



Pós-Graduação em Ciência da Computação

Aleciano Ferreira Lobo Júnior

**MODELOS PARA O PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURAS DE
COMUNICAÇÕES VEICULARES**

Dissertação de Mestrado



Universidade Federal de Pernambuco
posgraduacao@cin.ufpe.br
<www.cin.ufpe.br/~posgraduacao>

RECIFE
2016

Aleciano Ferreira Lobo Júnior

**MODELOS PARA O PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURAS DE
COMUNICAÇÕES VEICULARES**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em
Ciência da Computação do Centro de Informática da Univer-
sidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.*

Orientador: *Paulo Romero Martins Maciel*

RECIFE
2016

Catálogo na fonte
Bibliotecário Jefferson Luiz Alves Nazareno CRB 4-1758

L799m Lobo Júnior, Aleciano Ferreira.
Modelos para o planejamento de infraestruturas de comunicações
veiculares / Aleciano Ferreira Lobo Júnior. – 2016.
111f.: fig., tab.

Orientador: Paulo Romero Martins Maciel
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Cln.
Ciência da Computação, Recife, 2016.
Inclui referências e apêndice.

1. VANET. 2. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 3.IEEE
802.11p. I. Maciel, Paulo Romero Martins (Orientador). II. Título.

004.6 CDD (22. ed.) UFPE-MEI 2016-156

Aleciano Ferreira Lobo Júnior

**Modelos para o Planejamento de Infraestruturas de Comunicações
Veiculares**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em: 24/08/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Rubens de Souza Matos Júnior
Coordenadoria de Informática/IFSE

Prof. Dr. Paulo Romero Martins Maciel
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

*Esta dissertação é dedicada à memória de meus avós
paternos e de todos aqueles ao meu redor que me ajudaram
a concretizar os meus objetivos.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos amigos, família e minha namorada por todo o apoio durante esta fase da minha vida. Todos os conselhos e energias positivas foram importantes para que eu continuasse firme nos meus objetivos. Também gostaria de agradecer aos colegas do grupo MoDCS que sempre estiveram dando dicas importantes para a realização da pesquisa.

Agradeço também aos meus antigos professores que me deram força para tentar o Mestrado na UFPE, ao prof. Paulo Maciel por ter me recebido e garantido muitas oportunidades dentro do grupo de pesquisa e aos outros docentes do grupo MoDCS que lecionaram disciplinas importantes para o desenvolvimento da pesquisa.

“Existem muitas hipóteses na ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas.”

—CARL SAGAN

Resumo

A implantação de sistemas de transportes inteligentes (*Intelligent Transportation System (ITS)*) representa um desafio para a comunidade científica e industrial. As melhorias na segurança e eficiência do tráfego de veículos são os principais objetivos de sistemas ITS. Em 2014, acidentes de trânsito foram responsáveis por 32.765 mortes e mais de dois milhões de feridos somente nos Estados Unidos. O Brasil teve resultados piores em 2014: foram 52.226 pessoas mortas em acidentes de trânsito. A Administração Nacional de Segurança em Tráfego de Autoestradas (*National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*) estima que sistemas de comunicações veiculares possam reduzir a ocorrência e severidade de 22 de 37 tipos comuns de acidentes. Assim, comunicações *Vehicle-to-Vehicle (V2V)* e *Vehicle-to-Infrastructure (V2I)* podem melhorar a segurança por meio da complementação, ou em alguns casos, provendo alternativas aos equipamentos ativos tradicionais baseados no sensoriamento como radares, *Light Detection And Ranging (LIDAR)* ou por visão. Sobre a eficiência do tráfego de veículos, sistemas ITS implantados via *Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs)* irão também contribuir para as melhorias nestes índices por meio de ferramentas de monitoramento de tráfego, rotas dinâmicas e alertas sobre as condições da via. Em algumas localidades, estas características de tráfego variam ao longo de um mesmo dia, portanto, engenheiros ITS e pesquisadores devem estar preparados para este comportamento dinâmico de maneira efetiva enquanto analisam o desempenho do sistema. Por outro lado, uma vez que sistemas ITS dependem de serviços de rede, estudos específicos são necessários para considerar os parâmetros de comunicação e de mobilidade veicular. Este trabalho apresenta um modelo de desempenho que considera parâmetros de mobilidade e comunicação para guiar a tomada de decisões no planejamento e gerência de infraestruturas VANETs. As Redes de Petri Estocásticas (SPN) são o formalismo adotado. A dissertação também adota uma metodologia de avaliação. Para representar o comportamento das estações sem fio, foram empregadas distribuições expolinomiais. Os resultados mostram que o modelo proposto produz resultados que podem auxiliar engenheiros e projetistas a implantar e gerenciar infraestruturas VANETs.

Palavras-chave: VANET. Redes Veiculares. IEEE WAVE. 802.11p. Planejamento de Infraestruturas. Distribuições Expolinomiais. Avaliação de Desempenho

Abstract

The deployment of *Intelligent Transportation System (ITS)* is a challenge for industry and scientific community. Improvements on safety and vehicular traffic efficiency are the main ITS goals. In 2014, car accidents were responsible for 32,675 deaths and over two million injuries in the United States alone. Brazil had worse results: in 2014, 52,226 people died in car accidents. The *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)* estimates that vehicular communications may reduce the severity of 22 of 37 common types of accidents. Thus, V2V and V2I wireless communications may enable improved safety system effectiveness by complementing or, in some instances, providing alternative approaches to the traditional active safety equipment based on autonomous sensing, such as radar, lidar, or vision. Regarding vehicular traffic efficiency, ITS deployed through *Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs)* will also contribute to improvements in these indices by traffic monitoring tools, dynamic routes, and road condition alerts. In some locations, those traffic characteristics change widely within a single day, therefore, ITS engineers and researchers must deal with that dynamic behavior in an effective manner while analyzing the system performance. On the other hand, once the ITS depends on networking services, specific studies are required to consider the communication parameters along with vehicle mobility. This work presents a performance model that considers both mobility and communication parameters to guide decision-making during the design and management of VANETs infrastructures. The *Stochastic Petri Net (SPN)* is the adopted formalism. This dissertation also adopts an evaluation methodology. We employed expolynomial distributions to represent the service rates of the wireless stations. Results show that the proposed model provides results that may assist engineers to design and manage VANETs infrastructures.

Keywords: VANET. Vehicular Networks. IEEE WAVE. 802.11p. Infrastructure Planning. Expolynomial Distributions. Performance Evaluation

Lista de Figuras

1.1	Projeções de mortes causadas por acidentes de trânsito nos Estados Unidos no último século	18
1.2	Indenizações pagas por ano - quantidade e valores	19
2.1	Relação entre os tipos de redes: sem fio, MANET e VANET	28
2.2	Canais IEEE 802.11p na faixa DSRC	28
2.3	Pilha de protocolos do IEEE WAVE.	30
2.4	Relação entre a taxa de chegada, densidade e velocidade	31
2.5	Sistema de filas	32
2.6	Elementos de uma Rede de Petri	36
2.7	Exemplo de uma Rede de Petri	36
2.8	<i>Throughput Subnets</i>	39
2.9	Representação da Cox do tipo 1	41
2.10	Representação da Cox do tipo 2	41
3.1	Metodologia de avaliação de infraestruturas VANET	43
3.2	Arquitetura básica	47
3.3	Extensões à arquitetura base	49
4.1	Representação do raio da RSU: segmentos \overline{AB} e \overline{AC}	52
4.2	Representação do cálculo da cobertura total da <i>Roadside Unit</i> (RSU).	52
4.3	Modelo que representa uma fila $M/G/K/Q_c + K$	59
4.4	Modelo Cox do tipo 1	61
4.5	Modelo Cox do tipo 2	62
4.6	Módulos de componentes do <i>framework</i> OMNeT++	66
4.7	Estrutura do <i>framework</i> OMNeT++	66
4.8	Captura de tela do ambiente <i>Tkenv</i>	67
4.9	Captura de tela da interface do <i>Simulation of Urban MObility</i> (SUMO)	68
4.10	Arquitetura do Veins e conexões com o OMNeT++ e SUMO	68
4.11	Exemplo de troca de mensagens entre os <i>frameworks</i>	69
4.12	Topologia de mão dupla criada no <i>framework</i> SUMO	70
5.1	Avenida Prof. Luís Freire, Recife, Brasil	74
5.2	Tipos de mensagens e dados enviados pelo padrão J2735	75
5.3	Cobertura de ambas as RSUs nas duas soluções	76
5.4	Utilização, tempo de resposta e tamanho de fila para a solução I	79
5.5	Utilização, tempo de resposta e tamanho de fila para a solução II	80
5.6	Comparação percentual entre as soluções I e II	81

5.7	Trecho de pedágio com alta densidade de veículos e baixa velocidade	82
5.8	Fotografia do início de trecho da Rodovia PE-009	83
5.9	Cobertura da RSU no trecho da rodovia PE-009	83
5.10	Resultados do estudo de caso II	87
5.11	Novos resultados do estudo de caso II	88
5.12	Cenário de cruzamento escolhido	89
5.13	Visão geral do processo de análise DoE para os parâmetros escolhidos	91
5.14	Efeito dos parâmetros isolados sobre a utilização da RSU (ρ)	93
5.15	Efeito dos parâmetros isolados sobre o tempo de resposta (T_s)	93
5.16	Efeito dos parâmetros isolados sobre o tamanho da fila (L_q)	94
5.17	Efeito da interação dos parâmetros sobre a utilização (ρ)	95
5.18	Efeito da interação dos parâmetros sobre o tempo de resposta (T_s)	96
5.19	Efeito da interação dos parâmetros sobre o tamanho da fila (L_q)	96
A.1	Características da Ferramenta Mercury	109

Lista de Tabelas

1.1	Relação entre a proposta desta dissertação e outros trabalhos relacionados . . .	25
4.1	Parâmetros	57
4.2	Atributos das transições - Modelo geral	60
4.3	Atributos das transições - Modelo Cox 1	61
4.4	Atributos das transições - Modelo Cox 2	62
4.5	Expressões das métricas de avaliação	64
4.6	Parâmetros utilizados pelos <i>frameworks</i> de simulação	71
4.7	Comparação entre os valores dos modelos de simulação e modelos SPN propostos	71
5.1	Parâmetros e métricas de avaliação para ambas as soluções	77
5.2	Parâmetros e métricas de avaliação do estudo de caso II	85
5.3	Parâmetros e métricas de avaliação do estudo de caso III	92

Lista de Acrônimos

AERIS	<i>Applications for the Environment: Real-Time Information Synthesis</i>	
CCH	<i>Control Channel</i>	47
CTMC	<i>Continuous-Time Markov Chain</i>	109
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communications</i>	
EFM	<i>Energy Flow Model</i>	109
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	17
FIFO	<i>First In, First Out</i>	33
IS	<i>Infinite-server</i>	
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i>	16
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>	7
LIFO	<i>Last In, First Out</i>	33
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>	24
OBU	<i>On Board Unit</i>	29
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>	18
PHY	<i>Physical Layer</i>	23
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i>	109
RSU	<i>Roadside Unit</i>	29
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>	75
SINIAV	<i>Sistema de Identificação Automática de Veículos</i>	82
SCH	<i>Service Channel</i>	47
SPN	<i>Stochastic Petri Net</i>	24
SS	<i>Single-server</i>	
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>	50
USDOT	<i>U.S. Department of Transportation</i>	20
EPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>	19
VANETs	<i>Vehicular Ad-Hoc Networks</i>	16
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>	18
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>	18
WAVE	<i>Wireless Access for Vehicular Environments</i>	17

WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i>	28
WLAN	<i>Wireless Lan</i>	25

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação e Justificativa	17
1.2	Objetivos	20
1.3	Trabalhos Relacionados	20
1.4	Estrutura da Dissertação	26
2	Conceitos Básicos	27
2.1	Redes Veiculares	27
2.1.1	IEEE 802.11p e WAVE	28
2.1.2	Modelos de Tráfego Veicular	30
2.2	Teoria das Filas	32
2.3	Redes de Petri Estocásticas	36
2.4	Distribuições Expolinomiais	39
3	Metodologia e Arquiteturas	42
3.1	Metodologia de Avaliação	42
3.2	Arquiteturas	46
4	Modelagem da Infraestrutura VANET	50
4.1	Parâmetros	50
4.1.1	Parâmetros de Mobilidade	51
4.1.2	Parâmetros de Comunicação	55
4.2	Modelos Analíticos	58
4.2.1	Modelo Expolinomial Cox 1	60
4.2.2	Modelo Expolinomial Cox 2	61
4.3	Métricas de Avaliação	63
4.4	Comparações com Modelos de Simulação	64
4.4.1	<i>Frameworks</i> Utilizados	65
4.4.1.1	OMNeT++	65
4.4.1.2	SUMO	66
4.4.1.3	Veins	67
4.4.2	Métodos Utilizados	69
4.4.3	Resultados	70
5	Estudos de Caso	73
5.1	Estudo de Caso I	73
5.1.1	Parâmetros e Métricas	74

5.1.2	Resultados da Solução I	78
5.1.3	Resultados da Solução II	79
5.1.4	Comparações Entre a Solução I e a Solução II	80
5.2	Estudo de Caso II	82
5.2.1	Parâmetros e Métricas	84
5.2.2	Resultados	86
5.3	Estudo de Caso III	88
5.3.1	Parâmetros e Métricas	90
5.3.2	Resultados	91
6	Considerações Finais	98
6.1	Contribuições	99
6.2	Limitações e Trabalhos Futuros	100
	Referências	102
	Apêndice	108
	A Mercury	109
	B Script para Cálculo da Densidade Veicular	110

1

Introdução

Os contínuos avanços alcançados na área de *software*, *hardware* e comunicações estão fazendo com que novos tipos de redes sejam implantadas em ambientes além dos domiciliares, escritórios e campus. Um destes novos tipos são as redes veiculares (*Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs)*) (OLARIU; HRISTOV; YAN, 2012).

As características deste ambiente trazem diversos desafios para a indústria e academia. Pois, diferente de redes convencionais, as VANETs apresentam conectividade volátil e estão sujeitas a diferentes densidades veiculares. Por exemplo, uma região pode apresentar diferentes densidades de tráfego ao longo de um dia, indo da pouca utilização durante a madrugada até valores extremos encontrados em horários de pico (KHABBAZ; FAWAZ; ASSI, 2012).

Além disso, as comunicações veiculares representam uma oportunidade para o mercado emergente de sistemas de transportes inteligentes (*Intelligent Transportation System (ITS)*). Estes sistemas têm o objetivo de melhorar a eficiência e segurança do sistema de transportes (SUN et al., 2013; LI, 2012). Dentre outras, podemos citar aplicações para detecção e prevenção de colisões, pagamento automático de pedágios, rastreamento de veículos, notificações sobre as condições do tráfego, rotas dinâmicas, acesso à Internet e distribuição de conteúdo (WHAIDUZZAMAN et al., 2014; HUANG; CHEN; GLOBAL, 2010; BAIOCCHI; CUOMO, 2013).

Ainda sobre este mercado, projeções indicam que em 2024, 48% dos veículos em todo o planeta terão algum tipo de conectividade embutida (Microwaves RF, 2014). Aproximadamente 50 milhões de veículos terão dispositivos internos, como antenas, sistemas embarcados e interfaces para prover serviços de conectividade para os passageiros. No entanto, para que isso se torne possível, tanto a indústria quanto a academia devem desenvolver soluções e propor mecanismos para auxiliar o planejamento destas novas redes (FLEMING, 2015).

O planejamento de infraestruturas de comunicação deve levar em consideração todas as características de um ambiente, aplicações, equipamentos, assim como as suas respectivas restrições. Engenheiros e pesquisadores de VANETs precisam investigar e analisar todos os parâmetros importantes em um determinado projeto. Devem ser observadas características como: velocidade média dos veículos, tempo de permanência no ponto de acesso sem fio, especificações técnicas da aplicação a ser executada na localidade, capacidade de transferência de dados dos dispositivos, dentre outras.

De forma a suportar a implantação eficiente e padronizada destas novas tecnologias, o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE)) criou o grupo 1609 (LI, 2012), cujo objetivo é o desenvolvimento da família de padrões de acesso sem fio a ambientes veiculares (*Wireless Access for Vehicular Environments* (WAVE)). Este conjunto de padrões especifica a pilha de protocolos necessária para prover acesso sem fio em ambientes veiculares. O grupo já disponibilizou duas versões do padrão, a primeira no ano de 2007 e a segunda já em 2010 (IEEE, 2014). No entanto, o padrão ainda é considerado como em desenvolvimento. Diversos trabalhos na academia já apresentaram contribuições para tornar este padrão ideal para o ambiente das VANETs.

Além das melhorias ao padrão IEEE WAVE, diversas propostas surgiram na academia para auxiliar o planejamento de redes VANETs atendendo às características de cada localidade e restrições impostas durante o projeto. Detalhadas na Seção 1.3, grande parte envolve a avaliação de desempenho por meio de modelos matemáticos, políticas, algoritmos e simulações.

Trabalhos relacionados propõem modelos matemáticos podem ser utilizados para descrever desde o meio físico de comunicação até as camadas mais elevadas da pilha de protocolos de rede. Outros trabalhos discutem políticas e técnicas para aperfeiçoar o comportamento de determinados protocolos e melhorar o desempenho de infraestruturas VANET. Os trabalhos que buscam o planejamento por meio de algoritmos buscam aperfeiçoar determinados parâmetros definidos nos projetos, tais como: número mínimo de conexões, *throughput*, número de saltos, probabilidade de ocupação do canal e número mínimo de infraestruturas de comunicação. Um quarto grupo se destaca por utilizar modelos de simulação para exercitar o funcionamento de um futuro ambiente VANETs. As sucessivas simulações com variações nos valores dos parâmetros permitem observar como o sistema iria funcionar se submetido a tais condições. Porém, este último tipo de técnica quando utilizada de forma isolada é ineficiente devido à quantidade de tempo e recursos necessários para a sua realização.

Portanto, as propostas encontradas na academia têm características que irão adequar-se a cada tipo ambiente e problema. Nesta dissertação são propostos modelos de desempenho que envolve diversos parâmetros relevantes VANETs. Serão utilizados parâmetros oriundos da mobilidade veicular e parâmetros extraídos das características de comunicação dos aparelhos de rede. Distribuições expolinomiais serão empregadas para modelar a taxa de serviço das estações sem fio. A metodologia de avaliação permite restrições que podem ser impostas às métricas de avaliação para atender às características não ajustáveis ou fixas no ponto de vista do projetista. Por meio de tais contribuições, o estudo desta dissertação visa suportar o processo de tomada de decisões durante o planejamento de infraestruturas de comunicação veicular.

1.1 Motivação e Justificativa

As VANETs são tidas como soluções que permitem mais segurança nas vias e eficiência do tráfego de veículos por meio da integração de tecnologias da informação e comunicação no

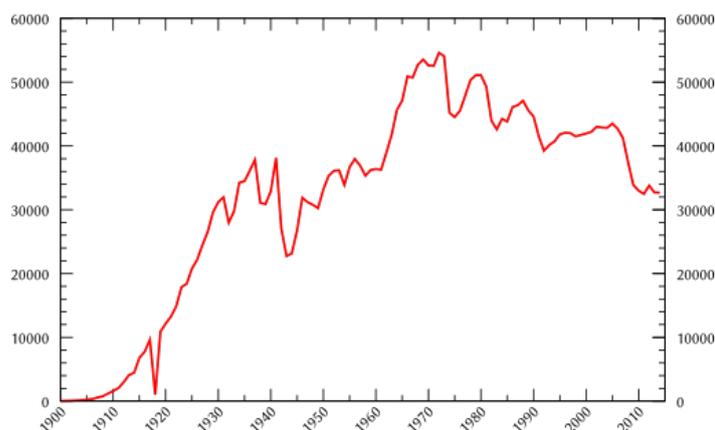


Figura 1.1: Projeções de mortes causadas por acidentes de trânsito nos Estados Unidos no último século (NHTSA, 2014)

sistema de transportes. Ao suportar comunicação veículo para veículo (*Vehicle-to-Vehicle (V2V)*) e veículo para infraestrutura (*Vehicle-to-Infrastructure (V2I)*), as VANETs podem facilitar um rol de aplicações e serviços que são basicamente divididas em duas partes: aplicações de segurança (prevenção de colisões e aviso sobre condições críticas) e de não segurança (*streaming* de mídia, eficiência energética, de tráfego e dos sistemas de transportes).

Referente às questões de segurança, a Administração Nacional de Segurança em Tráfego de Autoestradas (*National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*) relatou que apesar da queda no número de acidentes fatais (ver Figura 1.1), no ano de 2014, 326759 pessoas morreram em acidentes de trânsito (NHTSA, 2014). No Brasil, os dados da Seguradora Líder-DPVAT apontam que 52226 pessoas morreram no ano de 2014 em acidentes de trânsito (SEGURADORA LÍDER, 2014), o que representa cerca de 5% das indenizações pagas como visto na Figura 1.2. Outros 5% são gastos referentes à invalidez e 90% com despesas em atendimentos médicos e hospitalares (DAMS). Segundo mesmo estudo, as indenizações por morte no Brasil geraram pagamentos de R\$ 673.733.003,50.

A NHTSA estima que sistemas de comunicações veiculares possam reduzir a ocorrência e severidade de 22 de 37 tipos comuns de acidentes. Isto representa cerca de 80% dos acidentes (FLEMING, 2014). Nos Estados Unidos há programas como o *Connected Vehicles* (BIRDSALL, 2013) que buscam melhorar a segurança por meio do desenvolvimento de pesquisas e estudos na área. Equipamentos, sistemas de comunicação e aplicações VANETs são desenvolvidas e testadas para que em um futuro próximo os cidadãos possam beneficiar-se de tais tecnologias. Assim, a utilização de sistemas ITS irá permitir que diversos tipos de acidentes causados por falhas humanas, mecânicas ou de comunicação sejam reduzidos. Com isso, haverá mais segurança para motoristas e pedestres e menos gastos em saúde e indenizações.

No que se referem a questões de eficiência do tráfego de veículos, sistemas de transporte e eficiência energética, os sistemas de ITS implantados por meio de redes VANETs também irão contribuir com melhorias nestes índices. A Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos

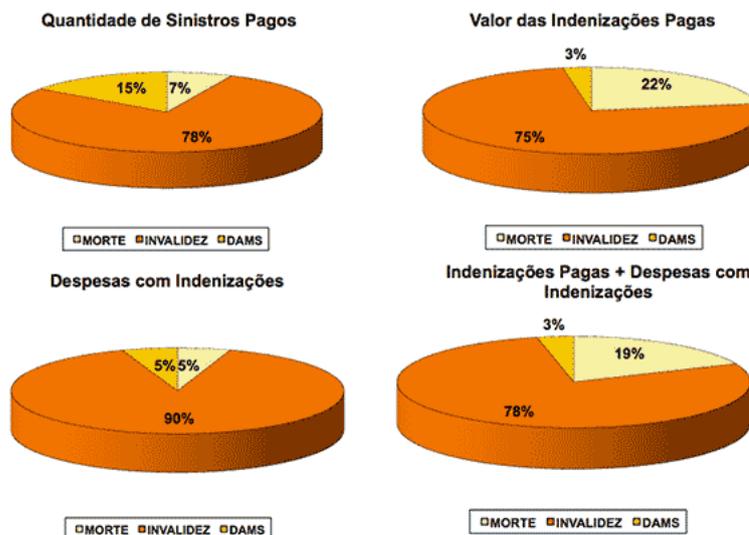


Figura 1.2: Indenizações pagas por ano - quantidade e valores (SEGURADORA LÍDER, 2014)

Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*), divulgou um relatório com dados coletados do período do ano 1990 ao ano de 2012 (EPA, 2014). Segundo a USEPA, cerca de 80% de todas as emissões de poluentes do setor de transporte são causadas por veículos terrestres. Para contornar tais situações, projetos como o AERIS (PINDILLI, 2012) usam os sistemas ITS por meio de redes VANETs para melhorar índices de poluição. Suas iniciativas são constituídas de: semáforos com fases inteligentes reduzindo o número de acelerações e desacelerações; faixas de trânsito dedicadas a veículos “verdes”¹; e, áreas de baixa emissão de poluentes, onde somente veículos verdes podem circular.

Dentre as aplicações anteriormente citadas, podemos também destacar:

- Alerta sobre condições climáticas ao longo da estrada;
- Alerta de trechos em obras ou congestionados;
- Predição de problemas mecânicos e envios de relatórios para os fabricantes;
- Integração com *smartphones* para usos como chave digital, localização e relatórios de consumo;
- Veículos autônomos, como vêm sendo estudado por empresas como Google (HARRIS, 2014), Baidu (WIRED, 2015) e Tesla (KESSLER, 2015).

Por fim, citamos aqui projetos de esforço mundial que trabalham para desenvolver arquiteturas, protótipos e sistemas VANETs. Programas de cooperação de sistemas ITS incluem o *Vehicle Safety Communications (VSC)*, *Crash Avoidance Metrics Partnership/VSC-2* e *Intellidrive*.

¹Estes tipos de veículos fazem um uso mais eficiente de suas fontes de energia e que geralmente não se baseiam em combustíveis fósseis como a gasolina.

Estes são coordenados pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos (*U.S. Department of Transportation* (USDOT)) (USDOT, 2016). Também existem os programas *PATH*, liderado pela Universidade da Califórnia (UCA), *Berkeley*, *CAR2CAR*, *Communication Consortium*, *COMeSafety2*, *Drive C2X*, *iTETRIS*, *AKTIV*, e *eImpact*. Com exceção do *PATH*, todos sendo executados na Europa. No Japão existe o projeto *SmartWay*, dentre outros que podem ser encontrados em (PAPADIMITRATOS et al., 2009) e (SOUSA et al., 2014).

1.2 Objetivos

Como discutido, a área de redes veiculares propõe diversas soluções para questões de segurança, eficiência e entretenimento. No entanto, diversos desafios surgem para a correta implantação destas soluções. Portanto, as VANETs devem ser planejadas levando-se em consideração os requerimentos das aplicações, equipamentos e restrições impostas.

A proposta apresentada nesta dissertação envolve o planejamento de infraestruturas VANETs por meio de modelos de avaliação de desempenho. Os modelos têm parâmetros essenciais para definição de infraestruturas VANETs. É apresentada também uma metodologia de avaliação que compreende a definição dos parâmetros, criação do modelo de desempenho da infraestrutura, avaliação do modelo e análise dos resultados. Em posse dos resultados, é possível identificar parâmetros que afetam o desempenho do sistema e assim tomar decisões referentes ao planejamento das infraestruturas VANETs.

Portanto, o objetivo geral desta dissertação é a proposição de modelos analíticos a serem utilizados no processo de avaliação de desempenho e planejamento de infraestruturas VANETs. Para se alcançar tal objetivo é necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Identificar parâmetros de mobilidade baseando-se no tráfego veicular e características básicas das vias;
- Identificar parâmetros de comunicação baseados nos tipos de equipamentos de rede e aplicações presentes em um sistema VANET;
- Elaborar metodologia de avaliação para os modelos;
- Definir métricas para a avaliação de desempenho das infraestruturas de comunicação;
- Desenvolver modelos de simulação para comparação com os modelos analíticos;
- Investigar o impacto dos parâmetros de mobilidade e comunicação sobre as métricas de avaliação de desempenho de infraestruturas VANETs.

1.3 Trabalhos Relacionados

Nos últimos anos, vários trabalhos envolvendo avaliação de desempenho e planejamento de VANETs têm surgido na academia. No entanto, não foram encontrados trabalhos que

permeiem todas as áreas cobertas por esta dissertação, então será destacado para cada trabalho com qual das áreas ele está se relacionando. Basicamente, há trabalhos que consideraram no processo de planejamento as seguintes características correlatas com o trabalho desta dissertação: parâmetros de mobilidade, parâmetros de comunicação e modelos analíticos. É importante salientar que alguns destes trabalhos podem se relacionar com uma ou mais áreas.

O uso de informações de mobilidade foi abordado em Barrachina et al. (2013). Os autores investigaram o impacto de diferentes densidades veiculares em três diferentes políticas de implantação: *minimum cost*, *uniform mesh* e *D-RSU*. Esta última política foi proposta pelos autores com o objetivo de implantar infraestruturas de comunicação em locais de menor densidade veicular. Esta consideração é interessante uma vez que os veículos localizados em tais regiões podem desfrutar de maior desempenho em conexões V2I e os locais mais densos podem se beneficiar das conexões V2V para isso. Semelhante a esta dissertação, Barrachina et al. (2013) investigam um tipo de aplicação que envia *beacons*² periódicos “normais” e outros “especiais”. Tais são enviados pelos veículos para informar as infraestruturas de comunicação e outros veículos sobre seu estado. Na avaliação de desempenho das três políticas de implantação há uma métrica em comum com esta dissertação: o tempo de resposta para que as estações sem fio recebam a mensagem.

De acordo com o estudo, em regiões com densidades veiculares abaixo de 70,75 veículos por quilômetro quadrado, a melhor política é a *Uniform Mesh* por proporcionar melhores tempos de resposta. Já em regiões com densidades veiculares entre 70,75 e 91 veículos por quilômetro quadrado, a melhor política é a proposta pelos autores, a *D-RSU*. E por fim, para densidades acima de 91 veículos por quilômetro quadrado, a melhor política é a proposta pelos autores, mas utilizando metade das estações com relação às outras políticas. A política *D-RSU* lida com maiores densidades veiculares quando em comparação com as outras políticas, no entanto, as faixas de valores apresentados ainda representam no geral situações de baixa densidade veicular. O trabalho de Barrachina et al. (2013) tem como pontos positivos o uso de informações de mobilidade e de comunicação. No entanto, as informações de comunicação são parte integrante do modelo de simulação estando fora da definição da política. Também, não foram variadas diferentes frequências e tamanho de mensagens para avaliar o subsequente impacto no tempo de resposta. Diferente do trabalho citado, a proposta desta dissertação leva também em conta os dados relativos à comunicação em um modelo analítico.

Em Farsi and Szczechowiak (2014), informações de mobilidade como a densidade veicular são utilizadas para determinar melhores localizações para implantar infraestruturas de comunicação. A técnica apresentada leva em consideração os trechos urbanos de maior densidade veicular, a mobilidade dos veículos e um número de estações (fixo) disponíveis para implantação. Assim como esta dissertação, além da densidade veicular, as comunicações V2I são baseadas no raio de transmissão e suas respectivas taxas. No entanto, esse trabalho desempenha melhor ao utilizar uma taxa variável de acordo com a distância que o veículo está da estação

²Pequenas mensagens com o objetivo de notificar o status do veículo para outros equipamentos na região.

sem fio. No caso, veículos a 25 m da estação sem fio têm uma taxa de 12 Mbps, enquanto que veículos a 85 m têm uma taxa de 100 Kbps. Um problema de otimização não linear é resolvido por um algoritmo que particiona um trecho urbano em várias células e distribui as estações sem fio por cada uma delas. O objetivo é maximizar uma determinada função, no caso, o número de carros “cobertos” pelas estações a serem implantadas.

Resultados mostram que a técnica proposta é melhor que a técnica baseada em grafos que foi relacionada pelo autor. Um número maior de veículos pode ser coberto utilizando a técnica dos autores. O trabalho de Farsi and Szczechowiak (2014) teve como ponto forte a utilização de uma taxa variável de acordo com a distância entre veículos e estação sem fio. Ainda, utilizou informações de mobilidade densidade veicular e raio da estação sem fio como parâmetro. Porém, os dados de comunicação são insuficientes para caracterizar uma aplicação veicular e só estão presentes no modelo de simulação, não fazendo parte das técnicas propostas. E de acordo com a maioria dos trabalhos na literatura, taxas de 12 Mbps com o respectivo esquema de modulação 16QAM são impraticáveis devido a sua elevada taxa de erros.

O trabalho de Wang, Zheng and Mitton (2015) avalia o tempo de resposta no envio de informações críticas em um cenário de via de alta velocidade. O modelo matemático leva em conta parâmetros de mobilidade como a velocidade dos veículos, sua densidade, a taxa de chegada, a probabilidade de ocorrência de acidentes e a distância de implantação entre duas estações sem fio adjacentes. A taxa de chegada citada é semelhante àquela adotada por esta dissertação e leva em conta uma distribuição exponencial. Um modelo matemático é proposto para encontrar a relação entre o atraso no tempo de resposta e a distância entre as estações sem fio implantadas. Os autores não propõem um tipo de aplicação, mas consideram que a mensagem a ser trocada entre os veículos e estação sem fio deve ser de segurança com o objetivo de alertar sobre as condições da estrada.

Os autores validam o modelo via simulações no *software MATLAB* e utilizam variações dos parâmetros de velocidade, raio da estação e taxa de chegada como entrada. De acordo com os resultados, as proposições analíticas estão de acordo com os dados obtidos na saída da simulação. Observa-se que o tempo de resposta cai à medida que são aumentadas a velocidade e taxa de chegada de veículos. Isto foi possível devido ao fato de que a maior densidade veicular permite que mais veículos recebam a mensagem e a velocidade elevada transmite em menor tempo a mensagem entre as estações. A distância ideal foi de 1 km entre estas com raio de 250 m. No entanto, Wang, Zheng and Mitton (2015) teriam maior contribuição se algum modelo de tráfego e comportamento dos veículos fosse estimado. Também, não leva em consideração o padrão IEEE WAVE que já é bem difundido entre a comunidade de pesquisadores VANETs. Ambas as características são levadas em conta nesta dissertação para realizar o planejamento das infraestruturas VANETs.

Considerando parâmetros de comunicação, Chen et al. (2011) propuseram um modelo para representar um canal sem fio que atende ao protocolo IEEE 802.11p. O trabalho define um modelo matemático para que o canal atenda a propósitos de segurança. O trabalho não especifica

se as comunicações são V2V ou V2I. É dada maior ênfase aos parâmetros de comunicação como a taxa de dados e a potência de transmissão dos aparelhos sem fio. Foi avaliado o impacto de um veículo quando transmitindo em um dos canais, a soma de todos os veículos transmitindo no mesmo canal, o efeito da transmissão a certa distância e a utilização do canal ao longo de uma via de determinado comprimento.

Os modelos foram validados via simulação e os resultados demonstram que as métricas do modelo estão de acordo com as mesmas métricas obtidas na saída da simulação. Foi possível estimar a utilização do canal para diferentes quantidades de veículos estabelecidos em determinados pontos da via. O modelo de simulação utilizou veículos com equipamentos de comunicação que variaram sua frequência de envio de mensagens entre 1 e 10 Hz. O trabalho tem importante contribuição, pois insere parâmetros como a potência de transmissão e outros relativos à camada física (*Physical Layer* (PHY)) do padrão 802.11p que não estão presentes em outros trabalhos como esta dissertação. Porém, não foi definida claramente a mobilidade dos veículos nem dados de comunicação como o tipo de mensagem e frequência no próprio modelo analítico. Foram checados trabalhos mais recentes dos autores, mas tal funcionalidade não foi considerada nestes trabalhos.

O trabalho de Khabbaz et al. (2013) propõe um sistema de filas para modelar uma infraestrutura VANETs. Esta dissertação tem muitos parâmetros em comum com o modelo analítico do autor citado, dentre eles: densidade veicular, velocidade dos veículos, modelo de mobilidade *free-flow* (ver Seção 2.1.2), taxa de serviço da infraestrutura de comunicação sem fio, taxa de chegada de veículos, dentre outros. Assim, é um trabalho que tanto propõe parâmetros de mobilidade quanto de comunicação para modelar uma estação sem fio. O objetivo primário do autor não é o planejamento de VANETs, mas a proposição permite determinar o desempenho de uma infraestrutura de comunicações veiculares e tomar decisões assim como proposto por esta dissertação. Os autores utilizam simulação para validar o modelo analítico e comprovam que o incremento na densidade de veículos da região ocasiona em uma probabilidade maior de terminação forçada e negação de serviço na infraestrutura.

Portanto, esta dissertação se aproxima bastante do trabalho de Khabbaz et al. (2013), no entanto, os modelos desta dissertação permitem que mais informações de comunicação sejam definidas, como o tamanho das mensagens, frequência e o raio da estação. Este último tem um considerável impacto na utilização que é um importante parâmetro em um sistema de filas (ver Seção 2.2).

Um trabalho que considerou tanto informações de mobilidade quanto de comunicação foi o de Rashidi et al. (2012). Referente à mobilidade, a velocidade dos veículos, a quantidade destes e as distâncias entre estações sem fio adjacentes foram consideradas. Referente à comunicação, a frequência de coleta, frequência de envio, o tamanho da informação e a capacidade do *buffer* interno dos equipamentos de comunicação dos veículos também foram consideradas. Até este ponto pode-se notar que alguns parâmetros têm similaridade com aqueles propostos por esta dissertação, no entanto, o foco do autor é em aplicações tolerantes ao tempo de resposta no envio.

Assim, o autor propõe uma série de equações para descobrir a distância ideal entre duas estações adjacentes enquanto também visualiza o tempo de resposta e taxa de recepção de mensagens.

Resultados mostram que a velocidade interfere no tempo de reposta, mas não na distância ideal entre estações. Segundo os autores, a distância máxima deve ser 11 *km*, após este valor há perdas consideráveis de pacotes devido aos *buffers* se apresentarem cheios. Também é visto que um tamanho de pacote com 256 *B* em média, com cerca de 90% de taxa de recepção, irá necessitar de uma distância entre estações de até 5 *Km*. A proposição de métodos para se encontrar este valor de saída é um das grandes contribuições dos autores. Também, a taxa de coleta e de envio juntamente com o tamanho do *buffer* interno de comunicação dos veículos permite modelar uma série de situações. Como melhorias, os autores poderiam estudar outros cenários além das estradas de alta velocidade, como vias urbanas e interseções. Também, o raio da estação sem fio deveria ser levado em consideração uma vez que pode interferir na capacidade de envio das informações pelos veículos. Nesta dissertação, os modelos propostos permitem estudar diferentes cenários, levando em consideração o tamanho do raio da estação em um modelo conjunto.

Outro trabalho que considerou informações de mobilidade e comunicação foi o de Jiang, Chen and Delgrossi (2008). Primeiro, os autores utilizam parâmetros como tamanho de pacotes, densidade veicular, número de faixas e frequência de envio. Em segundo, Jiang, Chen and Delgrossi (2008) propuseram um conceito diferente para a densidade de comunicação, parâmetro também proposto nesta dissertação. Adicionalmente, os autores propuseram a potência de transmissão dos aparelhos sem fio, parâmetro que não está presente nesta dissertação. O objetivo dos autores é conduzir um estudo via simulações para descobrir a taxa de dados ideal para comunicações veiculares. Também foi proposta uma política para a avaliação para se alcançar tal objetivo. O contexto estudado pelos autores é o de aplicações de segurança veicular.

O resultado encontrado aponta para a taxa de 6 *Mbps* como a ideal para comunicações veiculares. Como se percebe, o objetivo principal foi encontrar a taxa de dados ideal para VANETs. Porém, o tipo de cenário estudado não foi especificado e nem o tipo de modelo de tráfego adotado. Esta dissertação tem como melhoria a proposição de modelos analíticos ao invés de simulações. Além disso, são estudadas interseções, trechos de estrada e vias urbanas.

Zhang and Zhou (2003) propôs uma Rede de Petri Estocástica (*Stochastic Petri Net* (SPN)) para modelar uma rede *ad hoc* sem fio. O modelo foca em redes móveis *ad hoc* (*Mobile Ad Hoc Network* (MANET)) e propõe um modelo de clientes e servidores similar ao apresentado nesta dissertação. O modelo é semelhante a um modelo baseado na teoria das filas e tem alguns parâmetros no modelo SPN semelhantes aos desta dissertação como a taxa de geração de pacotes e a taxa de leitura no nó de destino. O modelo permite extrair algumas métricas de desempenho: o tempo que um pacote espera para ser colocado no *buffer* do nó local; o tempo que o pacote leva para sair do *buffer* do nó de destino; e, o tempo médio de transmissão. Todas estas métricas permitem obter a principal saída do trabalho de Zhang and Zhou (2003), o atraso médio dos pacotes. Os parâmetros de mobilidade não estão presentes no modelo analítico mas sim no

Tabela 1.1: Relação entre a proposta desta dissertação e outros trabalhos relacionados

	Principais contribuições da dissertação							
	Avaliação de Desempenho	Propõe Metodologia	Parâmetros de Mobilidade	Parâmetros de Comunicação	Modelos Analíticos	IEEE WAVE	Cenário Real	Baseado em Simulações
Esta dissertação	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Barrachina et al. (2013)	✓		✓			✓	✓	✓
Farsi and Szczechowiak (2014)	✓	✓	✓			✓	✓	✓
Wang, Zheng and Mitton (2015)	✓		✓				✓	
Chen et al. (2011)	✓			✓	✓	✓		✓
Khabbaz et al. (2013)	✓		✓	✓	✓	✓		✓
Rashidi et al. (2012)	✓		✓	✓		✓		✓
Jiang, Chen and Delgrossi (2008)	✓	✓	✓	✓		✓		✓
Zhang and Zhou (2003)	✓			✓	✓			

modelo de simulação utilizado nos estudos do trabalho.

As simulações foram realizadas no software *ns2* (FALL; VARADHAN, 2007). Utilizando um modelo simples de mobilidade tentam encontrar uma relação entre a taxa de entrega e o atraso. Os resultados foram então comparados com os propostos pelo modelo SPN e permitem validar o modelo analítico. De forma óbvia, o trabalho citado difere do apresentado nesta dissertação pelo fato de considerar uma rede sem fio (*Wireless Lan* (WLAN)) 802.11 em que a comunicação é nó a nó. No entanto, apresenta os mesmos conceitos de sistemas de fila apresentados nesta dissertação e tem uma métrica semelhante, que é o atraso médio dos pacotes ou tempo de resposta. Como melhoria, esta dissertação apresenta modelos de mobilidade de tráfego definidos e parâmetros de comunicação dentro do próprio modelo analítico.

Portanto, depois de discutidos os trabalhos que relacionam com esta dissertação, na Tabela 1.1 é apresentado um estudo comparativo entre os pontos de trabalhos relacionados. O objetivo é comparar as limitações e características entre o que foi proposto nesta dissertação e o que foi proposto nos trabalhos relacionados.

Nesta tabela os trabalhos foram classificados quanto às características apresentadas: se foi realizada avaliação de desempenho; se metodologias de avaliação foram propostas; se consideraram parâmetros de mobilidade e comunicação; se propuseram modelos analíticos; se o padrão IEEE WAVE foi considerado; se avaliou a sua técnica via cenário do mundo real; e, se o estudo de caso no trabalho foi baseado em simulações.

Desta forma, a importância desta dissertação é observada quando em comparação aos trabalhos relacionados, justamente por poder reunir esse conjunto de características e o melhor das técnicas de implantação.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este documento está dividido em seis capítulos. Após este capítulo, o Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos no qual este trabalho está envolvido, tais como teorias de tráfego, teorias das filas e redes de petri. O Capítulo 3 apresenta em detalhes a metodologia de avaliação proposta e as arquiteturas VANETs relacionadas. O Capítulo 4 insere os modelos dando ênfase aos parâmetros envolvidos no processo e compara-os com modelos de simulação. O Capítulo 5 apresenta estudos de caso baseados nos modelos propostos. Por fim, no Capítulo 6 apresentamos as considerações finais, listando as contribuições, detalhando as limitações e apresentando direcionamentos futuros.

2

Conceitos Básicos

Este capítulo apresenta uma visão geral dos conceitos relevantes utilizados neste trabalho. É válido ressaltar que aqui são fornecidos os subsídios para o entendimento dos conceitos utilizados e que cada tema pode ser mais bem explorado a partir das referências mencionadas. Primeiro, são apresentadas as principais características e conceitos das redes veiculares. Em seguida, os conceitos principais do modelo de tráfego adotado são discutidos. Logo após, a teoria no qual os modelos são desenvolvidos é apresentada: a teoria das filas. Também são demonstradas algumas métricas importantes na avaliação de sistema de filas. Outro conceito importante apresentado são as SPNs, formalismo adotado para a representação e análise dos sistemas VANETs estudados. Por fim, as distribuições expolinomiais são explanadas e a sua importância para esta dissertação é destacada.

2.1 Redes Veiculares

Os contínuos avanços alcançados na área de *software*, *hardware* e redes de comunicação tem propiciado uma série de conveniências na vida das pessoas e aumentou a sua produtividade. A conexão sem fio dentro dos domicílios e em qualquer lugar por meio das redes móveis celulares é um exemplo da integração e aplicação destas tecnologias.

Em redes *ad hoc* todos os nós são móveis e se conectam automaticamente de forma arbitrária. Assim, a MANET é um tipo de rede composta por dois ou mais nós equipados com dispositivos de comunicação sem fio desprovidos de controle central. A VANET é um subtipo da MANET, no entanto, o comportamento deste tipo de rede que é composta por veículos é bem diferenciado. O comportamento dos condutores e os padrões de mobilidade são características que diferenciam VANETs de MANETs.

Na Figura 2.1 é possível ver a relação entre os tipos de redes. As redes sem fio são o grupo mais abrangente compreendido por nós estáticos ou móveis. A MANET é o primeiro refinamento da rede sem fio onde os nós apresentam mobilidade e possuem a característica de conexão direta sem necessariamente utilizar uma infraestrutura central. A VANET é o refinamento da MANET onde os nós são compreendidos por veículos que tem mobilidade previsível devido ao deslocamento em ruas e estradas, porém, apresenta velocidades de deslocamento superiores.

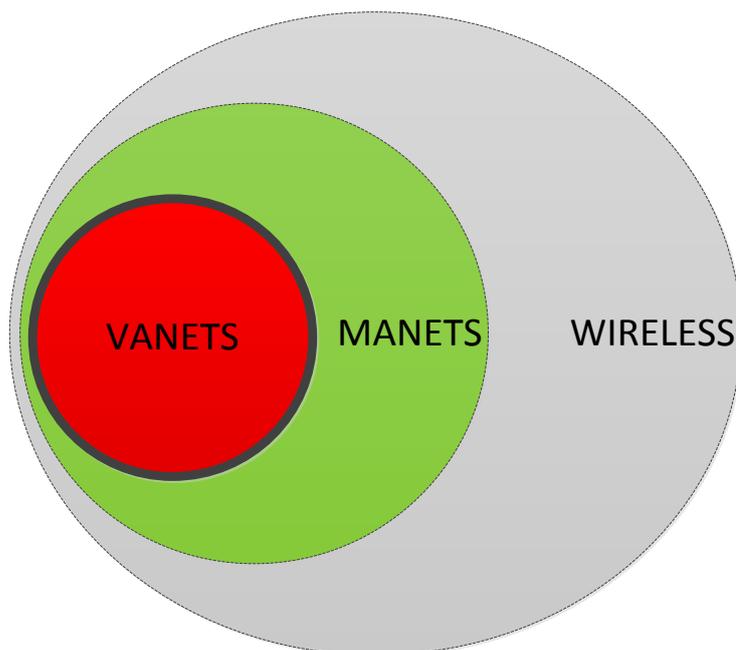


Figura 2.1: Relação entre os tipos de redes: sem fio, MANET e VANET

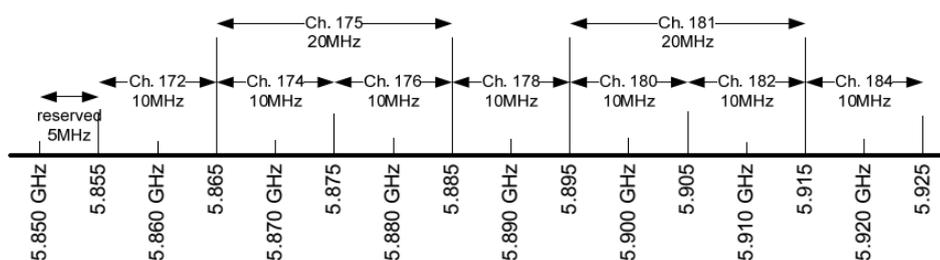


Figura 2.2: Canais IEEE 802.11p (IEEE..., 2011) na faixa DSRC

2.1.1 IEEE 802.11p e WAVE

A família de padrões WAVE é composta pelo 802.11p e as camadas superiores subsequentes. Tais objetivam o suporte a um ambiente conectado entre veículos, pedestres e infraestruturas permitindo uma vasta gama de aplicações (IEEE, 2014).

Em 2002, os Estados Unidos autorizaram a alocação de uma banda de frequência para serviços ITS (COMMISSION et al., 2002). Esta banda tem 75 MHz na faixa de 5 GHz e é chamada de DSRC. Foi permitido o uso de até sete canais, cada um contendo uma banda de frequência de 10 MHz.

O IEEE desenvolveu o padrão 802.11p (IEEE..., 2011) que especifica a camada física na pilha de protocolos para ambientes veiculares e opera na faixa DSRC. O padrão suporta taxas de transmissão entre 3–27 Mbps e um raio de cobertura de até 1200 metros (ANDREWS; COPS, 2009)(RAPPAPORT, 2009).

A Figura 2.2 mostra os canais disponíveis para uso no 802.11p/WAVE. *WAVE Short Message Protocol (WSMP)* é o protocolo WAVE para as funções de rede. O padrão especifica o

uso de cada um dos canais:

- o canal 178 é o canal de controle;
- os canais 172, 174, 176, 180, 182 e 184 são os canais de serviço;
- canais 174 e 176, e canais 180 e 182 podem ser combinados em canais de 20 MHz produzindo uma taxa de transmissão maior e criando respectivamente os canais 175 e 181;
- os canais 172 e 184 podem ser designados para aplicações de segurança pública envolvendo a segurança de vida e de bens.

A família de padrões WAVE se propõe a prover a pilha completa para uso em VANETs. O grupo 1609 desenvolveu sete padrões até o momento, 1609.0–4 e 1609.11–12 (IEEE, 2014). Todos estes padrões têm objetivos particulares, como segurança, serviços de rede e operações de rádio.

A Figura 2.3 mostra a disposição de cada um destes padrões:

- **IEEE P1609.0:** Arquitetura;
- **IEEE P1609.1:** Gerente de recursos;
- **IEEE P1609.2:** Serviços de segurança para mensagens de aplicação e mensagens de gerência ;
- **IEEE P1609.3:** Serviços de rede;
- **IEEE P1609.4:** Operações multicanal;
- **IEEE P1609.6:** Gerência de serviços remotos;
- **IEEE P1609.11:** Pagamento eletrônico e protocolo de troca de dados para ITS;
- **IEEE P1609.12:** Identificador de alocações.

Sobre os dispositivos utilizados nas VANETs, existem basicamente dois tipos especificados pelo padrão WAVE: *On Board Unit* (OBU)s dentro de veículos; e *Roadside Unit* (RSU)s que funcionam como pontos de acesso nos ambientes veiculares. Entre OBUs e RSUs é estabelecida uma conexão V2I. Entretanto, conexões entre OBUs são chamadas de V2V.

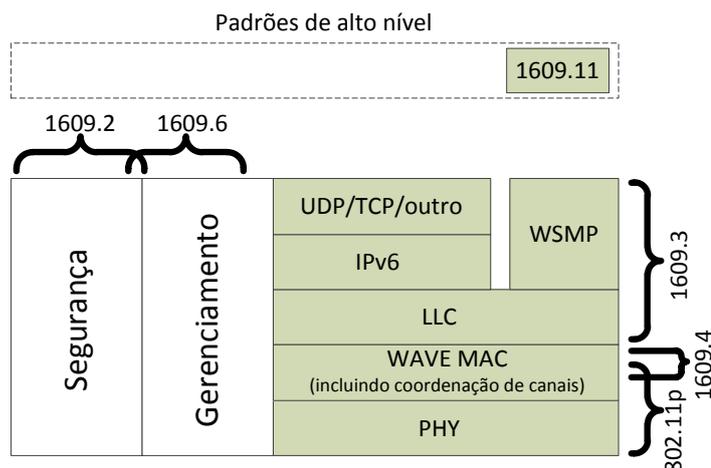


Figura 2.3: Pilha de protocolos do IEEE WAVE (IEEE, 2014)

2.1.2 Modelos de Tráfego Veicular

Vários estudos presentes na academia propuseram modelos para a emulação do tráfego veicular (KHABBAZ; FAWAZ; ASSI, 2012). Existem três importantes categorias: modelos estocásticos, *traffic stream* e modelos *car following*. Os modelos estocásticos se caracterizam por representar a mobilidade aleatória dos veículos utilizando grafos que representam topologias de vias e estradas. No entanto, não levam em conta princípios básicos da teoria de tráfego veicular. Os veículos se movem pelo grafo em velocidades e rotas totalmente aleatórias (BAI; HELMY, 2004). Modelos *traffic stream* são do tipo macroscópicos e tratam o tráfego veicular como um fluxo e relaciona três parâmetros fundamentais que são a densidade veicular¹, sua velocidade e taxa de chegada². Os veículos são considerados de forma coletiva isso tem a vantagem de facilitar estudos analíticos de alto nível. Porém, se baseiam em casos não realísticos ou específicos (KHABBAZ; FAWAZ; ASSI, 2012). A categoria *car following* é caracterizada por modelar o comportamento individual de cada veículo e permitir a troca de faixas na via. São bastante flexíveis mas têm a desvantagem de requerer um grande poder computacional para executar simulações.

Assim, nesta dissertação é empregado um tipo particular dos modelos *traffic stream*, que é o modelo *Free-flow* (KHABBAZ; FAWAZ; ASSI, 2012), também chamado de *uninterrupted flow* (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2004). Ele implica no fato de que um veículo não impõe restrições ao comportamento de outros veículos que circulam na mesma via (HALL, 1996). Em outros termos, dentro de um segmento que segue as regras do modelo *free-flow*, um veículo pode atingir uma velocidade que só seria possível se não houvesse algum outro veículo na pista. O motorista pode dirigir tão rápido quanto possível dentro das limitações de geometria do local. Além disso, o fluxo de veículos é estável, de alta velocidade média e densidade veicular de baixa para média (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2004).

¹Número de veículos por unidade de espaço.

²Número de veículos que passa por um ponto fixo por unidade de tempo

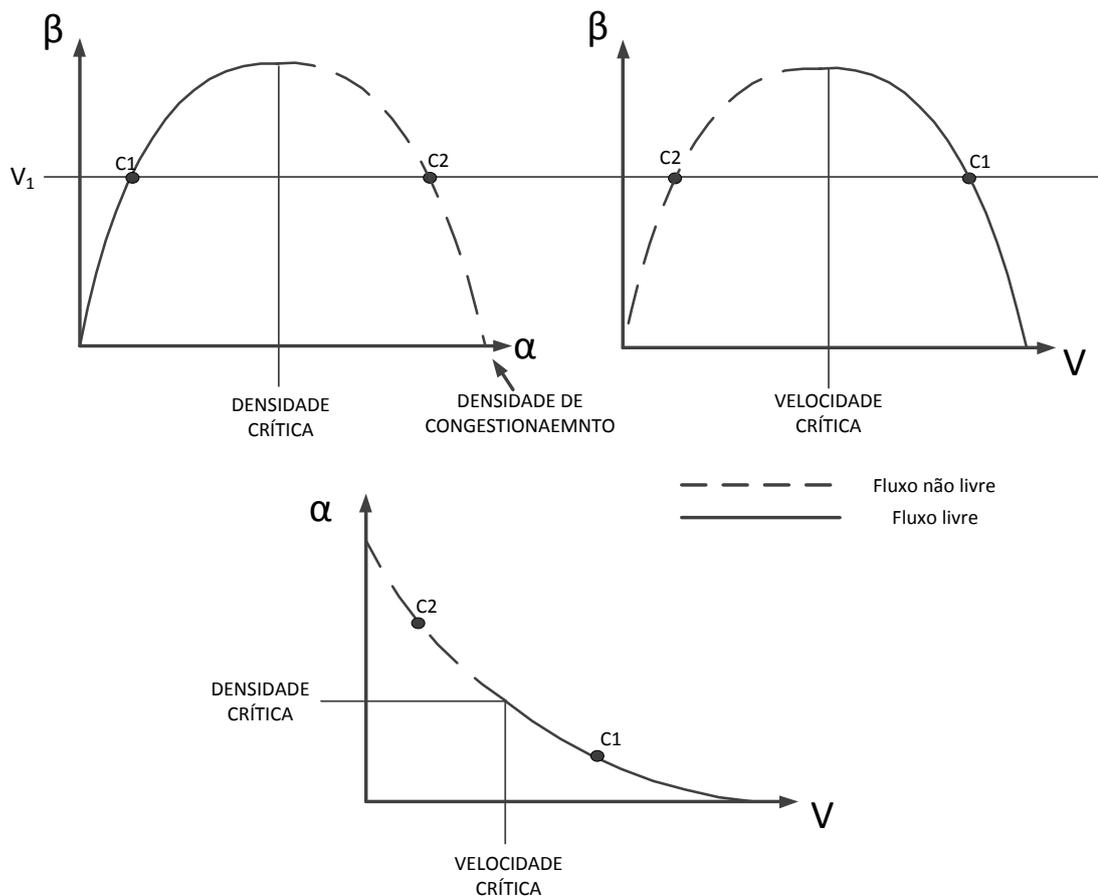


Figura 2.4: Relação entre a taxa de chegada, densidade e velocidade. Adaptado de (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 1994)

Como dito, os modelos *traffic stream* como o *free-flow* relacionam três importantes parâmetros: densidade veicular, velocidade e taxa de chegada. Em (MISHRA, 2016) é detalhada a relação entre esses parâmetros e sua importância para o modelo de tráfego adotado. A Figura 2.4 mostra graficamente estas relações.

Para melhor entendimento, considere:

- β : taxa de chegada;
- V : velocidade dos veículos;
- α : densidade veicular;
- **C1**: condição 1;
- **C2**: condição 2.

Nota-se que à medida que cresce a densidade veicular, existirá um ponto crítico em que a localidade começará a congestionar e haverá instabilidade no fluxo. Acontece comportamento inverso com relação à velocidade que em valores elevados torna o fluxo estável. Neste caso, a

baixa velocidade dos veículos induz um comportamento nos motoristas que tendem a seguir mais lentamente por receio de colidir no veículo à frente (ROESS; PRASSAS; MCSHANE, 2004).

Dentro das condições impostas por este tipo de modelo, não existe uma maneira de um segmento atingir a sua total capacidade física de veículos. A velocidade dos veículos e a densidade veicular devem permanecer em um valor estável (abaixo do crítico). Então, unindo-se a condição de estabilidade apresentada na Seção 2.2, o sistema (de tráfego veicular e de comunicação de dados) pode tornar-se completamente estacionário. Portanto, assumindo-se esta definição, a avaliação de modelos utilizando-se de soluções analíticas torna-se mais fácil.

2.2 Teoria das Filas

Um sistema de filas é descrito por clientes que “chegam” para serem atendidos pelos servidores. Um ou mais servidores atendem as requisições dos clientes, e na hipótese de não haver servidores disponíveis para atendimento em um dado momento, o próximo cliente espera em uma fila de tamanho finito ou infinito. Um servidor atende as requisições de um cliente por um determinado período de tempo. O estado ocupado é definido quando este servidor ainda está atendendo um cliente; e o estado ocioso é atribuído quando o servidor não está atendendo os clientes. Quando acaba o atendimento do cliente, um dos clientes que estava esperando na fila será selecionado para o atendimento de acordo com a disciplina de filas (BOLCH et al., 2006). A Figura 2.5 representa um sistema de filas.

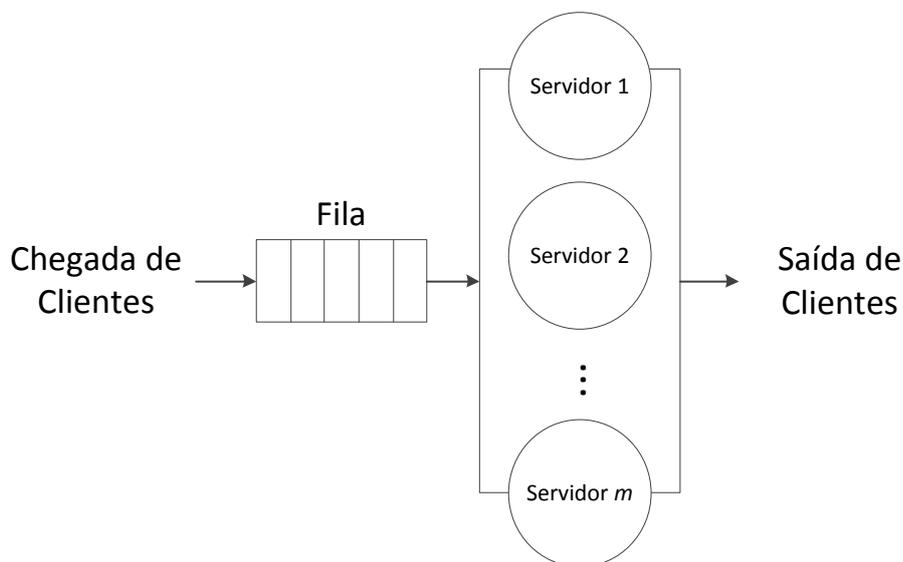


Figura 2.5: Sistema de filas

As características básicas que descrevem um sistema de fila são: processo de chegada de clientes, processo de atendimento de clientes, a disciplina de fila, a capacidade do sistema, o número de servidores e o número de fases do serviço (GROSS, 2008). Os tempos

de “chegada” e “atendimento” podem ser aproximadamente representados por distribuições de probabilidade (BOLCH et al., 2006). A disciplina de filas descreve a forma como os clientes são selecionados para serem atendidos quando estão esperando na fila. As disciplinas de filas consideram o atendimento em primeiro lugar de quem chegou primeiro na fila (*First In, First Out* (FIFO)) ou o atendimento em primeiro lugar de quem chegou por último na fila (*Last In, First Out* (LIFO)). Em alguns sistemas existe uma limitação física no dimensionamento da fila. Quando esta atinge um determinado tamanho, não é permitida a entrada de outros clientes até que se tenha espaço disponível. Este espaço é provido por meio do atendimento de um cliente e, conseqüentemente, redução do tamanho da fila. O número de servidores determina o número de clientes que podem ser atendidos em simultâneo. Um sistema de fila pode ter várias fases de serviço e cada cliente pode ter de passar por várias fases.

A teoria das filas permite modelar sistemas nos quais vários clientes compartilham recursos. Na computação, permite avaliar cenários onde recursos como processador, disco, memória e outros dispositivos são utilizados por clientes. Cenários como esse são muito comuns, o que torna a teoria das filas interessante como ferramenta em diversas áreas, como, redes de comunicação, sistemas telefônicos e, particularmente, avaliação de desempenho.

A notação matemática para descrever filas foi proposta por D. G. Kendall (JAIN, 2008):

$$A/S/m/B/K/SD$$

- *A* (*Arrival process* - Processo de chegada) - O processo de chegada das requisições ao sistema,
- *S* (*Service Time Distribution* - Tempo de serviços) - A distribuição que determina o tempo que os servidores precisam para atender as requisições,
- *m* (*Number of servers* - Número de servidores) - Servidores que são considerados parte de um mesmo sistema de filas caso sejam todos idênticos,
- *B* (*Buffer*) - A quantidade máxima de clientes que o sistema suporta. Esse número pode ser limitado por questões de espaço ou para limitar o tempo de espera,
- *K* - O tamanho da população que podem vir a requisitar serviços do sistema,
- *SD* (*Service Discipline*) - A ordem em que os clientes são atendidos.

As distribuições para os tempos de chegada e serviço são geralmente denominada por letras como demonstrado a seguir:

- *M* - Exponencial,
- $M^{[x]}$ - Exponencial com rajadas,
- E_k - Erlang. com parâmetro k ,

- H_k Hiper-exponencial, com parâmetro k ,
- D - Determinístico³
- G - Geral⁴.

A distribuição exponencial é denotada por M devido ao fato da mesma ser *memoryless*, ou seja, os resultados de tempos passados não afetam os tempos futuros. Se os intervalos dos tempos de chegadas são exponencialmente distribuídos com média $\frac{1}{\lambda}$, o tempo esperado para a próxima chegada/requisição é sempre $\frac{1}{\lambda}$, não importando o tempo desde a última chegada/requisição.

Por exemplo, a fila $M/M/4/100/5000/FIFO$ indica um sistema de fila no qual os tempos de chegada e de serviço são exponencialmente distribuídos, tem 4 servidores, e que tem capacidade para 100 requisições, de uma população total de 5000 clientes, servidos em um regime FIFO.

Existem importantes parâmetros quando se trata de sistemas de filas. Eles definem a geração de trabalhos, o seu processamento, características da fila e claro, métricas para análise do sistema. Os principais parâmetros utilizados nas teorias das filas são os seguintes:

- λ - Taxa média de chegada de requisições,
- μ - Taxa média de serviço por servidor,
- ρ - Utilização do sistema,
- L_s - Número médio de requisições no sistema,
- L_q - Número médio de requisições na fila,
- T_s - Tempo médio no sistema,
- T_q - Tempo médio na fila.
- Q_c - Capacidade da fila
- Q_d - Probabilidade de descarte ou fila cheia.

Os parâmetros λ e μ se associam as letras A e S da notação de filas discutida anteriormente. Estes valores são taxas, e para obter-se a sua notação em tempo basta que os valores sejam invertidos: o tempo médio entre requisições é $\frac{1}{\lambda}$ e o tempo médio por requisição é $\frac{1}{\mu}$.

A utilização ou intensidade de tráfego representa o percentual do quanto o sistema que está sendo utilizado produtivamente. Uma utilização de 100% indica que o sistema está utilizando todos os seus recursos (servidores) e seu desempenho atingiu o máximo suportado

³Em uma distribuição determinística os tempos são constantes e não há variância.

⁴Uma distribuição representada como geral implica em dizer que a distribuição não está especificada e que os resultados são válidos para todas as distribuições (JAIN, 2008).

teoricamente. Entretanto, esta situação não é desejada em termos práticos uma vez que pode induzir o sistema a falhas.

Uma importante definição com relação aos parâmetros apresentados anteriormente é a condição de estabilidade. Se a taxa de requisições que chega ao sistema for superior à taxa de processamento dos servidores, o sistema se torna instável (TRIVEDI, 2008). Portanto, como observado na Expressão 2.1, a quantidade de requisições que chegam ao sistema deve ser menor que a quantidade de requisições que podem ser processadas. Esta consideração torna possível a avaliação estacionária por meio de métodos analíticos e simulação.

$$\rho = \frac{\lambda}{m \times \mu} < 1. \quad (2.1)$$

O número médio de requisições ou trabalhos dentro do sistema é denotado por L_s neste trabalho. Este parâmetro é definido pela soma dos trabalhos na fila (L_q) aguardando serviço e os trabalhos sendo processados pelos servidores. A Expressão 2.2 mostra como obter o número de trabalhos dentro do sistema e a Expressão 2.3 mostra como obter o número de trabalhos esperando na fila.

$$L_s = \frac{\lambda}{-\lambda + \mu}, \quad (2.2)$$

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(-\lambda + \mu)}. \quad (2.3)$$

O tempo médio no sistema ou tempo de resposta é denotado por T_s . É a soma do tempo de espera na fila (T_q) e o tempo para processar um trabalho no servidor (BOLCH et al., 2006). Tais parâmetros temporais permitem observar durante uma análise se os trabalhos estão passando mais tempo esperando pelo serviço ou sendo servidos propriamente. A Expressão 2.4 mostra como obter o tempo de resposta do sistema e a Expressão 2.5 mostra como obter o tempo que os trabalhos esperam na fila.

$$T_s = \frac{1}{-\lambda + \mu}, \quad (2.4)$$

$$T_q = \frac{\lambda}{\mu(-\lambda + \mu)}. \quad (2.5)$$

Quando o sistema apresenta fila finita é possível definir a capacidade⁵ desta fila. O parâmetro Q_c define esta propriedade. Então, trabalhos que não encontram um servidor disponível se dirigem para a fila enquanto aguarda serviço.

Todos estes parâmetros estão disponíveis nos modelos propostos por esta dissertação e a sua relação dentro de um ambiente VANET é discutida no Capítulo 4.

⁵Em alguns trabalhos esta capacidade também é chamada de *buffer*.

2.3 Redes de Petri Estocásticas

O conceito das Redes de Petri foi concebido por Carl Adam Petri na sua tese de doutorado intitulada de *Kommunikation mit Automaten* (Comunicação com Autômatos) e apresentada na Universidade de Bonn em 1962 (PETRI, 1962). Deste então, esse formalismo tem sido utilizado em diferentes áreas, tais como Ciências da Computação, Engenharia Elétrica, Física, entre outras.

A representação gráfica das Redes de Petri é formada por transições (Figura 2.6(a)), lugares (Figura 2.6(b)), arcos (Figura 2.6(c)) e *tokens* (Figura 2.6(d)). As variáveis de estado são representadas pelos lugares e as ações realizadas pelo sistema são representadas pelas transições (MACIEL; LINS; CUNHA, 1996). Arcos dirigidos interligam estes dois componentes. A distribuição de *tokens* (ou marcas) nos lugares da Rede de Petri determinam o estado atual do sistema ou a quantidade de um determinado recurso disponível.

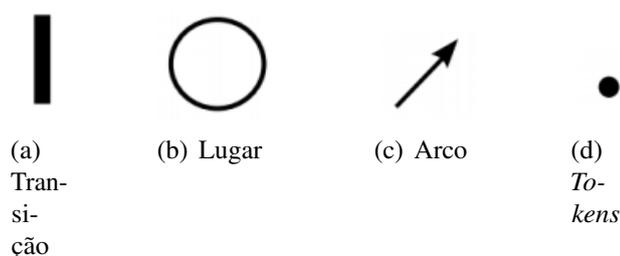


Figura 2.6: Elementos de uma Rede de Petri

A seguir na Figura 2.7, é apresentado um modelo de uma Rede de Petri no qual o funcionamento de uma lâmpada é modelado. Os lugares representam os estados da lâmpada (*aceso* ou *apagado*), enquanto que as transições representam as ações (*ligar* ou *desligar*). No estado inicial, tem-se a lâmpada no estado *apagado* e isso é representado por meio do *token* no lugar correspondente, como descrito na Figura 2.7(a). Neste ponto, a única transição possível será a transição *ligar*. Uma vez disparada, o *token* vai para o lugar *aceso*, como descrito na Figura 2.7(b).

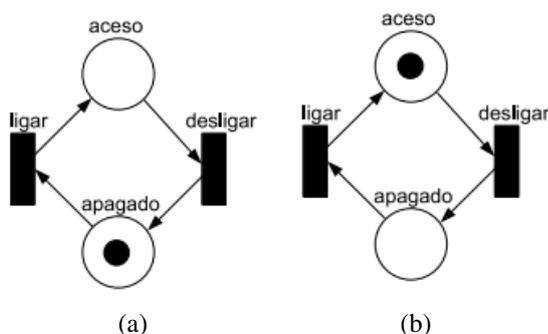


Figura 2.7: Exemplo de uma Rede de Petri

Inicialmente, as Redes de Petri propostas por Adam Petri não tinham o tempo como

notação devido às dificuldades que tal parâmetro traria às análises das redes. Os primeiros trabalhos incluindo o tempo em Redes de Petri foram os de Merlin and Farber (1976) e Noe and Nutt (1973).

Existem diferentes maneiras de inserir tempo em redes de Petri: associando-o à localização e ao tipo de tempo associado. Quanto ao local, o tempo pode ser associado em lugares, transições e *tokens*. Contudo, na maioria dos modelos, somente as transições são associadas a tempo. Isto se deve ao fato das transições representarem atividades, que por sua vez são ações que levam algum tempo para se completarem. Mas é importante mencionar que a escolha do local para associar o tempo é uma escolha tipicamente pessoal e depende também do tipo de sistema que está sendo modelado (AALST; HEE; REIJERS, 2000).

Independentemente do tipo de local em que será utilizada a noção de tempo, diversos tipos de *tempo* podem ser modelados em uma Rede de Petri com tempo: pode ser determinístico (RAM-CHANDANI, 1974), intervalar (MERLIN; FARBER, 1976) ou estocástico (MARSAN; CONTE; BALBO, 1984). (AALST; HEE; REIJERS, 2000) menciona que modelos de autores mais antigos utilizavam tempos determinísticos que por sua vez são de simples análise. No entanto, limitam a sua aplicabilidade. Assim, autores mais recentes usam modelos não-determinísticos ou estocásticos. O primeiro tipo pode ser definido por limitações como: um pacote leva menos de 50 *ms* para ser processado. O segundo, utilizado neste trabalho, define distribuições de probabilidade para as transições temporizadas.

Ao permitir a adição de tempo em Redes de Petri, surgem outros conceitos como o de grau de habilitação. Esse conceito determina o número de vezes que uma determinada transição pode ser disparada numa determinada marcação, antes de se tornar desabilitada. As semânticas de temporização indicam quantos disparos podem ser feitos por unidade de tempo numa transição, como visto a seguir:

- **Single-server (SS)**: apenas um *token* é disparado por vez, ou seja, a capacidade de um lugar/transição é 1.
- **Multiple-server**: é possível fazer k disparos por vez, ou seja, a capacidade de um lugar/transição é um k inteiro.
- **Infinite-server (IS)**: é possível fazer infinitos disparos de uma única vez.

As SPNs adicionam tempo ao formalismo de Redes de Petri. Este tempo é estocástico e distribuído exponencialmente para as transições temporizadas. Além destas, existem as transições imediatas, em que não há tempo associado. Os dois tipos de transições podem ter diferentes níveis de prioridades entre si. Entretanto, as transições imediatas e tem prioridade no disparo em relação às transições temporizadas. Assim que os arcos de entrada têm os *tokens* suficientes e ela torna-se habilitada, deve ser disparada mesmo que uma transição temporizada também esteja habilitada.

Formalmente, as SPNs podem ser definidas de várias formas. Nesta dissertação adota-se a definição segundo (GERMAN, 2000) apresentada a seguir: **Definição 1:** Uma SPN é definida pela 9-tupla $SPN = (P, T, I, O, H, \Pi, G, M_0, Atts)$, onde:

- $P = \{p1, p2, \dots, pn\}$ é o conjunto de lugares. n é a quantidade de lugares;
- $T = \{t1, t2, \dots, tm\}$ é o conjunto de transições imediatas e temporizadas, $P \cap T = \emptyset$. m é a quantidade de transições;
- $I \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N})^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de entrada (que podem ser dependentes de marcações);
- $O \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N})^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de saída (que podem ser dependentes de marcações);
- $H \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \mathbb{N})^{n \times m}$ é a matriz que representa os arcos de inibidores (que podem ser dependentes de marcações);
- $\Pi \in \mathbb{N}^m$ é o vetor que associa o nível de prioridade a cada transição;
- $G \in (\mathbb{N}^n \rightarrow \{true, false\})^n$ é o vetor que associa uma condição de guarda relacionada à marcação do lugar a cada transição;
- $M_0 \in (\mathbb{N}^n)$ é o vetor que associa uma marcação inicial de cada lugar (estado inicial);
- $Atts = (Dist, Policy, Concurrency, W)^m$ compreende o conjunto de atributos associados às transições:

$Dist \in \mathbb{N}^m \rightarrow F$ é uma função de distribuição de probabilidade associada ao tempo de cada transição, sendo que $F \leq \infty$. Esta distribuição pode ser dependente de marcação;

$Policy \in \{prd, prs\}$ define a política de memória adotada pela transição (*prd* - *preemptive repeat different*, valor padrão, de significado idêntico à *enabling memory policy*; *prs* - *preemptive resume*, corresponde a *age memory policy*);

$Concurrency \in \{ss, is\}$ é o grau de concorrência das transições, onde *ss* representa a semântica *single server* e *is* representa a semântica *infinite server*;

$W \in \mathbb{R}^+$ é a função peso, que associa um peso (w_t) às transições imediatas e uma taxa λ_t às transições temporizadas.

Os modelos SPN descrevem as atividades de sistemas por meio de gráficos de alcançabilidade. Tais podem ser convertidos em modelos Markovianos, que são utilizados para avaliação quantitativa do sistema analisado. As medições de desempenho e são obtidas por meio de simulações e de análises em estado estacionário e transiente baseadas na cadeia de Markov embutida no modelo SPN (BOLCH et al., 2006).

As SPNs marcadas e que tenham um número finito de lugares e transições na sua estrutura são isomórficas às cadeias de Markov (HAVERKORT, 1998; MARSAN et al., 1994).

O isomorfismo de um modelo SPN com uma cadeia de Markov é obtido a partir do gráfico de alcançabilidade reduzido, que é dado por meio da eliminação dos estados voláteis, do rótulo dos arcos com as taxas das transições temporizadas e dos pesos das transições imediatas.

2.4 Distribuições Expolinomiais

Modelos SPN consideram somente transições imediatas e transições temporizadas com tempos de disparo distribuídos exponencialmente. Porém, uma variedade de atividades podem ser modeladas utilizando construtores *throughput subnets* e *s-transitions* (FAGUNDES, 2006). Esses construtores são utilizados para representar distribuições expolinomiais, tais quais as distribuições Erlang, Hipoexponencial, Hiperexponencial e Coxian (DESROCHERS; AL-JAAR; SOCIETY, 1995). Combinações de lugares, transições exponenciais e transições imediatas podem ser utilizadas entre dois lugares para representar distribuições expolinomiais.

Uma das formas mais utilizadas para representar tempos de serviço é utilizando distribuições exponenciais. A análise é facilitada devido à “falta de memória”, uma das propriedades das distribuições exponenciais (TRIVEDI, 2008). Mas, há uma gama de situações em que distribuições exponenciais não aproximam corretamente o comportamento do sistema proposto. Distribuições expolinomiais podem ser úteis nestas situações. No caso das distribuições Cox, qualquer distribuição pode ser aproximada pelo uso dos seus parâmetros (KOUVATSOS, 2009; JANEVSKI, 2003).

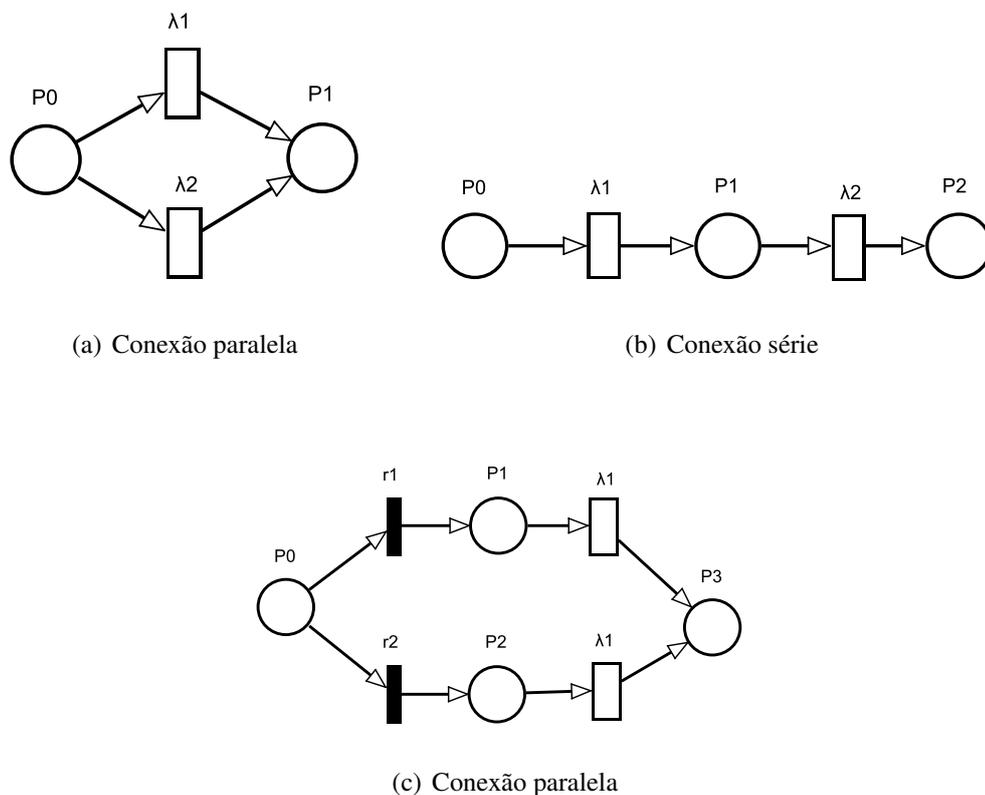


Figura 2.8: *Throughput Subnets*

A Figura 2.8(a) descreve uma *throughput subnet* formada por duas transições exponenciais em paralelo com taxas λ_1 e λ_2 , respectivamente. Uma marcação no lugar $P0$ aparecerá no lugar $P1$ após o disparo de uma das transições exponenciais que estão em paralelo as quais tem tempos associados τ_1 e τ_2 , respectivamente, (Expressão 2.6). A função de densidade para esses tempos é dada pela Expressão 2.7.

$$\tau = \min(\tau_1 + \tau_2) \quad (2.6)$$

$$f_\tau(t) = (\lambda_1 + \lambda_2) \exp^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}, t \geq 0 \quad (2.7)$$

Essas transições exponenciais em paralelo são equivalentes a uma transição exponencial com taxa $\lambda_1 + \lambda_2$.

A Figura 2.8(b) descreve uma *throughput subnet* formada por duas transições exponenciais em série com os parâmetros λ_1 e λ_2 , respectivamente. Uma marcação no lugar $P0$ aparecerá no lugar $P2$ após o disparo das transições exponenciais, as quais têm um tempo associado $\tau = \tau_1 + \tau_2$, cuja função de densidade é dada pela Expressão 2.8.

$$f_\tau(t) = (f_{\tau_1} * f_{\tau_2})(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\exp^{-\lambda_1 t} - \exp^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, t \geq 0 \quad (2.8)$$

* é o operador de convolução. Para o caso onde $\lambda_1, \lambda_2 = \dots = \lambda_n$, a função densidade é dada pela Expressão 2.9.

$$f_\tau(t) = \frac{\lambda^n t^{n-1} \exp^{-\lambda t}}{(n-1)!}, t \geq 0 \quad (2.9)$$

Essa expressão representa uma distribuição do tipo Erlang de ordem N . Uma distribuição do tipo Erlang é especificada por dois parâmetros $\lambda > 0$ e $n > 0$.

A Figura 2.8(c) descreve uma *throughput subnet* formada por duas sub-redes paralelas, cada uma contendo uma transição imediata e uma transição exponencial. Uma marcação no lugar $P0$ aparecerá no lugar $P3$ após o disparo das transições imediatas e exponenciais em cada sub-rede. A probabilidade de cada sub-rede é determinada pelos pesos r_1 e r_2 das transições imediatas. A função de densidade dos tempos associados às transições exponenciais é dada pela Expressão 2.10, que é uma distribuição hiperexponencial.

$$f_\tau(t) = r_1 f_{\tau_1}(t) + r_2 f_{\tau_2}(t) = r_1 \lambda_1 \exp^{-\lambda_1 t} + r_2 \lambda_2 \exp^{-\lambda_2 t}, t \geq 0 \quad (2.10)$$

A distribuição Cox pode ser obtida via combinação de lugares e transições exponenciais. Cada distribuição exponencial é uma fase da distribuição Cox. Portanto, a distribuição Cox é uma classe geral de distribuições expolinomiais. A distribuição exponencial por si só permite aproximar distribuições de dados com coeficiente de variação⁶ igual a 1. Já os tempos de requisi-

⁶O coeficiente de variação é uma medida que expressa o desvio padrão como percentagem da média (JAIN,

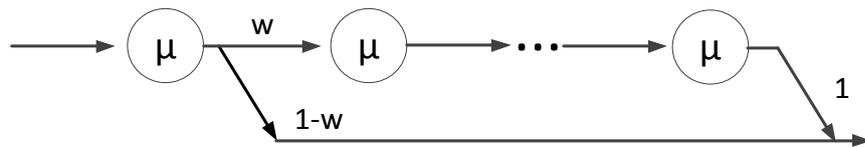


Figura 2.9: Representação da Cox do tipo 1

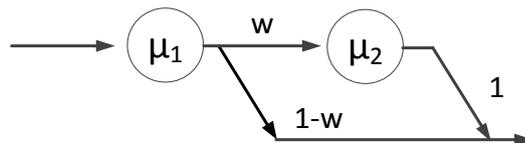


Figura 2.10: Representação da Cox do tipo 2

ções ou serviço com coeficientes de variação menor ou maior que 1 podem ser aproximados por distribuições Cox do tipo 1 e do tipo 2, respectivamente (BOLCH et al., 2006).

A distribuição Cox do tipo 1 tem os parâmetros k , μ e w . Uma representação da Cox 1 pode ser vista na Figura 2.9. Após a primeira taxa, há a probabilidade $1 - w$ de sair da série de taxas, ou w de continuar na série até a k -ésima taxa. A distribuição Cox do tipo 2 é utilizada para aproximar uma distribuição com coeficiente de variação maior do que 1. Ela é mais simples do que a Cox tipo 1, tem μ_1 , μ_2 e w como parâmetros. Uma representação da Cox 2 pode ser vista na Figura 2.10. Após a primeira taxa, há uma probabilidade $1 - w$ de sair da série, ou w de continuar para a segunda taxa. A obtenção e uso destes parâmetros nos modelos propostos por esta dissertação é detalhada na Seção 4.1.

Foram implementadas distribuições expolinomiais para representar as taxas de serviço da RSU. Portanto, proveu-se uma gama de possibilidades para representar o comportamento das RSUs nas implantações de infraestruturas VANET. Engenheiros e projetistas só necessitam de prover os parâmetros das distribuições baseados em medições prévias.

3

Metodologia e Arquiteturas

A necessidade de se promover serviços para VANETs com desempenho suficiente para as aplicações que os necessitam, favorece o desenvolvimento de técnicas, estratégias e modelos de avaliação de desempenho para tais serviços. Uma vez que as estruturas de comunicação que permitirão tais serviços estarão sob intensa utilização de recursos em horários de pico e/ou regiões de tráfego denso, o planejamento deve atender a todos os requisitos de ambiente, aplicações e também equipamentos. Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a avaliação de infraestruturas VANETs utilizando parâmetros de mobilidade e comunicação, e também apresenta as arquiteturas a serem consideradas neste processo.

Primeiro, a metodologia utilizada para a avaliação de desempenho é apresentada na Seção 3.1, descrevendo-se todas as etapas desde a obtenção dos parâmetros, definição das métricas de avaliação e possíveis restrições a estas. Parâmetros fornecidos pelas devidas partes (equipes responsáveis pelas especificações de comunicação e equipes responsáveis pela obtenção de dados de mobilidade da localidade) são utilizados como insumos para instâncias de modelos SPN. Também podem ser informadas algumas restrições, que tem como objetivo estabelecer um limiar para que algumas métricas observadas trabalhem dentro de uma determinada faixa especificada. Em seguida, o processo de avaliação de desempenho dos modelos é executado. Caso haja violações nas restrições, os parâmetros devem ser redefinidos. Caso contrário, entende-se que o sistema VANET funciona adequadamente para as configurações informadas.

Em seguida, a arquitetura básica é apresentada na Seção 3.2. Todos os elementos que constituem uma arquitetura VANET são descritos assim como seu funcionamento dentro do sistema de comunicações. A arquitetura básica permite que extensões sejam feitas por meio de refinamentos nos parâmetros. Por exemplo, ao invés de uma faixa de rolamento, podem ser especificadas duas ou mais, sendo somente necessário modificar o respectivo parâmetro (mais detalhes no Capítulo 4).

3.1 Metodologia de Avaliação

Nesta Seção externam-se as etapas da metodologia de avaliação de infraestruturas VANETs. A Figura 3.1 apresenta a metodologia proposta e é possível dividi-la em seis passos:

entendimento do sistema, caracterização dos parâmetros de mobilidade e de comunicação; definição das métricas de interesse e possíveis restrições; geração do modelo; avaliação de desempenho do modelo; e verificação das métricas contra as restrições.

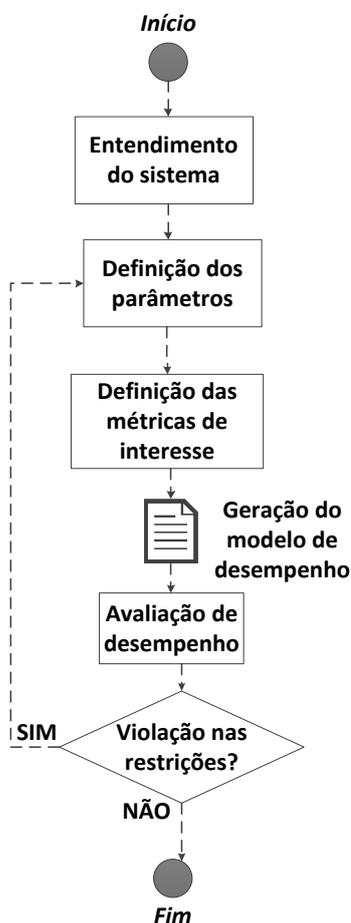


Figura 3.1: Metodologia de avaliação de infraestruturas VANET

- **Entendimento do sistema:** A primeira etapa da metodologia consiste no entendimento do sistema VANET a ser implantado. Engenheiros e pesquisadores precisam compreender os componentes e suas interações. Caso o entendimento do sistema seja ignorado, o projetista pode cometer erros de interpretação, e conseqüentemente, comprometerá o projeto como um todo. Nesta etapa devem ser definidas as fontes dos dados de mobilidade para que seja especificado como será o comportamento dos veículos. Também, é necessário definir a fonte dos dados para os parâmetros de comunicação como as especificações dos aparelhos de comunicação (OBUs e RSUs). Ainda neste passo, deve ser definido também de forma clara o tipo de aplicação a ser implantada. Ao fim desta atividade, os projetistas terão a compreensão do funcionamento do sistema e as fontes de dados para a definição dos parâmetros.
- **Definição dos parâmetros:** No segundo passo é necessário definir quais os parâmetros e seus valores para consideração no processo na avaliação. Os parâmetros podem

ser divididos entre parâmetros de mobilidade e parâmetros de comunicação. Os parâmetros de mobilidade se referem não somente ao tráfego de veículos, mas também a parâmetros como o raio de cobertura da RSU. Os parâmetros de comunicação dependem da aplicação escolhida em cada cenário e características de transmissão utilizadas por cada nó de rede. É possível especificar valores fixos ou variáveis para estes parâmetros.

- **Mobilidade:** Quando a localidade já apresenta tráfego de veículos antes da implantação das infraestruturas de comunicação, os dados serão providos por estudos prévios ou informados pelas entidades administradoras de trânsito na região¹. Dependendo da forma que os dados estão disponíveis, é possível transformá-los nos parâmetros utilizados pelos modelos apresentados no Capítulo 4. É possível inserir informações sobre a velocidade média dos veículos, número de faixas de rolamento na via e variar a densidade veicular para representar diferentes comportamentos ao longo do dia. Estes parâmetros estão detalhados na Seção 4.1.1.
- **Comunicação:** Quando a implantação de uma infraestrutura VANET visa suportar uma determinada aplicação, os dados dela precisam ser inseridos no modelo. Por exemplo, se a aplicação exige que cada veículo envie mensagens de 256 Kb a cada segundo, então esta informação precisa estar presente no modelo de forma adequada. O tamanho da mensagem (da aplicação), a probabilidade de erros durante o envio e a taxa de serviço da RSU também são parâmetros de comunicação que podem ser informados durante esta etapa. No caso deste último parâmetro, nesta dissertação foram empregadas distribuições expolinomiais (ver Seção 2.4) para representá-las. Caso a infraestrutura esteja sendo planejada não para uma aplicação específica, então os valores máximos ou críticos devem ser informados para que o processo de planejamento garanta níveis mínimos de desempenho para a infraestrutura. Estes parâmetros estão detalhados na Seção 4.1.2.

Ao fim desta atividade, os projetistas terão todas as informações necessárias sobre o ambiente para assim inseri-las no modelo de avaliação.

- **Definição das métricas de interesse:** Em termos gerais, o comportamento destas métricas é objetivo principal da análise. De acordo com a Seção 2.2, existem seis métricas disponíveis para análise. Durante o processo, os projetistas podem optar por observar todas ou somente uma parte destas. Caso optem, projetistas podem

¹Pode haver casos em que a localidade a receber a infraestrutura VANET ainda não seja utilizada para tráfego de veículos. Este é o caso para algumas cidades inteligentes que estão sendo construídas “do zero” (AGRELA, 2013).

definir restrições para tais. As restrições são limitações nos valores destas métricas. Por exemplo, um limite superior pode ser definido para a utilização da RSU com o objetivo de evitar utilização elevada. Outra questão útil ao utilizar restrições no processo de avaliação é obter saídas que garantam o equilíbrio do sistema. Se um parâmetro foge dos limites impostos pelas restrições, então, dentro do que foi especificado durante esta etapa, a configuração pode indicar que o sistema não está em equilíbrio e conseqüentemente, poderá sofrer problemas de desempenho. Com as métricas de avaliação definidas, o modelo de desempenho pode ser gerado.

- **Geração do modelo de desempenho:** Após obter todo o conjunto de parâmetros e métricas de avaliação, neste passo o modelo de desempenho é gerado. Os parâmetros são definidos em termos de características das OBU's, a densidade e fluxo de veículos na localidade, probabilidade de erros no envio de pacotes, parâmetros gerais da fila e parâmetros da RSU. O tipo de modelo utilizado neste trabalho são as SPNs, que são modelos baseados em estados (MACIEL et al., 2011). Outros modelos também poderiam ser utilizados como cadeias de markov ou fórmulas fechadas. Além disso, como o modelo é baseado na teoria das filas, as SPNs se mostram bem interessantes para a implementação destes sistemas. Uma das características principais é poder visualizar no próprio modelo o fluxo de eventos no sistema, desde a geração da requisição até a sua finalização. Ainda nesta etapa, é importante realizar a escolha das ferramentas apropriadas para modelar (entre as quais SHARPE (SAHNER; TRIVEDI, 1987), Mercury (SILVA et al., 2015) e TimeNet (GERMAN et al., 1995)).
- **Avaliação de desempenho:** Depois de definidos todos os parâmetros, seus valores, métricas e possíveis restrições, o modelo criado no passo anterior passa pela avaliação de desempenho. O tipo de análise é estacionária uma vez que o objetivo é verificar as métricas quando o sistema está em equilíbrio, ou seja, as métricas inseridas não se alteram mais (significativamente) com a passagem do tempo (TRIVEDI, 2008). Se os parâmetros forem variáveis, a ferramenta deve expor os resultados individuais para cada configuração dos parâmetros. Com os resultados da avaliação de desempenho, o próximo passo é verificar se houve violações nas restrições impostas.
- **Violação nas restrições:** Após a avaliação de desempenho, neste passo há uma verificação dos resultados com relação às restrições impostas. Como alguns parâmetros são variáveis, tendo valores mínimos e máximos, por exemplo, todas as combinações produzidas são analisadas. Se alguma violação for detectada, então se entende que o sistema não suporta completamente as configurações informadas nas fases anteriores. Engenheiros e projetistas podem então redefinir os parâmetros e executar uma nova avaliação. Caso não haja violações, o sistema VANET suporta adequadamente as configurações informadas.

É possível ainda comparar uma determinada solução com outra, os dados de saída podem ser armazenados e uma ou mais análises podem ser realizadas para que se tenham outros resultados para comparação. Por exemplo, em uma configuração podemos especificar dentre outras coisas, um raio de RSU de 200 *m*, e, em outra análise, avaliar os mesmos parâmetros. Utilizando um raio de RSU de 500 *m*. Estes são apenas alguns dos poucos exemplos em que a metodologia de avaliação pode ser empregada. Ao fim de todos estes passos, os engenheiros e projetistas terão informações que permitem identificar parâmetros que afetam o desempenho do sistema e subsidiar ou não a continuidade do projeto de implantação de uma infraestrutura VANET.

3.2 Arquiteturas

Nesta Seção são apresentadas as arquiteturas consideradas para a avaliação de infraestruturas VANETs. Inicialmente é apresentada a arquitetura básica que considera um cenário inicial, mas mostra como os modelos podem ser aplicados diretamente sobre esta. Além disso, partindo de uma arquitetura básica, é possível estendê-la e refiná-la para situações específicas como cruzamentos, vias de alta velocidade com várias faixas de rolamento, estradas de mão dupla, dentre outras. Isto é feito por meio de alterações dos valores informados nos parâmetros, como por exemplo, o número de faixas na via, ou, o número de canais disponíveis na RSU.

A arquitetura básica (ver Figura 3.2) é composta por um conjunto de veículos ocupando um segmento com um tráfego de mão única, com uma faixa única e uma RSU com um número de canais disponíveis. Veículos percorrem a via e trocam dados com a RSU utilizando suas OBUs internas (iremos considerar um veículo como sendo uma OBU ao longo deste trabalho). Então, as conexões são sempre V2I, entre OBUs e RSUs. A RSU presta serviço em um determinado segmento de pista e só atende os veículos dentro daquele espaço. A estação sem fio recebe os pacotes e os armazena em sua fila interna. Caso um canal esteja disponível, o pacote é processado logo em seguida. Como visto, a arquitetura básica pode ser dividida em **OBUs**, **fila** e **RSU**. A seguir, o funcionamento de cada um destes componentes será detalhado.

Sobre a mobilidade dos veículos que contêm as OBUs, se considera que cada motorista mantém uma velocidade média e uma distância segura dos veículos à sua frente. Quando se considera uma velocidade média, o que se está querendo dizer é que a avaliação é feita sob um sistema estacionário, em que as propriedades não variam ao longo do tempo (TRIVEDI, 2008). Já quando a distância entre veículos é considerada “segura”, se está respeitando a teoria do fluxo livre como apresentada na Seção 2.1.2 do Capítulo 2. Ou seja, além de manter uma distância segura que impeça a formação de congestionamentos, a atitude de um condutor não altera ou interfere na atitude do outro (alteração de velocidades, troca de faixas ou qualquer outra reação²).

²Sabemos, no entanto, que não é uma situação realista, mas é um cenário suficiente para a análise deste trabalho em questão onde se busca avaliar o estado estacionário do sistema.

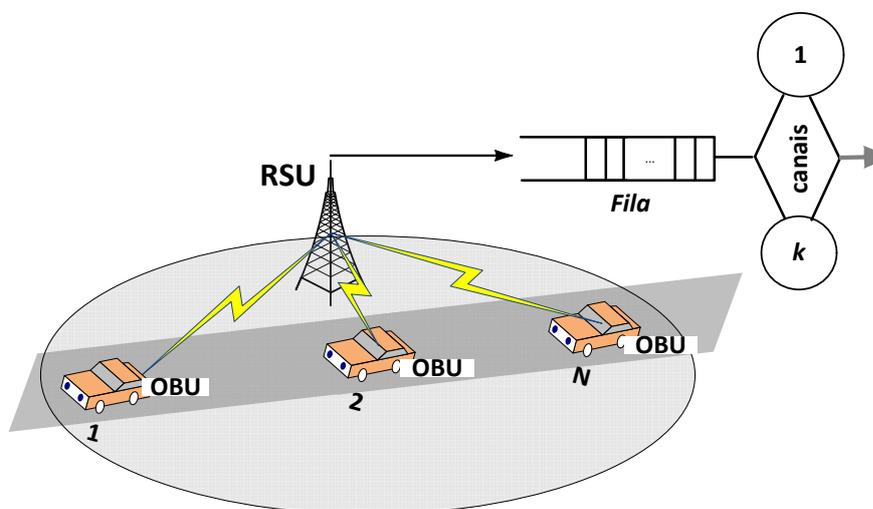


Figura 3.2: Arquitetura básica compreendida por várias OBU, uma RSU e uma via de mão única com uma faixa

Cada OBU presente em cada um dos veículos gera mensagens com uma distribuição exponencial de taxa específica. Tais mensagens, de acordo com o tipo de aplicação escolhida, têm um tamanho e frequência de envio definidas. Cada mensagem encapsula informações que são divididas em pacotes antes de serem enviadas para a RSU. As OBUs utilizam canais IEEE WAVE de 5.9 GHz para enviar pacotes para a RSU. Podem ser utilizados os canais de controle (*Control Channel (CCH)*) ou canais de serviço (*Service Channel (SCH)*), mas as OBUs só se conectam a um canal por vez. O envio dos pacotes entre os dispositivos leva um tempo que é considerado como a latência de envio.

O meio sem fio tem características diversas que podem fazer com que pacotes sejam perdidos no envio entre transmissor e receptor (RAPPAPORT, 2009). Os aparelhos devem prover de mecanismos para lidar com tais situações. Portanto, há uma probabilidade de que pacotes enviados pelas OBUs possam ser perdidos devido a questões do meio sem fio (ROS; MARTINEZ; RUIZ, 2014). Caso esta situação ocorra, os veículos devem enviar o pacote novamente. Quando o pacote for recebido corretamente, os veículos voltam à fase de geração de mensagens.

Existe uma fila³ finita para receber pacotes enviados pelas OBUs. Pacotes são armazenados caso haja capacidade suficiente para isto. Caso contrário, o pacote é descartado. Esta situação não é considerada erro de envio como ocorre no caso da OBU que tenta enviar um pacote e este é perdido devido a problemas do canal sem fio. Portanto, a OBU continuará enviando mensagens seguindo a sua taxa padrão quando o pacote é descartado devido à fila cheia. O pacote permanece na fila até que um canal da RSU seja liberado.

³Fisicamente a fila está presente dentro da RSU, mas logicamente pode ser separada desta. Por isso foi adotada uma divisão entre OBU, fila e RSU nesta Seção.

O processamento em si está presente na RSU. Esta RSU extrai pacotes da fila e realiza o processamento destes. A RSU deve prover serviços para várias OBUs ao mesmo tempo, mas cada canal só pode processar os pacotes de cada OBU por vez. À medida que mais OBUs estão sendo servidas pela RSU, maior a utilização desta. Os parâmetros da RSU como o número de canais e métricas como a utilização serão detalhados no Capítulo 4.

A arquitetura base é extensível no que se refere a suas configurações de mobilidade. É possível estendê-la para configurar cenários onde veículos trafegam em ambos os sentidos ou para interseções onde três ou mais vias se encontram em um ponto. Também é possível informar para todas estas arquiteturas números de faixas de rolamento diferentes: duas, três ou mais faixas para o tráfego dos veículos. É importante citar que algumas arquiteturas são equivalentes, por exemplo: a arquitetura de mão dupla e uma faixa se equivale à arquitetura de mão única e duas faixas⁴. Isto acontece pois o número de veículos ao final é o mesmo, assim a infraestrutura atenderá a uma equivalente quantidade de OBUs.

A Figura 3.3 mostra diferentes possibilidades de extensões da arquitetura base. A maneira de estender e criar diferentes cenários a partir destas arquiteturas é detalhada no Capítulo 4 onde todos os parâmetros de mobilidade e comunicação são apresentados. Todas estas extensões possíveis a partir da arquitetura base possibilitam a definição de diversos tipos de cenários. Desde vias locais de mão única e uma faixa até cruzamentos em “X” ou estradas de alta velocidade. Alguns destes cenários serão discutidos no Capítulo 5.

É importante enfatizar que alguns cenários não são possíveis de representação por meio desta arquitetura, principalmente pelo fato de serem dependentes do tempo ou de não apresentarem um comportamento estacionário. Podemos citar: estacionamentos, rotatórias ou qualquer situação que infrinja o modelo de tráfego *free-flow* (ver Seção 2.1.2). Para estes, o modelo de tráfego *car following* poderia ser mais adequado.

⁴No que se refere à carga que a RSU irá trabalhar.

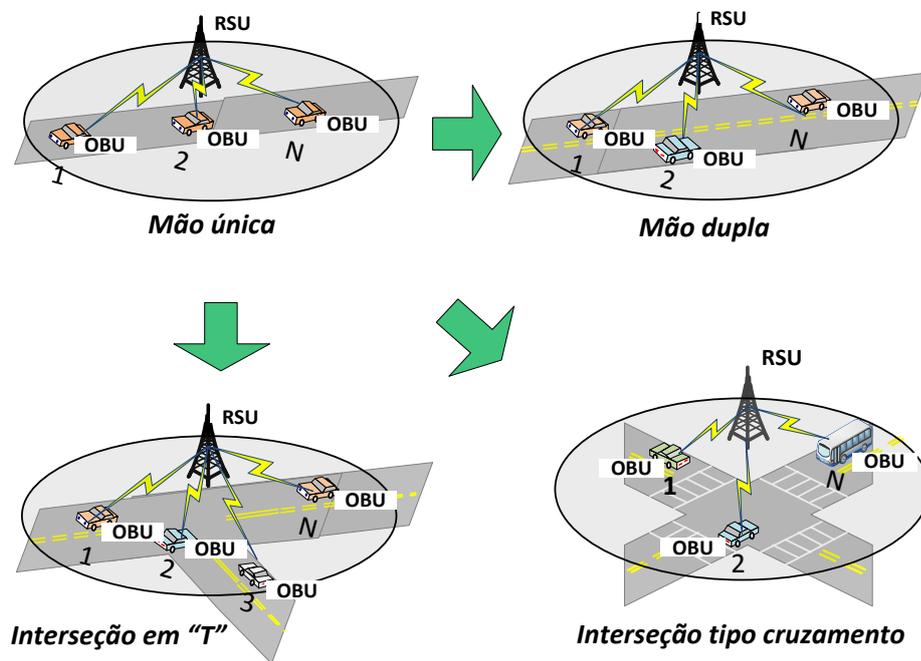


Figura 3.3: No topo esquerdo a arquitetura base. No topo direito uma extensão que configura uma via de mão dupla e na posição inferior esquerdo uma extensão para interseção em "T". Na posição inferior direito uma terceira extensão da arquitetura base que configura uma via de interseção do tipo cruzamento

4

Modelagem da Infraestrutura VANET

Este capítulo apresenta o modelo concebido da infraestrutura de comunicações VANET. As características das OBUs e RSUs do sistema VANET são descritas por meio de parâmetros de mobilidade e comunicação. A infraestrutura é avaliada através de métricas de desempenho. Observando estas métricas, projetistas VANET podem tomar decisões no processo de planejamento das infraestruturas de comunicações veiculares. Os modelos propostos também foram comparados com soluções providas por *frameworks* de simulação como OMNeT++ (OpenSim Ltd., 2014), Veins (SOMMER, 2012) e *Simulation of Urban MObility* (SUMO) (BEHRISCH et al., 2011).

Assim, este capítulo é dividido da seguinte forma: primeiro, na Seção 4.1, os parâmetros são apresentados e suas formulações são apresentadas; posteriormente na Seção 4.2, os modelos SPN são apresentados, suas subestruturas são descritas, a dinâmica de funcionamento é detalhada e as métricas de avaliação são expressas; por fim, na Seção 4.4, os modelos propostos são comparados com soluções providas por modelos de simulação.

4.1 Parâmetros

Esta seção apresenta os parâmetros utilizados para compor os modelos de planejamento de infraestruturas de comunicação VANET. Os parâmetros levados em consideração pelos modelos são divididos basicamente em parâmetros de mobilidade e parâmetros de comunicação. Os parâmetros de mobilidade definem informações do mundo físico e veicular. Neste sentido, podem ser informados parâmetros como velocidade média, densidade veicular, taxa de chegada de veículos na região, dentre outros. Também é considerado o comprimento de pista no qual se deseja oferecer os serviços da RSU. Os parâmetros de comunicação estabelecem informações sobre a troca de dados entre OBUs e RSUs. Podem ser definidos parâmetros como o tamanho da informação a ser enviada, a sua frequência, o tamanho do pacote considerado, dentre outras informações relativas à comunicação. Neste rol de informações, também são consideradas as informações referentes à probabilidade de perda de pacotes devido a erros de transmissão.

Este trabalho adota o modelo *free-flow* para orientar a mobilidade dos veículos. Em consequência, não são consideradas probabilidades de colisões de veículos (ver a Seção 2.1.2).

Também não são consideradas restrições de tempo real tais como temporização de semáforos. Isto se deve ao fato de que, utilizando o modelo *free-flow*, o comportamento considerado na avaliação do sistema é estacionário. Portanto, as propriedades têm valores médios quando consideradas para estabelecer o fluxo de veículos.

No que se refere aos parâmetros de comunicação entre OBUs e RSUs, este trabalho utiliza a teoria das filas para modelar o funcionamento do sistema VANET. Veículos (OBUs) agem como clientes criando requisições para os servidores (RSUs). Estes servidores, que são os canais de comunicação das RSUs, irão realizar certo número de operações por unidade de tempo para servir a estes veículos. Como os canais só podem processar um trabalho por vez, quando um novo trabalho encontrar o servidor ocupado, este irá aguardar em uma fila de tamanho limitado.

Devido à natureza probabilística dos eventos considerados neste trabalho, não é modelada a situação em que dois veículos tentam enviar um pacote ao mesmo tempo no mesmo canal. A probabilidade de que dois eventos ocorram simultaneamente é zero (TRIVEDI, 2008).

Portanto, diante do exposto, agora são apresentados os parâmetros divididos nas categorias de mobilidade e comunicação.

4.1.1 Parâmetros de Mobilidade

Os parâmetros de mobilidade são aqueles relativos ao fluxo de veículos. O número médio de veículos com OBUs¹ dentro do trecho de pista coberto pela RSU é representado por N . L_v denota o comprimento médio dos veículos que passam pelo trecho coberto da RSU. Estes são parâmetros que podem ser definidos diretamente ou inferido por meio de outros parâmetros expostos ao longo desta seção.

Cada RSU tem uma cobertura limitada que chega até cerca de 1200 m (ANDREWS; COPS, 2009; RAPPAPORT, 2009). Este parâmetro, que pode ser informado pelo fabricante do aparelho ou obtido por meio de pesquisas anteriores, é chamado de raio da RSU (D). A Figura 4.1, apresenta dois trechos de uma via com comprimento D : o segmento \overline{AB} e o segmento \overline{AC} . A RSU cobre ambos os segmentos igualmente.

Outro parâmetro é o tipo de via: mão única, mão dupla ou cruzamentos. Para isso, o parâmetro *wayType* pode receber respectivamente os valores 2, 4 ou 8. O número de faixas (nL) em cada sentido da via também deve ser especificado. Ambos os parâmetros são utilizados como multiplicadores do raio da RSU (D) para se obter a cobertura total da RSU (L_r), definida pela Expressão 4.1. Quando *wayType* recebe o valor 2, por exemplo, significa que D contribui duas vezes para definir L_r .

$$L_r = D \times \text{wayType} \times nL. \quad (4.1)$$

Uma representação gráfica de L_r é apresentada na Figura 4.2. Como a via é de mão dupla,

¹Considera-se que cada veículo possua somente uma única OBU.

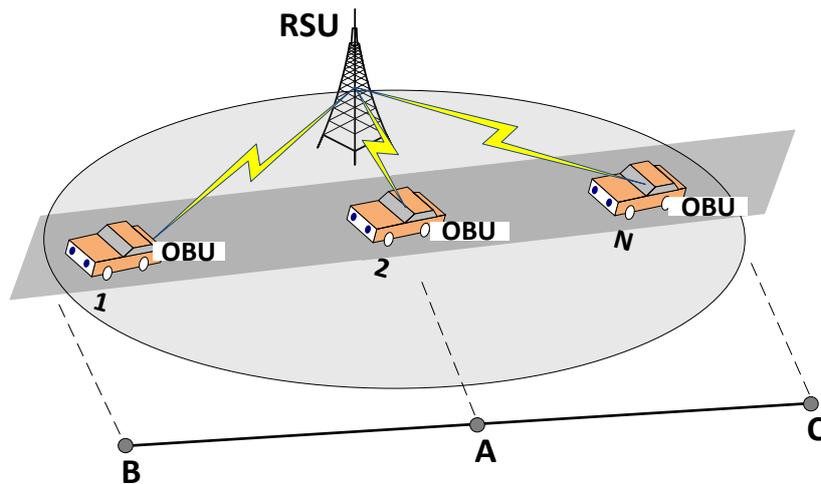


Figura 4.1: Representação do raio da RSU: segmentos \overline{AB} e \overline{AC}

tem duas faixas em cada sentido e um raio de RSU considerado de 200 m. Sendo assim, tem-se:

$$L_r = D \times \text{wayType} \times nL = 200\text{ m} \times 4 \times 2 = 1600\text{ m}$$

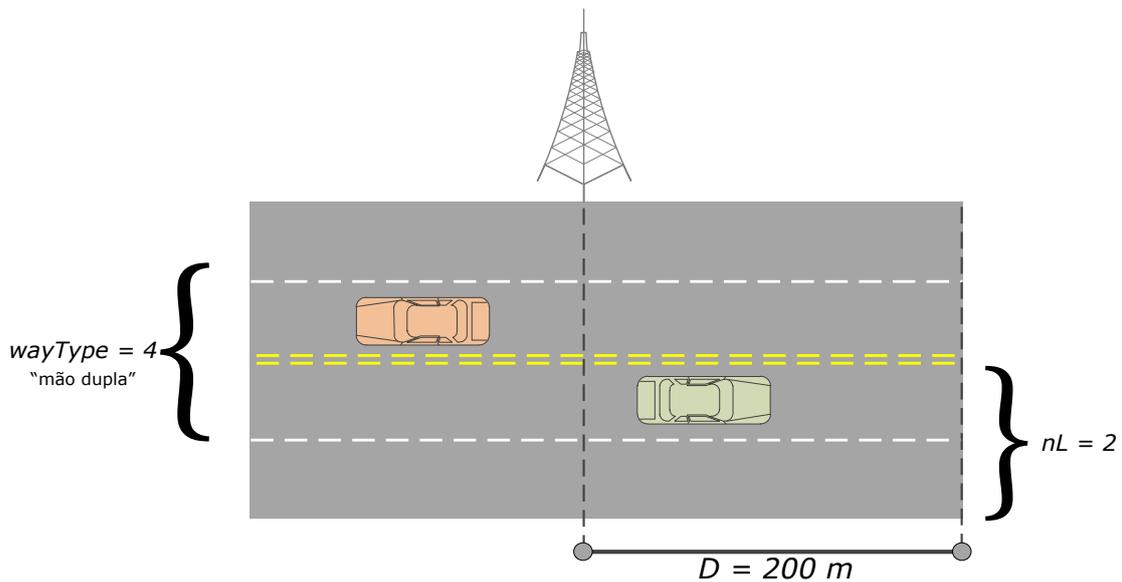


Figura 4.2: Representação do cálculo da cobertura total da RSU.

Quando se observa um determinado trecho de pista, um dos parâmetros importantes para determinar o fluxo de veículos é a densidade veicular (α). Este parâmetro relaciona a quantidade de veículos presente em uma determinada localidade coberta pela RSU. Esta densidade pode ter um impacto considerável no desempenho do sistema devido a este parâmetro indicar também a quantidade de OBUs enviando mensagens ao mesmo tempo para RSU no mesmo trecho de pista. Este parâmetro vale para todo o trecho coberto pela RSU. A densidade veicular ainda pode

representar dois outros parâmetros ao mesmo tempo: número de veículos (N) e cobertura total da RSU (L_r). Na Expressão 4.2 a densidade veicular é definida:

$$\alpha = \frac{N}{L_r}. \quad (4.2)$$

Utilizando outros parâmetros já apresentados, a densidade veicular pode também ser representada pela Expressão 4.3:

$$\alpha = \frac{N}{D \times \text{wayType} \times nL}. \quad (4.3)$$

Algumas fontes podem especificar os dados de mobilidade por meio da quantidade de veículos que trafegam ou entram em uma região por unidade de tempo (DENATRAN, 2016a). Para isso, os modelos de desempenho propostos permitem que tais informações sejam inseridas por meio do parâmetro β . Este parâmetro representa a taxa de chegada de veículos no trecho coberto pela RSU. A definição apresentada abaixo mostra que o parâmetro é dado pela quantidade de veículos que entram na região por unidade de tempo. É importante enfatizar que a mesma quantidade de veículos que entram também é a mesma que sai do trecho coberto. Isto se deve a aplicação do modelo *free-flow* que torna o parâmetro β estacionário na região.

$$\beta = \frac{N}{T}. \quad (4.4)$$

Onde T representa o período de observação.

Estradas ou vias urbanas estão sujeitas a diferentes limites de velocidades em detrimento da geografia, segurança dos pedestres, dentre outros fatores. Os modelos apresentados neste trabalho permitem a avaliação desse parâmetro no projeto de infraestruturas VANET. A velocidade média (V) dos veículos é a razão entre o espaço (Sp) percorrido pelos veículos e o intervalo de tempo (T) necessário para percorrer esse espaço (ver Expressão 4.5). Este trabalho considera que a velocidade dos veículos é constante.

$$V = \frac{Sp}{T}. \quad (4.5)$$

Onde Sp representa uma quantidade de espaço percorrida.

As expressões de β e V também podem ser utilizados para definir a densidade veicular (α):

$$\alpha = \frac{\beta}{V}. \quad (4.6)$$

A densidade veicular, quando determinada diretamente por β e V , desconsidera o comprimento do veículo. Se o comprimento L_v do veículo não for considerado corretamente poderá haver erros na representação da quantidade de veículos da região. Portanto, para distingui-los,

essa segunda representação é denotada por α' .

$$\alpha' = \frac{\beta}{V}. \quad (4.7)$$

A densidade veicular também pode ser obtida por meio do número de veículos e a dimensão L_v .

$$N = \frac{D \times 2 \times \alpha' \times nL}{1 + \alpha' \times L_v}.$$

O tempo que um veículo com velocidade média V permanece no espaço de cobertura de uma RSU ($2 \times D$) é definido como tempo de residência (R). A Expressão 4.8 é a definição formal do parâmetro e as expressões 4.9 a 4.11 são refinamentos da primeira apresentada.

$$R = \frac{Sp}{V}, \quad (4.8)$$

$$R = \frac{D \times 2}{V}, \quad (4.9)$$

$$R = \frac{D \times 2}{\frac{\beta}{\alpha}}, \quad (4.10)$$

$$R = \frac{D \times 2 \times \alpha}{\beta}. \quad (4.11)$$

O número de veículos (N), portanto, também pode ser obtido por meio da Expressão 4.12 a partir da Expressão 4.2:

$$\alpha = \frac{N}{L_r},$$

$$N = \alpha \times L_r. \quad (4.12)$$

Substituindo os valores de L , obtém-se a expressão:

$$N = \alpha \times D \times wayType \times nL. \quad (4.13)$$

Esta seção apresentou os parâmetros de mobilidade considerados para os modelos propostos. Dentre os parâmetros considerados, observou-se a densidade veicular, taxa de chegada de veículos, velocidade média e propriedades da RSU, tais qual o raio da RSU e a cobertura total desta.

4.1.2 Parâmetros de Comunicação

Os parâmetros de comunicação são aqueles relacionados à troca de dados entre as OBUs e a RSU. Tais informações dependerão basicamente do tipo de aplicação escolhido em cada localidade onde a infraestrutura VANET será implantada e características de transmissão dos equipamentos de rede.

Relativo ao tipo de aplicação, um dos tipos mais estudados dentro da área das VANETs é a transmissão periódica de mensagens. Chamada comumente de *beaconing*² (Society of Automotive Engineers, 2009), este tipo de aplicação é basicamente definida pelo tamanho da mensagem a ser entregue (S) e a frequência (f). A flexibilidade destes parâmetros permite planejar infraestruturas para suportar aplicações *beaconing* de menor e maior carga e definir o tamanho do pacote a ser enviado pelas OBUs enquanto trocam dados com a RSU. O tamanho do pacote (P_s) é um parâmetro definido em bytes. Cada mensagem a ser enviada pela OBU é dividida em pacotes que serão as “requisições” enviadas para a RSU. Esta irá processar os pacotes como sua menor unidade de trabalho. A taxa de dados por veículo (λ_v) representa o total de bytes enviados por segundo pela OBU instalada em cada veículo. Como pode ser visto na Expressão 4.14, essa taxa pode ser estimada pela razão entre o produto do tamanho da mensagem e a frequência, e o tamanho do pacote definido.

$$\lambda_v = \frac{S \times f}{P_s}. \quad (4.14)$$

De acordo com o padrão 802.11p, a RSU pode ter até seis canais de serviço (SCH) e um canal de controle (CCH) (IEEE. . . , 2011). O número de canais que uma RSU disponibiliza para uma OBU é representado pelo parâmetro K . É importante salientar que neste trabalho não é feita distinção entre SCH e CCH.

Os pacotes enviados por cada OBU serão processados por um dos K canais da RSU. Como cada canal tem propriedades semelhantes, ou seja, mesma capacidade de processar mensagens, existirá uma taxa agregada de mensagens por canal semelhante entre eles. Esta taxa representa todas as mensagens enviadas por todos os veículos naquele canal (ver Expressão 4.15).

$$\lambda_c = N \times \lambda_v. \quad (4.15)$$

λ_c também pode ser representada por meio do valor de λ_v obtido da Expressão 4.14:

$$\lambda_c = N \times \frac{S \times f}{P_s}. \quad (4.16)$$

Os pacotes enviados pelas OBUs levam um determinado período de tempo para chegar até a RSU. Este período refere-se ao tempo necessário para que os sinais eletromagnéticos da

²Mensagens enviadas periodicamente por um nó de rede para informar sobre a sua existência e também prover atualizações de estado.

comunicação sem fio percorram o ar e alcancem o receptor. A latência média é representada por meio do parâmetro L_t , em segundos. É importante salientar que a decisão sobre o pacote ter sido recebido ou não ocorre após a latência de envio.

Alguns fatores podem afetar o envio entre transmissor e receptor, desde postes, árvores, construções e características inerentes ao próprio sinal enviado e tecnologia de transmissão (RAPPAPORT, 2009). Para modelar a probabilidade de que um pacote seja perdido durante a transmissão, neste trabalho é proposto o parâmetro P_e . Engenheiros e projetistas de VANETs podem previamente realizar estudos de propagação na localidade antes da implantação da infraestrutura VANET e obter tais informações³. Alternativamente é possível se basear em modelos já propostos pela comunidade (MECKLENBRAUKER et al., 2011)(LIN et al., 2012)(ROS; MARTINEZ; RUIZ, 2014).

Consideramos que a RSU apresenta uma fila na qual pode guardar mensagens enquanto nenhum servidor está disponível. O parâmetro Q_c indica a capacidade do *buffer* que armazena tais mensagens. Este parâmetro tem sua importância devido ao fato da RSU ou qualquer outro dispositivo de rede ter um tamanho limitado de *buffers* para armazenamento de mensagens pré-processamento.

Para representar as taxas de serviço da RSU foram utilizadas distribuições expolinomais (ver Seção 2.4). Neste trabalho empregam-se as distribuições Cox, que são um tipo particular de distribuição expolinomial (HEEGAARD; SANDMANN, 2009). Por meio de medições em RSUs de sistemas reais, projetistas podem obter os parâmetros da distribuição de dados e defini-los em modelos analíticos⁴. A distribuição Cox foi escolhida pelo fato de permitir a modelagem de distribuições de dados com coeficiente de variação menor ou igual a 1, bem como coeficientes de variação maior do que 1 (BOLCH et al., 2006), o que garante uma boa cobertura de situações.

Existem dois tipos particulares de distribuição Cox. Se a distribuição a ser utilizada for a Cox do tipo 1, então haverá um determinado número de fases exponenciais, porém, todas iguais. Para isso, o parâmetro h recebe o número destas fases exponenciais na distribuição Cox do tipo 1:

$$\mu_{jc} = \mu_c, j = 1, \dots, h.$$

No entanto, quando a distribuição para representar a taxa de serviço da RSU for a distribuição Cox do tipo 2, o número de fases (h) será igual a 2 (BOLCH et al., 2006). Cada fase é distribuída exponencialmente mas com valores diferentes para cada uma das fases μ_{1c} e μ_{2c} .

Após a primeira fase nos dois tipos de distribuição Cox, existe uma probabilidade de continuar na série de h fases. Para representar esta informação definiu-se o parâmetro w neste

³A realização destes estudos está fora do escopo deste trabalho. Aqui somente utilizamos os resultados que poderiam ser providos por tais estudos.

⁴A obtenção dos parâmetros via medição está fora do escopo desta dissertação. Aqui são apresentados apenas os modelos que fazem uso destes dados.

Tabela 4.1: Parâmetros

Símbolo	Descrição
λ_c	Taxa de dados agregada por canal [<i>bps</i>]
λ_v	Taxa de dados por OBU [<i>bps/veículo</i>]
L_t	Latência de envio [<i>s</i>]
S	Tamanho da mensagem [<i>b</i>]
f	Frequência [<i>msgs/s</i>]
P_s	Tamanho do pacote [<i>B</i>]
h	Número de fases da taxa de serviço da RSU
w	Prob. de executar h fases da taxa de serviço da RSU
Q_c	Capacidade da fila [<i>pacotes</i>]
K	Canais disponíveis
μ_{hc}	h -ésima fase da taxa de serviço da RSU [<i>bps</i>]
P_e	Prob. de erro no envio [%]
α	Densidade veicular [<i>veículos/m</i>]
β	Taxa de chegada de veículos [<i>veículos/s</i>]
R	Tempo de residência [<i>s</i>]
N	Número de veículos [<i>veículos</i>]
L_v	Dimensão do veículo [<i>m</i>]
D	Raio da RSU [<i>m</i>]
L_r	Cobertura total da RSU [<i>m</i>]
$wayType$	Tipo de via
nL	Número de faixas [<i>faixas</i>]
V	Velocidade média [<i>m/s</i>]
τ	Densidade de comunicação [<i>bps/m</i>]

trabalho. Este parâmetro recebe valores entre 0 a 1 e depende da análise sobre os dados medidos, conforme mencionado anteriormente. Assim, quando os parâmetros da distribuição Cox definida forem inseridos no modelo, a RSU terá seu comportamento adequadamente representado.

Neste trabalho é proposto um parâmetro que permite relacionar os dados de mobilidade e de comunicação. A densidade de comunicação (τ) representa a quantidade de *bytes* por unidade de tempo sendo enviados por cada unidade de distância. Em outras palavras, τ é a taxa de comunicação por unidades de espaço. Este parâmetro tem a sua definição matemática apresentada na Expressão 4.17.

$$\tau = \alpha \times \lambda_v. \quad (4.17)$$

τ também pode ser representada por:

$$\tau = \frac{N \times \lambda_v}{L_r}, \quad (4.18)$$

$$\tau = \frac{\lambda_c}{L_r}. \quad (4.19)$$

A Tabela 4.1 mostra todos os parâmetros utilizados neste trabalho, seus símbolos, unidades e uma breve descrição.

4.2 Modelos Analíticos

Nesta seção são apresentados os modelos utilizados para a avaliação de infraestruturas VANETs. Os modelos representam o sistema de comunicação compreendido por OBUs e RSUs. Os modelos SPN podem ser divididos em quatro partes:

- **Geração:** modela a geração de mensagens e pacotes nas OBUs instaladas nos veículos;
- **Envio:** modela o processo de envio de pacotes e tratamento de perdas;
- **Fila:** representa a fila utilizada para armazenar os pacotes enquanto não há canais disponíveis;
- **Serviço:** modela o processo de ocupar um ou mais canais da RSU para processar os pacotes enviados pelas OBUs.

De forma a tornar mais fácil a compreensão dos modelos SPNs propostos nesta dissertação, inicialmente será apresentado um modelo simplificado que considera uma RSU com taxa de serviço seguindo uma distribuição geral. Esta representação permite apresentar as partes do modelo SPN de forma mais concisa. O que difere o modelo seguinte dos propostos por este trabalho é a representação da taxa de serviço. Enquanto que uma taxa de serviço que segue uma distribuição geral pode ser representada por somente uma transição temporizada em modelos SPN, uma taxa de serviço que segue uma distribuição Cox necessita de mais componentes para a sua representação. Portanto, após a compreensão do modelo simplificado apresentado nesta seção, na Seção 4.2.1 e Seção 4.2.2 será exposto o funcionamento dos modelos baseados em distribuições expolinomiais propostos por esta dissertação.

O modelo com taxa de serviço geral pode ser visto na Figura 4.3. A primeira parte do modelo é a geração. Nesta parte os *tokens* representam pacotes gerados pelas OBUs e são disparados com uma taxa constante por meio da transição temporizada *GerandoPkt*. O parâmetro utilizado na geração é a taxa de dados por veículo (λ_v). Seguindo a Expressão 4.14, os parâmetros que define-o são o tamanho da mensagem, sua frequência e um tamanho de pacote a ser utilizado. Isto significa que as mensagens são divididas em pacotes antes do envio para a RSU. Estes valores apresentados são inseridos na taxa da transição temporizada *GerandoPkt*. Ainda na geração, o número de veículos (N) é utilizado para definir a quantidade de *tokens* no lugar *Veiculos*. Após disparar, um *token* é colocado no lugar *PktGerado*, indicando que uma OBU gerou um pacote.

Após a OBU gerar um pacote, um *token* no lugar *PktGerado* habilita a transição *Latencia*. Ao disparar tal transição, o modelo representa a situação em que os sinais eletromagnéticos percorrem o meio sem fio até chegar ao receptor, no caso, a RSU. Com o envio completo, um *token* é colocado no lugar *EnvComp*.

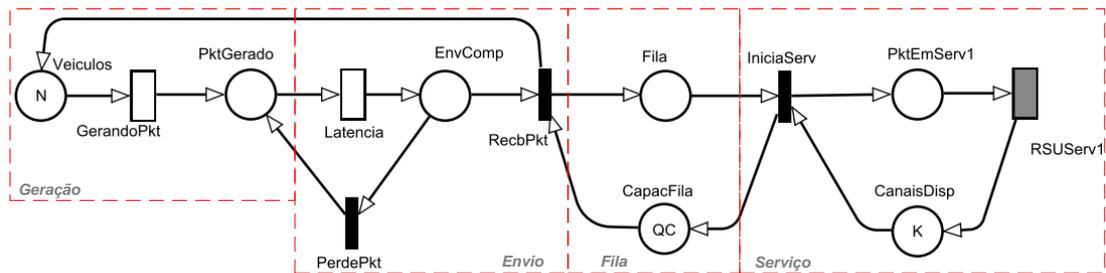


Figura 4.3: Modelo que representa uma fila $M/G/K/Q_c + K$

O pacote pode não ser detectado corretamente pela RSU após o envio⁵. Essa situação é representada no modelo por meio do disparo da transição imediata *PerdePkt*, que tem um peso definido de acordo com o parâmetro P_e . Com o disparo desta transição, um *token* volta ao lugar *PktGerado*. A partir deste ponto, o disparo da transição temporizada *Latencia* indica uma nova tentativa da OBU em enviar o pacote.

Quando enviado com sucesso, o pacote vai para a fila por meio do disparo da transição *RecbPkt* de peso $1 - P_e$. Isto armazena o *token* no lugar *Fila* e ao mesmo tempo também devolve um *token* ao lugar *Veiculos*. Isto indica que a OBU em questão está apta a gerar novas mensagens. Para ter sucesso na entrada da fila, é necessário ao menos um *token* no lugar *CapacFila*, que pode ter até Q_c *tokens* indicando a sua capacidade máxima. Após entrar na fila, havendo *tokens* no lugar *CanaisDisp*, o *token* pode ir de imediato para o lugar *PktEmServ*, pois o disparo das transições imediatas tem prioridade sobre o disparo das transições temporizadas (MARSAN; CONTE; BALBO, 1984; MARSAN et al., 1994). Isto indica que a RSU está utilizando um dos canais para processar um pacote enviado por uma das OBUs dentro da sua região coberta.

Ao ser disparada, a transição de taxa geral *RSUServ1* devolve um *token* ao lugar *CanaisDisp*, indicando que um dos canais da RSU está disponível novamente após o pacote ser processado. Os atributos das transições do modelo geral (ver Figura 4.3) são apresentados na Tabela 4.2. Essas transições são imediatas (im), exponenciais (exp) ou gerais (gr) e apresentam um grau de concorrência com a semântica *infinite server*.

Portanto, este modelo de fila apresentado pode exemplificar de forma concisa o funcionamento de um sistema VANET quando implementado via SPNs. Este modelo em questão é uma instância que considera tempos de serviço de distribuição geral para os canais da RSU. Na Seção 4.2.1 será apresentado o modelo SPN utilizando a distribuição Cox do tipo 1 para representar os tempos de serviço dos canais da RSU. E na Seção 4.2.2 será apresentado o modelo SPN utilizando a distribuição Cox do tipo 2 para representar os tempos de serviço dos canais da RSU.

⁵Os meios pelos quais o erro é detectado não está inserido no escopo deste trabalho

Tabela 4.2: Atributos das transições - Modelo geral

Transição	Tipo	Taxa	Peso	Prioridade	Concorrência
<i>RecbPkt</i>	im	-	$1 - P_e$	1	-
<i>PerdePkt</i>	im	-	P_e	1	-
<i>IniciaServ</i>	im	-	1	1	-
<i>GerandoPkt</i>	exp	λ_v	-	-	IS
<i>Latencia</i>	exp	L_t	-	-	IS
<i>RSUServ1</i>	gr	G	-	-	IS

4.2.1 Modelo Expolinomial Cox 1

Esta instância de modelo SPN (ver Figura 4.4) compartilha as partes de geração, envio e fila do modelo SPN discutido na subseção anterior. O que diferencia este modelo é a parte que representa as taxas de serviço da RSU. Para isto foram utilizadas as *throughput subnets* e os construtores *s-transitions* (FAGUNDES, 2006) como detalhado na Seção 2.4. Estes componentes permitem representar distribuições expolinomiais como a Cox do tipo 1 utilizada para representar a taxa de serviço da RSU. Portanto, nesta subseção somente será apresentado o funcionamento da parte de serviço da RSU.

Depois de sair da fila e situar-se no lugar chamado *PktEmServ1*, o *token* passa pela primeira fase da taxa de serviço. A transição temporizada *RSUServ1* possui um taxa exponencial de valor definido pelo parâmetro μ_c . Para disparar, é necessário que não haja *tokens* no lugar *Serv1Ok*, *PktEmServ2* e *Serv2Ok*. Satisfeitas as condições, a transição dispara colocando um *token* no lugar *Serv1Ok* e ao mesmo devolvendo um *token* no lugar *PktEmServ1*. A presença de um *token* neste local é constante até que todas as fases da taxa de serviço sejam completas. Neste ponto existe uma probabilidade representada pelo valor w inerente à distribuição Cox 1 que indica a possibilidade do *token* continuar na sequência de fases da taxa de serviço. Este valor define o peso da transição imediata $w1$. Caso disparada, $h - 1$ *tokens* irão para o lugar *PktEmServ2*. Estes $h - 1$ *tokens* representam as fases restantes de serviço necessárias para o pacote gerado pela OBU. Por exemplo, se o parâmetro h da distribuição Cox do tipo 1 identificar três fases de serviço, haverá dois *tokens* no lugar *PktEmServ2*. Então, a transição temporizada *RSUServ2* de taxa exponencial definida pelo parâmetro μ_c irá disparar os dois *tokens* completando as duas fases restantes, e em adição com o primeiro disparo no uso da transição temporizada *RSUServ1*, completam as fases necessárias do processamento neste exemplo. Os *tokens* ficam no local *Serv2Ok*, e, com o disparo da transição imediata *Encerra* que consome os referidos $h - 1$ *tokens*, um *token* é também retirado do lugar *PktEmServ1* e um *token* é devolvido ao lugar *CanaisDisp* indicando que um canal da RSU está disponível novamente.

Caso a transição imediata $w2$ de peso $1 - w$ seja disparada quando um *token* está no lugar *Serv1Ok*, um *token* do lugar *PktEmServ1* e outro do lugar *Serv1Ok* serão consumidos. Então o disparo da transição imediata $w2$ coloca um *token* no lugar *CanaisDisp* indicando que um canal da RSU está disponível novamente.

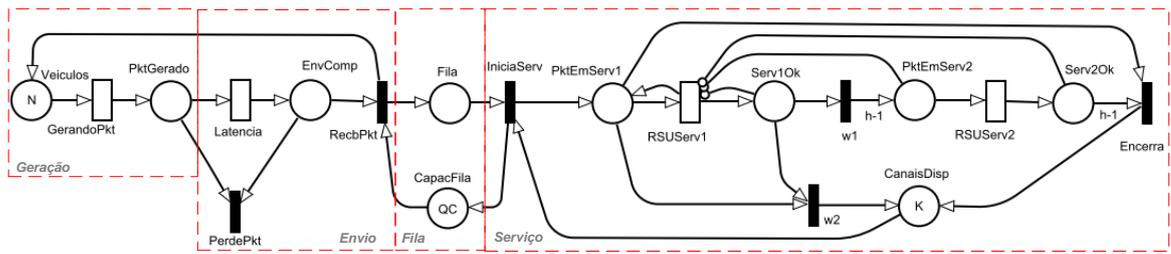


Figura 4.4: Modelo que representa uma fila $M/G/K/Q_c + K$. Onde “G” refere-se à distribuição Cox do tipo 1

Tabela 4.3: Atributos das transições - Modelo Cox 1

Transição	Tipo	Taxa	Peso	Prioridade	Concorrência
<i>RecbPkt</i>	im	-	$1 - P_e$	1	-
<i>PerdePkt</i>	im	-	P_e	1	-
<i>IniciaServ</i>	im	-	1	1	-
<i>w1</i>	im	-	w	1	-
<i>w2</i>	im	-	$1 - w$	1	-
<i>Encerra</i>	im	-	1	1	-
<i>GerandoPkt</i>	exp	λ_v	-	-	IS
<i>Latencia</i>	exp	L_t	-	-	IS
<i>RSUServ1</i>	exp	μ_c	-	-	IS
<i>RSUServ2</i>	exp	μ_c	-	-	SS

Os atributos das transições do modelo Cox tipo 1 são apresentados na Tabela 4.3. Essas transições são imediatas (im) ou exponenciais (exp) e apresentam um grau de concorrência com a semântica *infinite server* ou *single server*.

Portanto, esta instância de modelo SPN que foi apresentada demonstrou o funcionamento do sistema de filas para o caso em que a RSU possui tempos de serviço seguindo uma distribuição Cox do tipo 1.

4.2.2 Modelo Expolinomial Cox 2

Assim como o modelo anterior, esta instância de modelo SPN (ver Figura 4.5) compartilha uma parte do mesmo sistema implementado na SPN com taxa de serviço geral. Portanto, novamente será detalhada somente a parte do modelo referente às taxas de serviço da RSU.

Após o disparo da transição imediata *IniciaServ* colocando um *token* no lugar *PktEmServ1*, o *token* passa pela primeira fase da taxa de serviço. Não havendo *tokens* nos lugares *Serv1Ok*, *PktEmServ2* e *Serv2Ok*, a transição temporizada *RSUServ1*, de taxa exponencial definida pelo parâmetro μ_{1c} , pode então disparar. Após o *token* ser colocado no lugar *Serv1Ok*, o *token* pode disparar a transição imediata *w1* de peso definido pelo parâmetro w ou a transição imediata *w2* de peso $1 - w$. Caso a transição imediata *w1* dispare, será colocado um *token* no

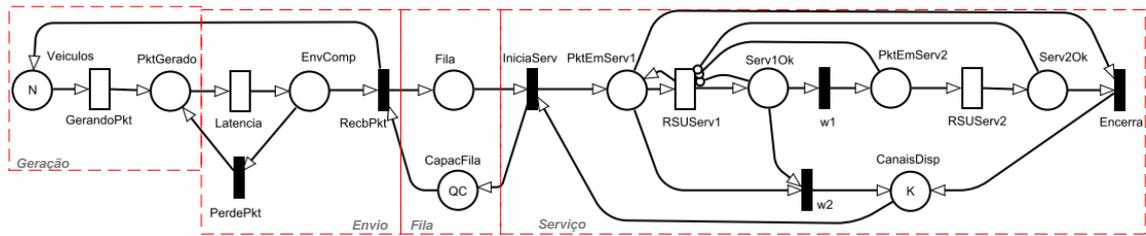


Figura 4.5: Modelo que representa uma fila $M/G/K/Q_c + K$. Onde “G” refere-se à distribuição Cox do tipo 2

Tabela 4.4: Atributos das transições - Modelo Cox 2

Transição	Tipo	Taxa	Peso	Prioridade	Concorrência
<i>RecbPkt</i>	im	-	$1 - P_e$	1	-
<i>PerdePkt</i>	im	-	P_e	1	-
<i>IniciaServ</i>	im	-	1	1	-
<i>w1</i>	im	-	w	1	-
<i>w2</i>	im	-	$1 - w$	1	-
<i>Encerra</i>	im	-	1	1	-
<i>GerandoPkt</i>	exp	λ_v	-	-	IS
<i>Latencia</i>	exp	L_t	-	-	IS
<i>RSUServ1</i>	exp	μ_{1c}	-	-	IS
<i>RSUServ2</i>	exp	μ_{2c}	-	-	SS

lugar *PktEmServ2*. Aqui se observa a diferença da Cox do tipo 2 para a Cox do tipo 1: ao invés de colocar $h - 1$ tokens no próximo lugar, na Cox 2 somente um é colocado. Como dito, as distribuições Cox do tipo 2 tem somente duas fases, onde as taxas de cada fase são distintas. Portanto, tendo uma das fases já executada (transição *RSUServ1*), só resta a próxima (transição *RSUServ2*) de taxa exponencial definida pelo parâmetro μ_{2c} para ser disparada. Ao dispará-la, um token é colocado no lugar *Serv2OK* indicando que as duas fases da taxa de serviço já foram concluídas. Então, disparando a transição imediata *Encerra*, um token é consumido do lugar *PktEmServ1* e outro é devolvido ao lugar *CanaisDisp*. Isto indica que um canal da RSU está disponível novamente.

Caso a transição imediata *w2* de peso $1 - w$ dispare, um token é retirado do lugar *PktEmServ1* e do lugar *Serv1Ok* e um é devolvido ao lugar *CanaisDisp*.

Os atributos das transições do modelo Cox tipo 2 (ver Figura 4.5) são apresentados na Tabela 4.4. Essas transições são imediatas (im) ou exponenciais (exp) e apresentam um grau de concorrência com a semântica *infinite server* ou *single server*.

Portanto, esta instância de modelo SPN que foi apresentada demonstrou o funcionamento do sistema de filas para o caso em que a RSU possui tempos de serviço seguindo uma distribuição Cox do tipo 2. Diferente da Cox do tipo 1, esta apresentada possui somente duas fases na taxa de

serviço.

4.3 Métricas de Avaliação

Nesta seção são apresentadas as métricas utilizadas para a avaliação de infraestruturas VANETs bem como as suas respectivas expressões. São possíveis seis métricas: a utilização (ρ), o tempo médio na fila (T_q), o tempo médio no sistema (T_s), o tamanho médio da fila (L_q), o tamanho médio do sistema (L_s) e a probabilidade de descarte na fila (Q_d). Estas métricas são as principais quando se avaliam sistemas de fila com *buffer* finito (mais detalhes na Seção 2.2).

Para a resolução das expressões, o *software* utilizado foi o *Mercury*⁶ (SILVA et al., 2015). O ambiente utilizado foi o SPN, onde foram criados os modelos de avaliação das infraestruturas VANETs, inseridos os parâmetros e definidas as métricas.

A utilização é definida como a fração de tempo em que o servidor está ocupado, executando serviço (BOLCH et al., 2006). Uma utilização de 100% indicaria que o servidor em questão está utilizando todos os seus recursos e seu desempenho atingiu o máximo suportado teoricamente. Em um sistema VANET, o número de veículos (N), a frequência de mensagens (f), a cobertura total da RSU (L_r), dentre outros fatores, podem afetar a utilização da RSU de forma significativa. Para avaliar esta métrica, neste trabalho foram definidas expressões equivalentes a serem resolvidas durante a avaliação dos modelos. Estas expressões estão dispostas na Tabela 4.5.

Uma vez que os modelos são baseados na teoria das filas, é possível obter algumas métricas comuns a estes tipos de sistemas. A métrica T_q representa o tempo médio que os pacotes esperam por serviço na fila, enquanto que a métrica T_s representa o tempo médio que um pacote passa dentro de todo o sistema (fila e servidor). O tempo médio no sistema é a soma do tempo médio na fila mais o tempo médio em processamento (BOLCH et al., 2006). Estas duas métricas permitem que engenheiros e projetistas verifiquem se há gargalos de desempenho em determinadas partes do sistema. Por exemplo, um tempo de fila muito alto indica que há uma demanda grande de mensagens chegando ao servidor. Para os modelos apresentados neste trabalho, as expressões para obtenção destas métricas estão presentes na Tabela 4.5.

Além das métricas relacionadas ao tempo, também é possível obter o número médio de pacotes na fila e em todo o sistema. A métrica L_q representa o tamanho médio da fila e a métrica L_s representa o tamanho médio do sistema. A observação da métrica do tamanho médio da fila permite que os projetistas tenham conhecimento do quanto em média a fila está ocupada. Caso seja notado que o tamanho da fila está próximo de sua capacidade total, talvez seja interessante adotar RSUs com capacidade interna maior, ou diminuir a geração e envio de mensagens nas OBU. Por sua vez, a observação da métrica do tamanho médio do sistema permite observar quantos pacotes estão na RSU ao mesmo tempo, seja em espera ou em serviço.

Em situações onde a fila da RSU está cheia, novos pacotes podem ser descartadas devido à ausência de espaço no *buffer* que compõe a fila. Neste trabalho, consideramos a probabilidade

⁶Mais informações sobre o *software* podem ser encontradas no Apêndice A e na referência citada.

Tabela 4.5: Expressões das métricas de avaliação

Parâmetro	Expressão
ρ	$E\{\#PktEmServ1\}/K$
T_q	$E\{\#Fila\} \times (1/(((S \times f)/Ps) \times N))$
T_s	$((E\{\#Fila\}) + (E\{\#PktEmServ1\})) \times (1/(((S \times f)/Ps) \times (N)))$
L_q	$E\{\#Fila\}$
L_s	$E\{\#PktEmServ1\} + E\{\#Fila\}$
Q_d	$P\{(\#PktGerado = 1)AND(\#Fila = QC)AND(\#PktEmServ1 = K)\}$

de descarte (Q_d) como métrica indicadora da quantidade de pacotes perdidas devido à fila cheia. Esta situação pode ocorrer quando houver uma alta taxa de geração de mensagens nas OBU e “lento” processamento da RSU.

A Tabela 4.5 mostra todas as métricas utilizadas na avaliação de desempenho da infraestrutura VANET, seus símbolos e expressões para resolução na ferramenta de modelagem *Mercury*.

Expressões como $E\{#p_j\}$, em que p_j é um lugar de um modelo SPN, representam o valor do número esperado de *tokens* no referido lugar (TRIVEDI, 2008). A Expressão 4.20 apresenta uma notação matemática para esta métrica (MARSAN et al., 1994). Portanto, na Tabela 4.5, a expressão $E\{\#PktEmServ1\}$ representa o número esperado de pacotes que tiveram serviço. E da mesma forma, $E\{\#Fila\}$ representa o número esperado de pacotes na fila.

$$E(p_j) = \sum_{x=1}^n x \times P(p_j, x) \quad (4.20)$$

Em que n é o número máximo de *tokens* que o lugar p_j pode conter. $P(p_j, x)$ indica a probabilidade do número de *tokens* no lugar p_j ser x .

Expressões como $P\{#p_j = n\}$, em que p_j é um lugar de um modelo SPN, representam a probabilidade de o lugar conter n *tokens*. A Expressão 4.21 apresenta uma notação matemática para esta métrica. Portanto, a expressão $P\{(\#PktGerado = 1)\}$ na Tabela 4.5 indica a probabilidade do número de *tokens* no lugar $PktGerado$ ser igual a 1. Da mesma forma, a expressão $P\{(\#PktEmServ1 = K)\}$ indica a probabilidade de haverem K *tokens* no lugar $PktEmServ1$.

$$P(p_j, n) = \sum_{i \in S_1} p_i \quad (4.21)$$

Em que $S_1 = \{i \in \{1, 2, \dots, S\} | M_i(p_j) = n\}$.

4.4 Comparações com Modelos de Simulação

Nesta seção são apresentadas as comparações dos modelos propostos com modelos de simulação. Este trabalho propõe modelos SPN para avaliar uma infraestrutura VANET a ser implantada. No entanto, é importante verificar se o modelo contempla resultados que

são consistentes com outros tipos de modelos. Para isto, validamos o modelo por meio de comparações com resultados providos por modelos de simulação. Os modelos de simulação permitem reproduzir o funcionamento do sistema à medida que este progride ao longo do tempo (ROBINSON, 2014).

Foram comparadas cinco métricas: utilização (ρ), tempo médio na fila (T_q), tempo médio no sistema (T_s), tamanho médio da fila (L_q) e tamanho médio do sistema (L_s). Por meio de métodos estatísticos foi possível verificar a proximidade dos valores propostos pelos modelos SPN desta dissertação com aqueles providos pelos modelos de simulação.

4.4.1 Frameworks Utilizados

Foram utilizados três *frameworks* de simulação: OMNeT++ (OpenSim Ltd., 2014), Veins (SOMMER, 2012) e SUMO (KRAJZEWICZ et al., 2002). Estes *frameworks* foram selecionados pois além de serem softwares livres, também são os mais utilizados nas pesquisas da área VANET. Eles são utilizados para pesquisas relativas à eficiência energética dos veículos (ALSABAAN; NAIK; NAYAK, 2010), algoritmos de roteamento (WISITPONGPHAN et al., 2007), proposição de protocolos (CAMPOLO et al., 2013), dentre outros. Cada um dos *frameworks* será detalhado nas seções a seguir.

4.4.1.1 OMNeT++

O OMNeT++ é um *framework* e biblioteca de simulação *open source*, extensível, modular, baseado na linguagem de programação C++, baseado em eventos discretos, que tem como objetivo principal a construção de simuladores de rede. Ele é totalmente programável e modular de forma que suporta a modelagem de redes complexas por meio da reutilização dos componentes. O OMNeT++ disponibiliza uma poderosa interface gráfica que permite realizar o *debug* dos modelos enquanto executados como também visualizar facilmente variáveis de interesse enquanto a simulação progride. Além disso, o gráfico da rede ou sistema é apresentado com animações, mostrando o fluxo das mensagens e exibe um *log* onde cada evento é detalhado.

No que se refere à forma de representar os componentes de uma rede, o OMNeT++ dispõe de uma arquitetura baseada em componentes genéricos. Fica a cargo do especialista o mapeamento dos conceitos como dispositivos de rede, protocolos, canais de comunicação dentro dos componentes de modelo. Estes últimos, chamadas de módulos, se bem projetados podem ser utilizados em uma ampla variedade de ambientes e combinados de várias formas. Por exemplo, a construção de um módulo que “gera pacotes intervalados” pode ser utilizada em vários tipos de modelagens de redes diferentes.

Uma representação dos módulos utilizados no OMNeT++ pode ser vista na Figura 4.6. Ambos os módulos **simple** e **compound** são instâncias de um objeto geral chamado **module**. Instâncias destes módulos servem como componentes para módulos ainda mais complexos. Isto permite que o especialista possa dividir um módulo em vários sub-módulos utilizando o módulo

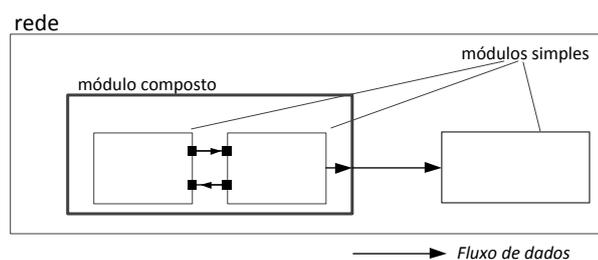


Figura 4.6: Módulos de componentes do *framework* OMNeT++

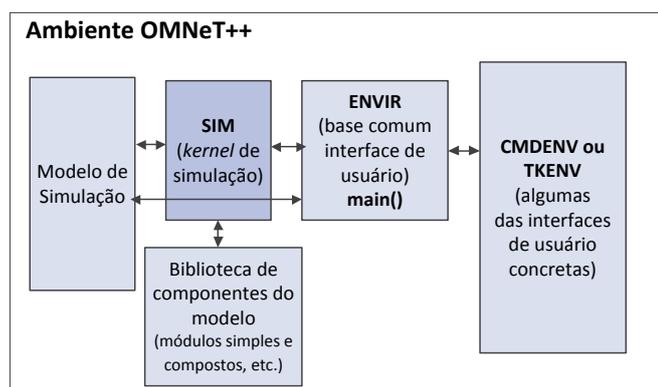


Figura 4.7: Estrutura do *framework* OMNeT++

composto. Como visto, módulos simples constituintes de um módulo composto podem trocar mensagens entre si e ainda comunicar-se com módulos externos.

A estrutura interna do OMNeT++ é dividida segundo a Figura 4.7. A Biblioteca de Modelos dos Componentes consiste do código compilado dos módulos simples e composto. Módulos são instanciados e o modelo concreto de simulação é criado pelo *kernel* de simulação e classe de bibliotecas no início da execução da simulação. A simulação ocorre em um ambiente definido pelas bibliotecas de interface de usuário (*Envir*, *Cmdenv* e *Tkenv*) – este ambiente define de onde os dados se originam, para onde os resultados da simulação vão, controla a simulação da execução, determina como o modelo de simulação é visualizado e possivelmente como é animado.

4.4.1.2 SUMO

O SUMO é um simulador também *open source* de tráfego que permite modelar sistemas incluindo veículos, transportes públicos e pedestres. Incluído no SUMO, há uma gama de funcionalidades que permitem descoberta de rota, visualização, importação de vias urbanas e estimativas da emissão de poluentes em classes de veículos.

SUMO é puramente um simulador microscópico, onde cada veículo no mapa pode ser definido explicitamente, contendo um nome, local e horário de saída e local de chegada. Se

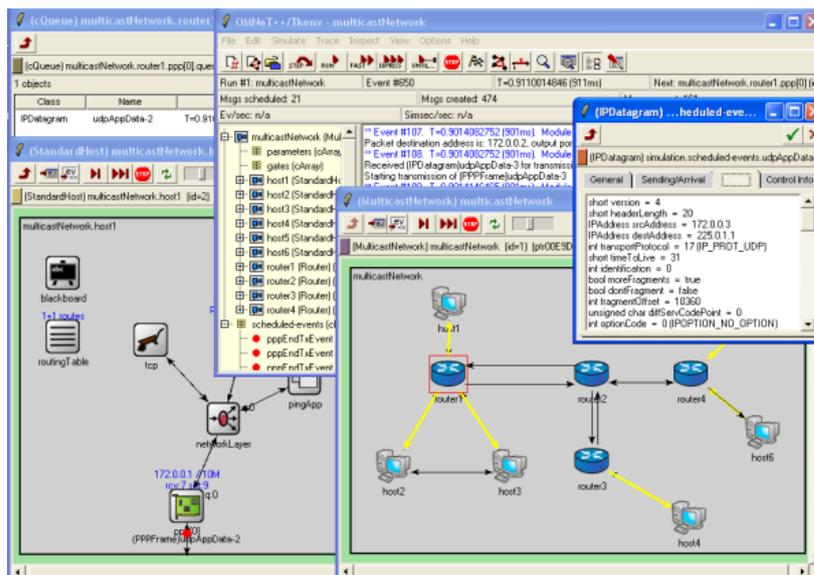


Figura 4.8: Captura de tela do ambiente *Tkenv* onde é possível ver o mapa de rede e funcionamento de componentes do modelo

desejado, mais informações podem ser repassadas para detalhar um veículo: faixa de rolamento escolhida na saída, velocidade, uso do freio e comportamento do condutor (agressivo, calmo, normal).

As vias podem ser geradas manualmente ou importadas de mapas digitais. A geração manual pode ser mais trabalhosa mas é bem útil em mapas mais simples. É possível definir a quantidade de faixas de uma via, curvas, junções com outras avenidas, semáforos, rotatórias, dentre outros. Se desejado, o SUMO disponibiliza de ferramentas para importar mapas de outros simuladores como também do *Open Street Map* (HAKLAY; WEBER, 2008).

Uma representação da interface gráfica do SUMO pode ser vista na Figura 4.9.

4.4.1.3 Veins

Um dos problemas encontrados no OMNeT++ é a representação dos nós quando se deseja executar simulações onde há mobilidade destes. O *framework* não torna a tarefa impossível, mas é demasiadamente complexo em casos onde se deseja, por exemplo, definir que um veículo percorra certo caminho em um mapa real.

Como visto anteriormente, o SUMO permite tal modelagem com facilidade e riqueza de detalhes. Inclusive, o SUMO possui uma porta de comunicação que pode ser utilizada para trocar mensagens sobre o movimento dos veículos com outros simuladores ou aplicações. Nesta situação, o SUMO permite inclusive que outro simulador possa dar comandos para que os veículos troquem de rota ou mudem seu comportamento de forma dinâmica.

O Veins é um projeto OMNeT++, ou seja, ele funciona dentro do *framework* como um projeto de programação funciona dentro de um ambiente de desenvolvimento comum. De código aberto, o projeto também é feito na linguagem C++ e voltado totalmente para estudos do tráfego



Figura 4.9: Captura de tela da interface do SUMO onde é possível ver as vias e os veículos trafegando durante a simulação

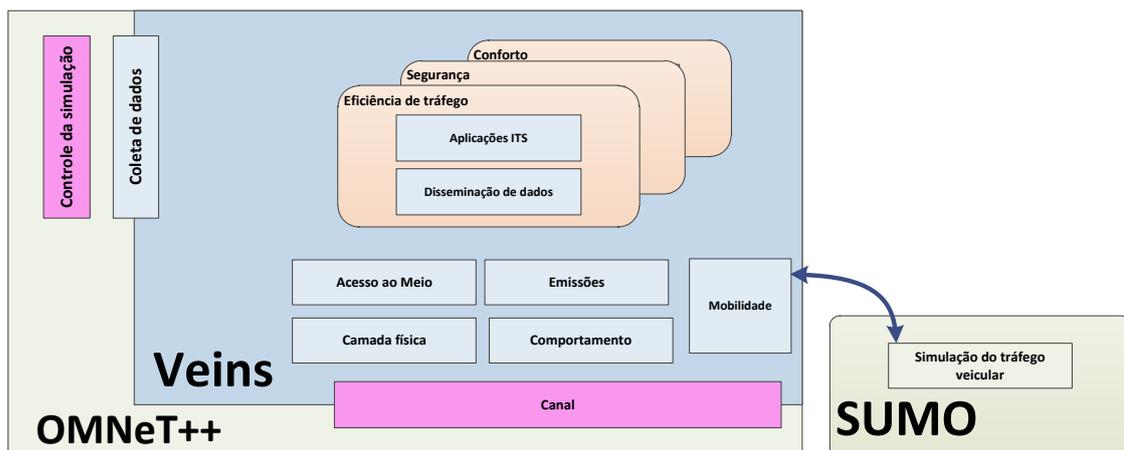


Figura 4.10: Arquitetura do Veins e conexões com o OMNeT++ e SUMO

veicular. Ele funciona interligando o OMNeT++ e o SUMO via interfaces de comunicação, permitindo solucionar o problema em modelar o comportamento móvel de nós de rede do OMNeT++.

Além de prover tal comunicação, o Veins possui uma biblioteca de módulos e códigos-fonte para modelar a parte de rede específica de ambientes veiculares incluindo o protocolo IEEE 802.11p, IEEE WAVE, dentre outros. Isto permite modelar desde a camada física da rede até mais altas camadas de aplicação.

A Figura 4.10 apresenta a arquitetura do Veins. Como visto, ele faz parte do OMNeT++ compartilhando algumas informações com este e se conecta com o SUMO para obter informações de mobilidade em tempo de execução da simulação.

Durante toda a simulação, os *frameworks* permanecem conectados e sincronizados. Cada

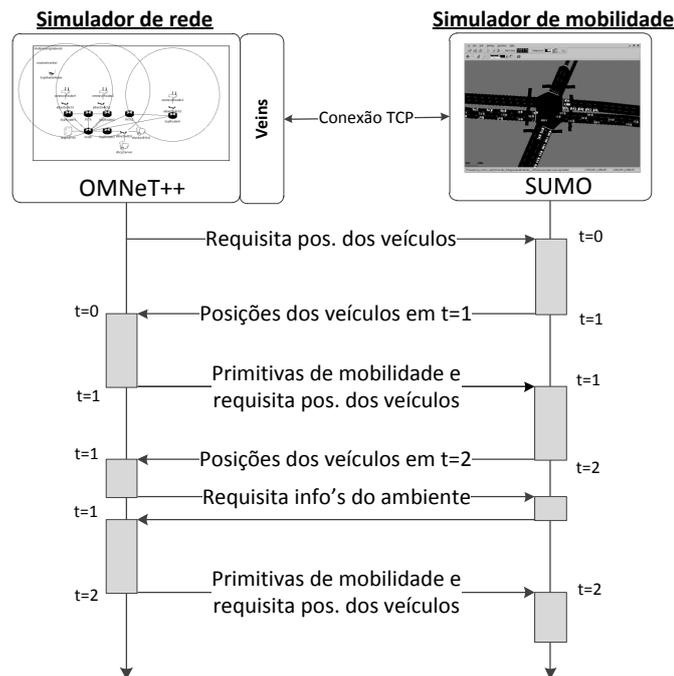


Figura 4.11: Exemplo de troca de mensagens entre os *frameworks* durante a simulação

movimento de veículo no SUMO é notificado via interface de rede ao Veins que por sua vez atualiza a posição interna do nó de rede e executa ações relativas à comunicação entre nós, instância de novos objetos, escrita de *logs*, dentre outras. Um exemplo da troca de mensagens entre os *frameworks* durante a simulação pode ser vista na Figura 4.11.

4.4.2 Métodos Utilizados

A biblioteca *queueinglib* do projeto OMNeT++ foi estendida para que fossem criadas classes apropriadas para a modelagem de um sistema de filas. Uma classe de nome *OBUHost* foi desenvolvida para agir como uma fonte de mensagens. Também foi criada uma classe de nome *RSUPassiveQueue* que recebe e armazena pacotes oriundos das OBUs e age como a fila do sistema. A classe *RSU Server* processa as mensagens consumidas da *RSUPassiveQueue*. E por fim, foi criado um módulo chamado *JobCollect* que recebe os pacotes depois de concluído os processamentos por parte do *RSU Server*.

Cada uma destas entidades tem mecanismos internos de registros de eventos durante a execução da simulação. Os dados gerados por tais eventos, quando analisados após a simulação, permitem obter várias métricas de interesse do usuário⁷. As métricas estudadas neste caso são a utilização (ρ), tempo médio na fila (T_q), tempo médio no sistema (T_s), tamanho médio da fila (L_q) e tamanho médio do sistema (L_s). O significado destas métricas neste modelo de simulação são os mesmos apresentados no Capítulo 2.

⁷Os dados podem ser processados durante a simulação, mas não é uma prática comum de acordo com os manuais de uso do OMNeT++ (OpenSim Ltd., 2014).

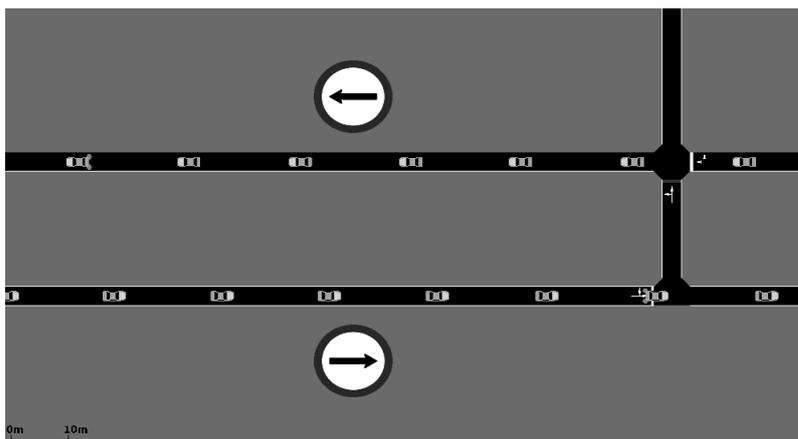


Figura 4.12: Topologia de mão dupla criada no *framework* SUMO

Após a criação destes componentes do sistema de filas no OMNeT++, foi necessário criar um cenário com vias de circulação no SUMO. Uma topologia simples com uma via de mão dupla separada por um canteiro e possuindo uma única faixa de rolamento. A Figura 4.12 apresenta o cenário criado no SUMO.

Os veículos trafegam seguindo uma velocidade constante e mantendo uma distância segura dos veículos à frente. Apesar de existirem cruzamentos no cenário, estes são ignorados e os veículos partem de um lado da via até o seu final no lado oposto sem cometer mudanças na sua rota.

O *framework* Veins foi utilizado para conectar os dois frameworks antes apresentados. Ao evento de um veículo mover-se no SUMO, o OMNeT++ é notificado via o Veins, que age como interface, e vice-versa. O tempo durante a execução da simulação é sincronizado entre todos os *frameworks*. Para cada veículo existente no SUMO haverá uma instância de objeto que representa uma OBU no lado do OMNeT++. Periodicamente as OBUs enviam mensagens para os módulos instanciados que compõem a RSU. Ao atingir o final da via, aquela instância de OBU é encerrada em ambos os *frameworks*, e por meio do Veins essas informações são trocadas.

Os parâmetros utilizados para configurar a simulação estão presentes na Tabela 4.6. Os códigos-fonte desenvolvidos, scripts e outros materiais suplementares úteis ao modelo de simulação estão presentes no repositório Github do desenvolvedor⁸.

4.4.3 Resultados

A Tabela 4.7 apresenta a comparação entre os resultados do modelo de simulação e dos modelos SPN propostos. Foi utilizado o método *batch means* (ROBINSON, 2014)(BANKS, 1998) para obtenção dos resultados das métricas estudadas durante a simulação.

É possível verificar que os resultados dos modelos SPN estão contidos no intervalo de confiança de valores obtidos do modelo de simulação. Os resultados providos pelos modelos deste trabalho são valores médios devido à análise estacionária, enquanto que os resultados do

⁸<http://www.github.com/aleciano>

Tabela 4.6: Parâmetros utilizados pelos *frameworks* de simulação

Parâmetro	Valor
N	60 veículos
D	500 <i>m</i>
$wayType$	“two way”
nL	1 faixa
V	36 <i>km/h</i>
RSU_X^a	500
RSU_Y^b	990
Ps	1500 <i>B</i>
f	10 <i>msgs/s</i>
S	2712 <i>b</i>
μ	6 <i>Mbps</i>
K	1 canal
Q_c	16 pacotes
$Tempo^c$	5000 <i>s</i>
$Repl.^d$	10
$I.C^e$	95%
$E.R.M^f$	< 5%

^a Posição no eixo “X” onde a RSU está localizada.

^b Posição no eixo “Y” onde a RSU está localizada.

^c Tempo utilizado em cada rodada de simulação suficiente para alcançar o estado estacionário.

^d Número de replicações.

^e Intervalo de confiança.

^f Erro relativo médio.

Tabela 4.7: Comparação entre os valores dos modelos de simulação e modelos SPN propostos

Métrica	Resultados do modelo de simulação	Resultados dos modelos SPN
ρ	(22.195, 28.887) [%]	26.772 [%]
T_q	(0.00051, 0.00090) [<i>ms</i>]	0.00073 [<i>ms</i>]
T_s	(0.00250, 0.00291) [<i>ms</i>]	0.00273 [<i>ms</i>]
L_q	(0.04167, 0.13870) [<i>pacotes</i>]	0.09787 [<i>pacotes</i>]
L_s	(0.32245, 0.38600) [<i>pacotes</i>]	0.36559 [<i>pacotes</i>]

modelo de simulação são obtidos por meio de métodos estatísticos sobre os eventos registrados durante a sua execução. Vale salientar que a análise dos resultados da simulação foi sobre o tempo estacionário. Portanto, é possível comprovar que os modelos propostos são compatíveis com modelos de simulação com 95% de confiança e um erro relativo médio menor do que 5%.

5

Estudos de Caso

Este capítulo apresenta os estudos de caso que foram elaborados durante o desenvolvimento desta pesquisa. O objetivo destes estudos de caso é utilizar os modelos SPN apresentados no Capítulo 4 para realizar a avaliação das infraestruturas VANETs. Em cada caso, um cenário veicular será apresentado juntamente com a aplicação em estudo. Em posse destas informações, os parâmetros são informados e a avaliação é executada para que sejam observadas as características das métricas e suas respectivas limitações.

No primeiro estudo de caso, apresentado na Seção 5.1, uma infraestrutura VANET com tráfego veicular simples é analisada para duas diferentes soluções de implantação. O objetivo é descrever como os modelos podem ser ajustados para diferentes parâmetros em uma mesma infraestrutura e prover resultados para a escolha da solução mais adequada para implantação. O segundo estudo de caso, apresentado na Seção 5.2, mostra um cenário de pedágio onde se deseja instalar uma infraestrutura VANET para automatização dos pagamentos. Uma vez que existem especificações de tempo de resposta para aplicações VANET onde há transações comerciais, este estudo de caso permite identificar se a solução atende a estas especificações e também mostra como propor alterações para otimização das métricas de interesse. No terceiro estudo de caso, apresentado na Seção 5.3, uma interseção urbana é estudada para suportar aplicações de segurança. O objetivo é modelar um cenário urbano mais complexo, definir restrições às métricas e utilizar a técnica *DoE* para analisar o impacto dos parâmetros e suas interações para as métricas de interesse e restrições impostas.

5.1 Estudo de Caso I

Este primeiro estudo de caso visa estudar uma situação com duas alternativas de equipamentos e respectivas configurações para implantar uma infraestrutura VANET de tráfego veicular simples. Os projetistas neste caso irão possuir duas soluções e desejam saber o comportamento do sistema quando aplicadas cada uma delas. Para isso, os parâmetros do ambiente serão obtidos e as soluções serão comparadas. Ao fim será possível saber qual das soluções é mais adequada de acordo com as métricas de interesse.

O cenário estudado é uma via local da cidade do Recife, no estado de Pernambuco. A



Figura 5.1: Avenida Prof. Luís Freire, Recife, Brasil

via apresentada no mapa da Figura 5.1 é de mão dupla, apresenta uma faixa de rolamento em cada sentido e não possui inclinação. Esta localidade foi escolhida pois apresenta um tráfego tipicamente leve e possui uma configuração inicial para o primeiro estudo de caso deste trabalho.

Neste estudo iremos considerar que os veículos que circundam a região estão equipados com OBUs que implementam o protocolo IEEE 802.11p/WAVE¹. A RSU também apresenta o mesmo protocolo, mas se localiza em um ponto fixo. As OBUs podem enviar pacotes para a RSU utilizando o canal de controle ou um dos canais de serviço.

Devido ao fato desta rua apresentar diferentes densidades de tráfego ao longo do dia, neste estudo de caso a densidade veicular, dentre outros parâmetros apresentados na Seção 5.1.1, serão variados. Estas situações estudadas permitem avaliar se a infraestrutura VANET se comporta bem diante de uma quantidade de situações.

A RSU tem uma cobertura limitada que em geral é determinada pelo tipo fabricante e peças utilizadas na construção do equipamento. Além disso, as características do local também influenciam na propagação e recepção do sinal. Assim, neste estudo, o valor do raio de cobertura da RSU leva em consideração estudos prévios² com uma margem tolerável de erros de transmissão.

5.1.1 Parâmetros e Métricas

Os veículos da região utilizam o serviço de *beaconing*. Este serviço é essencial para ambientes veiculares, principalmente em situações que tem como objetivo a segurança de

¹Consideramos que as OBUs rodam o protocolo IEEE 802.11p/WAVE mas não são consideradas todas as características deste protocolo.

²Estudos como esses podem ser realizados pelo próprio fabricante, pesquisadores ou engenheiros em uma localidade com características similares.

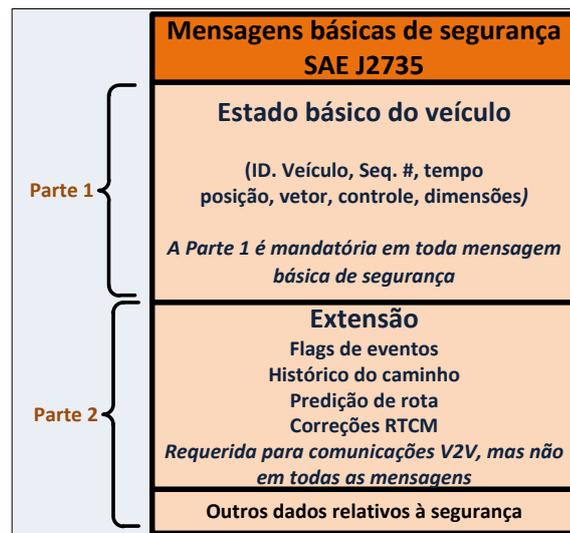


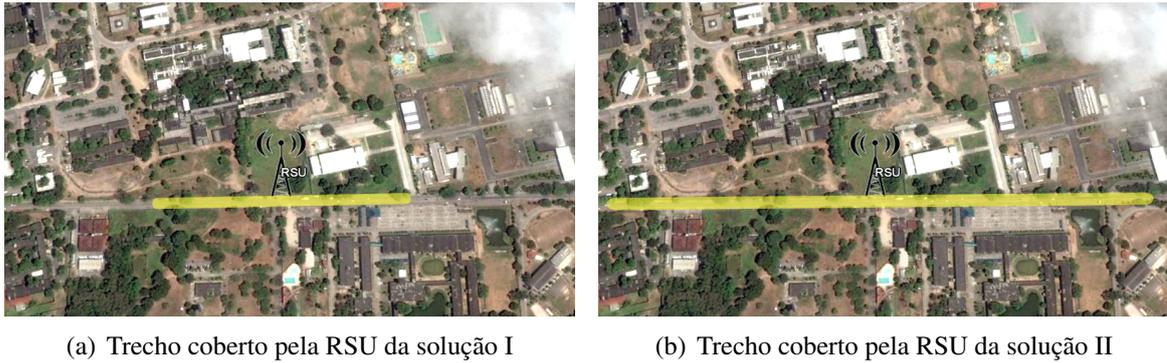
Figura 5.2: Tipos de mensagens e dados enviados pelo padrão J2735

motoristas, pedestres e bens. Neste serviço, veículos enviam *beacons* periodicamente quando estão dentro da área coberta pela RSU. As mensagens podem conter dados como: posição, movimento, dimensões do veículo, identificação do condutor e veículo. Existe um padrão desenvolvido pela Sociedade dos Engenheiros Automotivos (*Society of Automotive Engineers* (SAE)) chamado de **SAE J2735** (Society of Automotive Engineers, 2009) que especifica um tipo de mensagem compondo tais informações. Neste estudo em particular, serão utilizadas as mensagens básicas de segurança (**BSM**, do inglês, *Basic Safety Message*) parte 1 do referido padrão. A Figura 5.2 detalha os tipos de mensagens e dados do padrão.

De acordo com o padrão, mensagens da parte 1 têm 2712 bits e são enviadas dez vezes por segundo por cada OBU. Em nosso estudo de caso, para avaliar se a infraestrutura acomoda futuras expansões, iremos avaliar uma frequência de envio entre 5 e 15 mensagens por segundo. As mensagens são encapsuladas pelas OBUs que irão enviar pacotes de 1500 bytes na solução I e 500 bytes na solução II.

Os pacotes enviados são exponencialmente distribuídos utilizando um dos K canais disponibilizados. Embora seja possível utilizar até seis canais 802.11p/WAVE, neste estudo iremos avaliar a RSU com um canal para a solução I e com dois canais para a solução II. Entretanto, mesmo disponibilizando dois canais, o envio por parte das OBUS é para somente um dos canais disponíveis por vez. Portanto, desta maneira é possível ter OBUs mais simples e baratas uma vez que possuem antenas capazes de se conectar a uma frequência por vez. Ainda sobre a RSU, em ambas as soluções o tamanho da fila considerado será de 32 pacotes.

O raio da RSU é diferente para as duas soluções. Iremos considerar que na solução I a RSU tem um raio efetivo de 200 m, enquanto que na solução II o raio é de 400 m. Estes valores levam em consideração uma distância em que pacotes possam ser recebidos considerando uma probabilidade de erro (P_e) tolerável. O tempo para enviar o pacote, ou a latência (L_t) é de 0,7 ms.



(a) Trecho coberto pela RSU da solução I

(b) Trecho coberto pela RSU da solução II

Figura 5.3: Cobertura de ambas as RSUs nas duas soluções

A probabilidade de erro é de 5% e 10% para a solução I e II respectivamente. A Figura 5.3(a) mostra o trecho de pista coberto pela RSU da solução I e a Figura 5.3(b) mostra o trecho de pista coberto pela RSU da solução II. Como a via é de mão dupla e tem somente uma faixa em cada sentido, o parâmetro $wayType$ é 4 e o parâmetro nL é 1.

Para determinar a densidade veicular, este estudo de caso adota distâncias de segurança entre veículos assim como indicado pelo sítio do Departamento de Trânsito do Paraná (DETRAN-PR, 2016). Além disso, o modelo de tráfego *free flow* é levado em consideração. As distâncias de segurança são calculadas de acordo com a velocidade média considerada. O DETRAN-PR considera que cada veículo deve estar a no mínimo dois segundos do carro à frente, sendo assim, para saber a distância correta podemos empregar a fórmula da velocidade média. Sabendo a que a velocidade média considerada é de 30 quilômetros por hora (ou 8,3 metros por segundo), podemos determinar a distância segura entre veículos da seguinte forma:

$$V = \frac{Sp}{T},$$

$$8,3 = \frac{Sp}{2},$$

$$Sp = 8,3 \times 2,$$

$$Sp \simeq 17m.$$

Sp indica uma quantidade de espaço percorrida e T representa o período de observação.

Portanto, os veículos devem manter uma distância de cerca de 17 m do veículo imediatamente a sua frente. Para determinar a densidade veicular correta, ainda é necessário conhecer o tamanho médio dos veículos. Neste estudo de caso são considerados veículos com uma dimensão média de 4 metros. Para realizar o cálculo correto da densidade veicular, um *script* utilizando o *software Mathematica* foi empregado e está disponível no Apêndice B. Então, a densidade veicular varia entre 0,018 e 0,025 veículos por metro.

A distribuição Cox do tipo 2 foi utilizada para determinar a taxa de serviço da RSU em ambas as soluções. Esta distribuição tem duas fases de serviço: na solução I, a primeira fase μ_{1c} tem valor 9 *Mbps* e a segunda fase μ_{2c} tem valor 6 *Mbps*; na solução II, a primeira fase μ_{1c} tem

Tabela 5.1: Parâmetros e métricas de avaliação para ambas as soluções

	Símbolo	Valor
Parâmetros	f	1–15 [<i>msgs/s</i>]
	S	2712 <i>b</i>
	P_s	1500 <i>B</i> , 500 <i>B</i> ³
	D	200 <i>m</i> , 400 <i>m</i>
	$wayType$	“mão dupla” (4)
	nL	1 faixa
	α	0,018–0,025 [<i>veiculos/m</i>]
	V	30 <i>km/h</i>
	β	0,17–0,225 [<i>veiculos/s</i>]
	L_v	4 <i>m</i>
	λ_v	(<i>varivel</i>)
	L_t	0,7 <i>ms</i> ⁴
	μ_{1c}	9 <i>Mbps</i> , 6 <i>Mbps</i>
	μ_{2c}	6 <i>Mbps</i> , 3 <i>Mbps</i> ⁵
	K	1, 2 canais
	h	2 fases
	w	5%
	P_e	5%, 10%
	Q_c	32 pacotes
	Métricas	ρ
T_s		< 20 <i>ms</i>
L_q		Sem restrições

valor 6 *Mbps* e a segunda fase μ_{2c} tem valor 3 *Mbps*³. O número de fases (h) é 2, uma vez que a distribuição Cox 2 tem somente duas fases da taxa de serviço. O parâmetro w recebe o valor de 5%.

Neste estudo serão avaliados três relevantes métricas: a utilização da RSU (ρ), o tempo de resposta ou tempo médio de sistema (T_s) e o tamanho médio da fila (L_q). A utilização é importante para se verificar a estabilidade do sistema e se o mesmo não está sob estresse. O tempo de resposta pode ser útil para se detectar problemas em partes do sistema, por exemplo, se o pacote passa muito tempo na fila ou no processamento da RSU. O tamanho médio da fila indica o número de pacotes aguardando serviço enquanto a RSU está ocupada. Um tamanho de fila próxima ao limite Q_c indica que o sistema não consegue lidar corretamente com a grande quantidade de pacotes que estão chegando à estação.

A Tabela 5.1 mostra todos os parâmetros escolhidos e as métricas juntamente com as suas restrições quando aplicáveis para a solução I. É importante mencionar que estes são todos os parâmetros necessários para este estudo de caso em particular. Outros parâmetros (se necessários) serão derivados de acordo com os providos pela tabela utilizando as expressões apresentadas no Seção 4.1.

³Tamanho do pacote baseado no trabalho de (SHIVALDOVA; WINKELBAUER; MECKLENBRAUKER, 2013).

⁴Valor baseado no trabalho de (LIN et al., 2012).

⁵Taxas baseadas no trabalho de (JIANG; CHEN; DELGROSSI, 2008), (CAMPOLO et al., 2013), e (PAIER et

Considerando os modelos propostos, na próxima seção serão discutidos os resultados da avaliação de desempenho deste estudo de caso. Primeiro, os resultados de ambas as soluções são discutidos e em seguida uma comparação é realizada para que seja verificada a diferença entre as soluções estudadas.

5.1.2 Resultados da Solução I

A Figura 5.4 mostra os resultados da utilização, tempo de resposta e tamanho de fila para a solução I. A Figura 5.4 (a) mostra o resultado da utilização quando as frequências de mensagens são 5, 10 e 15 *msgs/s*. À medida que a densidade veicular é incrementada nota-se uma mudança no valor da utilização. O crescimento é linear para todos os valores de f estudados. Entretanto, para mesmos valores de densidade veicular, a mudança no valor da frequência de mensagens geradas produz um grande impacto no valor da utilização. Dobrando a frequência de geração produz igualmente um valor em dobro da utilização. Também nota-se que a utilização permaneceu sempre abaixo da restrição de 90%, indicando que o sistema está estável e poderia inclusive suportar uma maior carga.

Pode-se observar que caso em um futuro próximo seja preciso incrementar a frequência de geração de mensagens do padrão SAE J2735 que por definição são de 10 *msgs/s*, a infraestrutura vai suportar sem problemas para a métrica de utilização.

A Figura 5.4 (b) mostra o resultado do tempo de resposta para a variação da densidade veicular para diferentes valores de frequência de mensagens. O comportamento é bem similar ao da Figura 5.4 (a), em que o crescimento é tipicamente linear. Entretanto, dobrando o valor de f de 5 para 10 *msgs/s*, não produz o dobro desta métrica, como no caso da utilização. O crescimento é de 3% neste caso. Aumentando a frequência de 10 para 15 *msgs/s* o crescimento no tempo de resposta chega a ser menor do que 3%.

O valor do tempo de resposta esteve sempre dentro da restrição de 20 *ms*, indicando que não há violação neste caso. Este valor de tempo de resposta dentro destas condições é bem interessante e permite uma série de aplicações que exigem baixo tempo de resposta. Aplicações que na sua maioria visam evitar colisões e notificar sobre situações emergenciais no próprio veículo ou na via em si.

A Figura 5.4 (c) mostra o tamanho da fila durante a avaliação da solução I. Os valores de tamanho da fila são pequenos, isto indica que os pacotes passaram pouco tempo na fila ou sequer precisaram esperar a liberação da RSU ou dos seus canais. Diferente dos casos anteriores, à medida que se tem um valor maior de frequência de mensagens, rapidamente a fila cresce. Quando $f = 5$ *msgs/s*, o incremento no valor da densidade veicular não produz variação significativa no tamanho da fila. Porém, quando $f = 10$ *msgs/s*, pode-se notar que o valor quase que chega ao dobro ao fim da variação no valor da densidade veicular. Já quando $f = 15$ *msgs/s*, o crescimento no tamanho da fila tem tendência exponencial.

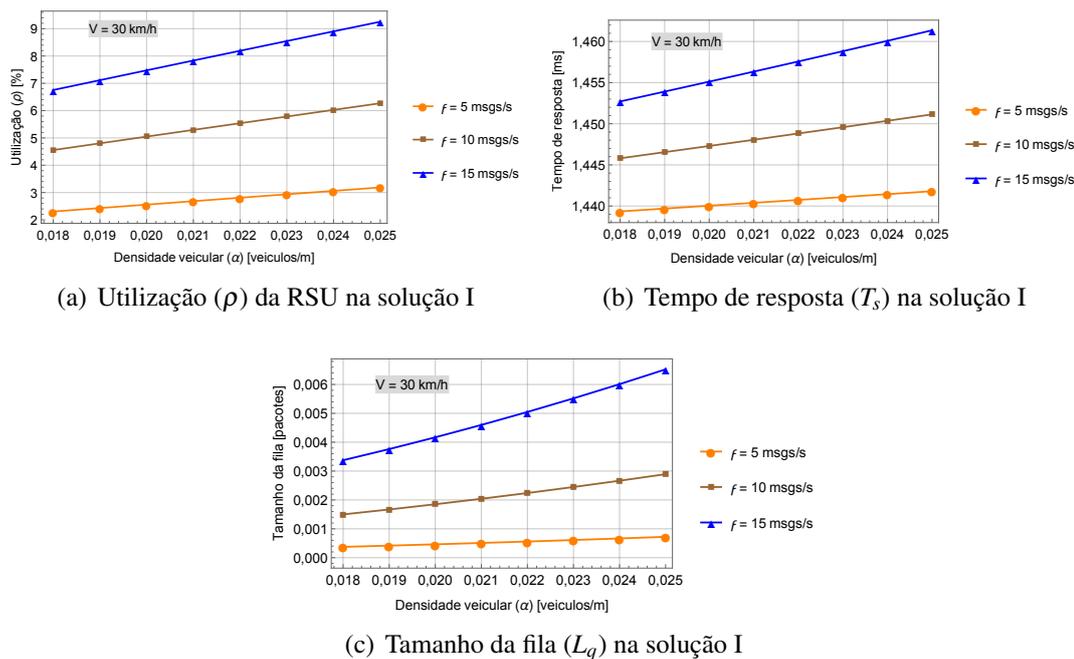


Figura 5.4: Utilização, tempo de resposta e tamanho de fila para a solução I

Uma conclusão que pode ser retirada da análise do tamanho da fila na solução I é a de que o aumento de ambos os valores de frequência de geração de mensagens e de densidade veicular produz um grande impacto sobre o tamanho da fila. No entanto, como não houve restrições impostas, os valores apresentados são aceitos.

5.1.3 Resultados da Solução II

Na Figura 5.5 são apresentados os resultados da utilização, tempo de resposta e tamanho da fila para a solução II. A Figura 5.5 (a) mostra o resultado da utilização da RSU para a solução II quando a frequência de mensagens geradas são 5, 10 e 15 msgs/s respectivamente. À medida que a densidade veicular é incrementada na região nota-se um aumento linear da utilização, assim como ocorreu na solução I. A diferença neste caso é que a utilização é um pouco maior. Para $f = 5 \text{ msgs/s}$, o incremento na densidade veicular produz pouco efeito sobre o valor da utilização, aumentando cerca de 1%. Para $f = 10 \text{ msgs/s}$, o aumento é de em torno de 3%, indicando que essa frequência de mensagens pelas OBUs produz uma variação maior na utilização. Para $f = 15 \text{ msgs/s}$, o aumento na utilização ao longo do incremento do valor da densidade veicular é de cerca de 4%.

Nota-se que na solução II a utilização sofreu maior impacto do que na solução I. Isto se deve principalmente ao fato de que a RSU cobre 400 m ao invés de 200 m, como na solução I. A variação de densidade veicular apresentada produz uma variação real de cerca de quatro carros no trecho coberto pela RSU. Portanto, um aumento que pode ser considerado simples e que produziu mudanças significativas na utilização da RSU na solução II. Porém, os valores ainda estão respeitando a restrição de 90%, portanto, podem ser aceitos neste sentido.

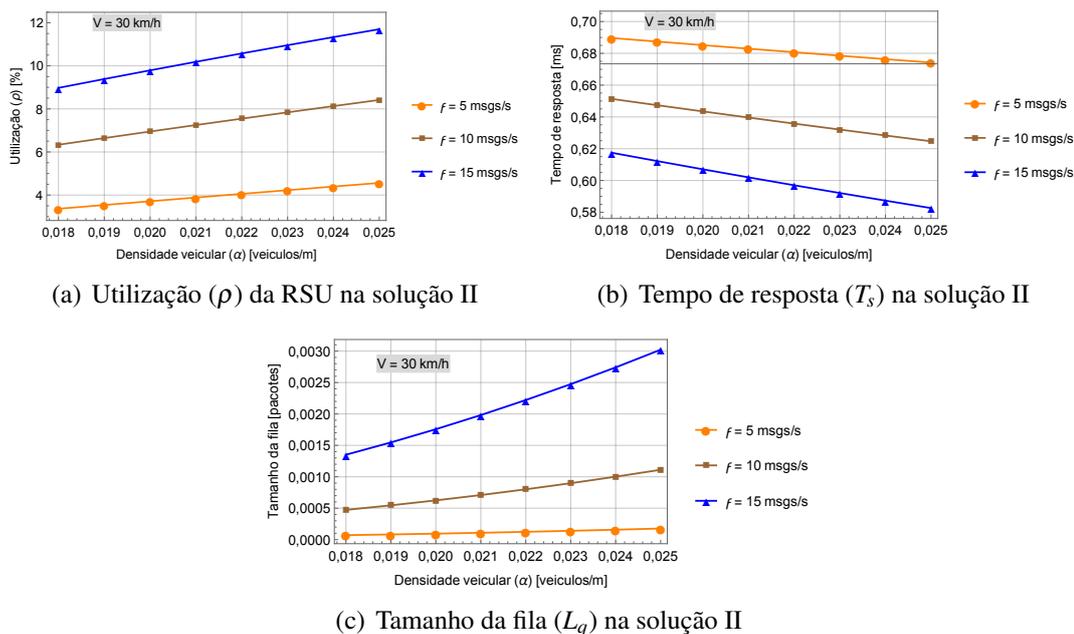


Figura 5.5: Utilização, tempo de resposta e tamanho de fila para a solução II

A Figura 5.5 (b) mostra o tempo de resposta para a solução II. Pode-se notar de imediato que os valores em comparação com os apresentados pela solução I são menores e decrescentes à medida que incrementada a densidade veicular (a análise comparativa será apresentada na Seção 5.1.4). Para $f = 5 \text{ msgs/s}$, a variação na densidade veicular produz uma variação de cerca de $0,02 \text{ ms}$ no tempo de resposta. Entretanto, quando $f = 10 \text{ msgs/s}$, a variação no tempo de resposta é um pouco mais significativa, cerca de $0,01 \text{ ms}$. A maior variação ocorre quando $f = 15 \text{ msgs/s}$, o tempo de resposta aumentou $0,04 \text{ ms}$ durante a variação na densidade veicular. Novamente o valor do tempo de resposta respeitou a restrição de 20 ms com bastante folga.

A Figura 5.5 (c) mostra o tamanho da fila em pacotes para as frequências de mensagens de 5, 10 e 15 msgs/s respectivamente. Quando as OBUs enviam 5 msgs/s , a variação no tamanho da fila é mínima, entretanto, este valor sofre mudanças mais significativas quando a frequência é de 10 e 15 msgs/s . Para estes casos o tamanho da fila não apenas aumenta como também apresenta um comportamento que tende a uma curva exponencial. Para $f = 15 \text{ msgs/s}$, o tamanho da fila aumenta cerca de três vezes.

Apesar dos valores de tamanho de fila ser bem baixos, é importante notar o efeito da variação do número de veículos na região coberta quando estes tem OBUs que enviam pacotes a frequências maiores. À medida que a RSU precisa servir mais OBUs ao mesmo tempo, o tamanho da fila irá crescer consideravelmente.

5.1.4 Comparações Entre a Solução I e a Solução II

Na Figura 5.6 estão apresentadas as diferenças entre a solução I e II para as métricas observadas. Valores positivos indicam a métrica em questão apresentou valores maiores na

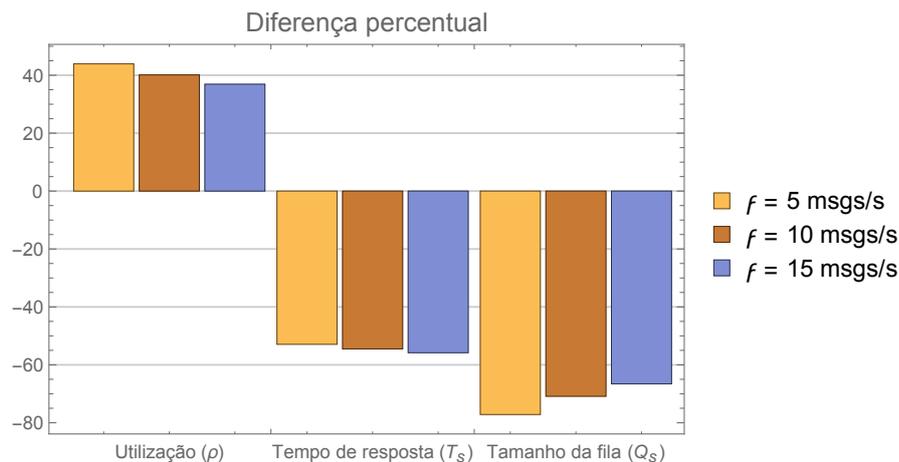


Figura 5.6: Comparação percentual da utilização (ρ), tempo de resposta (T_s) e tamanho da fila (L_q) entre as soluções I e II

solução II do que na solução I. Por sua vez, valores negativos indicam que a métrica apresentou valores menores na solução II do que na solução I. A utilização da RSU (ρ) aumentou no uso da solução II. Isto ocorre porque o raio da RSU (D) considerado é maior, com isso, a estação vai servir a um número maior de OBU's ao mesmo tempo. O aumento é de cerca de 40% com relação ao valor da solução I. Como visto nas Figuras 5.4 e 5.5, o aumento no valor bruto é em média de 3%, portanto, no planejamento desta infraestrutura VANET, mesmo o parâmetro utilização tendo sido incrementado em 50%, seria uma boa decisão adotar a solução II.

Com relação à métrica tempo de resposta (T_s), pode-se notar que na solução II são apresentados valores menores do que a solução I. A melhoria no tempo de resposta é de cerca de 50%. Um dos parâmetros que possibilitou isso foi a disponibilização de dois canais ao invés de um como ocorreu na solução I. Outro fator importante foi a redução do tamanho do pacote, pois quando menores ocupam a RSU por um quantidade menor de tempo. E como o tempo de resposta é observado em cima de cada pacote, assim tem-se uma melhoria nesta métrica.

Para o tamanho da fila (L_q), também se observa uma melhoria com relação à solução I. Diferente das duas outras métricas, a melhoria tem níveis significativos diferentes para diferentes frequências de envio de mensagens. Quando as OBU's geram 5 mensagens por segundo, podemos notar que a melhoria foi de cerca de 80% no tamanho da fila. Por sua vez, quando as OBU's dobraram essa frequência de 5 para 10 mensagens por segundo, a melhoria foi de apenas 70%. E para frequências de envio de 15 mensagens por segundo podemos notar que a melhoria esteve por volta de 60%.

Portanto, diante dos resultados expostos e da comparação feita nesta seção, é possível considerar que a solução II é melhor que solução I em todos os parâmetros observados. Mesmo a RSU tendo cobertura total maior e conseqüentemente um número maior de OBU's ao mesmo tempo na solução II, há melhorias significativas devido ao uso de um tamanho de pacote menor e mais canais disponibilizados.



Figura 5.7: Trecho de pedágio com alta densidade de veículos e baixa velocidade (INFOGLOBO S.A, 2016)

5.2 Estudo de Caso II

Este segundo estudo de caso tem como objetivo estudar um cenário de estrada onde se deseja implantar uma infraestrutura VANET para automatização de pedágio. Os modelos serão utilizados para criar o cenário, avaliar se as métricas estão dentro do que é especificado pelos padrões e verificar se alterações nos parâmetros permitem melhores resultados para as métricas.

Na maior parte dos pedágios localizados no Brasil, veículos param nos guichês para realizar o pagamento. Em horários de pico, as filas podem crescer e causar congestionamentos devido à lentidão de todo o processo. Segundo reportagem disponível no sítio do *Correio 24 Horas* (CORREIO 24H, 2016), no dia 26 de Junho de 2016 a velocidade média em um pedágio da rodovia BR-324 era de cerca de 10 quilômetros por hora. Esta situação, além de causar a lentidão e prejuízo no trajeto dos motoristas, aumenta a emissão de poluentes devido as constantes acelerações e desacelerações.

O governo do Brasil estuda implantar um sistema chamado Sistema de Identificação Automática de Veículos (SINIAV) (DENATRAN, 2016b). Entre outros, um dos benefícios seria a cobrança automática do trecho de pedágio, inclusive permitindo pagar somente pelo trecho que for percorrido pelos motoristas.

Portanto, este estudo de caso irá estudar um cenário de pedágio localizado na Rodovia PE-009, no estado de Pernambuco. O objetivo é avaliar uma infraestrutura VANET para que esta atenda a alguns requisitos mínimos, como o tempo de resposta e utilização. Os veículos devem trafegar na rodovia e realizar o pagamento automático do pedágio sem necessidade de realizar paradas ou mesmo reduzir a velocidade. Como descrito no sistema SINIAV, as OBU's teriam chips que identificariam o condutor, veículo e informações de pagamento.

A Figura 5.8 mostra o trecho de pedágio escolhido e a Figura 5.9 apresenta um mapa



Figura 5.8: Fotografia do início de trecho da Rodovia PE-009 sob concessão da Concessionária Rota do Atlântico (GOOGLE, 2016)

contendo a visão aérea atual da localidade. Os trechos em amarelo representa a cobertura planejada para a RSU.

Neste estudo os veículos possuem OBUs que geram mensagens com uma determinada frequência e tamanho de acordo com a aplicação de pagamento de pedágios. Estas OBUs implementam o protocolo IEEE 802.11p/WAVE e enviam pacotes para um dos canais da RSU. Esta também implementa o mesmo protocolo mas se localiza numa posição fixa do trecho da estrada.

Como o objetivo é automatizar o processo e permitir que os veículos trafeguem pelo trecho sem parar os veículos, diferentes velocidades médias serão utilizadas para que as métricas sejam verificadas. Além da velocidade média, a densidade veicular no trecho será variada para



Figura 5.9: Cobertura da RSU no trecho da rodovia PE-009

valores que representem números grandes e pequenos de veículos. Estes valores irão permitir que a capacidade da RSU seja verificada em diferentes situações: desde uma menor quantidade de veículos em alta velocidade até uma grande quantidade de veículos trafegando em velocidade moderada.

5.2.1 Parâmetros e Métricas

Assim como no estudo de caso anterior, os veículos utilizam um serviço de *beaconing*. Entretanto, os veículos enviam a parte 1 e a parte 2 das mensagens básicas de segurança do padrão SAE J2735. A parte 1 tem o tamanho de 2712 bits, e a parte 2 tem o tamanho de 16728 bits. A frequência das mensagens será de 1 até 10 mensagens por segundo. Estas mensagens são geradas e encapsuladas em pacotes de 1500 *bytes* que serão enviados para a RSU seguindo uma distribuição exponencial.

A RSU irá oferecer 4 canais para que as OBUs enviem os pacotes referentes ao pagamento do pedágio. Os canais utilizados serão os canais de serviço (SCH). Este valor foi escolhido pois o objetivo é oferecer um canal para cada uma das faixas do trecho do pedágio. São 4 faixas em um trecho somente de mão única, pois o pedágio é cobrado no momento em que os veículos entram no trecho sob controle da concessionária. Portanto, o parâmetro *wayType* recebe o valor 2 e o parâmetro *nL* recebe o valor 4.

O raio da RSU é de 200 *m*, ou seja, veículos que se localizem a essa distância *D*, tanto antes como após a mesma, estarão dentro do raio de cobertura para enviar as informações relativas ao pagamento do pedágio. Esta distância leva em consideração um valor aceitável de probabilidade de erro (P_e). Como o raio da RSU é menor que nos estudos anteriores, a probabilidade de erro considerada será de 1%. A latência de envio (L_t) é variável de acordo com a velocidade, sendo 4,27 *ms* para 60 *Km/h*, 4,36 *ms* para 80 *Km/h* e 5,03 *ms* para 100 *Km/h*. O trecho de pista coberto pode ser observado na Figura 5.9.

A densidade veicular foi calculada tendo como base uma distância segura entre os veículos e segue o modelo de tráfego *free flow*. Como visto na Seção 2.1.2, neste modelo os veículos trafegam sem sofrer interferência da geografia do ambiente, sinalizações ou de outros motoristas. Assim como no estudo anterior, o *script* descrito no Apêndice B é utilizado para determinar a densidade veicular. Sendo assim, para as velocidades $V = 60, 80$ e 100 *km/h*, as respectivas densidades veiculares são: 0,0267857, 0,0206422 e 0,016791 *veiculos/m*. O tamanho médio dos veículos considerado foi de 4 *m*. A taxa de chegada de veículos (β) na região recebeu o valor fixado de 0,5 *veiculos/s*.

A distribuição Cox do tipo 2 foi utilizada para determinar a taxa de serviço da RSU. Esta distribuição tem duas fases de serviço: a primeira fase μ_{1c} tem valor 4,5 *Mbps* e a segunda fase μ_{2c} tem valor 2,25 *Mbps*. A probabilidade de continuar até a última fase da taxa de serviço recebe o valor atribuído ao parâmetro *w*. Neste estudo, será considerado o valor de 30% para tal parâmetro. O número de fases (*h*) é 2. Ainda sobre a RSU, o tamanho da fila considerado

Tabela 5.2: Parâmetros e métricas de avaliação do estudo de caso II

	Parâmetros	Valor
	f	1–10 [msgs/s]
	S	16728 b
	P_s	1500 B ⁶
	D	200 m
	$wayType$	“mão única” (2)
	nL	4 faixas
	α	0,0314–0,0167 [veiculos/m]
	V	60 km/h, 80 km/h, 100 km/h
	β	0,5 veiculos/s
Parâmetros	L_v	4 m
	λ_v	(varivel)
	L_t	4,27 ms , 4,36 ms , 5,03 ms ⁷
	μ_{1c}	4,5 $Mbps$
	μ_{2c}	2,25 $Mbps$
	K	4 canais
	h	2 fases
	w	30%
	P_e	1%
	Q_c	16 pacotes
Métricas	ρ	< 90%
	T_s	< 20 ms
	Q_d	< 5%

neste estudo será de 16 pacotes. Valor inferior com relação ao estudo anterior, mas como a RSU oferece um número maior de canais, é esperado que não ocorram prejuízos ao utilizar-se um valor inferior para o tamanho da fila.

Neste estudo serão avaliados três métricas: o tempo de resposta ou tempo de sistema (T_s), a utilização da RSU (ρ) e a probabilidade de descarte (Q_d). O tempo de resposta é importante de se verificar pois as mensagens geradas pelo padrão SAE J2735 tem determinados valores de tempo dependendo do tipo de aplicação. O guia Society of Automotive Engineers (2010), que apresenta estas informações de tempo, informa que para aplicações comerciais e de pagamentos eletrônicos, o tempo de resposta precisa estar entre 10 e 20 ms . Portanto, esta é uma das restrições necessárias a este projeto de implantação. Além deste, a utilização da RSU também será observada a fim a de se verificar a estabilidade do sistema. Para isso, a restrição no valor de utilização foi imposta para 90%. Valor escolhido para evitar que a RSU opere sob estresse. A probabilidade de descarte tem uma restrição de 5%. Todas estas métricas são valores médios uma vez que a análise é estacionária.

A Tabela 5.2 mostra todos os parâmetros e métricas escolhidos juntamente com as suas restrições quando aplicáveis.

⁶Tamanho do pacote baseado no trabalho de Shivaldova et al. (SHIVALDOVA; WINKELBAUER; MECKLENBRAUKER, 2013).

⁷Valor baseado no trabalho de (LIN et al., 2012).

5.2.2 Resultados

As Figura 5.10(a), Figura 5.10(b) e Figura 5.10(c) mostram respectivamente os resultados da métrica tempo de resposta (T_s), utilização (ρ) e probabilidade de descarte (Q_d) da RSU. Para as velocidades de 60 e 80 km/h houve violações nas restrições impostas. A linha vermelha pontilhada na Figura 5.10(a) mostra o limite do tempo de resposta de 20 ms aceito. Quando os veículos trafegaram a 100 km/h não houve violações nesta restrição. As velocidades maiores ocasionam menos violações devido ao fato dos veículos usarem a RSU um tempo menor do que quando trafegam a velocidades menores. O tempo de residência, é inversamente proporcional à velocidade trafegada como visto na Expressão 4.9. Neste caso, os tempos de residência para as velocidades 60, 80 e 100 km/h são de 24, 18 e 14,4 s , respectivamente.

Como visto, se fosse utilizada a frequência de 10 $msgs/s$ como imposta pelo padrão SAE J2735, a única ocasião em que os veículos não violariam a restrição seria quando navegassem pelo trecho com 100 km/h . À medida que os veículos passam mais tempo na região e geram mensagens a frequências maiores, mais a RSU fica sobrecarregada e por isso leva mais tempo para processar os pacotes.

Para verificar corretamente a carga da RSU, a Figura 5.10(b) mostra os resultados da métrica utilização (ρ). A linha vermelha pontilhada determina o limite aceitável do valor da utilização. Pode ser visto que esta métrica teve valores melhores com relação à variação da velocidade dos veículos e frequência das mensagens. Para $V = 60 km/h$, as frequências acima de 7 mensagens por segundo violaram a restrição. Para $V = 80 km/h$, a única frequência de mensagens que violou a restrição foi a de 10 mensagens por segundo. Para $V = 100 km/h$ não houve violações nas restrições impostas. Isso comprova que quanto maior as velocidades dos veículos, menos tempo passam utilizando os canais da RSU e subsequentemente provocam um tempo de utilização menor.

A probabilidade de descarte é vista na Figura 5.10(c). Nota-se que para baixos valores de frequência de mensagens, a probabilidade de descartar pacotes é mínima, chegando a ser desprezível. Porém, ao incrementar a frequência para valores acima de 6 mensagens por segundo, a métrica tem comportamento diferente. Para $V = 60 km/h$ o crescimento da métrica é bem elevado e viola as restrições chegando a 70% quando as OBUs geram mensagens com frequências de 10 por segundo. Para $V = 80 km/h$, as violações ocorrem a partir de 8 mensagens por segundo e chegam ao valor máximo de cerca de 30%. O incremento nesta métrica é atrelado à utilização, que no limite e sem servidores disponíveis, começa a descartar pedidos. Para $V = 100 km/h$ não houve violações ao valor de 5% de probabilidade perda.

Portanto, dentre as duas métricas, o tempo de resposta (T_s) e a probabilidade de descarte (Q_d) foram as que mais sofreram violações nas restrições. O tempo de residência maior aliado a frequências maiores provocou estes gargalos no desempenho da infraestrutura VANET. Diante desta situação, engenheiros e projetistas poderiam sugerir alterações nos parâmetros para que a RSU trabalhe dentro da faixa tolerável independente do comportamento das OBUs.

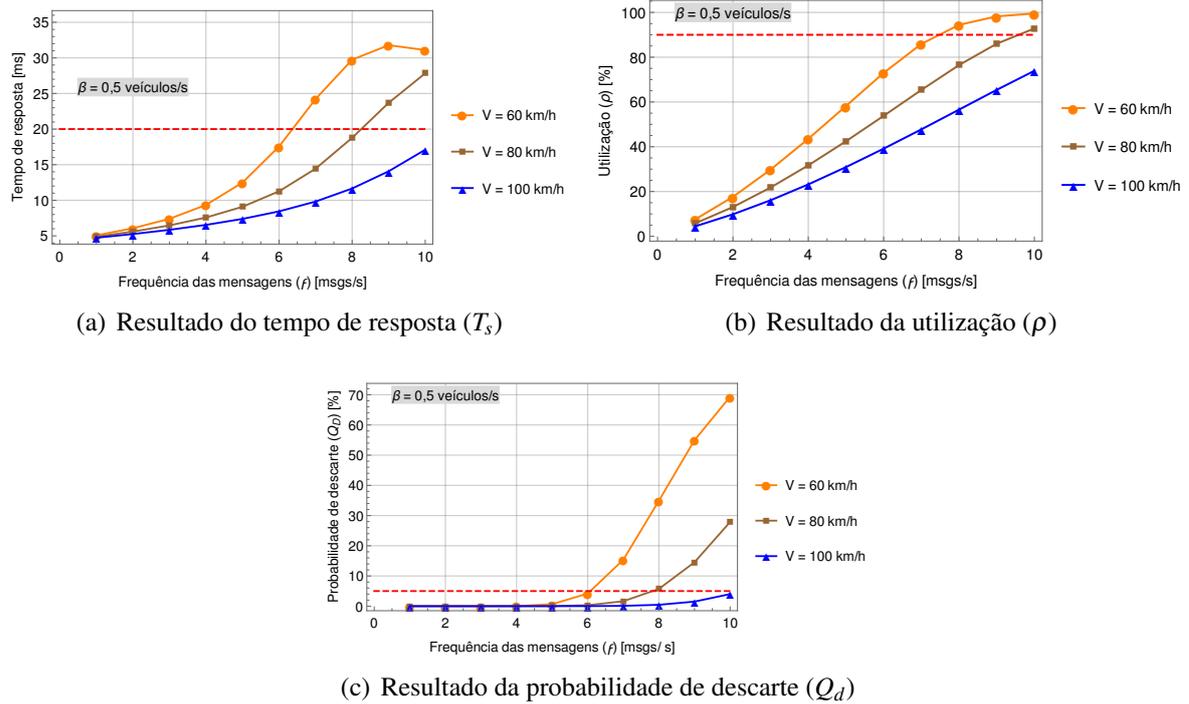


Figura 5.10: Resultados para vários valores de frequência e velocidade. A linha vermelha pontilhada representa o limite da restrição imposta

Para verificar tais situações, neste estudo de caso foram propostas alterações nos parâmetros para que houvesse melhorias nas métricas, principalmente o tempo de resposta. Utilizando os conhecimentos adquiridos no estudo de caso anterior, um dos parâmetros que pode melhorar o tempo de resposta é o tamanho do pacote (P_s). Uma redução neste valor se mostrou útil no estudo de caso anterior como visto na Figura 5.5(b). Por sua vez, para melhorar a utilização da RSU e a probabilidade de descarte uma das propostas pode ser um incremento na taxa de serviço desta. Portanto, iremos realizar uma nova análise seguindo estes novos valores: P_s de 500 B; e, μ_{1c} de 6 Mbps e μ_{2c} de 3 Mbps.

As Figura 5.11(a) Figura 5.11(b) e Figura 5.11(c) mostram como se comportaram as métricas após as alterações nos parâmetros. Referente ao tempo de resposta (T_s), é possível notar que a mudança no tamanho do pacote trouxe melhorias. Para a velocidade de 60 km/h, que causa um tempo de residência maior e portanto mais veículos enviando pacotes, o valor do tempo de resposta chegou sequer a 5 ms quando as OBU's geraram 10 mensagens por segundo. Na mesma frequência, para as velocidades de 80 km/h e 100 km/h, o tempo de resposta foi cerca de 3 e 2 ms respectivamente.

No que se refere à utilização (ρ), podemos notar que o incremento na taxa de serviço da RSU trouxe melhorias. As velocidades de 60, 80 e 100 km/h provocaram uma utilização abaixo dos 90% impostos como restrição. Quando as OBU's geraram 10 mensagens por segundo, as utilizações máximas foram de 40, 60 e 80% respectivamente para 60, 80 e 100 Km/h.

Com relação à probabilidade de descarte (Q_d) houveram também melhorias notáveis.

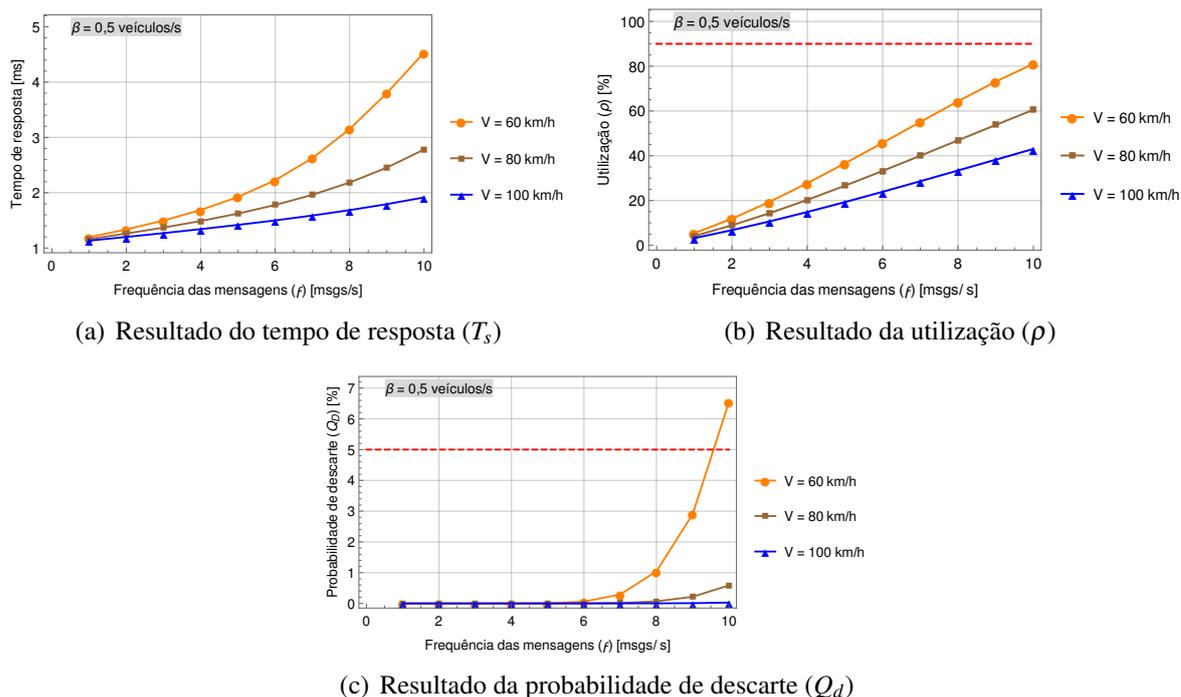


Figura 5.11: Resultados para novas especificações dos parâmetros. A linha vermelha pontilhada representa o limite da restrição imposta

Para as velocidades de 80 e 100 Km/h não há mais violações a restrição de 5 ms da métrica. Porém, para menores velocidades como 60 Km/h ainda há um caso de violação a restrição. O valor 6,5% para a métrica acontece no momento de maior carga quando as OBU's geram 10 mensagens por segundo. Isto mostra que as alterações não foram suficientes para respeitar esta restrição. Neste sentido, o que poderia ser feito pelos projetistas seria melhor mais ainda os parâmetros. Proporcionar mais canais para a RSU, aumentar a taxa de serviço, dentre outros. Não é possível alterar os parâmetros referentes à mobilidade pois estes dependem exclusivamente do comportamento dos motoristas, algo que não pode ser alterado pois se trata de fator externo.

Portanto, podemos concluir que neste estudo de caso foi possível realizar a avaliação de uma infraestrutura VANET para atender a uma futura demanda em um posto de pedágio de uma concessionária localizada no estado de Pernambuco, Brasil. Quando houve um número significativo de violações as restrições, os resultados obtidos das análises poderiam auxiliar engenheiros e projetistas a fazerem alterações no projeto e visualizar o novo comportamento das métricas de avaliação. Assim, em posse dos resultados, é possível dizer se a infraestrutura pode acomodar corretamente a futura demanda de veículos equipados com o sistema SINIAV para pagamento automático de pedágios.

5.3 Estudo de Caso III

Este estudo de caso tem como objetivo utilizar os modelos para avaliar uma infraestrutura VANET em uma interseção urbana. As interseções do tipo cruzamento são locais em que aciden-



Figura 5.12: Cruzamento da Avenida Gen. San Martin com a Rua Delmiro Gouveia, Recife, Brasil

tes ocorrem com frequência, muitas vezes são causados por falta de sinalização e visibilidade dos veículos que trafegam em sentido diferente. Os modelos são utilizados para representar este cenário veicular mais complexo, permitem definir restrições às métricas e usam a técnica *DoE* para análise dos resultados produzidos.

O uso de OBUs nos veículos possibilita uma série de aplicações que podem trazer uma segurança maior para motoristas que trafegam por estes tipos de localidades. O USDOT publicou um trabalho em que são propostas diversas aplicações para interseções urbanas: aviso sobre cruzamento em sinal vermelho; assistente de curva a esquerda e curva a direita; extensão de fase para veículos prioritários; preempção para veículos de emergência (ABERNETHY; ANDREWS; PRUITT, 2012). Portanto, é importante avaliar infraestruturas VANETs para que estas atendam corretamente estes tipos de aplicações.

A Figura 5.12 apresenta o trecho urbano escolhido para o estudo de interseções do tipo cruzamento. O local fica próximo a avenidas de grande fluxo e representa um caminho percorrido por uma quantidade significativa de motoristas que trabalham ou moram na região.

As OBUs enviam mensagens periódicas para a RSU por meio de um dos canais disponibilizados. Tanto as OBUs quanto a RSU implementam o padrão IEEE 802.11p/WAVE. As mensagens são encapsuladas em pacotes de tamanho fixo, mas que terão valores diferentes em cada uma das análises realizadas neste estudo. Além do tamanho do pacote, a frequência das mensagens será variada para se verificar a capacidade do sistema de se adequar.

Como regiões urbanas tem diferentes densidades de tráfego ao longo de um mesmo dia, diferentes densidades veiculares serão estudadas para verificar o comportamento do sistema e das métricas de avaliação. A velocidade média terá valor fixado, pois, uma vez que se trata de uma via local, a velocidade do tráfego não é intensa e tem valores médios baixos.

5.3.1 Parâmetros e Métricas

Os veículos são dotados de OBUs que geram mensagens com determinadas frequências, tamanhos de pacote que seguem uma distribuição exponencial. Neste estudo de caso, as OBUs enviam a parte 1 do padrão SAE J2735. Esta mensagem tem 2712 *bits* e terão frequências que variam entre 5 e 15 mensagens por segundo. O tamanho do pacote será variado entre 200, 500 e 1500 *bytes*.

Serão disponibilizados 4 canais de serviço (SCH) na RSU para que os as OBUs enviem suas informações. Em tese, cada um dos canais pode cobrir veículos trafegando em cada uma das quatro vias que formam a interseção. O parâmetro *wayType* recebe o valor 8 devido ao tipo do trecho ser um cruzamento, e o parâmetro *nL* recebe o valor 1 devido ao fato da via só ter uma faixa de rolamento em cada sentido.

O trecho coberto pela RSU é de 500 *m* como visto na Figura 5.12. Este valor compreende uma distância considerável para que os motoristas usem os serviços VANET da interseção. Além disso, é uma distância que leva em consideração a probabilidade de erro aceitável no envio dos pacotes. Para isso, a probabilidade de erro P_e recebe o valor 1%. Caso um pacote seja perdido durante o envio, as OBUs reenviarão esta seguindo o mesmo valor da taxa de dados por veículo (λ_v).

Para que sejam verificadas diferentes condições ao longo do dia, a densidade veicular foi variada para valores que representam densidades baixas e altas. Para determinar este valor, foi levada em consideração a velocidade média de 30 *km/h* e veículos com tamanho médio de 4 *m*. Utilizando o *script* disponível no Apêndice B, a densidade veicular variou-se entre 0,039 e 0,047 veículos por metro. As variações representam respectivamente um número equivalente de 158, 173 e 188 veículos nas regiões cobertas pela RSU.

Diferente dos estudos anteriores, a distribuição Cox do tipo 1 foi utilizada. Esta distribuição permite um número h de fases com taxas de serviço iguais. Neste estudo de caso, são 3 fases com uma taxa igual de 6 *Mbps*. Também, o parâmetro w recebe o valor 1%. A RSU tem uma fila de pacotes de tamanho 16 para o armazenamento destes enquanto a RSU está ocupada.

Este estudo de caso irá avaliar três importantes métricas: a utilização da RSU (ρ), o tempo de resposta (T_s) e o tamanho da fila (L_q). Entretanto, será utilizada uma técnica bem conhecida na avaliação de desempenho que é o *Design* de Experimentos (DoE, do inglês, *Design of Experiments*) (JAIN, 2008). A técnica do DoE permite obter o máximo de informação de um sistema com vários fatores ou parâmetros que influenciam as métricas de desempenho. Um conjunto de análises planejadas com o uso de DoE pode ser utilizada para verificar quais parâmetros tem influência sobre as métricas, assim como a interação entre vários parâmetros. Uma visão geral do processo está presente na Figura 5.13.

A restrição imposta à utilização será de 90%. Valor escolhido para evitar que a RSU opere sob estresse. Para o tempo de resposta, a restrição será de 10 *ms*, para que o atraso nas mensagens não prejudique aplicações de segurança que venham a ser implantadas na infraestrutura da região.

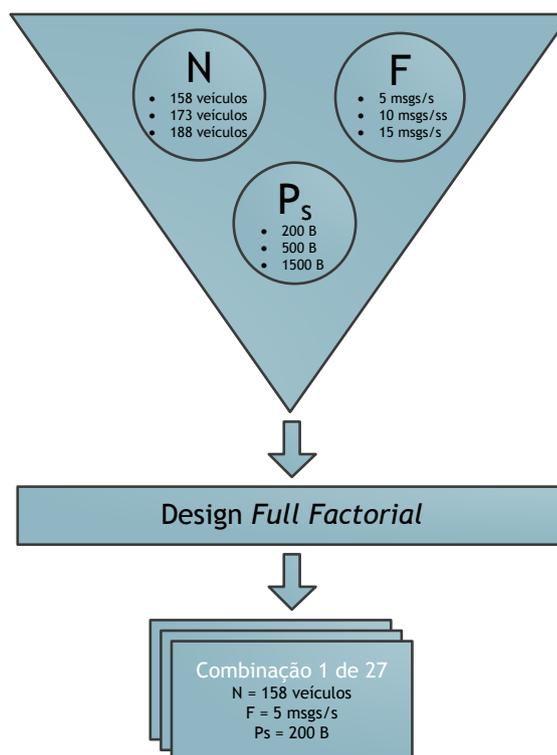


Figura 5.13: Visão geral do processo de análise DoE para os parâmetros escolhidos

Para o tamanho da fila a restrição imposta será de até 60% do tamanho máximo, ou seja, 9,6 *pacotes*.

A Tabela 5.3 mostra todos os parâmetros e métricas escolhidos juntamente com as suas restrições quando aplicáveis.

5.3.2 Resultados

O *software MINITAB* (MINITAB, 2000) foi utilizado para realizar o DoE e as análises dos resultados gerados pela avaliação de desempenho no *Mercury*. A Figura 5.14 mostra os parâmetro isolados e os efeitos de seus diferentes níveis para a utilização (ρ). Como visto, os fatores que isoladamente apresentam efeito sobre a utilização são o número de veículos (N), o tamanho do pacote (P_s) e a frequência das mensagens (f). Isto pode ser notado por meio das inclinações nas linhas dos referidos parâmetros sobre a média representada pela linha horizontal. O número de veículos teve uma sutil mas notável influência, assim como o tamanho do pacote. Ambos influenciaram a utilização entre os valores de 18% e 22%. Já a frequência das mensagens teve o maior efeito, influenciando a utilização entre os valores de 10% e 30%. O tamanho do

⁸Tamanho do pacote baseado no trabalho de Shivaldova et al. (SHIVALDOVA; WINKELBAUER; MECKLENBRAUKER, 2013).

⁹Valor baseado no trabalho de (LIN et al., 2012).

¹⁰Taxas baseadas no trabalho de (JIANG; CHEN; DELGROSSI, 2008), (CAMPOLO et al., 2013), e (PAIER et al., 2010).

Tabela 5.3: Parâmetros e métricas de avaliação do estudo de caso III

	Símbolo	Valor	
	f	5–15 [msgs/s]	
	S	2712 b	
	P_s	200–1500 [B] ⁸	
	D	500 m	
	$wayType$	“interseção” (8)	
	nL	1 faixa	
	α	0,039–0,047 [veiculos/m]	
	N	158–188 [veiculos]	
	V	30 km/h	
Parâmetros	L_v	4 m	
	λ_v	(varivel)	
	L_t	0,000741 ms ⁹	
	μ_c	6 $Mbps$ ¹⁰	
	h	3 fases	
	w	1%	
	K	4 canais	
	P_e	1%	
	Q_c	16 pacotes	
	Métricas	ρ	< 90%
		T_s	< 10 ms
		L_q	< 9,6 $pacotes$

pacote (P_s) isoladamente não teve influência sobre o valor da utilização como visto na linha que se localiza sobre a média durante todas as variações deste parâmetro. Todos estes valores estiveram abaixo da limitação de 90% imposta. Portanto, pode-se concluir que uma infraestrutura VANET funcionando com estes parâmetros não teriam valores de utilização da RSU fora do aceitável.

A Figura 5.15 mostra os parâmetros isoladamente e os prováveis efeitos que estes tiveram sobre o tempo de resposta (T_s). O número de veículos (N) e a frequência das mensagens (f) não tiveram efeitos consideráveis sobre o tempo de resposta. A variação dos seus valores isoladamente resultou em valores bem próximos a média da métrica, como visto nas linhas horizontais que se localizam quase que sobre a média sem nenhuma variação. O tamanho do pacote (P_s) influenciou o resultado da métrica de maneira bem significativa. Entre 200 e 500 *bytes* há uma pequena inclinação, e entre 500 e 1500 *bytes* há uma inclinação maior. Estes resultados mostram que o único parâmetro isolado que influencia diretamente o tempo de resposta da RSU é o tamanho do pacote escolhido. Os valores do tempo de resposta estiveram sempre abaixo da restrição de 10 *ms* imposta durante a fase de especificação. Portanto, pode-se concluir que, relativo ao tempo de resposta, a infraestrutura VANET suportaria aplicações de segurança que exigem valores desta métrica abaixo dos 10 *ms*.

Os efeitos isolados dos parâmetros para o tamanho da fila (L_q) podem ser vistos na Figura 5.16. Os parâmetros com efeito considerável foram o número de veículos (N) e a frequência das mensagens (f). O número de veículos e o tamanho do pacote provocaram

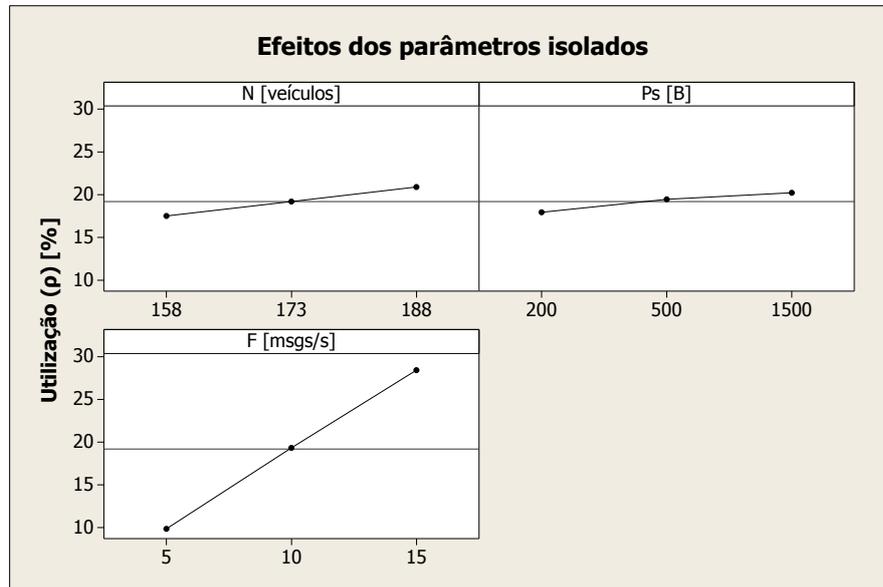


Figura 5.14: Efeito dos parâmetros isolados sobre a utilização da RSU (ρ)

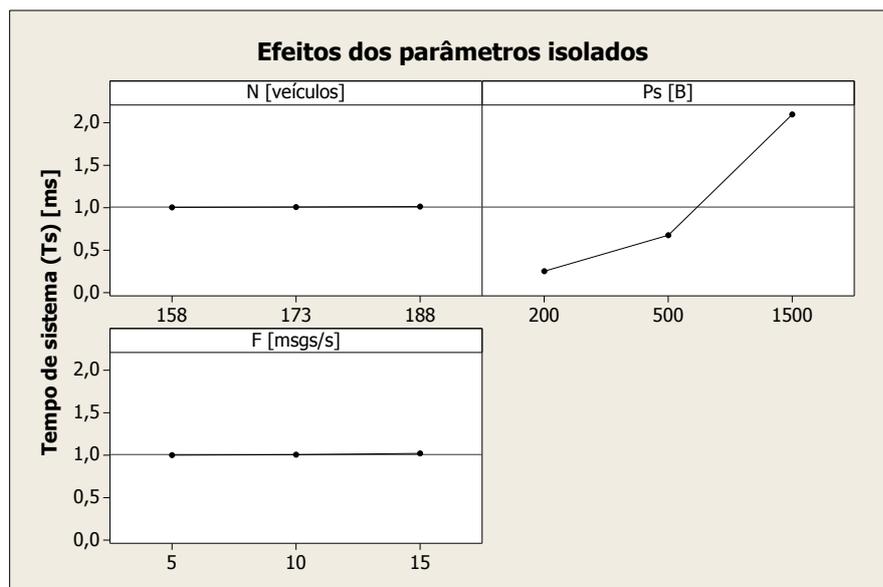


Figura 5.15: Efeito dos parâmetros isolados sobre o tempo de resposta (T_s)

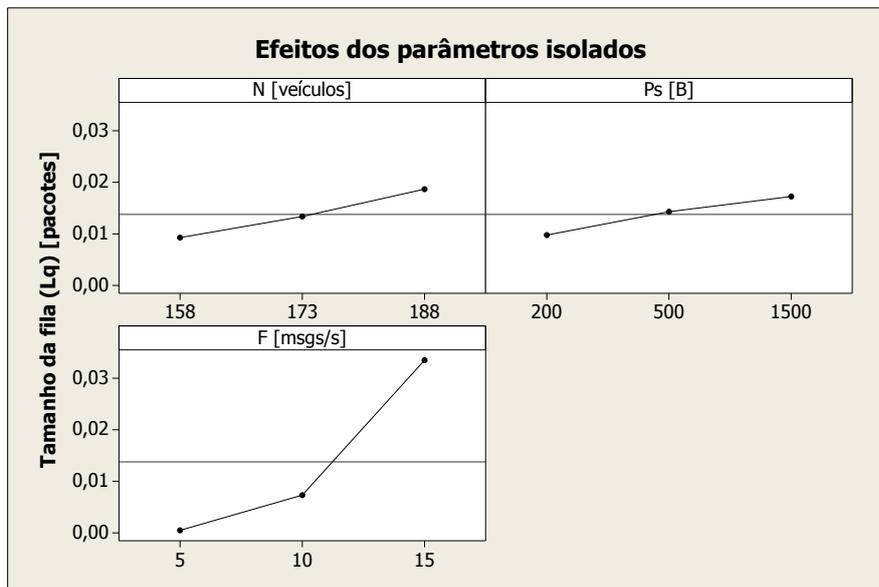


Figura 5.16: Efeito dos parâmetros isolados sobre o tamanho da fila (L_q)

variação entre 0,01 e 0,02 pacotes presentes na fila. A frequência das mensagens provocou uma variação maior entre 10 e 15 mensagens por segundo do que entre 5 e 10 mensagens por segundo. Isto significa que a alta frequência das mensagens faz com que a RSU fique mais tempo ocupada e assim a fila comece a ser usada para armazenar pacotes. O tamanho do pacote (P_s) isoladamente não provocou efeito algum no tempo de resposta. Esta métrica também operou todo tempo abaixo da restrição imposta, que foi de 9,6 *pacotes*. Portanto, pode-se concluir também que, relativo ao parâmetro tamanho da fila, a infraestrutura VANET planejada iria atender as especificações feitas pelos engenheiros e projetistas.

A análise isolada dos parâmetros pode levar a algumas interpretações não tão corretas, por isso é importante analisar as interações entre os parâmetros. Na Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19, linhas que não estiverem paralelas significam que a interação dos parâmetros provocou efeito considerável na métrica observada.

Na Figura 5.17 é possível observar que as interações que produziram efeitos no valor da utilização (ρ) foram as da frequência das mensagens (f) com o número de veículos (N) e tamanho do pacote (P_s). As linhas no gráfico do lado direito superior e central não estão totalmente paralelas, sendo a linha para o número de veículos 188 a mais inclinada em ambos os gráficos. Isso quer dizer que variando a frequência e mantendo valor do número de veículos em 188, a utilização (ρ) sofrerá uma variação maior que nos outros valores de números de veículos. O mesmo ocorre quando variando a frequência e mantendo valor do tamanho do pacote em 1500 B.

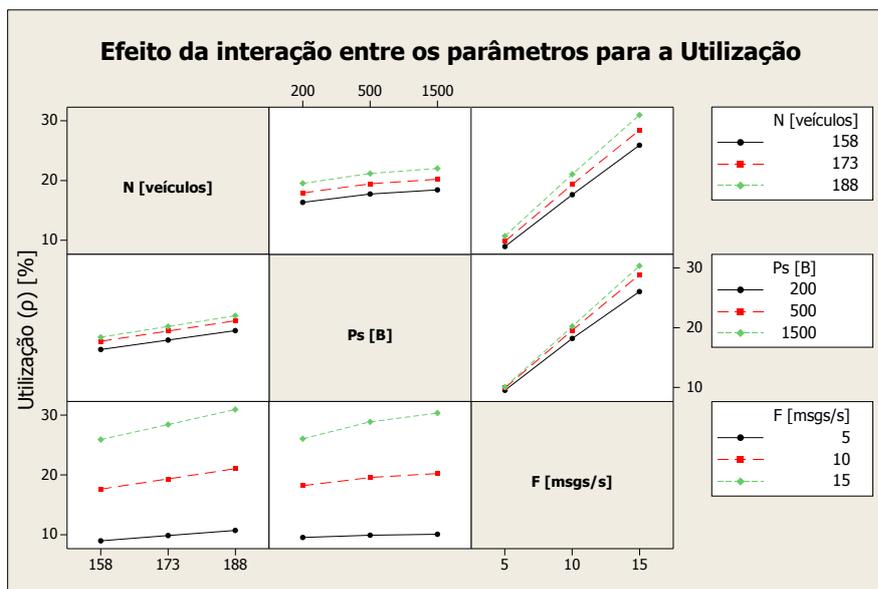


Figura 5.17: Efeito da interação dos parâmetros sobre a utilização (ρ)

Anteriormente, ao analisarmos os parâmetros isolados sobre o tempo de resposta (T_s) na Figura 5.18, notou-se que somente o tamanho do pacote (P_s) exerceu alguma influência. Ao avaliarmos as interações entre os parâmetros na Figura 5.18 confirmamos que os outros parâmetros não influenciam consideravelmente o tempo de resposta. Por meio da figura observamos que todas as linhas estão sempre paralelas. Portanto, engenheiros e projetistas podem concluir que dentre os três parâmetros, o tamanho do pacote é o único que influencia os resultados do tempo de resposta.

Na Figura 5.19 são apresentados os resultados que indicam as interações entre os parâmetros que afetam o tamanho da fila (L_q). A interação do valor de frequência (f) com o número de veículos (N) e tamanho do pacote (P_s) produziram efeitos na métrica. No gráfico localizado no local superior e central direito notam-se as linhas não paralelas. O mesmo pode ser notado no gráfico do local inferior esquerdo. Engenheiros e projetistas podem então concluir que o tamanho da fila sofre maior alteração quando a frequência das mensagens é de 15 mensagens por segundo e quando o número de veículos é de 188.

Portanto, por meio deste estudo de caso foi possível conhecer e avaliar uma infraestrutura VANET para atender uma interseção urbana. Foram determinados três parâmetros com valores variáveis e três métricas de avaliação. Por meio do uso da técnica DoE foram verificados os principais parâmetros que tem influência sobre as referidas métricas. A utilização da RSU sofre influência considerável quando variados o número de veículos na região e a frequência das mensagens. O tempo de resposta sofre maior influência do tamanho do pacote escolhido durante

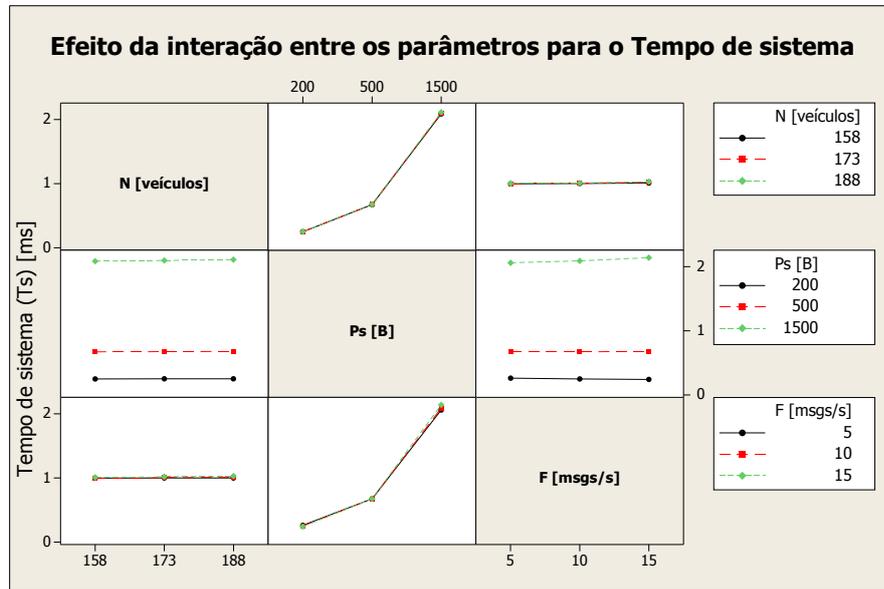


Figura 5.18: Efeito da interação dos parâmetros sobre o tempo de resposta (T_s)

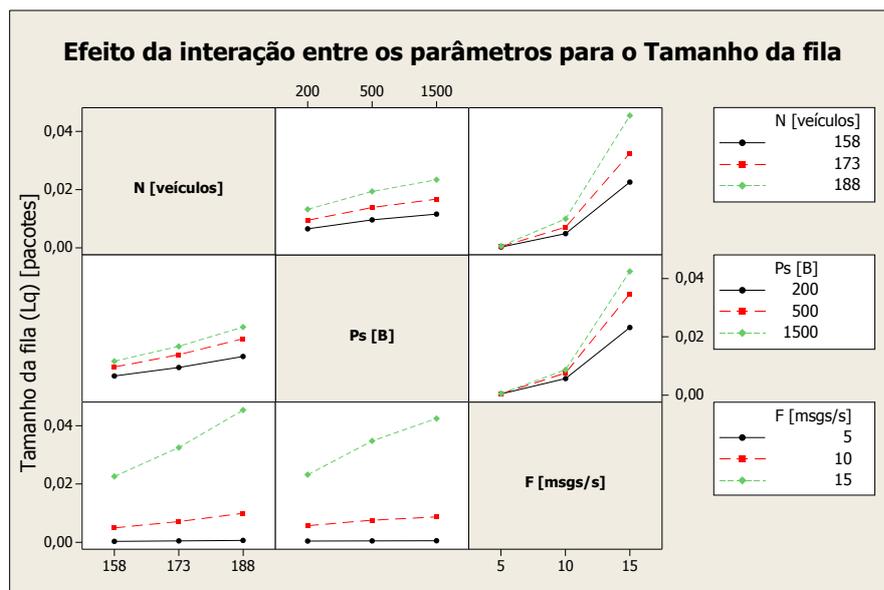


Figura 5.19: Efeito da interação dos parâmetros sobre o tamanho da fila (L_q)

a troca de dados entre OBUs e a RSU. A influência dos outros parâmetros é quase que mínima. Por fim, o tamanho da fila, assim como a utilização da RSU, tem influência quando variado o número de veículos na região e a frequência das mensagens.

6

Considerações Finais

As VANETs despontam como um tipo de rede em que usuários se tornarão tão dependentes quanto o são hoje com relação à *smartphones* e computadores. Este comportamento é fruto de contínuos avanços em *hardware* e *software* que permitem que as redes móveis tenham mais desempenho e ofereçam novas aplicações para os usuários. Além destes fatores, o uso de tecnologias da informação e comunicação tem atraído a sociedade para solucionar problemas já bem conhecidos. Um deles é a segurança no trânsito, que representa uma das principais causas de morte no Brasil e no mundo. Dados da Seguradora Líder-DPVAT apontam que 52.226 pessoas morreram no ano de 2014 em acidentes de trânsito (SEGURADORA LÍDER, 2014). Nos Estados Unidos foram 32.6759 pessoas mortas em acidentes fatais entre veículos, caminhões, motocicletas e outros veículos (NHTSA, 2014).

Outra área que demanda soluções é a área climática. É sabido que veículos são grandes poluentes e contribuem para efeitos globais como a variação da temperatura média em alguns países. Sendo assim, aplicações que possam monitorar e controlar os níveis de emissões de poluentes serão úteis. Quando instaladas em veículos, tais aplicações podem inclusive privilegiar veículos “verdes” por meio de regras como: livre circulação em zonas especiais, descontos em pedágios e faixas exclusivas para o deslocamento em vias de alta velocidade (PINDILLI, 2012).

Desta forma, para atender a estas e outras questões, as VANETs precisam suportar de forma correta a demanda de informações por parte dos usuários. É necessário realizar o planejamento de infraestruturas de comunicações veiculares para oferecer desempenho adequado às necessidades dos ambientes em que as aplicações irão ser implantadas.

Assim, esta dissertação propôs modelos de avaliação de desempenho adequados às variáveis consideradas importantes em um ambiente VANET. Foram levados em consideração parâmetros de mobilidade dos veículos e parâmetros referentes à comunicação entre OBU e RSU. Como visto nos trabalhos relacionados, uma minoria deles fizeram uso combinado destes dois tipos de parâmetros. Em sua maioria, só consideraram um deles ou ambos de forma isolada. Também foi proposta uma metodologia de avaliação para as infraestruturas VANETs.

Em aderência aos modelos, foram propostas arquiteturas equivalentes. Tais arquiteturas permitem que diversos tipos de localidades sejam modeladas: vias de mão única, vias de mão dupla, interseções em “T”, cruzamentos, vias de alta velocidade, dentre outras. É possível

especificar a quantidade de faixas de rolamento, raio da RSU, quantidade de canais disponíveis, velocidade dos veículos, dentre outros parâmetros relevantes.

Esta dissertação também refinou os modelos iniciais quando permitiram que fossem definidas probabilidades de erro no envio de mensagens, diferentes parâmetros para modelagem da via e características das taxas de serviço da RSU. Esta última característica foi possível por meio do uso de distribuições expolinomiais, especialmente as distribuições Cox. Assim, é possível modelar uma gama de situações recorrentes em um ambiente de comunicações veicular sem fio.

Por fim, os estudos de caso provaram a eficiência das técnicas quando foram aplicadas em cenários do mundo real. Foi modelada uma via urbana de mão dupla, uma setor de pedágios de uma estrada mantida por uma concessionária privada e uma interseção do tipo cruzamento. As análises realizadas permitiram não somente entender o funcionamento do sistema, mas deu insumos para que decisões referentes ao planejamento das infraestruturas VANETs fossem tomadas.

6.1 Contribuições

Como resultado do que foi apresentado nesta dissertação, é possível destacar as seguintes contribuições:

- **Elaboração de modelos de avaliação de infraestruturas VANETs:** para representar um sistema VANET, foram desenvolvidos modelos considerando a geração de mensagens nas OBUs, perdas e reenvio na transmissão, armazenamento em fila de espera e serviço na RSU por meio de distribuições expolinomiais. A avaliação de desempenho dos modelos permite resolver as métricas com base nos parâmetros inseridos.
- **Proposição de uma arquitetura base extensível:** arquiteturas foram propostas para representar vários cenários veiculares. É possível especificar um cenário veicular simples de mão única até cenários mais complexos de interseções urbanas.
- **Desenvolvimento de um modelo de simulação para VANETs:** por meio dos *frameworks* de simulação apresentados, modelos baseados na teoria das filas foram desenvolvidos para representar um cenário VANET e obter métricas de interesse para comparação com modelos analíticos.
- **Avaliação de infraestruturas VANETs para diferentes cenários veiculares:** por meio dos estudos de caso, diferentes cenários e propostas foram apresentadas. Foram estudados cenários com diferentes especificações de parâmetros de mobilidade e comunicação. Cada estudo demonstrou uma possibilidade para aplicação dos modelos desta dissertação.

Além das contribuições mencionadas acima, foram desenvolvidos artigos com base nos resultados da pesquisa como principal autor e aguardando publicação:

- Aleciano Lobo Júnior, Bruno Silva, Rubens Matos e Paulo Maciel. “*Planning VANET Infrastructures using Communication and Mobility Parameters*”.
- Aleciano Lobo Júnior, Bruno Silva, Rubens Matos e Paulo Maciel. “*Exponential Modelling for Supporting Vehicular Network Infrastructure Planning*”.

6.2 Limitações e Trabalhos Futuros

Devido ao fato da área VANET não ser tão difundida ou não estar em uso atualmente como outras áreas, algumas dificuldades surgiram ao longo dos estudos. Desta forma, houve algumas limitações que gostaríamos de enfatizar:

- Nem todas as funcionalidades dos padrões puderam ser empregadas. Padrões como o IEEE WAVE tem uma especificação bem vasta e se torna quase impossível propor modelos que atendam a todas as características deste. Também, o escopo da análise não envolveu todas as camadas do padrão, por isso, nesta dissertação atentou-se somente para algumas camadas e outras foram omitidas.
- Os modelos só permitem especificar uma RSU por vez. Isto não é uma limitação, mas exclui algumas possibilidades desejáveis encontradas em trabalhos relacionados, como: modelar o atraso no envio de mensagens entre RSUs, calcular a distância entre estações e localizações ideais em certa região. Porém, gostaríamos de enfatizar que é possível realizar o planejamentos nestes casos utilizando os modelos de avaliação propostos. Mas, cada RSU deve ser modelada por vez.
- Experimentos com sistemas reais não foram possíveis devido às dificuldades de se obter os equipamentos necessários. Seria necessário realizar a importação destes e os orçamentos obtidos não nos permitiu adquirir os aparelhos.

Ao término dessa pesquisa, verificou-se que a mesma possui extensões para atividades futuras. Dentre as quais, podem-se destacar:

- **Novas distribuições para taxa de geração de mensagens:** atualmente a taxa de geração de mensagens por parte das OBU's segue uma distribuição exponencial. É um comportamento que pode não se tornar adequado em determinadas situações. Portanto, técnicas como aproximação de fases (BOLCH et al., 2006) podem ser úteis para modelar as transições dos futuros modelos propostos, e assim permitir que outras distribuições representem melhor a geração de mensagens.

- **Refinamento do modelo de perdas:** o modelo de perdas atual utiliza uma probabilidade estática e não leva em consideração a distância entre os nós. Em trabalhos futuros, seria importante a melhor representação das perdas na comunicação entre OBUs e RSUs. Estas perdas poderiam considerar o tipo localização, a distância e parâmetros de potência de sinal e desvanecimento.
- **Performabilidade:** a performabilidade envolve o estudo conjunto de técnicas de avaliação de desempenho e disponibilidade (LIMA et al., 2014). Os equipamentos e a própria rede estão sujeitos a falhas que podem deixar o serviço indisponível por uma determinada quantidade de tempo. O estudo da performabilidade de uma infraestrutura VANET ou até mesmo de um sistema mais completo envolvendo servidores permitiria a proposição de uma visão mais completa de um sistema VANETs.
- **Medições de um sistema real/emulado:** uma das dificuldades encontradas foi a medição de dados em um sistema real. A obtenção destes dados permite definir parâmetros para representação dos comportamentos por distribuições de probabilidade. Seria possível modelar de forma mais realista a geração de mensagens, taxa de serviço e até de perda de pacotes.

Referências

- AALST, W. M. V. D.; HEE, K. M. V.; REIJERS, H. A. Analysis of discrete-time stochastic petri nets. *Statistica Neerlandica*, Wiley Online Library, v. 54, n. 2, p. 237–255, 2000.
- ABERNETHY, B.; ANDREWS, S.; PRUITT, G. *Signal Phase and Timing (SPaT) Applications, Communications Requirements, Communications Technology Potential Solutions, Issues and Recommendations*. [S.l.], 2012.
- AGRELA, L. *Ásia constrói cidades inteligentes 'do zero' ao custo de US\$ 102 bilhões*. 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/tec/2013/07/1303359-asia-constrói-cidades-inteligentes-do-zero-ao-custo-de-us-102-bi.shtml>>. Acesso em: 2 Mai 2016.
- ALSABAAN, M.; NAIK, K.; NAYAK, A. Applying vehicular ad hoc networks for reduced vehicle fuel consumption. In: *Recent Trends in Wireless and Mobile Networks*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 217–228.
- ANDREWS, S.; COPS, M. *Final Report: Vehicle Infrastructure Integration Proof of Concept Results and Findings Summary - Vehicle*. [S.l.], 2009.
- BAI, F.; HELMY, A. A survey of mobility models. *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA*, v. 206, p. 147, 2004.
- BAIOCCHI, A.; CUOMO, F. Infotainment services based on push-mode dissemination in an integrated vanet and 3g architecture. *Communications and Networks, Journal of, IEEE*, v. 15, n. 2, p. 179–190, 2013.
- BANKS, J. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998.
- BARRACHINA, J. et al. Road side unit deployment: A density-based approach. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, v. 5, n. 3, p. 30–39, 2013.
- BEHRISCH, M. et al. Sumo-simulation of urban mobility-an overview. In: *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 55–60.
- BIRDSALL, M. S. Connected vehicle: Moving from research to deployment scenarios. *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal*, Institute of Transportation Engineers, v. 83, n. 1, p. 44, 2013.
- BOLCH, G. et al. *Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- CAMPOLO, C. et al. Augmenting vehicle-to-roadside connectivity in multi-channel vehicular ad hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 36, n. 5, p. 1275 – 1286, 2013. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S108480451200094X>>.
- CHEN, Q. et al. Mathematical modeling of channel load in vehicle safety communications. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. ISSN 1090-3038.

- COMMISSION, F. C. et al. *Amendment of the commission's rules regarding dedicated short-range communication service in the 5.850-5.925 ghz band*. [S.l.], 2002.
- CORREIO 24H. *Com congestionamento, BR-324 tem velocidade média de 20 km/h neste domingo (26)*. 2016. Disponível em: <<http://www.correio24horas.com.br/detalhe/salvador/noticia/com-congestionamento-br-324-tem-velocidade-media-de-20-kmh-neste-domingo-26/?cHash=288da318b081bc25f3aece2f65f563ce>>. Acesso em: 20 Jun 2016.
- DENATRAN. *Frota Nacional*. 2016. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2016.htm>>. Acesso em: 2 Mai 2016.
- DENATRAN. *Sistema de Identificação Automática de Veículos*. 2016. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/siniav.htm>>. Acesso em: 20 Jun 2016.
- DESROCHERS, A.; AL-JAAR, R.; SOCIETY, I. C. S. *Applications of petri nets in manufacturing systems: modeling, control, and performance analysis*. IEEE Press, 1995. ISBN 9780879422950. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mL1TAAAAMAAJ>>.
- DETRAN-PR. *Comportamentos seguros no trânsito*. 2016. Disponível em: <<http://www.detran.pr.gov.br/modules/catasg/servicos-detalhes.php?tema=motorista&id=345>>. Acesso em: 2 Mai 2016.
- EPA, A. *Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2012*. [S.l.], 2014.
- FAGUNDES, R. A. de A. *Avaliação de desempenho do serviço de controle de concorrência usando Redes de Petri Estocástica*. Dissertação (Mestrado) — Federal University of Pernambuco, February 2006.
- FALL, K.; VARADHAN, K. The network simulator (ns-2). URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2007.
- FARSI, A.; SZCZECOWIAK, P. Optimal deployment of road side units in urban environments. In: IEEE. *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. [S.l.], 2014. p. 815–820.
- FLEMING, B. Advances in automotive electronics [automotive electronics]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 9, n. 2, p. 4–19, June 2014. ISSN 1556-6072.
- FLEMING, B. Advances in automotive electronics [automotive electronics]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 10, n. 1, p. 4–11, March 2015. ISSN 1556-6072.
- GERMAN, R. *Performance analysis of communication systems with non-Markovian stochastic Petri nets*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- GERMAN, R. et al. Timenet: a toolkit for evaluating non-markovian stochastic petri nets. *Performance Evaluation*, Elsevier, v. 24, n. 1, p. 69–87, 1995.
- GOOGLE. *PE-009 - Google Maps*. 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/maps/zsAUWyL8tFH2>>. Acesso em: 20 Jun 2016.
- GROSS, D. *Fundamentals of queueing theory*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- HAKLAY, M.; WEBER, P. Openstreetmap: User-generated street maps. *Pervasive Computing, IEEE*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 12–18, 2008.

- HALL, F. L. Traffic stream characteristics. *Traffic Flow Theory. US Federal Highway Administration*, 1996.
- HARRIS, M. How google's autonomous car passed the first us state self-driving test. *IEEE Spectrum*. <http://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/how-googlesautonomous-car-passed-the-first-us-state-selfdriving-test>, 2014.
- HAVERKORT, B. R. *Performance of computer communication systems: a model-based approach*. [S.l.]: Wiley, 1998.
- HEEGAARD, P. E.; SANDMANN, W. Importance sampling simulations of phase-type queues. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Winter Simulation Conference*. [S.l.], 2009. p. 1136–1145.
- HUANG, C.-M.; CHEN, Y.-S.; GLOBAL, I. *Telematics communication technologies and vehicular networks: wireless architectures and applications*. [S.l.]: Information Science Reference, 2010.
- IEEE. IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture. *IEEE Std 1609.0-2013*, p. 1–78, March 2014.
- IEEE 802.11p Standard. *IEEE Std 802.11s-2011 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE 802.11k-2008, IEEE 802.11r-2008, IEEE 802.11y-2008, IEEE 802.11w-2009, IEEE 802.11n-2009, IEEE 802.11p-2010, IEEE 802.11z-2010, IEEE 802.11v-2011, and IEEE 802.11u-2011)*, p. 1–372, Sept 2011.
- INFOGLOBO S.A. *Com chips, pedágios serão pagos conforme trecho percorrido*. 2016. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/com-chips-pedagios-serao-pagos-conforme-trecho-percorrido-19491229>>. Acesso em: 20 Jun 2016.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- JANEVSKI, T. *Traffic analysis and design of wireless IP networks*. [S.l.]: Artech House, 2003.
- JIANG, D.; CHEN, Q.; DELGROSSI, L. Optimal data rate selection for vehicle safety communications. In: ACM. *Proceedings of the fifth ACM international workshop on Vehicular Inter-NETworking*. [S.l.], 2008. p. 30–38.
- KESSLER, A. M. Elon musk says self-driving tesla cars will be in the us by summer. *The New York Times*. <http://mobile.nytimes.com/2015/03/20/business/elon-musk-says-selfdriving-tesla-cars-will-be-in-the-us-by-summer.html>, 2015.
- KHABBAZ, M. et al. Modeling and analysis of an infrastructure service request queue in multichannel v2i communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2013.
- KHABBAZ, M. J.; FAWAZ, W. F.; ASSI, C. M. A simple free-flow traffic model for vehicular intermittently connected networks. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 1312–1326, 2012.
- KOUVATSOS, D. D. *Traffic and Performance Engineering for Heterogeneous Networks*. [S.l.]: River Publishers, 2009. v. 1.

- KRAJZEWICZ, D. et al. Sumo (simulation of urban mobility). In: *Proc. of the 4th middle east symposium on simulation and modelling*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 183–187.
- LI, Y. J. An overview of the dsrc/wave technology. In: *Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks*. [S.l.]: Springer, 2012. p. 544–558.
- LIMA, M. A. de Q. et al. Performability evaluation of emergency call center. *Performance Evaluation*, v. 80, p. 27 – 42, 2014. ISSN 0166-5316. 'SI: Service Science of Queues. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166531614000868>>.
- LIN, J. C. et al. Wireless communication performance based on ieee 802.11p r2v field trials. *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 5, p. 184–191, May 2012. ISSN 0163-6804.
- MACIEL, P. et al. Performance and dependability in service computing: Concepts, techniques and research directions, ser. *Premier Reference Source*. Igi Global, 2011.
- MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. *Introdução às redes de Petri e aplicações*. [S.l.]: UNICAMP-Instituto de Computacao, 1996.
- MARSAN, M. A. et al. *Modelling with generalized stochastic Petri nets*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- MARSAN, M. A.; CONTE, G.; BALBO, G. A class of generalized stochastic petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, ACM, v. 2, n. 2, p. 93–122, 1984.
- MECKLENBRAUKER, C. F. et al. Vehicular channel characterization and its implications for wireless system design and performance. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 99, n. 7, p. 1189–1212, 2011.
- MERLIN, P. M.; FARBER, D. J. Recoverability of communication protocols—implications of a theoretical study. *Communications, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 24, n. 9, p. 1036–1043, 1976.
- Microwaves RF. *Expanded Coverage Will Drive Connected Car Market*. 2014. Disponível em: <<http://mwrf.com/systems/expanded-coverage-will-drive-connected-car-market>>. Acesso em: 20 Abr 2016.
- MINITAB, I. Minitab statistical software. *Minitab Release*, v. 13, 2000.
- MISHRA, S. *Traffic Flow Characteristics*. 2016. Disponível em: <<http://www.ce.memphis.edu/4162/>>. Acesso em: 20 Abr 2016.
- NHTSA. *FATALITY ANALYSIS REPORTING SYSTEM*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www-fars.nhtsa.dot.gov/Main/index.aspx>>.
- NOE, J. D.; NUTT, G. J. Macro e-nets for representation of parallel systems. *Computers, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 100, n. 8, p. 718–727, 1973.
- OLARIU, S.; HRISTOV, T.; YAN, G. The next paradigm shift: from vehicular networks to vehicular clouds. *Basagni, S. and Conti, M. and Giordano, S. Stojmenovic, I.,(Eds), Mobile Ad hoc networking: the cutting edge directions*, Wiley and Sons, New York, 2012.

OpenSim Ltd. *OMNeT++*. 2014. Disponível em: <<http://www.omnetpp.org/>>. Acesso em: 18 Jul 2016.

PAIER, A. et al. Average downstream performance of measured IEEE 802.11p infrastructure-to-vehicle links. In: *Proceedings of IEEE ICC 2010, Workshop on Vehicular Connectivity*. Cape Town: [s.n.], 2010.

PAPADIMITRATOS, P. et al. Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation. *Communications Magazine, IEEE*, IEEE, v. 47, n. 11, p. 84–95, 2009.

PETRI, C. A. *Kommunikation mit automaten*. Bonn: *Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des NM*, n. 3, 1962.

PINDILLI, E. Applications for the environment: Realtime information synthesis (aeris) benefit-cost analysis. *Prepared by United States Department of Transportation, Federal Highway Administration Office*, 2012.

RAMCHANDANI, C. Analysis of asynchronous concurrent systems by timed petri nets. Massachusetts Institute of Technology, 1974.

RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: Princípios e Práticas*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.

RASHIDI, M. et al. Placement of road side units for floating car data collection in highway scenario. In: IEEE. *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2012 4th International Congress on*. [S.l.], 2012. p. 114–118.

ROBINSON, S. *Simulation: the practice of model development and use*. [S.l.]: Palgrave Macmillan, 2014.

ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S.; MCSHANE, W. R. *Traffic engineering*. [S.l.]: Prentice Hall, 2004.

ROS, F. J.; MARTINEZ, J. A.; RUIZ, P. M. A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools. *Computer Communications*, Elsevier, v. 43, p. 1–15, 2014.

SAHNER, R. A.; TRIVEDI, K. S. Reliability modeling using sharpe. *Reliability, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 36, n. 2, p. 186–193, 1987.

SEGURADORA LÍDER. *INDENIZAÇÕES PAGAS POR ANO - QUANTIDADE E VALORES*. 2014. Disponível em: <<http://www.seguradoralider.com.br/Pages/Desempenho-DPVAT-2014-completo-ano.aspx>>. Acesso em: 2 Mai 2016.

SHIVALDOVA, V.; WINKELBAUER, A.; MECKLENBRAUKER, C. Vehicular link performance: From real-world experiments to reliability models and performance analysis. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, v. 8, n. 4, p. 35–44, Dec 2013. ISSN 1556-6072.

SILVA, B. et al. Astro: An integrated environment for dependability and sustainability evaluation. *SUSTAINABLE COMPUTING-INFORMATICS & SYSTEMS*, ELSEVIER SCIENCE BV PO BOX 211, 1000 AE AMSTERDAM, NETHERLANDS, v. 3, n. 1, p. 1–17, 2013.

SILVA, B. et al. Mercury: An integrated environment for performance and dependability evaluation of general systems. In: *Proceedings of Industrial Track at 45th Dependable Systems and Networks Conference (DSN)*. [S.l.: s.n.], 2015.

Society of Automotive Engineers. *Draft SAE J2735 Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*. 2009. Disponível em: <http://standards.sae.org/j2735_200911>. Acesso em: 18 Set 2015.

Society of Automotive Engineers. *DSRC Implementation Guide*. 2010. Disponível em: <<http://www.sae.org/standardsdev/dsrc/DSRCImplementationGuide.pdf>>. Acesso em: 18 Set 2015.

SOMMER, C. *Vehicles in network simulation (VEINS)*. 2012. Disponível em: <<http://veins.car2x.org>>. Acesso em: 18 Jul 2016.

SOUSA, E. Teixeira Gomes de et al. Performance and cost modeling strategy for cloud infrastructure planning. In: *Cloud Computing (CLOUD), 2014 IEEE 7th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 546–553.

SUN, W. et al. Analytical study of the IEEE 802.11 p EDCA mechanism. In: IEEE. *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*. [S.l.], 2013. p. 1428–1433.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway capacity manual. *National Research Council Special Report 209, Washington, DC*, 1994.

TRIVEDI, K. S. *Probability & statistics with reliability, queueing and computer science applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.

USDOT. *U.S. Department of Transportation*. 2016. Disponível em: <<https://www.transportation.gov/>>. Acesso em: 18 Set 2015.

WANG, Y.; ZHENG, J.; MITTON, N. Delivery delay analysis for roadside unit deployment in vehicular ad hoc networks with intermittent connectivity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, PP, n. 99, p. 1–1, 2015. ISSN 0018-9545.

WHAIIDUZZAMAN, M. et al. A survey on vehicular cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 40, p. 325–344, 2014.

WIRED. *Baidu's Self-Driving Car Has Hit the Road*. 2015. Disponível em: <<https://www.wired.com/2015/12/baidus-self-driving-car-has-hit-the-road/>>. Acesso em: 2 Mai 2016.

WISITPONGPHAN, N. et al. Routing in sparse vehicular ad hoc wireless networks. *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 25, n. 8, p. 1538–1556, 2007.

ZHANG, C.; ZHOU, M. A stochastic petri net-approach to modeling and analysis of ad hoc network. In: IEEE. *Information Technology: Research and Education, 2003. Proceedings. ITRE2003. International Conference on*. [S.l.], 2003. p. 152–156.

Apêndice



Mercury

Para a obtenção dos modelos desta pesquisa e suas respectivas análises, fizemos uso da ferramenta Mercury (SILVA et al., 2015), específica para modelagem analítica. É interessante fornecer um espaço para apresentar essa ferramenta, visando justificar a sua escolha.

A ferramenta Mercury, desenvolvida pela equipe de pesquisadores *Modelling of Distributed and Concurrent Systems* da Universidade Federal de Pernambuco, é o *kernel* de outra ferramenta denominada ASTRO (SILVA et al., 2013). A ferramenta ASTRO é um ambiente integrado para a avaliação de sustentabilidade, custo e disponibilidade de ambientes de *data center*. Esta ferramenta permite que usuários modelem sistemas de TI, sistemas energéticos e sistemas de resfriamento, sem a necessidade de conhecer os formalismos matemáticos que serão empregados para realizar a análise das propriedades desses sistemas.

O Mercury, por sua vez, além de ser o *kernel* de modelagem e avaliação dos modelos de alto nível criados pelo ASTRO, também é uma ferramenta para a criação e análise de diagramas de blocos de confiabilidade (*Reliability Block Diagram (RBD)*), cadeias de Markov de tempo contínuo (*Continuous-Time Markov Chain (CTMC)*), SPN e modelos de fluxo energético (*Energy Flow Model (EFM)*). As características de funcionamento da ferramenta Mercury são vistas na Figura A.1 a seguir:

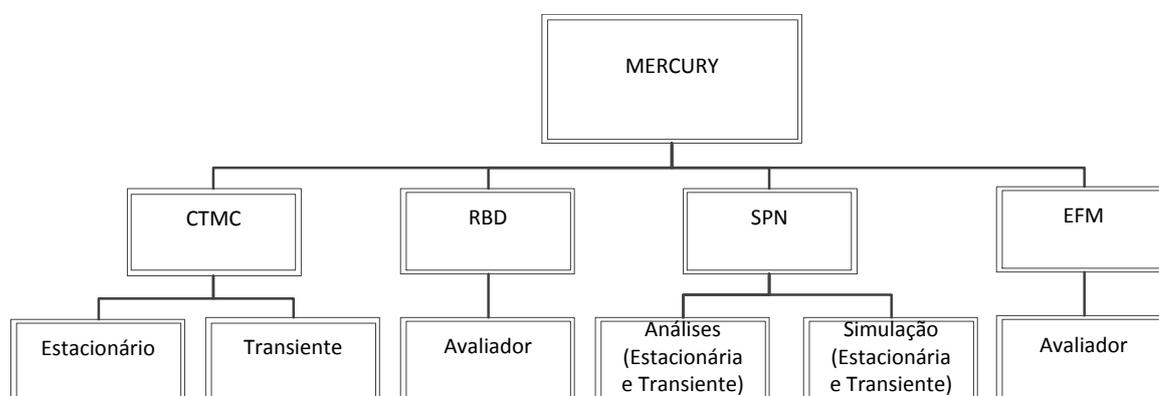


Figura A.1: Características da Ferramenta Mercury

B

Script para Cálculo da Densidade Veicular

(* Declaracao de variaveis *)

$oneway = 2;$

$twoway = 4;$

$intersection = 8;$

$wayType = oneway;$ (* tipo da via escolhido *)

$d = 200m;$ (* raio da RSU *)

$lanes = 4;$ (*faixas*)

$lv = 4m/veiculos;$ (* comprimento medio dos veiculos *)

$beta = 0.5 * veiculos/s;$ (* taxa de chegada de veiculos *)

$v = (50/3.6) * m/s;$ (* Velocidade media *)

(* Fim declaracao de variaveis *)

$alphaTemp = beta/v;$ (* alpha bruto sem considerar distancia segura *)

$l = d * wayType * lanes$ (* soma total dos comprimentos de pista cobertos *);

Print[" α (bruto) : ", alphaTemp];

$nTemp = alphaTemp * l;$

Print["Total de veiculos (bruto): ", nTemp];

Print["Distancia entre veiculos (para-choque dianteiro a para-choque traseiro): ",

$1/alphaTemp$];

$dParaCadaV = 1/alphaTemp + lv;$

Print["Espaco para cada veiculo (tamanho+distancia): ", dParaCadaV];

$n_{New} = 1/d_{ParaCadaV} * d * 2;$

$n = n_{New} * lanes * wayType/2; (* \text{Numero correto apos inclusao do tamanho dos veiculos} *)$

Print["Total de veiculos (ajustado): ", n];

$alpha = n/l;$

Print[" α (ajustado) = ", $alpha$];