é realizada após a confirmação do recebimento da mensagem e pode ser repassada adiante do novo custodiante para outro.

O nó custodiante deve manter a mensagem na memória de forma persistente, pelo menos até realizar a transferência de custódia. Este modelo de transferência e o armazenamento persistente permite delegar a responsabilidade do envio confiável dos dados para outros nós que não sejam o remetente original (FALL; FARRELL, 2008), mas também exigem que os nós participantes armazenem as mensagens por longos períodos de tempo. Por este motivo, é esperado um custo elevado relacionado à capacidade de armazenamento.

Essa capacidade de armazenamento dos nós é determinante em uma DTN, sendo um aspecto fundamental em sua arquitetura. Portanto algumas questões devem ser observadas especialmente no gerenciamento, congestionamento e mitigação de negação de serviço (CERF et al., 2007).

Quando o volume de mensagens recebidas excede a capacidade de encaminhamento e o limite de armazenamento do *buffer*, o nó saturado pode ser impedido de receber novas mensagens. Considerando as condições de uma DTN, com contatos imprevisíveis e muitas vezes escassos, um único nó saturado pode fazer uma grande diferença na capacidade de entrega ou no atraso apresentado na rede (FALL; FARRELL, 2008).

Um nó sob essas condições, segundo Fall e Farrell (2008), dispõe de algumas opções para mitigar a situação. Em ordem de preferência são: descartar os agregados expirados; mover o agregado para o próximo contato disponível; deixar de aceitar novos agregados ou descartar os agregados antigos, mas ainda não expirados.

2.3 REDES VEICULARES OPORTUNISTAS

As redes de comunicação, sejam elas com fio ou sem fio, são consideradas tipicamente como conexões estáveis, significando que existe, na maior parte do tempo, pelo menos um caminho fim-a-fim entre todos os dispositivos participantes da rede. Nesse tipo de rede, as interrupções são consideradas situações momentâneas e os protocolos de roteamento reagem a esses eventos, procurando por novos caminhos (SPYROPOULOS et al., 2010). Nas MANET's, onde as interrupções são mais frequentes, protocolos de roteamento também consideram tais interrupções como exceções de curta duração e imediatamente acionam o seu mecanismo de descoberta, buscando estabelecer um novo caminho para o destino.

Em uma rede veicular, diversas características como a alta mobilidade dos veículos, a variedade das condições de tráfego e os obstáculos presentes nas grandes cidades alteram constantemente a topologia da rede, causando constantes e longos períodos de interrupção.

Os protocolos tradicionais desenvolvidos para as MANET's, os quais esperam uma conexão fim-a-fim, enfrentam dificuldades para estabelecer novas rotas, que em muitas situações podem não existir. Por esse motivo, é válido afirmar que tais protocolos não são adequados para redes que apresentem alto atraso e conexões disruptivas (SPYROPOULOS et al., 2010; BENAMAR et al., 2014).

Como apresentado na seção anterior, os ambientes de rede que operam sob condições de conectividade intermitente/disruptiva com alto atraso recebem o nome de Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões (DTN) ou Redes Oportunistas. Essa rede assume que a rota até o destino pode não estar disponível atualmente, mas possivelmente ao longo do tempo. Utiliza basicamente o mecanismo conhecido como *store-carry-and-forward*, que permite aos nós armazenarem o conteúdo da transmissão, utilizando sua mobilidade para o encaminhamento oportunista e múltiplos saltos até a entrega ao destino (AHMED et al., 2015).

A característica citada, utilizada no contexto de uma VANET, adiciona a capacidade da rede veicular ser tolerante a desconexões e permite o uso de aplicações tolerantes a atrasos, dessa maneira, VANET's que utilizam essa capacidade são conhecidas como Redes Veiculares Tolerantes a Atrasos e Desconexões – sigla em inglês (VDTN) ou Redes Veiculares Oportunistas (BENAMAR et al., 2014).

Em uma VDTN, os protocolos de roteamento possuem papel fundamental para o funcionamento da rede, considerando que devam operar em ambientes altamente densos a locais que ofereçam poucas oportunidades de encontros. Portanto, precisam evitar estratégias onerosas sem perder as oportunidades de encaminhamento. Na próxima seção, são identificadas as

características do roteamento DTN e as principais estratégias presentes na literatura.

2.4 ROTEAMENTO EM DTN

Assim como em qualquer rede de comunicação (DTN ou não), o principal desafio dos protocolos de roteamento é permitir a entrega da mensagem com o menor atraso fim-a-fim e o menor uso de recursos da rede.

Em uma DTN, incluindo as VDTN's, a rota utilizada para a entrega da mensagem é baseada nos encontros previstos ou não previstos e na decisão em determinar a utilidade desses encontros para o encaminhamento das mensagens. Em vista disso, decisões ruins podem atrasar a sua entrega ou mesmo impedir que ela chegue ao destino.

Alguns protocolos de roteamento utilizam a abordagem de inundação, enviando várias cópias das mensagens, a fim de atingir o destino o mais rápido possível, enquanto que outros buscam utilizar informações da rede para determinar as oportunidades de transferências mais promissoras, enviando uma única cópia ou poucas delas. Essa última estratégia gera uma economia no uso dos recursos da rede, no entanto existem ainda diversas outras abordagens e diferentes classificações que podem ser encontradas.

Com base na metodologia para encontrar os destinos e se a réplica de mensagens é utilizada ou não, os protocolos podem ser classificados em várias categorias: cópia única, múltiplas cópias, inundação, encaminhamento aleatório, encaminhamento com base em diferentes informações na rede, entre outros (BENAMAR et al., 2014). A figura 7 resume a classificação das principais abordagens, no qual o comportamento de cópia única e múltiplas cópias não estão representadas, uma vez que sobrepõem várias categorias, e ao menos uma dessas estratégias é utilizada por todas as demais categorias ou subcategorias de protocolos, ilustradas na figura 7.

Nas próximas subseções, é desenvolvida uma visão geral das principais categorias de protocolos, ilustradas na figura 7.

2.4.1 INUNDAÇÃO

Os protocolos de inundação replicam cópias de suas mensagens armazenadas para todos os nós possíveis. Embora alguns protocolos possam limitar essa inundação determinando o número de cópias, qualquer decisão de encaminhamento é realizada 'às cegas', ou seja, sem qualquer conhecimento do estado da rede.

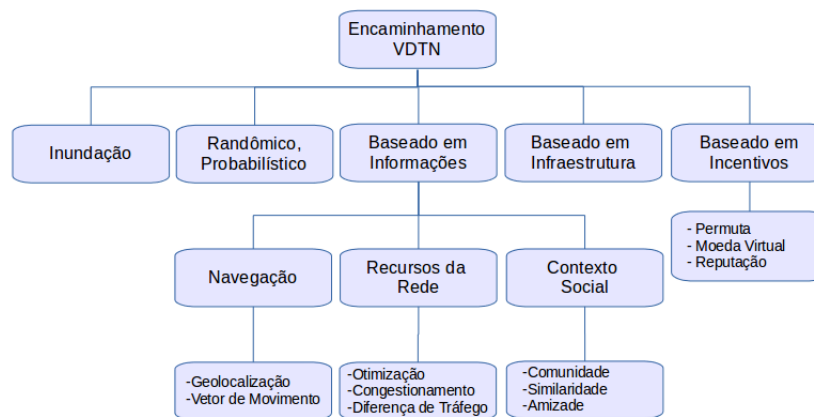


Figura 7: Classificação dos Protocolos

Fonte: Adaptado de (BENAMAR et al., 2014)

Protocolos que realizam a inundação sem qualquer controle podem apresentar as melhores probabilidades de entrega. Visto que uma cópia de cada mensagem é enviada em todas as oportunidades de contato, o que viabiliza a entrega se as condições e os recursos da rede não apresentarem limitações.

Naturalmente, os protocolos desse tipo consomem mais recursos, principalmente banda e memória, pois dependendo do tamanho dos agregados, das quantidades de mensagens enviadas/replicadas e o tamanho do *buffer* dos nós, a rede pode ser rapidamente congestionada, afetando o seu desempenho (SOARES et al., 2013).

2.4.2 DETERMINISTA E ESTOCÁSTICO

Zhang (2006) também diferencia o protocolos de roteamento DTN entre determinista e estocástico. No roteamento determinístico, a topologia atual e futura da rede é conhecida, permitindo que o encaminhamento da mensagem seja agendado (KHABBAZ et al., 2012).

O roteamento estocástico é utilizado quando o movimento dos nós é imprevisto e nenhuma informação sobre a evolução da topologia é conhecida. Nesse caso, o encaminhamento da mensagem é feito de forma aleatória, e a mensagem é encaminhada salto a salto de forma randômica, na expectativa otimista de que chegue ao seu destino (ZHANG, 2006).

2.4.3 BASEADO EM INFORMAÇÕES

Alguns protocolos de roteamento utilizam um conhecimento sobre a rede para determinar se o nó encontrado é um bom candidato para o encaminhamento da mensagem, e assim

definir o melhor caminho para o destino. O conhecimento pode ser prévio, mediante consulta a uma base de dados local ou adquirido no decorrer do tempo, por meio do histórico dos encontros entre os nós, saúde atual da rede, dados de localização ou informações sociais (BENAMAR et al., 2014).

O histórico de encontros entre os nós pode ser utilizado para determinar a probabilidade de o contato/vizinho entregar a mensagem ao destino, enquanto que o uso de geolocalização se baseia no uso de informações geográficas presentes em veículos equipados com GPS, para identificar se o vizinho se move em direção ao destinatário ou baseado em sua velocidade e assim determinar se ele poderá entregar a mensagem de forma mais rápida.

Já os algoritmos que avaliam os recursos do ambiente podem tomar decisões diferentes para evitar um congestionamento na rede ou para otimizar o tráfego, priorizando certos tipos de dados, a fim de reduzir o número de réplicas das mensagens.

Outros protocolos procuram utilizar informações sociais para a decisão de roteamento. Em determinadas DTN's, os nós participantes podem ser formados por uma grande quantidade de dispositivos utilizados e transportados por pessoas. Logo o comportamento dos nós reflete o hábito humano, e neste conceito alguns algoritmos exploram essa conduta para melhorar a decisão de roteamento (ZHU et al., 2013).

2.4.4 BASEADO EM INCENTIVOS

As estratégias de encaminhamento apresentadas anteriormente são projetadas para utilizar a cooperação entre os nós, considerando que os nós intermediários prestarão o melhor esforço para garantir que a mensagem chegue ao destino. No entanto, os nós de uma DTN podem se tornar egoístas.

Quando os nós são controlados por pessoas, do ponto de vista individual, para preservar seus recursos como memória, energia e banda, um nó pode assumir um comportamento egoísta e não estar disposto a retransmitir e armazenar mensagens para outros nós (LI et al., 2010, 2011). Essa prática pode degradar ou inviabilizar o funcionamento da DTN, pois não haverá a cooperação necessária para que os dados sejam transportados e encaminhados salto a salto até o destino (ZHANG et al., 2011).

Zhang et al. (2011) classificou os algoritmos baseados em incentivo em três categorias principais: *Troca/Permuta*, *Moeda Virtual* e *Reputação*. Na *Troca/Permuta*, o conceito é baseado na simples reciprocidade. O nó A poderá fornecer seus recursos para o nó B, caso o nó B prover da mesma forma os recursos para o nó A. Embora a implementação dessa negociação

seja simples, o acordo não garante a efetiva compensação para o nó que cedeu os recursos no primeiro momento.

Na categoria *Moeda Virtual*, os nós ganham moedas fornecendo seus recursos e gastam suas moedas utilizando os recursos dos demais nós. O uso da moeda virtual eleva a complexidade da implementação, mas permite a troca de recursos de forma assíncrona.

Na última categoria, *Reputação*, os nós acumulam pontos de reputação, fornecendo serviços aos outros, onde os membros da rede que possuem uma alta reputação, recebem um tratamento preferencial no pedido de recursos. Nesse caso, a complexidade, as vantagens e desvantagens são parecidas com a categoria *Moeda Virtual*.

2.5 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DTN

Existe uma grande quantidade de protocolos de roteamento propostos e novos surgindo a todo momento. Isso se deve principalmente à ampla diversidade de ambientes em que uma DTN pode operar, dessa maneira, um protocolo pode apresentar melhor desempenho em certos ambientes em comparação com outros.

Nesta seção, serão apresentadas as características e estratégias utilizadas por alguns dos principais protocolos de roteamento para superar as dificuldades impostas em um ambiente DTN.

2.5.1 EPIDÊMICO

Os principais objetivos do protocolo Epidêmico são entregar o máximo de mensagens e minimizar o atraso na entrega (VAHDAT; BECKER, 2000). Para isso o protocolo utiliza uma técnica de inundação pura, em que réplicas de todas as mensagens são transmitidas para todos os vizinhos ao alcance de contato. Deste modo, a mensagem será entregue no menor tempo possível, desde que exista um caminho até o destino no decorrer do tempo.

A figura 8 ilustra a disseminação do protocolo. No exemplo, durante o tempo 1, o nó S transmite sua mensagem com destino ao D, para todos os vizinhos ao seu alcance, neste caso os nós A e B. No decorrer do tempo, o nó A encontra o nó C, que possui contato direto e entrega a mensagem para o destino D.

A técnica de inundação também causa problemas na utilização dos recursos da rede. Quando cada mensagem é replicada para toda a rede, a memória do nó pode ser rapidamente ocupada e não ter espaço para novas mensagens, além disso o meio de comunicação sem fio

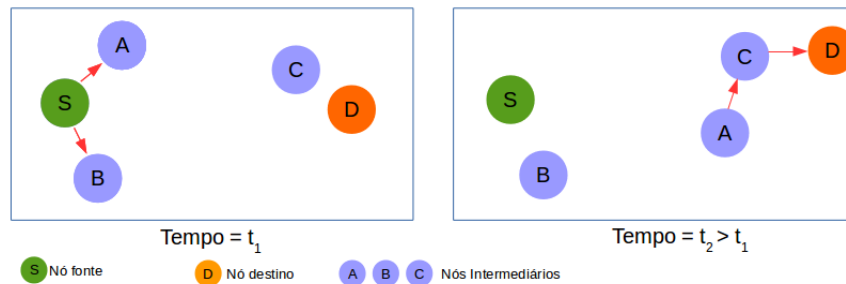


Figura 8: Processo de Inundação do Protocolo Epidêmico

Fonte: Adaptado de (VAHDAT; BECKER, 2000)

também pode ficar saturado ao retransmitir mensagens que muitas vezes já foram entregues (TORNELL et al., 2015).

Por tais motivos, em determinados ambientes, onde há qualquer limitação de recurso, o protocolo epidêmico pode apresentar desempenho inferior para taxa de entrega das mensagens em comparação a protocolos que utilizam informações da rede para definir suas estratégias de encaminhamento e limitação de inundação.

2.5.2 PROPHET

O protocolo *Prophet* é definido pela RFC 6693, sendo uma variante do protocolo epidêmico no qual também utiliza o processo de inundação, entretanto aplica mecanismos que limitam a disseminação das mensagens, podendo atingir taxas de entrega e atraso iguais ou superiores ao epidêmico em alguns casos (LINDGREN et al., 2012; PATHAK et al., 2017).

Com base no histórico de contatos e na transitividade, o protocolo utiliza as observações realizadas no ambiente, considerando os padrões de mobilidade presente para ajudar nas decisões de roteamento. Desde modo, evita uma inundação cega das mensagens, aplicando um roteamento probabilístico.

A métrica de probabilidade de encontro, chamada de *previsibilidade de entrega*, é definida como $P_{(a,b)}$, indicando a probabilidade de dois nós, (a e b), se encontrarem. O projeto do protocolo limita esses valores entre 0 e 1, logo $P \in [0, 1]$, sendo a métrica calculada de modo que o maior valor indique encontros mais frequentes e configure o nó como um bom candidato para o envio da mensagem.

A figura 9 mostra o mecanismo básico da decisão de encaminhamento e a limitação de réplicas das mensagens. O nó fonte é representado por S , o destino por D , os intermediários são B e C e cada nó possui sua área de cobertura. Baseado no histórico de encontros, o nó

B manifesta uma probabilidade maior de encontrar D em relação ao nó S . Considerando esses valores, o nó S encaminha a mensagem apenas para o nó B , que no tempo seguinte encontra o destino e entrega a mensagem.

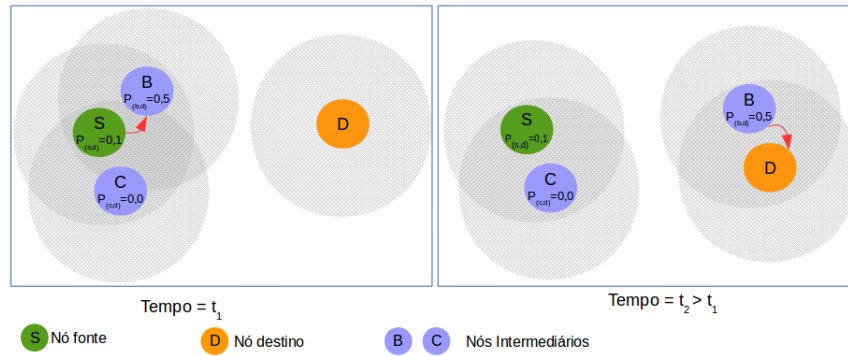


Figura 9: Decisão de Encaminhamento do Prophet

Como exposto na figura 9, as mensagens são replicadas apenas para os nós que possuem probabilidade maior que o nó S ; os nós que possuem previsibilidade menor, como o nó C , não recebem a réplica. Esse mecanismo garante que a mensagem seja replicada apenas para os nós que efetivamente possuem melhores condições de entregar a mensagem, reduzindo a sobrecarga na rede.

Os valores da *previsibilidade de entrega* são atualizados à medida que os encontros entre os nós ocorrerem, seguindo algumas regras que serão expostas a seguir. Os valores das constantes utilizadas nas referidas regras e equações são apresentados na tabela 1 para melhor compreensão.

Tabela 1: Parâmetros e valores recomendados pela RFC 6693

Parâmetro	Valor Recomendado
$P_{encounter_max}$	0,7
$P_{encounter_first}$	0,5
$P_{first_threshold}$	0,1
beta	0,9
gamma	0,999
delta	0,01

Quando dois nós se encontram, a previsibilidade de entrega de um para o outro é atualizada imediatamente. Se o nó A nunca encontrou o B , o valor para $P_{(a,b)}$ é configurado com o valor da constante $P_{encounter_first}$. O valor também é configurado, caso $P_{(a,b)} < P_{first_threshold}$, do contrário, $P_{(a,b)}$ é calculado utilizando a Equação 1, em que $P_{encounter}$ é um fator que define a taxa de crescimento a cada encontro (exceto o primeiro), e $delta$ é um

pequeno número positivo que estabelece o limite superior do resultado, como informado anteriormente $P \in [0, 1]$.

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)\text{antigo}} + (1 - \text{delta} - P_{(a,b)\text{antigo}}) * P_{\text{encounter}} \quad (1)$$

A equação 1 determina a taxa de crescimento da previsibilidade de entrega a cada encontro, contudo nas redes móveis ad hoc, as interferências no meio de comunicação, obstáculos, encontros com múltiplos nós simultaneamente, entre outros problemas, afetam a comunicação com os vizinhos e podem produzir vários contatos em um curto espaço de tempo. Esses contatos não refletem a realidade dos encontros relacionados ao padrão de mobilidade e nesse caso, o valor da previsibilidade não pode ser calculado da mesma forma.

Para reduzir a distorção da previsibilidade nesses casos, $P_{\text{encounter}}$ é definida como a função do intervalo de tempo entre o encontro e a última atualização de previsibilidade de entrega de um mesmo nó. A figura 10 exibe a forma da função, no qual I_{typ} é a constante que define o tempo típico do intervalo de encontro entre os nós.

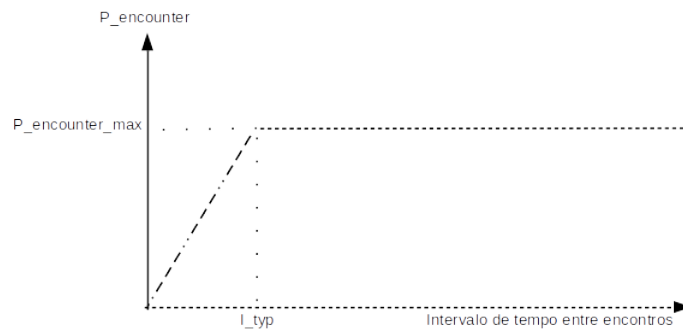


Figura 10: $P_{\text{encounter}}$: função do intervalo de tempo entre as atualizações

Fonte: Adaptado de (LINDGREN et al., 2012)

De acordo com a função, para os encontros com intervalos maiores que o tempo típico definidos em I_{typ} , o valor de $P_{\text{encounter}}$ é definido como $P_{\text{encounter_max}}$, caracterizando o encontro normal, resultado das oportunidades relacionadas ao padrão de mobilidade dos nós, enquanto valores inferiores ao tempo típico I_{typ} refletem os contatos brevemente espaçados do comportamento da tecnologia sem fio em ambientes com muita interferência.

Utilizando apenas as regras anteriores para a atualização do valor de previsibilidade, em certo momento, todos os nós teriam os valores máximos iguais ou próximos a 1. Para corrigir essa questão é aplicado um fator de envelhecimento para P , seguindo a equação 2, em que γ é uma constante de redução e K é o tempo decorrido desde a última aplicação do

envelhecimento.

$$P_{(a,b)} = P_{(a,b)\text{antigo}} * \textit{gamma}^K \quad (2)$$

A previsibilidade de entrega também possui uma propriedade transitiva, que é baseada na observação de que, se o nó *A* encontra frequentemente o nó *B*, e o nó *B* encontra frequentemente o nó *C*, o nó *C* possivelmente é um bom candidato para qual os demais nós podem encaminhar mensagens com destino ao *A*. A transitividade é calculada de acordo com a equação 3, na qual *beta* é uma constante que determina o impacto da transitividade na previsibilidade de entrega.

$$P_{(a,c)} = P_{(a,c)\text{antigo}} + (1 - P_{(a,c)\text{antigo}}) * P_{(a,b)} * P_{(b,c)} * \textit{beta} \quad (3)$$

A propriedade transitiva permite que um nó reconheça e utilize as probabilidades de encontros dos contatos de seus vizinhos, possibilitando ao nó ter uma visão extensa dessas previsibilidades, o que permite uma decisão de roteamento eficiente até o destino, mesmo quando o nó origem e os vizinhos imediatos nunca tenham contato direto com o destino.

2.5.3 FIRST CONTACT

O *First Contact* é um protocolo simples, no qual a origem encaminha a mensagem para o primeiro contato, enquanto os nós intermediários executam o mesmo procedimento. Se não há contato disponível, a mensagem é armazenada até que um contato seja estabelecido e assim é encaminhada salto a salto de forma aleatória até que chegue ao destino (SOARES et al., 2013).

Uma única cópia da mensagem circula pela rede, o que causa uma sobrecarga mínima. Entretanto a abordagem aleatória utilizada pelo protocolo normalmente apresenta resultados negativos para a taxa de entrega. Nestes casos, a pequena quantidade de mensagens que são efetivamente entregues apresentam um elevado atraso.

Em redes um pouco mais complexas, as mensagens também podem circular pela rede sem qualquer progresso em direção ao destino, sendo repassadas indefinidamente, entre um pequeno conjunto de nós com contatos frequentes, resultando na expiração do seu tempo de vida (JAIN et al., 2004).

2.5.4 SPRAY AND WAIT

O protocolo *Spray and Wait* (SPYROPOULOS et al., 2005) aplica uma inundação controlada na intenção de reduzir a sobrecarga observada no protocolo epidêmico puro, manifestando uma escalabilidade superior em redes densas. O *Spray and Wait* é definido em duas fases, como o próprio nome indica: *Spray* e *Wait*.

Na fase *Spray* (fase de pulverização), para cada mensagem criada em um nó da rede, um número limitado de réplicas é transmitido da fonte para seus vizinhos. Caso o destino não seja encontrado diretamente pelo nó origem na fase de pulverização, o protocolo entra na fase *Wait*, em que espera que os vizinhos que receberam as cópias das mensagens realizem a entrega diretamente ao destino.

A distribuição das cópias das mensagens também pode acontecer de duas formas: normal e binária. No modo normal, ilustrado na figura 11, cada cópia de um número limitado (N) de réplicas é encaminhada do nó origem para o vizinho, onde se encerra a fase de pulverização e aguarda-se que a mensagem seja entregue.

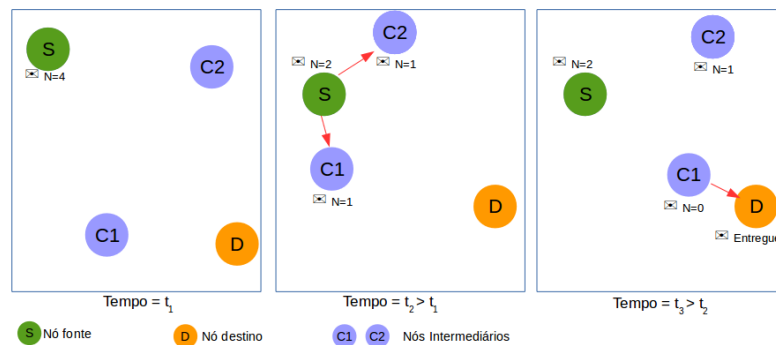


Figura 11: Estratégia de pulverização normal do protocolo Spray and Wait

Fonte: Adaptado de (SOARES et al., 2013)

Na estratégia binária, ilustrada na figura 12, metade das cópias (N) é transmitida a cada encontro, enquanto cada vizinho transmite a metade das cópias recebidas e assim por diante, até que cada nó contato fique com uma mensagem armazenada. Então entra-se na fase de espera até que a mensagem seja entregue ao destino.

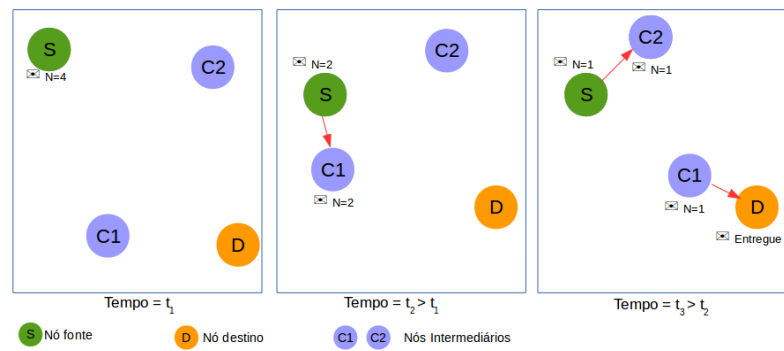


Figura 12: Estratégia de pulverização binária do protocolo Spray and Wait

Fonte: Adaptado de (SOARES et al., 2013)

A cada encontro, independentemente do modo de pulverização e caso ainda tenha cópias suficientes no seu *buffer*, o protocolo *Spray and Wait* encaminha a referida cópia para o nó vizinho. Assim depende unicamente dos primeiros encontros e da mobilidade desses nós para a entrega das mensagens, pois não possui qualquer conhecimento da rede para avaliar se o contato é um bom candidato para a entrega, a fim de aplicar uma decisão de encaminhamento.

3 METODOLOGIA

Empregando o traçado e os registros de movimentos dos veículos, foi realizada a construção de um modelo de mobilidade virtual, que retrata todo o transporte público urbano da cidade de Curitiba-PR. Para esse cenário, também foi elaborado um padrão de tráfego de dados representando uma aplicação de monitoramento de frota, bem como duas propostas de alterações de protocolos de roteamento, que exploram as características desse ambiente. Por fim, em conjunto com o cenário, modelo de tráfego e protocolos propostos, foram produzidas as simulações para a obtenção de resultados de desempenho.

A validação e o desenvolvimento experimental dos protocolos propostos e do modelo de mobilidade são realizados com o simulador One (Opportunistic Network Environment), versão 1.6 (KERÄNEN et al., 2009). O One é desenvolvido na linguagem JAVA especificamente para simulação de redes tolerantes a atrasos e desconexões, o qual também oferece uma excelente plataforma para a otimização e desenvolvimento de novos protocolos de roteamento DTN.

Nas próximas seções, estão dispostas as características do cenário, a elaboração do modelo de mobilidade, o padrão de tráfego e, por fim, os detalhes do ambiente de simulação.

3.1 CENÁRIO

O cenário utilizado neste trabalho é a cidade de Curitiba-PR, que abrange uma área de aproximadamente 435km², sendo uma das maiores cidades do Brasil, com uma população total estimada de 1.908.359 habitantes (IBGE, 2018). Esta é considerada referência no Sistema de Transporte Público e utilizada como modelo para outras cidades do mundo, sendo também apontada pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente em 2011 como uma das capitais com utilização representativa do sistema de transporte público coletivo (ONU, 2011).

Na próxima seção, são expostos os detalhes da construção do modelo de mobilidade, representando o transporte público urbano da cidade.

3.2 MODELO DE MOBILIDADE

O modelo de mobilidade é parte fundamental para uma avaliação confiável dos resultados das simulações. Muitos trabalhos utilizam geradores sintéticos para representar a mobilidade de pequenas regiões de uma cidade, ou mesmo pequenos trechos de uma via. Em outros casos, quando são utilizados dados reais, estes representam uma pequena porção dos veículos realmente presentes no ambiente (SATO; KIKUCHI, 2016; CHERIF et al., 2017; IKEDA et al., 2014).

O uso de um modelo com representação parcial de um ambiente pode desfigurar os resultados. Alguns estudos também alertam sobre o uso de modelos puramente sintéticos, que geram movimentos e cenários artificiais e que podem não representar a realidade, prejudicando da mesma forma a avaliação dos cenários e protocolos de roteamento (KRAJZEWICZ et al., 2012; UPPOOR et al., 2014).

Nessa lógica, segundo Uppoor et al. (2014), alguns aspectos devem ser considerados na construção de um modelo válido, entre eles:

- Representar integralmente o tráfego de veículos;
- Utilizar um rastreamento da posição dos veículos com precisão na ordem de segundos;
- Abranger áreas urbanas inteiras com uma descrição fiel do *layout* das vias e de sua sinalização.

Neste trabalho, o modelo de mobilidade foi criado utilizando-se dos traçados e de dados reais do transporte público urbano da cidade, obtidos a partir dos registros de movimentos dos veículos, observados durante o período de 23 a 26 de maio de 2017 entre as 5h30min e 24h. Todos os dados (traçado, movimentos dos veículos, posição de pontos, etc) foram fornecidos pela Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba (URBS, 2017).

A construção do modelo a partir desses dados, considerando cada linha de ônibus em operação na cidade com sua representação única de percurso, quantidade de veículos, velocidade média operacional, conjunto de pontos de parada e terminais, foi executada em duas etapas: 1 - Importação do Traçado/Pontos de paradas e 2 - Extração de dados estatísticos.

3.2.1 IMPORTAÇÃO DO CENÁRIO

Os dados do percurso de todas as linhas foram fornecidos em um único arquivo no formato JSON (JavaScript Object Notation), com o traçado descrito no padrão latitude/longi-

tude, os quais foram extraídos e convertidos individualmente para o formato WKT (Well-known text), reconhecido pelo simulador One, de modo a conservar todas as características (extensão, posição e traçado).

Obtidos os traçados em formato WKT, todas as linhas foram agrupadas utilizando o software específico para edição GIS (Geographic Information System), OpenJump (DAVIS et al., 2017), criando um único arquivo representando com fidelidade o itinerário de todas as linhas de ônibus em operação na cidade. A figura 13 ilustra o resultado obtido.



Figura 13: Traçado do itinerário das linhas do transporte público urbano de Curitiba-PR.

Na figura 13, é possível verificar que o traçado de todas as linhas estabelece uma malha totalmente integrada e esse fato colabora para os encontros que criam oportunidades de troca de mensagens entre os veículos. Adicionalmente é possível notar que a mesma malha oferece uma extensa cobertura, o que confere à rede o acesso a todas as áreas da cidade. A figura 14 ilustra a cobertura das linhas sobre a cidade de Curitiba-PR.

Para criar o movimento dos veículos no simulador One, foi empregado o modelo baseado em mapa nomeado de *BusMovement*. Neste modelo é necessário designar pontos específicos a serem percorridos, seguindo os traçados existentes no mapa principal. Para tanto, foram aproveitados os próprios pontos de parada existentes no cenário real, o que possibilitou que os veículos de cada linha, efetivamente, seguissem seus itinerários percorrendo cada ponto e terminal na ordem correta.

Os dados como a posição de cada ponto e terminal também são fornecidos no mesmo formato (JSON/Latitude,Longitude) e, dada a precisão da localização, os pontos estão sempre

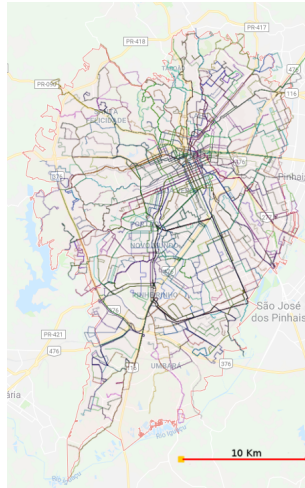


Figura 14: Cobertura do transporte público em Curitiba-PR.

Fonte: Adaptado de (GOOGLE, 2018)

posicionados ao lado dos percursos, pois efetivamente ficam em locais de fácil acesso aos pedestres, sendo na maioria dos casos nas calçadas. Por esse motivo, antes de converter os dados originais para o formato reconhecido pelo *One* (WKT), houve um reposicionamento dos pontos de parada para uma localização existente dentro do percurso previamente importado, permitindo a sua representação no modelo de mobilidade bem como seu uso como referência, para que os veículos sigam seu itinerário corretamente.

A figura 15 exemplifica a referida correção, na qual a seta vermelha indica o reposicionamento do ponto de ônibus no mapa, enquanto a figura 16 ilustra o resultado obtido, contendo a posição de todos os pontos e terminais do transporte público urbano da cidade.

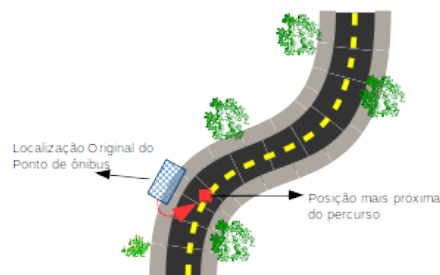


Figura 15: Correção da posição dos pontos de ônibus.

Assim como o percurso dos veículos, os pontos de parada e terminais também são compartilhados entre várias linhas, o que também propicia encontros e oportunidades de troca de mensagens no contexto DTN, uma vez que os veículos parados nos terminais e pontos de ônibus possuem um tempo maior para a troca de mensagens.

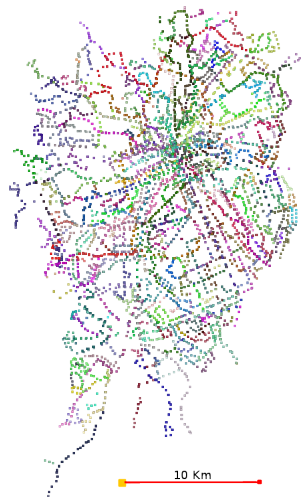


Figura 16: Pontos de parada do transporte público de Curitiba-PR.

O sistema de transporte da cidade possui +6500 pontos de ônibus e o tempo médio de parada, de acordo com levantamentos fornecidos pela (URBS, 2017), é de aproximadamente 16 segundos. Um aspecto a ser considerado no ambiente real, trata-se do comportamento das paradas, uma vez que os veículos percorrem todos os pontos, porém realizam a parada somente caso algum passageiro solicitar o embarque ou desembarque. Desse modo, atualmente não estão disponíveis informações que indiquem 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 16 segundos, que na prática é definido de forma aleatória para cada ponto, de acordo com as sementes utilizadas no simulador One.

3.2.2 EXTRAÇÃO DE DADOS ESTATÍSTICOS

Após a obtenção do itinerário, pontos de parada e terminais na primeira etapa, o segundo conjunto de informações necessárias para a configuração do modelo no simulador One refere-se basicamente à quantidade de veículos e a sua velocidade média operacional.

O sistema de transporte público de Curitiba opera com faixas de horário que refletem na quantidade de linhas e veículos em operação. A tabela 2 revela um resumo das principais faixas com a sua respectiva distribuição de frota, obtido a partir dos registros de movimentos de cada veículo. Nela, é possível identificar maior aplicação de veículos nas faixas de horário P1 (5h30 às 8h30) e P3 (16h31 às 19h30).

Essa concentração ocorre, em parte, por se tratar dos períodos que correspondem ao início e ao término do horário comercial e letivo, momento que possivelmente gera maior de-

manda de usuários no transporte público coletivo.

Tabela 2: Faixas de Horários e Distribuição da Frota

Faixa de Horário	P1	P2	P3	P4
Período	05h30 - 8h30	11h31 - 14h	16h31 - 19h30	22h31 - 23h
Qtde. de Veículos	1.280	807	1.226	624
Qtde. de Linhas	267	245	262	245

Como apresentado na tabela 2, existem mudanças das características do transporte público no decorrer do dia. Em alguns períodos há uma quantidade de veículos maior em circulação em relação a outros, portanto, foram utilizadas como modelo de cenário as características referentes à faixa de horário P1. O principal motivo para a escolha dessa faixa deve-se ao fato desse período apresentar a maior densidade de veículos no ambiente, o que colabora para ampliar o número de encontros e conseqüentemente maior troca de mensagens, correspondendo ao melhor cenário entre as faixas existentes.

A quantidade de veículos por linha foi definida com base na média total de veículos presentes em cada dia de observação para a faixa de horário P1. A fim de calcular a velocidade média de cada linha, foram usados todos os registros de posições de cada veículo, e o tempo decorrido em cada mudança de posição, aproveitando-se da posição geográfica inicial com a seguinte, em coordenadas latitude/longitude, conforme ilustrado na figura 17.

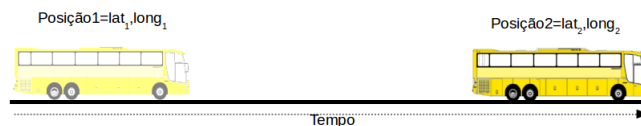


Figura 17: Posições de um veículo no decorrer do tempo.

O cálculo para determinar a distância entre os trechos baseou-se na equação 4 (HOQUE et al., 2012), em que φ_1 φ_2 representam as coordenadas latitude da posição 1 e 2, Δ a diferença entre as coordenadas λ longitude 1 e 2 e R o raio do globo terrestre.

$$d = \text{acos}(\text{sen}\varphi_1 * \text{sen}\varphi_2 + \text{cos}\varphi_1 * \text{cos}\varphi_2 * \text{cos}\Delta\lambda) * R \quad (4)$$

A velocidade foi obtida com a divisão da distância pelo tempo, conforme nota-se na equação 5, em que (d) é a distância total percorrida (obtida com a equação 4) e (t), o tempo total transcorrido. Assim, com base nos dados de cada veículo de uma mesma linha, obtém-se a média de velocidade da mesma.

$$v = \frac{d}{t} \quad (5)$$

Nessa velocidade média, estão implícitas as características como desaceleração, paradas obrigatórias em semáforos e outras sinalizações, congestionamento e todas as outras propriedades de trânsito e movimento dos veículos, as quais não é possível representar com maior fidelidade no simulador One.

Para atribuir mudanças às velocidades dos veículos, é calculada a velocidade média necessária para que o veículo complete todo o seu percurso no mesmo tempo médio inicialmente obtido, aguardando em todos os pontos de parada o tempo de 16 segundos. Desse modo, as médias obtidas são utilizadas como velocidades mínima e máxima. As informações de cada linha, compiladas e utilizadas no ambiente, são apresentadas no anexo A.

3.3 MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS

O modelo de tráfego de dados também é parte importante para a simulação e a avaliação do cenário, no qual é necessário recorrer a um padrão que represente uma aplicação viável no contexto de um ambiente VDTN, considerando o atraso normalmente presente nesse tipo de rede.

Neste trabalho é usado um modelo de tráfego, representando o monitoramento da frota de ônibus. A fonte de dados utilizada nesta produção, por exemplo, foi obtida por meio do monitoramento dos veículos operados por diversas empresas de transporte, no qual normalmente utilizam a infraestrutura da rede celular para o envio de dados, o que pode gerar custos elevados. Na cidade de Curitiba-PR, segundo a URBS (2017), entre março/16 e fevereiro/17, foram gastos R\$ 882.785,16 com os serviços de rede celular para este fim.

Para esta aplicação é assumido que cada um dos 1.280 veículos (considerando a faixa de horário P1, ver tabela 2) precisam informar frequentemente dados importantes como: posição geográfica, velocidade, consumo de combustível, temperatura do motor, entre outras informações. Consideramos que a mensagem com essas informações é enviada por todos os ônibus em circulação, com destino a uma central, utilizando um volume de dados de 5KB para cada mensagem.

Para efeitos de avaliação de desempenho, um ponto único de destino foi escolhido como central de recepção dos dados, a praça Rui Barbosa na área central da cidade. O local foi definido com base na sua utilização, sendo um dos pontos com maior concentração de linhas, e

nesse aspecto, possivelmente o ponto com melhores condições para a recepção das mensagens. Essa estratégia se baseia na dinâmica de uma VDTN fundamentada no transporte público, pois quanto maior o número de veículos que passam pelo destino, maior será a possibilidade de entrega dos dados.

A figura 18 define a localização do ponto de destino das mensagens de todos os veículos para este modelo de tráfego.

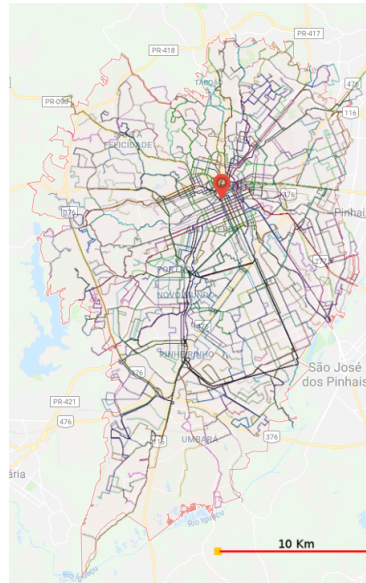


Figura 18: Localização do ponto utilizado como destino das mensagens no mapa da cidade de Curitiba-PR.

A tabela 3 mostra o resumo deste modelo de tráfego, utilizado no ambiente de simulação.

Tabela 3: Resumo do Modelo de Tráfego

Aplicação	Monitoramento
Origem	Todos os Veículos em Circulação (1280)
Destino	Praça Rui Barbosa
Tamanho da Mensagem	5KB
Taxa de Envio	15min, 45min e 90min
TTL	180 minutos

Empregando o mesmo padrão de tráfego, os veículos do transporte público também podem ser utilizados como plataforma para o monitoramento ambiental, coletando nos vários pontos da cidade em que circulam dados como temperatura, umidade, qualidade do ar e outras informações, que podem ser enviadas a uma central de processamento.

No domínio da segurança pública, esse modelo de tráfego pode ser aplicado em um estudo inicial da viabilidade da rede, no envio de avisos relacionados a incidentes de segurança. De acordo com levantamento da Prefeitura de Curitiba (CURITIBA, 2017), entre janeiro e abril de 2017, foram registrados um total de 685 casos de roubos e assaltos nos ônibus do transporte público. Assim um botão de pânico poderia ser acionado por motoristas para o envio discreto de avisos relacionados a incidentes de segurança nos veículos com destino as suas centrais, recorrendo apenas à VDTN. Tais informações poderiam ajudar na resposta dos agentes de segurança em relação a estes incidentes, melhorando a segurança dos usuários. Além das aplicações expostas, o referido modelo ainda pode ser adaptado para outras aplicações, entretanto para fins de referência, nomeamos de *monitoramento*.

4 PROTOCOLOS APRIMORADOS

Neste capítulo, são explanadas as propostas de alterações dos protocolos originais *Prophet* e *Spray and Wait*, explorando as características do cenário e do modelo de aplicação utilizado neste trabalho, nomeadas respectivamente de *Prophet-Bus* e *Spray and Wait Bus*.

4.1 PROPHET-BUS

O protocolo *Prophet-Bus* utiliza o mesmo algoritmo do protocolo *Prophet*, no entanto duas alterações são propostas, com base nas características do ambiente do transporte público e na aplicação de monitoramento observada na seção 3.3.

Em uma rede exclusivamente baseada no transporte público urbano, diferentemente do cenário veicular comum, os veículos seguem traçados predefinidos, transitando sempre pelos mesmos locais. Em vista disso um ônibus que encontra o destino ao percorrer seu itinerário, possivelmente, repetirá esse contato.

No modelo de tráfego sugerido na seção 3.3, em particular, todas as mensagens da rede possuem como destino uma central de recepção fixa, localizada ao longo do traçado de várias linhas. Os veículos, portanto, pertencentes a essas linhas certamente são os únicos que podem realizar o encaminhamento final da mensagem ao destino. Contudo os ônibus precisam percorrer inteiramente o seu itinerário para encontrá-la uma única vez e, em razão dos longos trajetos e a baixa velocidade operacional, esses eventos se tornam esparsos, o que mantém os valores de *previsibilidade de entrega* reduzidos em virtude também da ação do mecanismo de envelhecimento do protocolo *Prophet*.

O protocolo *Prophet*, conforme exposto na seção 2.5.2, faz uso de um mecanismo baseado no histórico dos encontros, que procura estimar a probabilidade de o nó encontrar um determinado destino. Tal probabilidade é chamada de *previsibilidade de entrega* e é atualizada a cada encontro entre os nós, enquanto o mecanismo de envelhecimento é aplicado para evitar que todos os nós da rede acumulem indefinidamente os valores dos encontros.

Contudo, no ambiente do transporte público, o fator de envelhecimento afeta negativamente a *previsibilidade de entrega* para os veículos que possuem contato com o destino. A figura 19 exemplifica o funcionamento do mecanismo em uma linha circular (001), onde a seta indica o sentido e P , a previsibilidade de o veículo encontrar o destino.

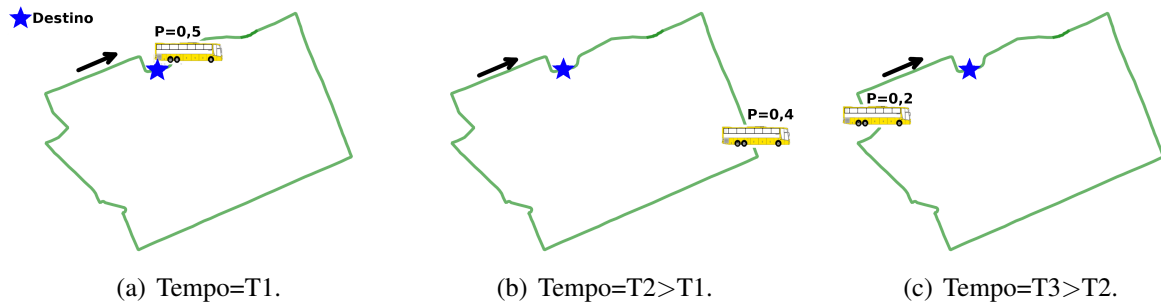


Figura 19: Mecanismo de envelhecimento do Protocolo *Prophet*.

Na figura 19(a), após o encontro com o destino, o veículo recebe o valor inicial de previsibilidade (0,5) e, no decorrer do tempo, nas figuras 19(b) e 19(c), os valores sofrem reduções à medida que o veículo se aproxima novamente do destino. Neste exemplo, num eventual encontro com outro nó, o veículo que está se afastando terá uma maior probabilidade de receber a cópia do agregado, em comparação àquele que já está se aproximando do destino.

Com base nesses comportamentos, a proposta de alteração do protocolo *Prophet* envolve duas mudanças exclusivamente para os veículos que possuem contato direto com o destino.

A primeira mudança atua na fixação da *previsibilidade de entrega* para um valor próximo do limite superior. Para isso, é assumido que o endereço do destino de todas as mensagens é único e conhecido por todos os nós. A cada encontro o nó verifica se a identificação do vizinho corresponde ao destino, caso positivo, o nó registra esse contato direto e em seguida fixa sua *previsibilidade de entrega* para um valor próximo do limite máximo. O algoritmo 1 demonstra as alterações no código original implementado no *One* (linhas 16 a 19 e 25 a 29).

Algoritmo 1

```

1  \\Atualização de Previsibilidade de Entrega
2  private void updateDeliveryPredFor(DTNHost host) {
3      double PEnc;
4      double simTime = SimClock.getTime();
5      double lastEncTime=getEncTimeFor(host);
6      if(lastEncTime==0)
7          PEnc=PEncMax;
8      else
9          if((simTime-lastEncTime)<I_TYP)
10         {
11             PEnc=PEncMax*((simTime-lastEncTime)/I_TYP);
12         }

```

```

13  else
14      PEnc=PEncMax;
15
16  //Se o vizinho é o destino, altera o atributo de registro do contato direto
17  if(host.getAddress() == destino)
18  {
19      this.getHost().setContatoDireto(true);
20  }
21
22  double oldValue = getPredFor(host);
23  double newValue = oldValue + (1 - oldValue) * PEnc;
24
25  //Fixa valor para previsibilidade de entrega para o destino
26  if (this.getHost().getContatoDireto() && host.getAddress()==destino)
27  {
28      newValue = 0.9;
29  }
30  preds.put(host, newValue);
31  lastEncouterTime.put(host, simTime);
32  }

```

A segunda alteração desativa o mecanismo envelhecimento. Quando o procedimento de envelhecimento é executado, é aferido se o nó possui contato direto com o destino, caso positivo, a *previsibilidade de entrega* não é afetada pelo mecanismo. O algoritmo 2 apresenta as mudanças no código (linhas 11 a 19).

Algoritmo 2

```

1  //Envelhecimento das Previsibilidades de Entrega
2  private void ageDeliveryPreds() {
3      double timeDiff = (SimClock.getTime() - this.lastAgeUpdate) / secondsInTimeUnit;
4      if (timeDiff == 0)
5      {
6          return;
7      }
8      double mult = Math.pow(GAMMA, timeDiff);
9      for (Map.Entry<DTNHost, Double> e : preds.entrySet()) {
10
11  //O nó com contato direto com destino, não reduz a probabilidade com o tempo
12      if (e.getKey().getAddress() == destino && this.getHost().getContatoDireto())
13      {
14          e.setValue(e.getValue());
15      }else
16      {
17          e.setValue(e.getValue()*mult);
18      }
19      }
20      this.lastAgeUpdate = SimClock.getTime();
21  }

```

O fluxograma exposto na figura 20 resume os processos descritos nos algoritmos 1 e 2.

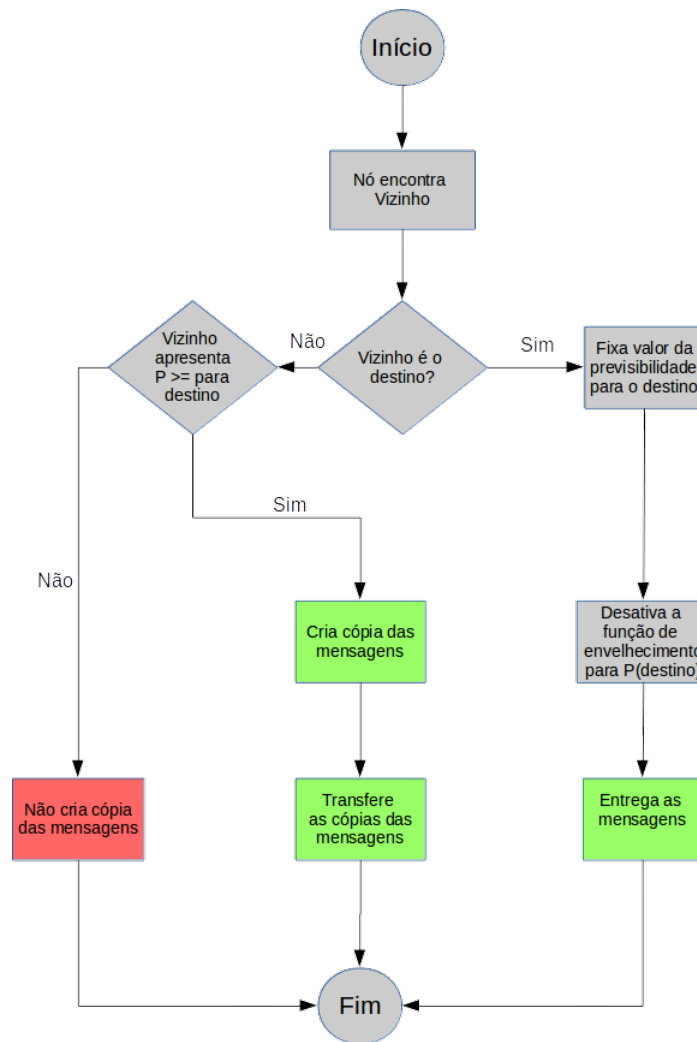


Figura 20: Fluxograma da proposta de alteração do Protocolo Prophet-Bus.

As alterações propostas visam manter valores fixos e uniformes para a *previsibilidade* dos veículos que podem realizar a entrega direta das mensagens. A disseminação desses valores pela rede continua a ser realizada utilizando a propriedade transitiva já existente no protocolo *Prophet*. Como resultado, todos os veículos que estão no percurso do destino, ao serem contatados por um vizinho com uma nova mensagem, sempre receberão a cópia desse agregado, aumentando as possibilidades de entrega e a redução do atraso.

4.2 SPRAY AND WAIT BUS

O protocolo *Spray and Wait Bus* apoia-se no algoritmo do *Spray and Wait*, no qual o funcionamento básico do protocolo original consiste em realizar uma pulverização limitada, de acordo com um número predeterminado de cópias de cada mensagem. Após a fase de pulverização, o protocolo entra na fase de espera até que a mensagem chegue ao destino. Essa

pulverização pode ser executada utilizando o método normal, no qual envia uma cópia única a cada encontro, ou binário, enviando a metade das cópias existentes para cada contato até que se tenha apenas uma cópia no *buffer*.

Utilizando o método normal ou binário, as cópias são enviadas a cada encontro sem qualquer tipo de avaliação prévia. Assim o encaminhamento é realizado de forma totalmente oportunista e aleatória, pois não há conhecimento sobre informação da rede ou das possibilidades de entrega do nó vizinho.

Com base no modo de pulverização binário, a proposta de alteração do protocolo *Spray and Wait Bus* resume-se em acrescentar uma decisão de encaminhamento, considerando a direção e o conhecimento do contato direto do nó vizinho com o destino. É presumido que a localização e o endereço do destino são únicos e conhecidos por todos na rede, do mesmo modo como a direção de um nó e seus vizinhos também são conhecidas. A informação da direção de um nó pode ser obtida com base nas informações de um sistema GPS ou por bússolas instaladas nos veículos, enquanto o endereço e a localização do destino podem ser pré-carregado em um banco de dados local.

A cada encontro, o nó verifica se a identificação do vizinho corresponde com o destino. Caso positivo, registra esse contato e entrega as mensagens que estão em seu *buffer*; caso contrário, é verificada a direção de ambos os nós, e com base nessas informações o protocolo *Spray and Wait Bus*, realiza uma pulverização binária seletiva, se atendida qualquer uma das seguintes condições:

1. Se o nó detentor das cópias estiver se afastando do destino e o nó vizinho se aproximando ou;
2. Se o nó vizinho possui contato direto com o destino.

Caso nenhuma das condições seja atendida no encontro atual, o nó não enviará qualquer cópia de suas mensagens, mantendo-as até encontrar um vizinho que atenda ao menos uma das condições.

O propósito dessa estratégia é direcionar a pulverização das mensagens para as regiões próximas ao destino, utilizando a direção dos veículos, o que aumentaria a probabilidade de entrega. Do mesmo modo, o protocolo deve reduzir a sobrecarga, pois seleciona os nós de acordo com os critérios apresentados, antes de realizar o encaminhamento.

O fluxograma existente na figura 21 descreve o processo executado a cada encontro no protocolo proposto.

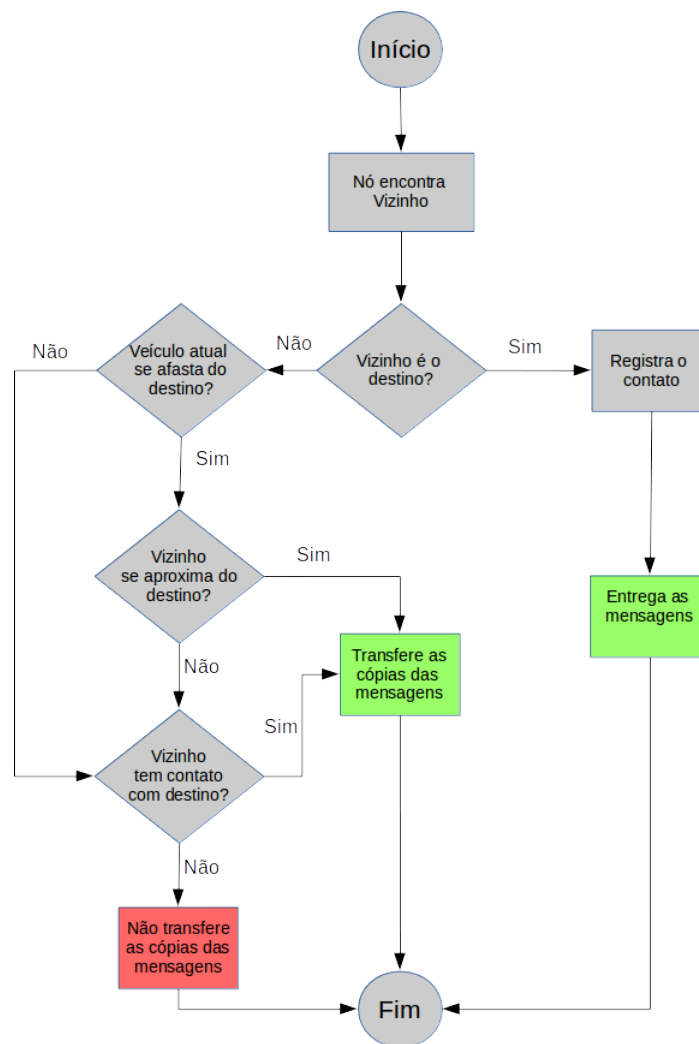


Figura 21: Fluxograma da proposta de alteração do Protocolo Spray and Wait Bus.

No capítulo 5 a seguir, são apresentados o resumo do ambiente de simulação, as métricas de avaliação e, finalmente, os resultados obtidos com as alterações nos protocolos (*Spray and Wait Bus* e *Prophet-Bus*) propostos nesta dissertação.

5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Tendo em vista o cenário de mobilidade construído com dados do ambiente real, o qual representa todo o transporte público urbano de Curitiba-PR, e do padrão de tráfego de uma aplicação de monitoramento de frota (apresentados respectivamente nas seções 3.2 e 3.3), foi avaliado o comportamento da rede, empregando os protocolos de roteamento *Prophet e Spray and Wait* (originais) com os propostos *Prophet-Bus e Spray and Wait Bus*.

Foram utilizados os alcances de comunicação entre veículos de 200m a 1km, com taxas de envio de 15min, 45min e 90min em simulação de 3h. 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 apresentados neste capítulo correspondem à média das 30 execuções com intervalo de confiança de 95%.

Embora o padrão WAVE seja capaz de oferecer um alcance de comunicação de até 1.000 metros, os diversos obstáculos presentes no meio urbano dificultam a propagação do sinal de rádio, limitando a distância para a conectividade entre os veículos. Estudos realizados por Cheng et al. (2007) e Karedal et al. (2011) sugerem alcances mais conservadores. Portanto, neste trabalho exibimos os resultados com configurações de comunicação de 200 a 1000 metros, considerando que os valores próximos a 200m seriam os mais adequados à realidade de um ambiente urbano.

O tamanho do buffer foi configurado para não causar impacto negativo na rede, ou seja, seu tamanho foi definido para suportar a quantidade de cópias geradas, tamanho, TTL e taxa de geração das mensagens. Na tabela 4 é possível visualizar o resumo das configurações utilizadas na simulação.

Tabela 4: Parâmetros das Simulações

Parâmetro	Valor
Simulador	One
Tempo de Simulação	180min
Cenário	Trans. público urbano de Curitiba
Num. de Veículos	1.280
Num. de Linhas	267
Velocidade	10km/h ~ 47km/h
Aplicação	Monitoramento
Raio de Alcance	200m, 350m, 500m, 750m e 1km
Taxa de Transmissão	11Mbps
TTL	180min
Tamanho do Buffer	250MB

Entre os protocolos de roteamento confrontados, os parâmetros utilizados para o *Prophet* e *Spray and Wait*, incluindo as propostas neles baseadas, estão resumidos na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros dos Protocolos

Prophet	
PEncMax	0,5
L TYP	1.800 seg
BETA	0,9
GAMMA	0,999885791
SecondsInTimeUnit ¹	30 seg
Spray and Wait	
Núm. de Cópias	60
Modo de Pulverização	Binário

5.1 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Na avaliação dos protocolos *Prophet* e *Spray and Wait* (originais) e dos protocolos *Prophet-Bus* e *Spray and Wait Bus*, as seguintes medidas de desempenho são consideradas:

Taxa de entrega: Representa o percentual das mensagens criadas ($M_{criadas}$) efetivamente entregues ($M_{entregues}$) por cada protocolo testado no mesmo tempo de simulação. A equação 6 demonstra como é realizado este cálculo.

¹Parâmetro da unidade de tempo em segundos utilizado para o cálculo de envelhecimento das *previsões de entrega* no Simulador One. Valores maiores implicam em um envelhecimento menor para as *previsibilidades de entrega*.

$$Taxa\ de\ Entrega = \frac{M_{entregues}}{M_{criadas}} * 100 \quad (6)$$

Atraso Médio: Representa o atraso fim-a-fim global, ou seja, o tempo médio decorrido da criação até a entrega das mensagens. A equação 7 mostra como é realizado este cálculo.

$$Atraso\ Medio = \frac{\sum atrasos}{M_{entregues}} \quad (7)$$

Sobrecarga: Representa a razão entre o número de réplicas ($M_{replicas}$) das mensagens transmitidas na rede pela quantidade de mensagens recebidas ($M_{entregues}$). A equação 8 apresenta como é realizado esse cálculo.

$$Sobrecarga = \frac{M_{replicas} - M_{entregues}}{M_{entregues}} \quad (8)$$

5.2 PROPHET VS PROPHET-BUS

A figura 22 apresenta os resultados obtidos para a taxa de entrega, utilizando os protocolos *Prophet-Bus* e *Prophet*, com as frequências de envio de 15min, 45min e 90min e os raios de comunicação de 200m a 1000m.

Os protocolos apresentam melhor desempenho para a taxa de entrega à medida que o raio de alcance é ampliado e a quantidade de mensagens é reduzida. O protocolo proposto (*Prophet-Bus*) aponta resultados ligeiramente melhores que o protocolo original, principalmente com intervalos de envio menores como 15min e 45min, conforme especificado nas figuras 22(a) e 22(b).

Para uma frequência de envio 15min e raio de alcance de 200m (figura 22(a)), os protocolos *Prophet-Bus* e *Prophet* revelam respectivamente uma taxa de entrega de $57,9\% \pm 0,3$ e $56,7\% \pm 0,3$. A diferença de desempenho entre os protocolos segue praticamente constante até o raio de alcance de 1.000m, onde o *Prophet-Bus* apresenta o valor de $69,4\% \pm 0,1$ e o protocolo original $68\% \pm 0,1$.

Na figura 22(b), representando o envio de mensagens a cada 45min, a vantagem do protocolo *Prophet-Bus* sobre o protocolo original é reduzida. Para um raio de comunicação de 200m, o protocolo *Prophet-Bus* atinge uma taxa de entrega de $91\% \pm 0,2$, enquanto o protocolo original apresenta $90,4\% \pm 0,3$. Da mesma forma, a diferença de desempenho segue até os 1.000m, em que o protocolo proposto apresenta $99,71\% \pm 0,1$ e o original $99,4\% \pm 0,1$.

A diferença de desempenho entre os protocolos é dissipada com o uso de um intervalo

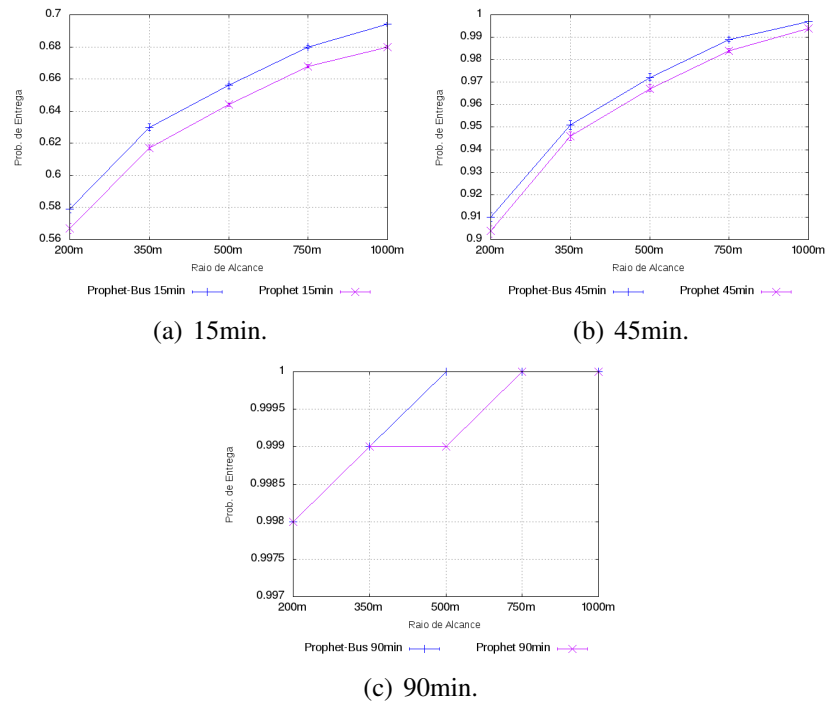


Figura 22: Taxa de entrega dos protocolos Prophet e Prophet-Bus para 15min, 45min e 90min.

de envio de 90min. Dessa maneira, ambos os protocolos apresentam uma taxa de entrega de $99\% \pm 0,1$ para um raio de alcance de 200m e $100\% \pm 0$ para um raio de 1.000m. Na figura 23 é apresentado o resultado agrupado da métrica taxa de entrega para todas as condições de cenário simuladas.

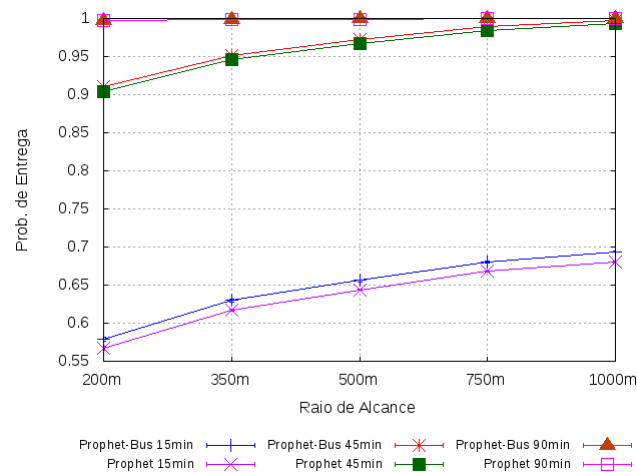


Figura 23: Taxa de entrega dos protocolos Prophet e Prophet-Bus.

A figura 24 denota os resultados para o atraso médio com os mesmos intervalos de envio de 15min, 45min e 90min e alcances de comunicação de 200m a 1.000m.

As figuras 24(a), 24(b) e 24(c) indicam uma redução do atraso médio para ambos os protocolos à medida que o raio de alcance é ampliado e a quantidade de mensagens é re-

duzida. Nessa métrica, o protocolo *Prophet-Bus* atinge melhores resultados em comparação ao protocolo original, ao entregar as mensagens com menor atraso, independentemente das configurações do cenário.

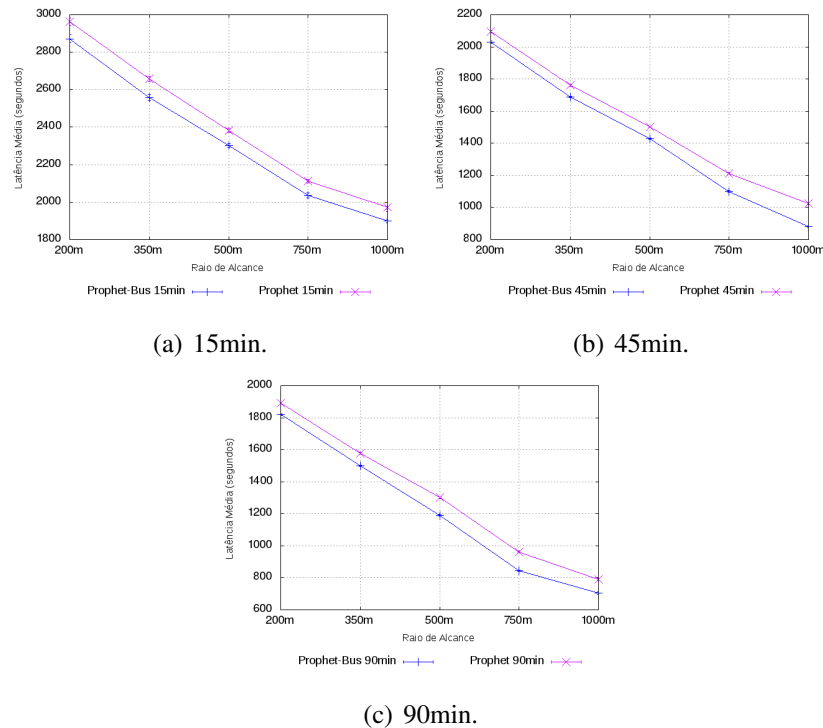


Figura 24: Atraso médio dos protocolos Prophet e Prophet-Bus para 15min, 45min e 90min.

Na figura 24(a), representando o envio de uma mensagem a cada 15min, o *Prophet-Bus* realiza a entrega do pacote no tempo médio de $2.872 \pm 19(s)$, enquanto o protocolo *Prophet* original apresenta um tempo médio de $2.962 \pm 20(s)$, ambos para um raio de comunicação de 200 metros. Para um raio de 1.000 metros, o *Prophet-Bus* demonstra um atraso de $1.899 \pm 10(s)$, enquanto o protocolo original aponta um atraso de $1.974 \pm 11(s)$.

Aplicando o envio de 1 mensagem a cada 45min, conforme ilustrado na figura 24(b), o protocolo proposto exibe um atraso de $2.030 \pm 7(s)$, enquanto o protocolo original apresenta $2.096 \pm 8(s)$, ambos para um cenário com alcance de 200m. Para um cenário com raio de comunicação de 1.000m, os protocolos *Prophet-Bus* e *Prophet* apresentam respectivamente um atraso médio de 880 ± 5 e $1.023 \pm 4(s)$.

O protocolo *Prophet-Bus* mantém um atraso médio inferior também no cenário com envio de mensagens mais esparsas, conforme ilustrado na figura 24(c). Para uma cobertura de comunicação de 200m por veículo, o protocolo obtém um atraso médio de $1.820 \pm 7(s)$, ao mesmo tempo que o protocolo original alcança $1.890 \pm 8(s)$. Para o alcance de 1.000m, *Prophet-Bus* e *Prophet* apresentam nesta ordem um atraso médio de $704 \pm 7(s)$ e $789 \pm 7(s)$. A figura 25

ilustra o resultado agrupado para o atraso médio com todos os intervalos de envio e raios de alcance aplicados.

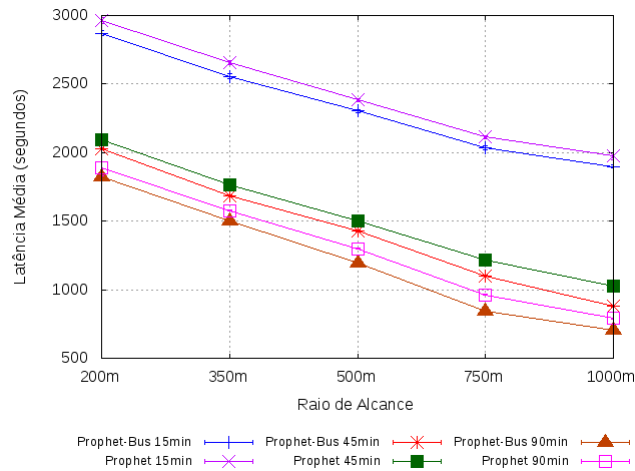
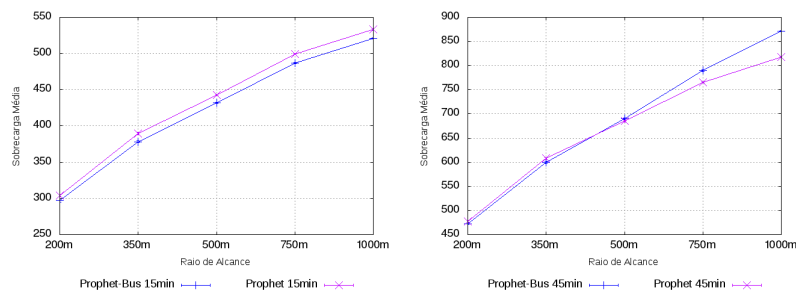


Figura 25: Atraso médio para os protocolos Prophet e Prophet-Bus.

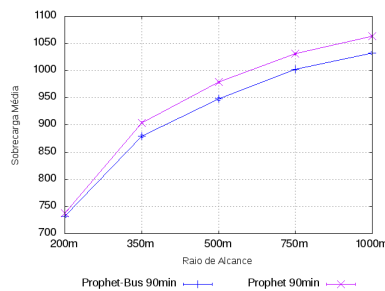
A figura 26 expõe os resultados obtidos para a sobrecarga média, empregando o protocolo proposto e o original, com as frequências de envio de 15min, 45min e 90min e alcances de comunicação de 200m a 1.000m.

Conforme disposto no conjunto de figuras 26(a), 26(b) e 26(c), a sobrecarga apresenta um constante crescimento, ao passo que os raios de comunicação são estendidos e o intervalo de envio de mensagens é ampliado.



(a) 15min.

(b) 45min.



(c) 90min.

Figura 26: Sobrecarga dos protocolos Prophet e Prophet-Bus para 15min, 45min e 90min.

Para um cenário com intervalo de envio de 15min, ilustrado na figura 26(a), o protocolo *Prophet-Bus* aplica uma menor sobrecarga média no ambiente, independentemente do alcance de comunicação. Com um raio de alcance de 200m, o protocolo acusa uma sobrecarga de mensagens de 297 ± 2 , enquanto o protocolo original aplica uma sobrecarga de 304 ± 2 mensagens. Para o alcance de 1.000m, o protocolo proposto exibe uma sobrecarga 521 ± 1 e o protocolo *Prophet* 533 ± 1 .

Na figura 26(b), em que são apresentados os resultados para o intervalo de comunicação de 45min, o protocolo proposto apresenta um desempenho ligeiramente superior para os alcances de comunicação menores. Utilizando um raio de 200m, o protocolo emprega uma sobrecarga de 473 ± 2 mensagens, enquanto o protocolo proposto indica uma sobrecarga de 478 ± 2 mensagens. O *Prophet-Bus* continua apontando uma menor sobrecarga até o cenário com alcance de aproximadamente 500 metros, quando o protocolo original passa a obter melhores resultados. Já com um alcance de 1.000m, o *Prophet* aplica uma sobrecarga de 818 ± 2 , ao passo que o protocolo proposto utiliza uma sobrecarga de 871 ± 2 mensagens.

Em um cenário com taxa de envio de mensagens a cada 90min, o protocolo original impõe uma maior sobrecarga no ambiente, não importando o alcance de comunicação. Sendo um raio de 200m, o protocolo proposto utiliza uma sobrecarga de 732 ± 2 , enquanto o *Prophet* emprega 738 ± 2 mensagens. À medida que o raio de comunicação é ampliado, o desempenho do protocolo proposto, em relação ao protocolo original, é levemente ampliado, demonstrando no ambiente com alcance de 1000m, uma sobrecarga de 1.032 ± 2 , contra 1.063 ± 2 mensagens do protocolo original. A figura 27 exhibe o resultado agrupado para a sobrecarga média com todas as configurações usadas nas simulações.

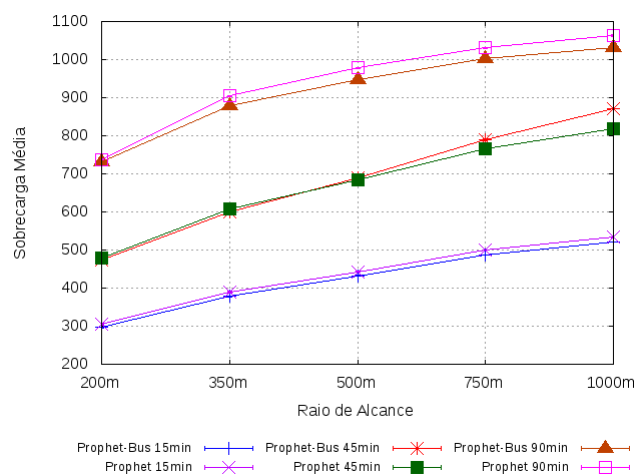


Figura 27: Sobrecarga média dos protocolos Prophet e Prophet-Bus.

Com exceção da métrica sobrecarga em algumas condições aplicadas no cenário, o

protocolo *Prophet-Bus* proposto neste trabalho, de forma geral, apresenta melhor desempenho comparado ao protocolo original. Embora as diferenças tenham se apresentado tênues, ainda assim indicam que as mudanças realizadas produziram efeito positivo no aproveitamento da mobilidade e das características do cenário.

Na seção 5.3, são apresentados os resultados obtidos para o mesmo cenário e condições, com o uso do segundo protocolo proposto nesta dissertação.

5.3 SPRAY AND WAIT VS SPRAY AND WAIT BUS

A figura 28 mostra os resultados para a taxa de entrega, utilizando os protocolos *Spray and Wait Bus* e *Spray and Wait*, com as frequências de envio de 15min, 45min e 90min e com raios de comunicação de 200m a 1.000m.

Como esperado, ambos os protocolos também demonstram melhor desempenho para a taxa de entrega à medida que o raio de alcance foi ampliado e a quantidade de mensagens, reduzida. O protocolo proposto (*Spray and Wait Bus*) apresenta resultados melhores que o protocolo original, principalmente com intervalos de envio maiores como 45min e 90min, conforme apresentado nas figuras 28(b) e 28(c).

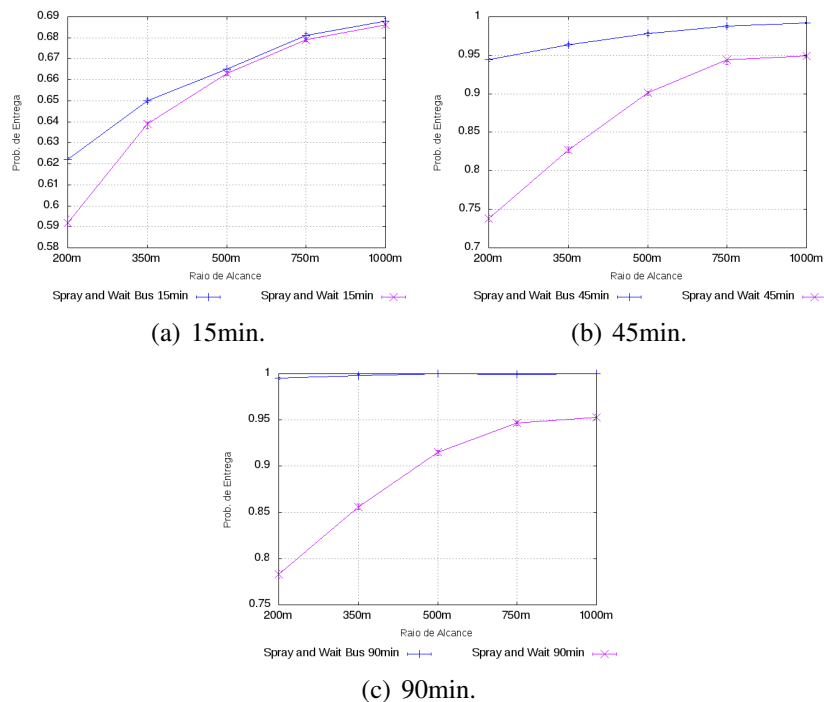


Figura 28: Taxa de entrega dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus para 15min, 45min e 90min.

Nas condições do cenário com envio de uma mensagem a cada 15 minutos e alcance

de comunicação de 200 metros, ilustrado na figura 28(a), o protocolo sugerido nesta dissertação aponta uma taxa de entrega $62,2\% \pm 0,2$ para $59,2\% \pm 0,2$ do protocolo original. Para a mesma taxa de envio de mensagens, a diferença de desempenho entre os protocolos foi reduzida de acordo com a ampliação do raio de alcance, de modo que o *Spray and Wait Bus* e *Spray and Wait* apresentem respectivamente taxas de entrega de $68,8\% \pm 0,01$ e $68,6\% \pm 0,1$, para um raio de comunicação de 1.000 metros.

Na figura 28(b), os resultados exibem um desempenho razoável do protocolo *Spray and Wait Bus* em comparação ao protocolo original. Considerando o envio de dados a cada 45 minutos e um raio de comunicação de 200 metros, o protocolo proposto revela uma taxa de entrega de $94,4\% \pm 0,2$ frente a $73,8\% \pm 0,4$ do protocolo original. À proporção que o raio de alcance é ampliado, a diferença de desempenho entre os protocolos demonstra uma redução, de modo que, ao utilizar um alcance de comunicação de 1.000 metros, os protocolos *Spray and Wait Bus* e *Spray and Wait* apresentam na devida ordem taxas de entrega de $99,2\% \pm 0,1$ e $94,9\% \pm 0,2$.

Dispondo de um intervalo de transmissão de 90min, o protocolo modificado atinge taxas de entrega de $99,5\% \pm 0,1$ e $100\% \pm 0$, para um alcance de 200 metros e 1.000 metros respectivamente, ao passo que o protocolo original apresenta $78,3\% \pm 0,4$ e $95,3\% \pm 0,3$ para os mesmos raios de alcance. Na figura 29, é evidenciado o resultado agrupado para todas as frequências de envio e raios de comunicação.

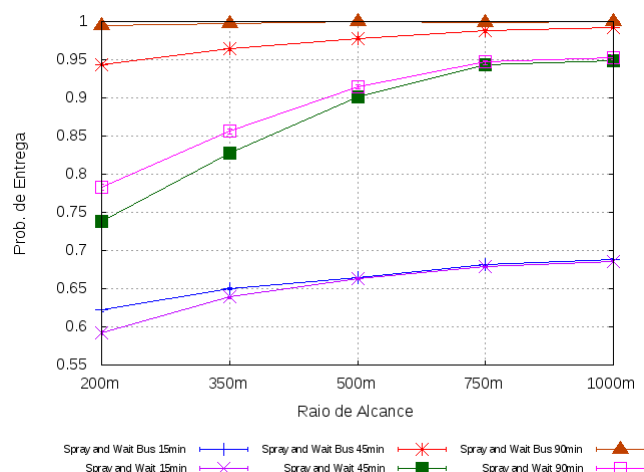


Figura 29: Taxa de entrega dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus.

A figura 30 aborda os resultados para o atraso médio, tendo em vista as mesmas configurações de cenário. Os resultados indicam uma redução do atraso para os dois protocolos confrontados, conforme o alcance de comunicação é ampliado.

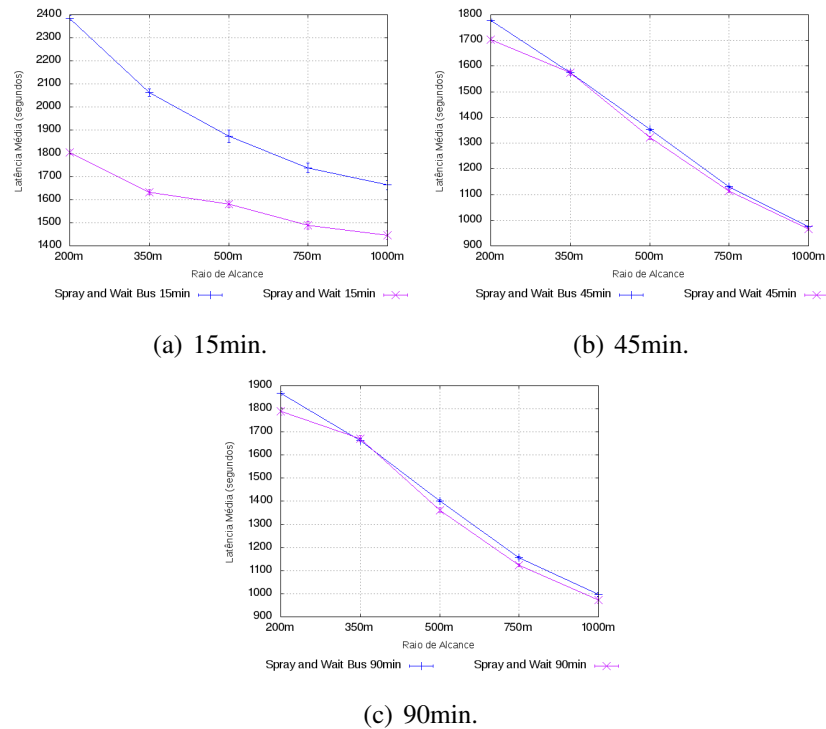


Figura 30: Atraso médio dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus para 15min, 45min e 90min.

No mesmo conjunto de figuras, ainda é possível verificar o menor atraso apresentado pelo protocolo original, principalmente no cenário com intervalo de envio de 15 minutos, indicado na figura 30(a). O protocolo original e o proposto apresentam respectivamente $1.805 \pm 9(s)$ e $2.385 \pm 10(s)$, para um alcance de 200m e $1.446 \pm 18(s)$ e $1.663 \pm 20(s)$ para o alcance de 1.000m. A figura 31 expressa os resultados de todas as configurações do cenário.

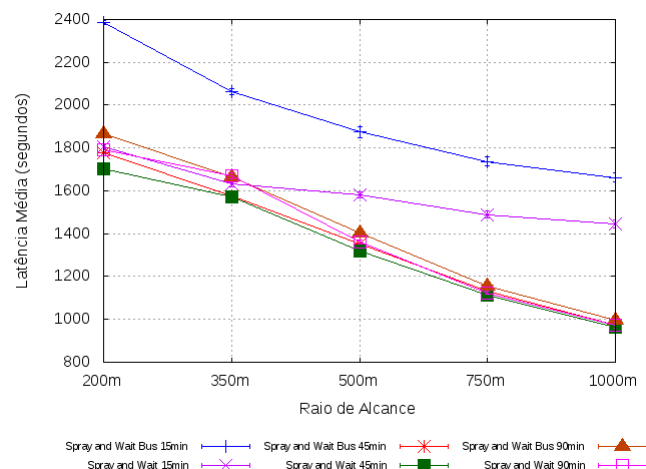


Figura 31: Atraso médio para os protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus.

Na figura 32 são apresentados os resultados obtidos para a sobrecarga média, com os intervalos de envio de 15min, 45min e 90min e alcances de comunicação de 200m à 1000m.

Para esta métrica, ambos os protocolos apresentam um melhor desempenho, conforme o intervalo entre as transmissões de mensagens é ampliado de 15 para 90 minutos.

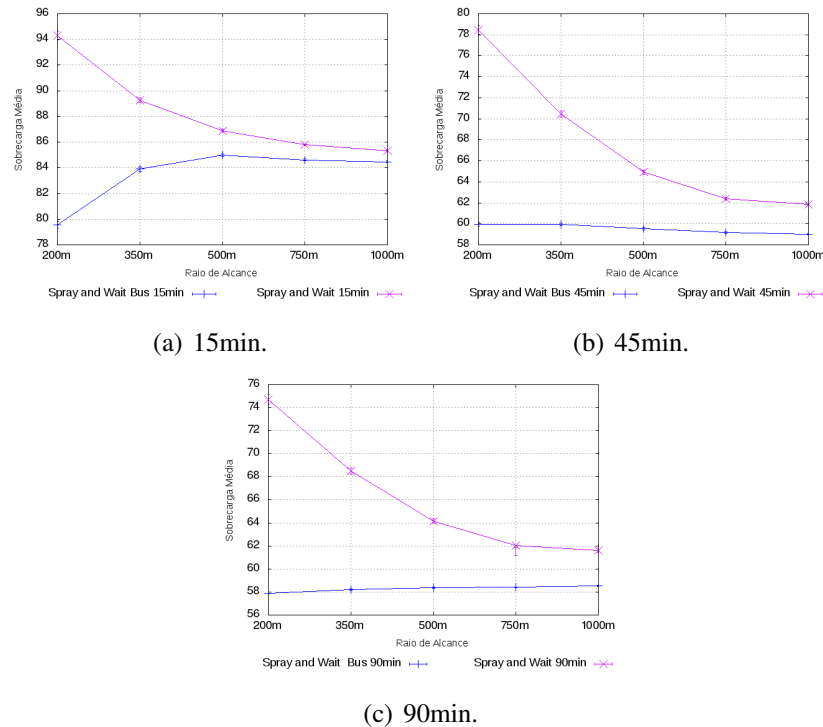


Figura 32: Sobrecarga dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus para 15min, 45min e 90min.

A figura 32 também manifesta uma redução da sobrecarga para o protocolo *Spray and Wait* original à medida que o alcance de comunicação é ampliado. Esse comportamento não é perceptível no protocolo proposto, uma vez que o mecanismo de decisão de encaminhamento seleciona os melhores veículos para o envio das cópias – conforme condições definidas e apresentadas na seção 4.2. Nas simulações, este mecanismo permitiu maiores taxas de entrega utilizando o mesmo número de cópias por mensagem (60), revelando uma maior eficiência no uso da rede em qualquer configuração de cenário como apresentado nas figuras 32(a), 32(b) e 32(c). A figura 33 resume os resultados de todas as configurações utilizadas para o cenário.

Entre todas as métricas utilizadas, o protocolo *Spray and Wait Bus* revelou melhor desempenho para a taxa de entrega e sobrecarga, entretanto evidenciou maior atraso em todas as configurações do cenário simuladas. Em parte, esse dado é decorrente do tempo necessário para os veículos que detêm o destino em seu itinerário registrarem esse contato. Assim, apenas após o primeiro encontro com o destino, essa informação pode ser utilizada como um dos critérios na decisão de encaminhamento.

A seção 5.4 tece uma análise do desempenho geral entre os dois protocolos propostos

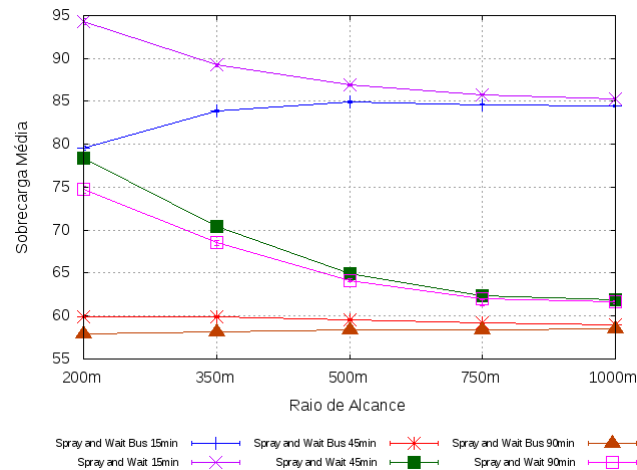


Figura 33: Sobrecarga média dos protocolos Spray and Wait e Spray and Wait Bus.

neste trabalho: *Spray and Wait Bus* e *Prophet-Bus*.

5.4 SPRAY AND WAIT BUS VS PROPHET-BUS

Na figura 34 é comparado o desempenho para a métrica taxa de entrega entre os dois protocolos alterados nesta dissertação. Os resultados exibem melhor desempenho do protocolo *Spray and Wait Bus*, com frequências de comunicação de 15 e 45 minutos e com as configurações de cenário que utilizam alcances de comunicação até 750 metros. Nos cenários com intervalo de envio de 90 minutos, os protocolos desenvolvem desempenho muito similar.

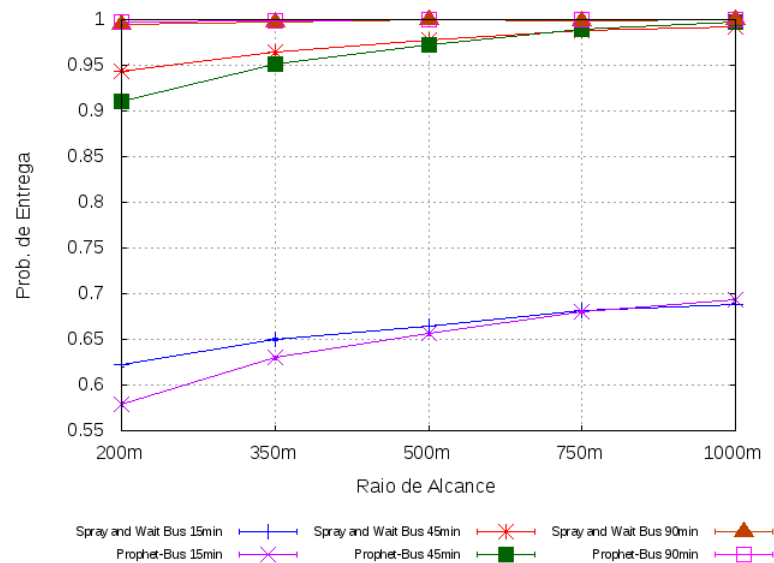


Figura 34: Taxa de entrega para os protocolos Spray and Wait Bus e Prophet-Bus.

As figuras 37 e 38 do anexo B apresentam os mapas com os índices de taxas de entrega

para cada linha nas condições de cenário com raio de alcance de 200m e intervalos de envio de 15, 45 e 90 minutos. Assim como apresentado na figura 34, é possível verificar o impacto causado na taxa de entrega, ao passo que o intervalo de geração das mensagens é ampliado.

Na figura 35 é comparado o desempenho dos protocolos para o atraso médio. O protocolo *Spray and Wait Bus* apresenta menor atraso médio para as configurações de cenário com intervalo de envio de 15min. Com um envio de mensagens a cada 45min, o protocolo *Spray and Wait Bus* exibe melhor resultado até os ambientes com alcance de 500m. O menor atraso observado comparando todas as configurações foi alcançado pelo protocolo *Prophet-Bus* com o envio de mensagens a cada 90min e alcance de comunicação de 1.000m.

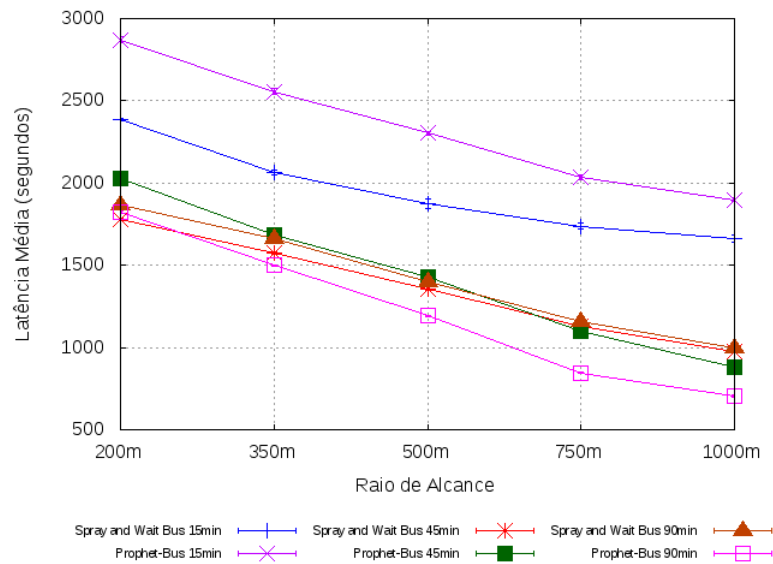


Figura 35: Atraso médio para os protocolos Spray and Wait Bus e Prophet-Bus.

As figuras 39 e 40 do anexo B apresentam os mapas com os índices de atrasos para cada linha nas condições de cenário com raio de alcance de 200m e intervalos de envio de 15, 45 e 90 minutos. É possível verificar um menor atraso na região central, correspondente a região do destino das mensagens. Além disso, observa-se que o atraso nessas regiões também é reduzido conforme o intervalo de geração das mensagens é ampliado.

O desempenho da métrica sobrecarga pode ser averiguado na figura 36, onde é possível observar que o protocolo *Prophet-Bus* apresenta um desempenho inferior em todas as condições de cenário avaliadas. Estes resultados, em parte, podem ser explicados pelas características do comportamento do protocolo e das configurações para o (TTL) utilizados nos cenários das simulações.

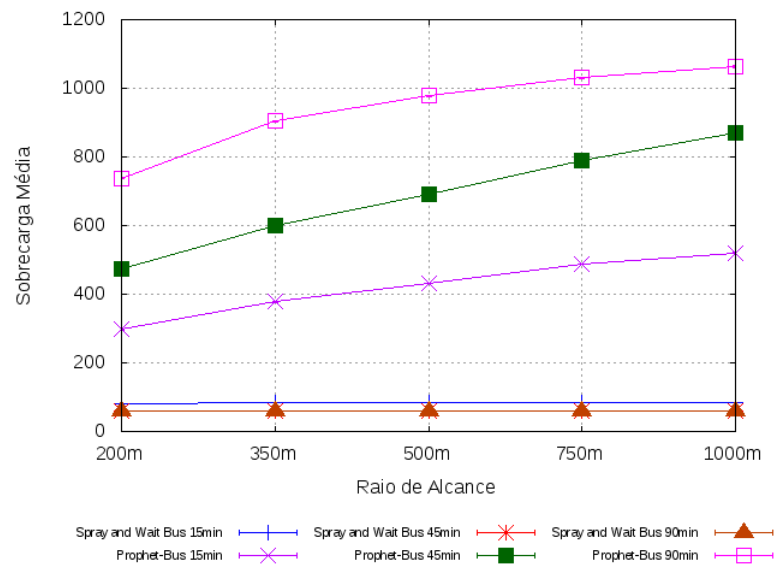


Figura 36: Sobrecarga média para os protocolos Spray and Wait Bus e Prophet-Bus.

De acordo com o algoritmo do *Prophet-Bus* os veículos enviam uma cópia das mensagens existentes no buffer para cada vizinho que apresenta uma previsibilidade de entrega maior ou igual. Neste caso, cada mensagem é replicada para muitos veículos durante todo tempo de simulação – considerando o tempo de vida de cada mensagem (180min), o que favorece a transmissão de muitas cópias, gerando uma maior sobrecarga. Adicionalmente o protocolo *Prophet-Bus* também apresenta um comportamento puramente epidêmico durante um período inicial, até que o tempo e a mobilidade dos veículos permitam definir e atualizar os valores de previsibilidade que são utilizados nas decisões de encaminhamento.

Por outro lado, o protocolo *Spray and Wait Bus* envia um número limitado de 60 réplicas de cada mensagem. Deste modo a sobrecarga apresentará um valor superior a 60 apenas quando o protocolo for incapaz de atingir 100% de taxa de entrega durante o tempo de simulação. Diante disso, como apresentando nas figuras 34 e 36, o protocolo *Spray and Wait Bus* apresenta as melhores taxas de entrega com um uso menor de réplicas para cada mensagem, e por estas condições, expressa as menores sobrecargas em todas as configurações de ambiente testadas.

Entre todos os protocolos avaliados, incluindo os modificados e expostos nesta dissertação, o *Spray and Wait Bus* revelou melhor desempenho geral, considerando principalmente as métricas taxas de entrega e sobrecarga, o que indica maior eficiência em seu uso no cenário simulado, representando o transporte público da cidade de Curitiba-PR.

6 CONCLUSÃO

Na presente dissertação, como contribuição inicial um grande volume de dados correspondente aos movimentos reais de cada veículo, como traçados das linhas, pontos de parada e outras características foram tratados e formatados para a construção de um cenário virtual, que representa todo o transporte público do município de Curitiba. Este cenário, disponibilizado no Simulador One, oferece melhores condições de avaliação da capacidade do ambiente como plataforma para a construção de uma VDTN, bem como melhores condições para os testes de aprimoramento de protocolos de roteamento específicos para esse tipo de cenário.

A próxima contribuição do trabalho apresenta e avalia os protocolos *Spray and Wait Bus e Prophet-bus* como modificações dos protocolos originais *Spray and Wait e Prophet*. Os protocolos propostos exploram algumas propriedades do transporte público, em especial seus itinerários fixos, que garantem o encontro recorrente com determinado destino existente em seu percurso.

Para fins de avaliação, foi proposto um padrão de tráfego no qual a transmissão de mensagens é realizada por cada um dos veículos presentes no ambiente, em intervalos regulares de 15min, 45min e 90min com destino a uma central fixa, localizada no centro da cidade. Esse padrão de tráfego representa uma aplicação de monitoramento, na qual os veículos informam dados relativos a sua posição, velocidade, condições mecânicas entre outras informações, porém o mesmo modelo também pode ser empregado no monitoramento ambiental e no estudo inicial de uma ferramenta para avisos de incidentes de segurança.

Os resultados obtidos nas simulações apontam que a densidade e a mobilidade dos veículos pertencentes ao transporte público urbano da cidade permitem que as mensagens trafeguem por longos caminhos e sejam entregues ao seu destino. É possível observar que todos os protocolos (exceto *Spray and Wait*) são capazes de atingir taxas de aproximadamente 100% nos cenários que utilizam um intervalo de envio de 90 minutos e taxas superiores a 90% com intervalos de envio de 45min.

Por outro lado, em condições com taxa de envio de 15min, os índices menores de

taxa de entrega conquistados pelos mesmos protocolos indicam uma incapacidade de a rede entregar as mensagens de forma a suprir essa taxa de geração. Ao verificar os tempos de atraso médio, os menores valores alcançados com o uso de intervalos de envio de 15min apresentam um tempo médio de $1.446 \pm 18(s)$ em cenários com alcance de 1.000m e de $1.805 \pm 9(s)$ – aproximadamente 30min –, para um alcance de 200m.

Em relação às modificações sugeridas e apresentadas no protocolo *Prophet-bus*, os resultados indicam uma pequena melhora em todas as métricas e para quaisquer configurações de cenário, legitimando a eficácia das mudanças para o aproveitamento das características do ambiente.

O mecanismo de decisão de encaminhamento do *Prophet e Prophet-bus* permite que determinado veículo encaminhe uma mensagem para qualquer vizinho que apresente previsibilidade de entrega maior ou igual e nesse caso, as mensagens são replicadas por um longo período até atingir o seu tempo de vida. Adicionalmente a esse fato, no início das simulações, o protocolo se comporta como protocolo epidêmico puro, pois necessita de certo tempo até que a mobilidade e os encontros permitam-lhe obter os históricos utilizados na composição dos valores de *previsibilidade de entrega*. Tais fatores geram sobrecarga superior em comparação ao *Spray and Wait bus e Spray and Wait*, que utilizam um número fixo para as cópias de cada mensagem.

Para o protocolo *Spray and Wait bus*, como segunda proposta desta dissertação, utilizamos como base o protocolo *Spray and Wait* que originalmente não utiliza qualquer decisão de encaminhamento. A mudança proposta incluí duas condições para o encaminhamento do pacote, considerando o movimento dos veículos e o contato prévio do vizinho com o destino, também com base nos itinerários fixos dos veículos, que assegura o reencontro com o destino após um primeiro contato.

A inclusão de uma decisão de encaminhamento na proposta do *Spray and Wait Bus* mostrou-se promissora, em especial, para as métricas taxa de entrega e sobrecarga. As alterações permitiram ao *Spray and Wait bus* atingir os melhores valores para as referidas métricas, principalmente em cenários com alcances de comunicação mais curtos e ajustados à realidade de um ambiente urbano. Por outro lado, essas mesmas decisões refletiram maior atraso médio em comparação ao protocolo original, uma vez que o protocolo sugerido seleciona os melhores encontros com base em seus critérios antes de encaminhar as mensagens.

Este trabalho expõe a possibilidade do uso dos veículos do transporte público urbano da cidade de Curitiba como plataforma para a construção de uma VDTN, haja vista que as taxas de entrega de 100%, para algumas configurações do cenário, mostram que é possível transmitir

os dados de todos os veículos até um ponto fixo no centro da cidade. No entanto, algumas limitações para esse modelo de tráfego também são expostas.

O uso de intervalos de envio muito altos, bem como a incidência de grandes atrasos na rede, pode prejudicar a eficiência de uma aplicação de monitoramento, uma vez que a finalidade desta aplicação é justamente conhecer o estado da frota no menor intervalo de tempo possível. Por esse motivo, propostas para a redução da latência, sobrecarga e o aumento da taxa de entrega, que podem proporcionar melhorias para esse tipo de aplicação e permitir o uso de outras ainda mais exigentes, são discutidas em trabalhos futuros na seção 7.

7 TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos não explorados neste trabalho podem ser utilizados para melhorar algumas das métricas como atraso, taxa de entrega e sobrecarga. Nesse sentido, esse capítulo sugere algumas possibilidades de investigação em trabalhos futuros, de modo não exaustivo, relacionados ao trabalho apresentado e com foco na arquitetura do ambiente e nos protocolos de roteamento.

7.1 SUPRESSÃO DE ENCAMINHAMENTO E LIMPEZA DO BUFFER

Os protocolos de roteamento que utilizam um mecanismo de inundação ou várias cópias – ainda que limitado –, assim como o *Spray and Wait e Prophet* e os propostos nesta dissertação, continuam a disseminar as cópias das mensagens, mesmo quando estas já foram entregues ao destino. Tal comportamento sobrecarrega o meio de transmissão e os *buffers* dos nós com mensagens desnecessárias.

Assim, sugere-se o uso de estratégias para a supressão de encaminhamento e a remoção do buffer das mensagens já entregues ao destino. Uma lista com as mensagens entregues pode ser compartilhada e atualizada entre os nós a cada contato. Essa informação pode ser utilizada para a limpeza do buffer, evitando também que as mensagens já entregues continuem sendo propagadas desnecessariamente pela rede. Esse mecanismo poderá reduzir a sobrecarga na rede e, eventualmente, melhorar outras métricas como atraso e taxa de entrega.

7.2 GESTÃO DE PRIORIDADE DA FILA

A dinâmica de uma rede DTN, considerando a velocidade dos veículos que muitas vezes trafegam em sentido opostos, bem como os múltiplos contatos, oferece oportunidades de conexão muito breves que, em muitos casos, não permitem a transferência de todas as mensagens entre os vizinhos. Desse modo a priorização da fila de encaminhamento é um mecanismo a ser explorado.

Os Protocolos *Prophet* e *Prophet-bus*, de acordo com sua implementação no simulador One, empregam uma ordenação da fila para o encaminhamento da mensagem com base nas probabilidades do vizinho, ou seja, encaminha em ordem decrescente as mensagens que o vizinho indica ter maiores probabilidades de entrega. Essa estratégia é descrita na RFC 6693 com a nomenclatura GRTRMax, entretanto muitas outras estratégias nomeadas como GRTRSort, GTMX+, GRTR+ e GTHR são descritas em (LINDGREN et al., 2012) e podem ser implementadas e confrontadas em simulações adicionais para uma avaliação de desempenho comparativa.

Adicionalmente, os protocolos *Spray and Wait* e *Spray and Wait Bus* utilizam um mecanismo de ordenação simples, conhecido como FIFO, no qual as primeiras mensagens armazenadas no buffer são as primeiras a serem encaminhadas a cada oportunidade de contato. Um mecanismo inspirado no protocolo *MaxProp* (BURGESS et al., 2006), baseado no número de saltos das mensagens que prioriza o encaminhamento daquelas com poucos saltos, pode ser utilizado para priorizar a disseminação de mensagens novas. Tal estratégia pode, eventualmente, reduzir o atraso apresentado neste protocolo.

7.3 ARQUITETURA COM RSU'S

No modelo de tráfego utilizado nesta dissertação, todos os veículos enviam mensagens para uma única central. Essa central não fornece dados para a rede e serve apenas como ponto de recepção dos dados, além disso, apesar de o ponto ser escolhido por fazer parte do percurso de muitas linhas, várias outras estão muito distantes, o que dificulta a entrega da mensagem para este destino.

Um modo de reduzir a latência na entrega das mensagens é utilizar mensagens com múltiplos destinos ou mesmo diferenciar e aplicar um destino mais adequado para cada linha. Ao acrescentar múltiplas centrais de recepção de dados, estas podem ser interligadas por meio de um enlace de fibra óptica, o que permitiria também propagar outros tipos de dados em várias regiões da cidade e oferecer informações externas para a VDTN, originalmente não existentes na rede.

Como exemplo, antenas RSU's interligadas podem ser aplicadas em terminais de diferentes regiões da cidade. Do mesmo modo, estudos futuros podem ser realizados na exploração do impacto das posições e quantidade das antenas sobre o ambiente.

REFERÊNCIAS

- ACER, U. et al. Timely data delivery in a realistic bus network. In: **2011 Proceedings IEEE INFOCOM**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 446–450. ISSN 0743-166X.
- AHMED, S. H.; KANG, H.; KIM, D. Vehicular delay tolerant network (VDTN): Routing perspectives. In: **2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 898–903. ISSN 2331-9852.
- AWANG, A. et al. Routing in vehicular ad-hoc networks: A survey on single- and cross-layer design techniques, and perspectives. **IEEE Access**, v. 5, p. 9497–9517, 2017. ISSN 2169-3536.
- BENAMAR, N. et al. Routing protocols in vehicular delay tolerant networks: A comprehensive survey. **Computer Communications**, v. 48, n. Supplement C, p. 141 – 158, 2014. ISSN 0140-3664. Opportunistic networks. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414001212>>.
- BERNERS-LEE, T.; FIELDING, R.; MASINTER, L. **Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax**. [S.l.], Janeiro 2005. Disponível em: <<https://www.ietf.org/rfc/rfc3986.txt>>.
- BURGESS, J. et al. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: **Proceedings IEEE INFOCOM 2006. 25TH IEEE International Conference on Computer Communications**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–11. ISSN 0743-166X.
- CERF, V.; BURLEIGH, S.; HOOKE, A. **Delay-Tolerant Networking Architecture**. [S.l.], Abril 2007. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc4838>>.
- CHENG, L. et al. Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 ghz dedicated short range communication (dsrc) frequency band. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 25, n. 8, p. 1501–1516, Outubro 2007. ISSN 0733-8716.
- CHERIF, A. H. et al. Improving the performances of geographic VDTN routing protocols. In: **2017 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- CURITIBA, P. M. de. **Número de assaltos nos ônibus cai 22%**. 2017. [Http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/numero-de-assaltos-nos-onibus-cai-22-no-quadrimestre/42202](http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/numero-de-assaltos-nos-onibus-cai-22-no-quadrimestre/42202).
- DAVIS, M.; AQUINO, J.; CHANG, A. **OpenJump: Jump Unified Mapping Platform**. 2017. [Http://sourceforge.net/projects/jump-pilot/files/OpenJUMP/1.11/](http://sourceforge.net/projects/jump-pilot/files/OpenJUMP/1.11/).
- DENATRAN. **Departamento Nacional de Trânsito**. 2017. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica>>.

- DIAS, D. S.; COSTA, L. H. M. K. Análise da capacidade de dados de uma rede de ônibus urbanos. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-(SBRC)**, 2016.
- FALL, K.; FARRELL, S. DTN: an architectural retrospective. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 26, n. 5, p. 828–836, Junho 2008. ISSN 0733-8716.
- GOOGLE. **Google Maps**. 2018. <https://www.google.com.br/maps/place/Curitiba,+PR>.
- GRAFLING, S.; MAHONEN, P.; RIIHIJARVI, J. Performance evaluation of IEEE 1609 WAVE and IEEE 802.11p for vehicular communications. In: **2010 Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 344–348. ISSN 2165-8528.
- HOQUE, M. A.; HONG, X.; DIXON, B. Analysis of mobility patterns for urban taxi cabs. In: **2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 756–760.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/por-cidade-estado-estatisticas.html>>.
- IKEDA, M. et al. Performance comparison of DTN routing protocols in vehicular-dtn environment. In: **2014 Ninth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 247–252.
- ISMAIL, D. P. I. I.; JA'AFAR, M. H. F. Mobile ad hoc network overview. In: **2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–8.
- JAIN, S.; FALL, K.; PATRA, R. Routing in a delay tolerant network. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 34, n. 4, p. 145–158, 2004. ISSN 0146-4833. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1030194.1015484>>.
- JIANG, D.; DELGROSSI, L. IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. In: **VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2036–2040. ISSN 1550-2252.
- KAHN, R. The organization of computer resources into a packet radio network. **IEEE Transactions on Communications**, v. 25, n. 1, p. 169–178, Janeiro 1977. ISSN 0090-6778.
- KAKKASAGERI, M. S.; MANVI, S. S. Review: Information management in vehicular ad hoc networks: A review. **J. Netw. Comput. Appl.**, v. 39.
- KAREDAL, J. et al. Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 60, n. 1, p. 323–328, Janeiro 2011. ISSN 0018-9545.
- KERÄNEN, A.; OTT, J.; KÄRKKÄINEN, T. 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, 2009. ISBN 978-963-9799-45-5.
- KHABBAZ, M. J.; ASSI, C. M.; FAWAZ, W. F. Disruption-tolerant networking: A comprehensive survey on recent developments and persisting challenges. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 14, n. 2, p. 607–640, Fevereiro 2012. ISSN 1553-877X.

KRAJZEWICZ, D. et al. Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. **International Journal On Advances in Systems and Measurements**, v. 5, n. 3&4, p. 128–138, Dezembro 2012.

LI, Y. et al. Evaluating the impact of social selfishness on the epidemic routing in delay tolerant networks. **IEEE Communications Letters**, v. 14, n. 11, p. 1026–1028, Novembro 2010. ISSN 1089-7798.

LI, Y. et al. The impact of node selfishness on multicasting in delay tolerant networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 60, n. 5, p. 2224–2238, Junho 2011. ISSN 0018-9545.

LINDGREN, A. et al. **Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks**. [S.l.], Novembro 2012. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc6693>>.

MCMAHON, A.; FARRELL, S. Delay- and disruption-tolerant networking. **IEEE Internet Computing**, v. 13, n. 6, p. 82–87, Novembro 2009. ISSN 1089-7801.

MICHOUD, R.; OROZCO, A. M.; LLANO, G. Mobile ad-hoc routing protocols survey for the design of VANET applications. In: **2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.

MONTEIRO, R. et al. Lessons learned from a real vehicular network deployment of delay-tolerant networking. In: **2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2489–2494. ISSN 2164-7038.

ONU. **Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication**. [S.l.]: United Nations Environment Programme, 2011.

PATHAK, S.; GONDALIYA, N.; RAJA, N. A survey on PROPHET based routing protocol in delay tolerant network. In: **2017 International Conference on Emerging Trends Innovation in ICT (ICEI)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 110–115.

SATO, F.; KIKUCHI, R. Hybrid routing scheme combining with geo-routing and DTN in VANET. In: **2016 10th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 250–255.

SCOTT, K.; BURLEIGH, S. **Bundle Protocol Specification**. [S.l.], Novembro 2007. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/rfc5050>>.

SEDE, M. et al. Routing in large-scale buses ad hoc networks. In: **2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2711–2716. ISSN 1525-3511.

SOARES, V. N. et al. Protocolos de encaminhamento para redes veiculares com ligações intermitentes. In: **CRC 2012: 12ª Conferência sobre Redes de Computadores**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 77–84.

SPYROPOULOS, T.; PSOUNIS, K.; RAGHAVENDRA, C. S. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In: **Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking**. New York, NY, USA: ACM, 2005. (WDTN '05), p. 252–259. ISBN 1-59593-026-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1080139.1080143>>.

SPYROPOULOS, T. et al. Routing for disruption tolerant networks: taxonomy and design. **Wireless Networks**, v. 16, n. 8, p. 2349–2370, Novembro 2010. ISSN 1572-8196. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11276-010-0276-9>>.

TORNELL, S. M. et al. DTN protocols for vehicular networks: An application oriented overview. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 2, p. 868–887, Abril 2015. ISSN 1553-877X.

UPPOOR, S. et al. Generation and analysis of a large-scale urban vehicular mobility dataset. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 13, n. 5, p. 1061–1075, Maio 2014. ISSN 1536-1233.

URBS. **Companhia de Urbanização da Cidade de Curitiba**. 2017. Disponível em: <<http://urbs.curitiba.pr.gov.br/>>.

VAHDAT, A.; BECKER, D. **Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks**. [S.l.], 2000.

VENDRAMIN, A. C. B. K. **Cultural GrAnt: um protocolo de roteamento baseado em inteligência coletiva para redes tolerantes a atrasos**. Tese (Doutorado) — UTFPR, 2012.

VOYIATZIS, A. A survey of delay-and disruption-tolerant networking applications. **Journal of Internet engineering**, v. 5, n. 1, 2012.

ZHANG, C. et al. C4: A new paradigm for providing incentives in multi-hop wireless networks. In: **2011 Proceedings IEEE INFOCOM**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 918–926. ISSN 0743-166X.

ZHANG, Z. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 8, n. 1, p. 24–37, Janeiro 2006. ISSN 1553-877X.

ZHU, Y. et al. A survey of social-based routing in delay tolerant networks: Positive and negative social effects. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 1, p. 387–401, Janeiro 2013. ISSN 1553-877X.

ANEXO A – DADOS DAS LINHAS

As tabelas deste anexo apresentam o resumo das informações extraídas dos registros de movimento de todos os veículos utilizadas no padrão de mobilidade, representando o ambiente na faixa de horário P1 (05h30 - 8h30).

Tabela 6: Dados das Linhas 1 a 165

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
001	5148	12	2	2,95 ~ 3,33
002	9177	23	3	3,64 ~ 4,28
010	19600	48	5	4,15 ~ 4,99
011	22110	23	5	4,13 ~ 4,45
020	45850	17	16	4,90 ~ 5,05
021	48100	14	17	5,08 ~ 5,21
022	43000	9	39	5,70 ~ 5,81
023	42385	9	27	5,97 ~ 6,09
024	18380	5	3	5,10 ~ 5,23
027	17134	35	5	4,70 ~ 5,60
030	66155	145	21	5,12 ~ 6,29
040	51040	110	24	4,99 ~ 6,09
050	38973	90	13	5,01 ~ 6,19
060	44255	73	5	5,67 ~ 6,71
150	16043	39	2	4,61 ~ 5,70
160	26589	72	4	4,32 ~ 5,36
165	24844	59	3	4,27 ~ 5,13

Tabela 7: Dados das Linhas 166 a 266

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
166	16800	43	2	4,86 ~ 6,11
167	22412	65	1	4,76 ~ 6,17
168	28075	78	3	5,41 ~ 7,20
169	15813	44	2	5,02 ~ 6,53
170	18619	49	5	5,01 ~ 6,41
171	16610	39	2	5,02 ~ 6,25
175	18201	50	3	4,00 ~ 4,89
176	15508	45	2	4,65 ~ 5,99
180	29924	80	4	4,64 ~ 5,84
181	21633	58	1	5,35 ~ 7,12
182	25314	69	4	5,24 ~ 6,87
183	24472	66	3	4,91 ~ 6,29
184	22880	51	2	5,73 ~ 7,27
201	8533	10	1	5,02 ~ 5,56
203	36688	49	45	4,75 ~ 5,30
204	46856	17	28	5,78 ~ 5,99
205	16103	39	7	4,86 ~ 6,04
207	16320	39	8	4,25 ~ 5,11
211	13703	30	5	5,57 ~ 6,98
212	13425	40	2	4,77 ~ 6,24
213	11684	31	2	4,43 ~ 5,49
214	17653	49	3	4,85 ~ 6,25
216	28573	66	14	4,52 ~ 5,47
222	13712	38	3	4,73 ~ 6,03
224	7312	23	1	4,83 ~ 6,46
225	8371	22	3	4,14 ~ 5,05
226	11966	32	4	4,51 ~ 5,63
231	13714	28	2	4,19 ~ 4,88
232	11285	23	4	4,65 ~ 5,52
233	6588	18	4	4,19 ~ 5,17
236	14795	35	2	4,96 ~ 6,15
242	9756	30	2	3,96 ~ 4,99
243	11256	39	2	4,69 ~ 6,42
244	13123	29	2	5,25 ~ 6,50
245	17580	51	3	5,38 ~ 7,25
256	18055	10	6	4,82 ~ 5,05
260	20107	52	2	5,27 ~ 6,80
265	25899	62	4	4,31 ~ 5,20
266	16983	50	3	4,88 ~ 6,41

Tabela 8: Dados das Linhas 270 a 393

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
270	25955	69	3	5,30 ~ 6,91
271	23017	63	3	4,70 ~ 5,97
272	23392	61	3	5,19 ~ 6,69
274	21786	63	3	4,93 ~ 6,46
280	21583	54	3	5,18 ~ 6,60
285	25260	61	3	4,57 ~ 5,59
302	22154	26	8	5,05 ~ 5,61
303	40361	86	27	5,54 ~ 6,96
304	47410	13	13	7,91 ~ 8,22
305	19536	5	5	6,16 ~ 6,32
307	39466	13	10	6,32 ~ 6,55
311	6802	48	1	4,35 ~ 5,24
321	6683	15	1	4,11 ~ 4,85
322	11271	20	3	4,60 ~ 5,31
323	7253	21	3	4,40 ~ 5,58
331	4674	22	1	4,37 ~ 6,63
332	7344	21	3	4,40 ~ 5,55
334	6509	21	2	3,64 ~ 4,52
335	17022	35	4	6,16 ~ 7,80
336	12373	33	4	5,01 ~ 6,44
338	28946	72	8	5,79 ~ 7,60
340	15273	6	1	5,27 ~ 5,46
341	19532	46	3	5,28 ~ 6,66
342	20040	58	3	5,10 ~ 6,74
343	4799	14	1	3,42 ~ 4,10
361	20360	53	2	5,24 ~ 6,77
365	23162	68	5	3,91 ~ 4,83
366	17457	50	3	3,94 ~ 4,84
370	22668	58	6	4,33 ~ 5,32
371	19553	41	4	5,39 ~ 6,64
372	22377	54	8	5,01 ~ 6,27
373	20792	50	2	4,73 ~ 5,83
374	19944	48	4	4,78 ~ 5,91
375	23390	62	2	5,13 ~ 6,61
378	19646	44	1	4,58 ~ 5,52
380	24611	65	7	4,67 ~ 5,90
385	12304	28	2	4,64 ~ 5,63
386	21399	49	4	4,45 ~ 5,35
387	21767	47	2	5,35 ~ 6,62
393	35669	89	1	4,47 ~ 5,49

Tabela 9: Dados das Linhas 461 a 542

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
461	25017	57	3	4,95 ~ 6,09
462	27208	93	6	5,49 ~ 7,98
463	26537	47	4	5,95 ~ 7,20
464	19997	55	3	4,51 ~ 5,71
465	15227	28	1	5,19 ~ 6,17
466	15660	14	2	5,21 ~ 5,65
467	21462	44	2	5,24 ~ 6,37
468	27581	62	4	5,40 ~ 6,77
469	13905	5	2	4,49 ~ 4,61
470	19211	50	2	4,70 ~ 5,90
471	21821	54	3	4,43 ~ 5,41
472	26135	62	3	5,10 ~ 6,38
474	28863	66	4	5,62 ~ 7,14
475	26235	58	4	5,36 ~ 6,67
500	22450	10	14	6,89 ~ 7,26
502	26851	41	16	5,24 ~ 6,04
503	22450	34	10	5,46 ~ 6,32
505	29888	17	17	5,56 ~ 5,86
506	39635	10	16	6,58 ~ 6,76
507	35061	9	12	6,23 ~ 6,40
508	36098	9	13	6,16 ~ 6,32
511	12216	31	4	5,02 ~ 6,36
512	15514	41	4	5,07 ~ 6,52
513	18502	14	6	4,97 ~ 5,30
515	15448	39	6	5,36 ~ 6,92
516	28415	65	1	4,54 ~ 5,48
518	7424	4	2	3,82 ~ 3,96
520	8641	5	2	6,30 ~ 6,70
521	11040	24	2	4,54 ~ 5,43
522	14345	32	3	4,82 ~ 5,86
523	7633	17	2	4,70 ~ 5,64
531	14034	34	4	5,14 ~ 6,47
532	10174	15	4	4,96 ~ 5,65
533	16816	34	3	4,84 ~ 5,77
534	12189	30	3	5,07 ~ 6,39
535	15807	38	7	5,26 ~ 6,66
536	16435	39	1	4,07 ~ 4,84
540	30113	51	2	3,28 ~ 3,62
541	8166	23	7	4,24 ~ 5,29
542	7920	24	5	4,61 ~ 6,00

Tabela 10: Dados das Linhas 545 a 641

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
545	48173	95	9	6,16 ~ 7,72
546	10743	3	4	5,62 ~ 5,77
547	6058	38	2	5,05 ~ 10,62
548	20451	50	5	6,21 ~ 8,29
550	24147	23	15	6,64 ~ 7,42
551	6242	14	1	4,70 ~ 5,69
552	16952	23	2	6,47 ~ 7,57
560	12575	32	1	4,35 ~ 5,33
561	17884	43	4	5,27 ~ 6,67
594	44909	94	1	5,02 ~ 6,32
602	27260	56	11	5,31 ~ 6,48
603	22330	45	25	4,56 ~ 5,37
607	59482	14	11	5,85 ~ 5,99
610	17600	4	3	6,91 ~ 7,10
611	11926	27	3	4,33 ~ 5,17
612	16250	47	4	5,22 ~ 6,95
614	22818	59	7	4,84 ~ 6,10
615	8513	24	2	4,13 ~ 5,12
616	25643	25	2	4,25 ~ 4,56
617	28013	61	5	5,82 ~ 7,36
619	27065	67	8	5,95 ~ 7,87
621	17497	38	5	4,94 ~ 6,01
622	12662	37	2	4,67 ~ 6,04
623	13323	35	5	4,35 ~ 5,36
624	13315	29	3	4,70 ~ 5,66
625	19608	48	6	4,45 ~ 5,43
627	28908	69	3	5,58 ~ 7,16
628	33165	76	6	6,27 ~ 8,23
629	23227	59	7	5,27 ~ 6,76
630	22232	37	4	5,72 ~ 6,81
631	12023	26	2	3,45 ~ 3,93
632	10063	25	1	4,40 ~ 5,37
633	13530	36	4	4,76 ~ 6,02
635	15991	42	2	5,16 ~ 6,66
636	14102	41	3	4,65 ~ 5,99
637	15443	37	2	4,85 ~ 6,00
638	19173	47	3	5,18 ~ 6,56
639	18587	49	6	5,04 ~ 6,47
640	16927	43	2	5,17 ~ 6,61
641	28501	59	1	6,30 ~ 8,04

Tabela 11: Dados das Linhas 642 a 720

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
642	28612	66	2	6,71 ~ 9,03
643	27414	67	4	5,84 ~ 7,64
644	18191	34	1	6,61 ~ 8,31
646	30639	64	5	5,87 ~ 7,36
649	17863	36	4	5,36 ~ 6,54
650	26840	39	11	6,57 ~ 7,80
652	15205	35	4	5,37 ~ 6,75
653	15304	42	4	4,50 ~ 5,65
654	14742	42	4	5,15 ~ 6,80
655	26386	63	4	6,21 ~ 8,23
656	17796	31	2	5,66 ~ 6,95
657	11663	26	2	4,35 ~ 5,18
658	25873	68	9	4,87 ~ 6,18
659	38235	75	2	6,72 ~ 8,59
661	17950	43	3	4,30 ~ 5,18
662	19476	46	3	4,82 ~ 5,94
663	24349	63	3	4,66 ~ 5,83
665	28815	66	4	5,07 ~ 6,28
666	22588	52	2	4,74 ~ 5,79
668	17834	17	1	4,68 ~ 5,05
670	21518	51	2	5,32 ~ 6,72
671	20119	52	2	5,00 ~ 6,36
673	21685	56	3	5,20 ~ 6,69
674	28210	74	4	5,28 ~ 6,85
680	27493	45	6	5,91 ~ 7,03
681	21938	40	2	5,87 ~ 7,13
683	13020	21	2	4,80 ~ 5,51
684	28991	65	10	5,85 ~ 7,47
685	33822	72	4	6,61 ~ 8,63
690	36183	125	4	6,41 ~ 10,13
701	21514	50	7	4,68 ~ 5,71
703	26308	64	10	4,73 ~ 5,86
705	28604	10	14	5,17 ~ 5,33
711	9827	24	4	4,23 ~ 5,11
712	13082	31	4	4,26 ~ 5,12
713	4826	21	2	3,65 ~ 4,96
714	19406	20	1	4,25 ~ 4,59
718	7815	16	1	4,48 ~ 5,29
719	11543	29	2	3,89 ~ 4,65
720	15238	35	2	4,89 ~ 6,01

Tabela 12: Dados das Linhas 721 a 916

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
721	12691	47	1	5,06 ~ 7,35
732	15210	39	1	5,00 ~ 6,36
760	16312	37	3	4,44 ~ 5,33
761	24062	46	4	4,93 ~ 5,85
762	21612	53	2	4,81 ~ 5,98
776	18526	80	2	4,86 ~ 7,45
777	19518	47	6	4,81 ~ 5,95
778	26776	78	3	4,91 ~ 6,43
779	18813	39	2	4,54 ~ 5,37
801	9615	23	7	4,39 ~ 5,32
811	16255	34	3	5,35 ~ 6,57
812	19923	44	4	5,77 ~ 7,32
814	14728	24	3	5,54 ~ 6,51
815	14624	10	1	4,21 ~ 4,42
816	14080	39	3	5,28 ~ 6,97
821	24363	61	4	6,08 ~ 8,31
822	7802	18	3	4,35 ~ 5,21
823	10610	53	2	5,38 ~ 9,71
825	21175	40	1	6,12 ~ 7,57
826	26857	48	5	4,97 ~ 5,83
827	19294	33	1	5,96 ~ 7,19
828	30140	70	6	4,83 ~ 5,93
829	6393	8	4	5,09 ~ 5,69
831	10205	22	1	5,13 ~ 6,28
860	28182	75	7	5,24 ~ 6,81
861	21574	53	3	4,95 ~ 6,34
865	11752	33	2	4,78 ~ 6,46
870	26419	51	6	5,66 ~ 6,91
875	17072	49	2	4,74 ~ 6,12
876	25622	73	6	5,44 ~ 7,32
901	18025	49	8	6,03 ~ 8,59
902	17771	7	4	7,81 ~ 8,29
911	13730	16	2	5,02 ~ 5,57
912	9678	26	1	4,66 ~ 5,88
913	12968	35	1	5,09 ~ 6,59
915	8529	19	1	4,82 ~ 6,06
916	8765	25	2	5,65 ~ 8,27

Tabela 13: Dados das Linhas 917 a Z03

Identificação da Linha	Extensão (m)	Qtde. de Pontos	Qtde. Veículos	Vel. Mín. e Máx. (m/s)
917	11102	22	2	6,14 ~ 7,78
918	13093	29	1	4,77 ~ 5,79
924	48342	215	7	6,64 ~ 13,10
965	22640	62	4	5,47 ~ 7,39
967	16377	43	3	5,01 ~ 6,49
972	24050	58	3	5,33 ~ 6,79
X11	16194	12	7	5,22 ~ 5,55
X12	12955	12	2	6,46 ~ 7,26
X14	17686	2	2	6,15 ~ 6,93
X19	23235	33	1	7,20 ~ 8,77
X22	10699	2	2	6,10 ~ 6,22
X30	6599	5	1	5,74 ~ 6,19
X32	11197	4	4	5,58 ~ 5,72
Z03	5298	10	1	4,72 ~ 5,55

B – MAPAS DE ENTREGA E ATRASO

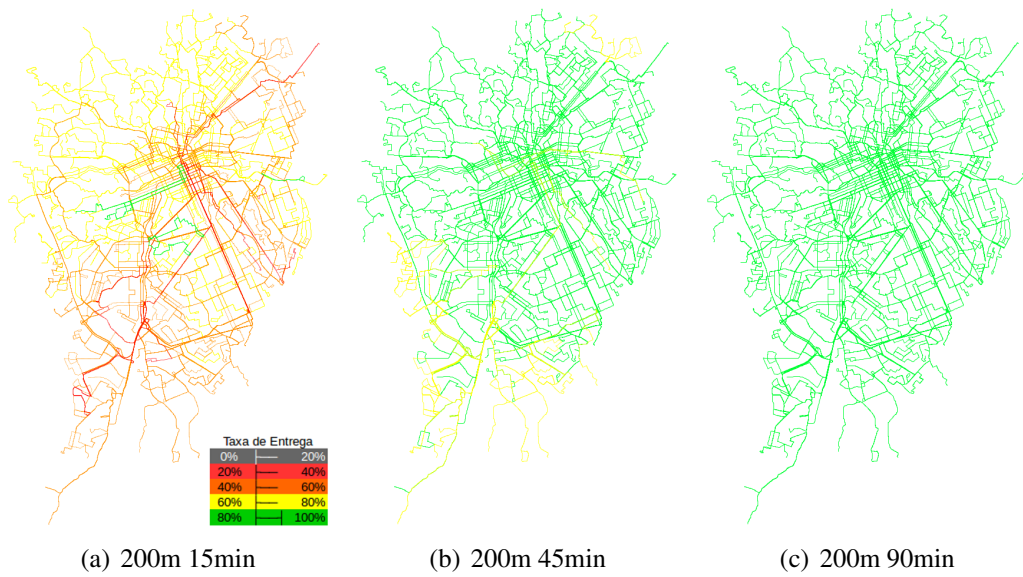


Figura 37: Mapa da probabilidade média de entrega por linha com Protocolo *Prophet-Bus*.

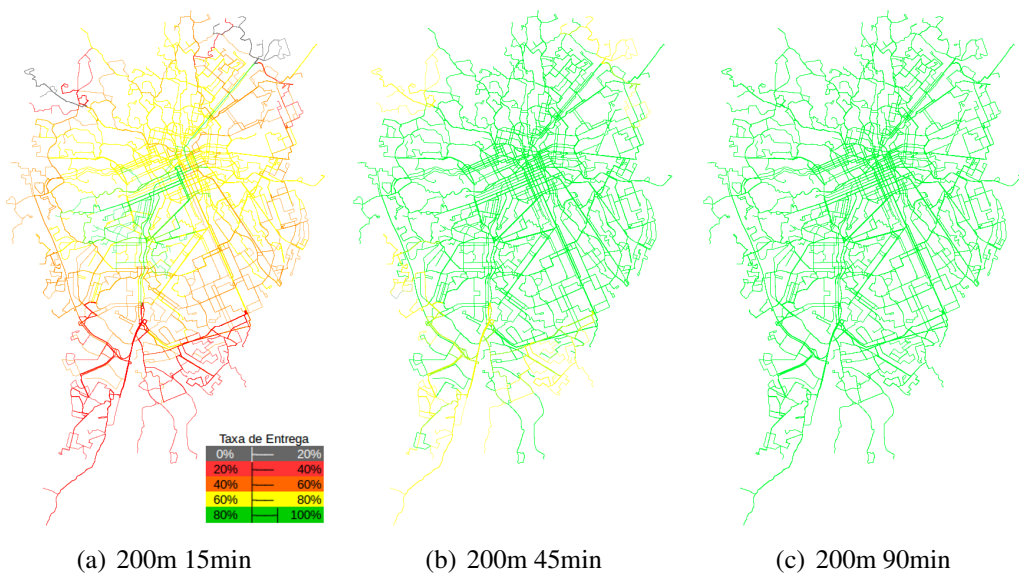


Figura 38: Mapa da probabilidade média de entrega por linha com Protocolo *Spray and Wait-Bus*.

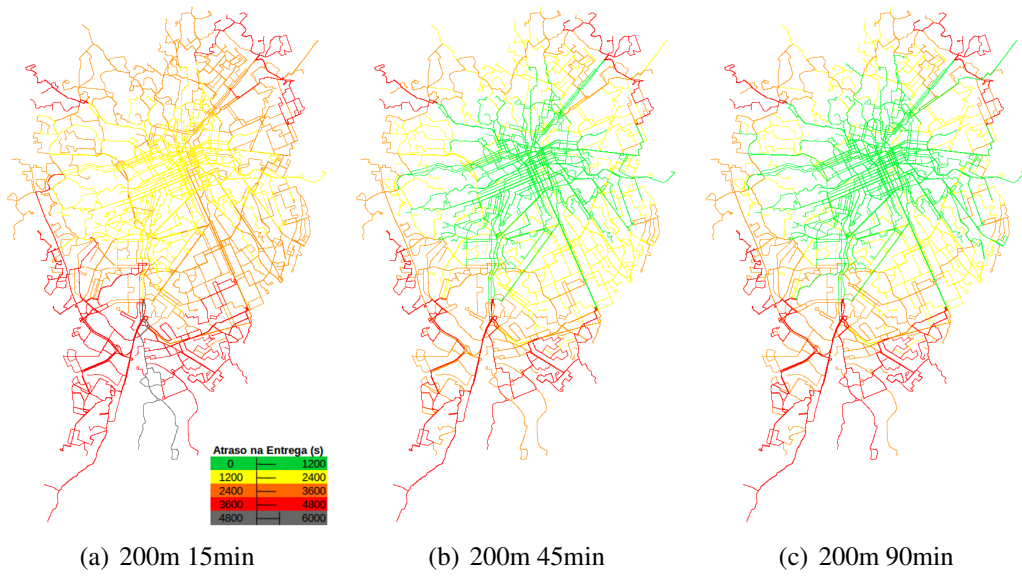


Figura 39: Mapa da probabilidade média de atraso por linha com Protocolo *Prophet-Bus*.

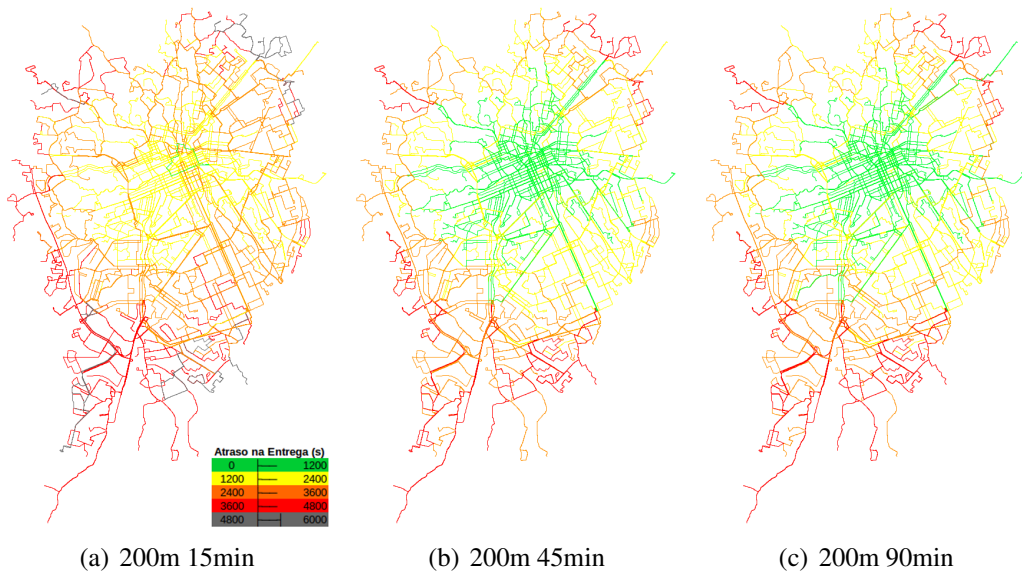


Figura 40: Mapa da probabilidade média de atraso por linha com Protocolo *Spray and Wait-Bus*.