

Avaliação de Desempenho de uma Arquitetura VANET com Semáforos Inteligentes Cooperativos

Firmino Neto, Laécio Rodrigues, Glauber Gonçalves,
André Soares e Francisco Airton Silva

¹ Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Brasil

{faps, ggoncalves, andre.soares}@ufpi.edu.br

Abstract. *Intelligent vehicle traffic can make use of intelligent traffic lights that work cooperatively to improve mobility. A smart traffic light architecture offers challenges related to time and resource constraints. This paper aims to evaluate the performance of a VANET architecture of cooperative intelligent devices through stochastic Petri net (SPN) models. The proposed models calculate the mean response time, resource utilization, probability and number of discarded messages. The highly flexible validated model allows systems developers and administrators to calibrate eighteen parameters, including eight transitions and ten markings representing resource capacity.*

Resumo. *Tráfego inteligente de veículos pode fazer uso de semáforos inteligentes que trabalham cooperativamente para alcançar maior mobilidade de veículos. A arquitetura de semáforos inteligentes oferece desafios relacionados à restrição de tempo de comunicação e quantidade de recursos. Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho de uma arquitetura VANET de semáforos inteligentes cooperativos através de modelos de redes de Petri estocásticas (SPN). Os modelos propostos calculam o tempo médio de resposta, utilização de recursos, probabilidade e número de descartes de mensagens. O modelo é altamente flexível, permitindo aos desenvolvedores e administradores de sistemas calibrarem dezoito parâmetros, incluindo oito transições e dez marcações, representando quantidade de recursos.*

1. Introdução

As VANETs (Veicular Ad Hoc Networks) são redes veiculares móveis que emergiram devido ao crescimento das tecnologias de comunicação sem fio. As VANETs foram projetadas para melhorar a eficiência do tráfego de veículos. Tais redes têm como objetivo permitir a comunicação entre veículos automotores. As características deste ambiente trazem diversos desafios para a indústria e academia, tais como o fato das VANETs apresentarem conectividade volátil e estarem sujeitas a diferentes densidades veiculares [Júnior and Ferreira 2016]. Existem duas categorias de comunicação neste contexto. A primeira, também conhecida como V2V (*Vehicle to Vehicle*), trata da comunicação direta entre veículos. A segunda, também conhecida como V2I (*Vehicle to Infrastructure*), trata da comunicação entre veículos e estações fixas (infraestruturas) localizadas nas margens das vias. Vastas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na área de VANETs, no entanto muitos desafios ainda devem ser atacados.

Diversas aplicações podem ser desenvolvidas para VANETs, desde o controle de tráfego, gestão de vagas de estacionamento, alertas de riscos de acidentes, disponibilização de conteúdo interativo aos passageiros, dentre várias outras [Silva et al. 2013]. No contexto específico de controle de tráfego têm-se uma grande preocupação com a alta emissão de CO₂ através de congestionamentos nas grandes cidades. Felizmente, aos poucos o controle de tráfego que conhecemos hoje irá mudar, se tornando cada vez mais inteligente. Tráfego inteligente de veículos é uma área de estudo das redes veiculares que foca em aumentar a mobilidade nas cidades.

Uma das formas de tornar o tráfego mais eficiente é tornando os semáforos mais inteligentes e autônomos para se comunicar com veículos dando instruções de rotas. Outra possibilidade é formar uma cooperação entre semáforos inteligentes à fim de maximizar a quantidade de informações úteis aos veículos na área de cobertura. A arquitetura de semáforos inteligentes cooperativos traz consigo um grande desafio principalmente relacionado à restrição de tempo de comunicação e quantidade de recursos. Assim, os semáforos inteligentes — acoplados por equipamentos Road Side Units (RSU) — devem ser bem desenhados para atender a uma determinada demanda de fluxo de veículos. Avaliar o desempenho de tais sistemas com natureza de tempo-real deve ser uma preocupação desde estágios iniciais de planejamento. No entanto, realizar experimentos reais em VANETs exige equipamentos de alto custo¹. Este trabalho tem o objetivo de propor modelos de redes de Petri estocásticas (SPN) flexíveis para avaliar o desempenho de uma arquitetura VANET com semáforos inteligentes cooperativos.

Redes de Petri são modelos matemáticos baseados em teoria da probabilidade usados para modelar e avaliar sistemas complexos. As características modeláveis de tais sistemas incluem paralelismo, concorrência e parametrização de taxa de entrada de requisições. Modelos de redes de Petri têm sido aplicados para avaliar arquiteturas VANETs [Malik and Pandey 2018, Zhang et al. 2016, Alheeti et al. 2016, Junior et al. 2017], porém nenhum desses modelos focou em arquiteturas de semáforos inteligentes. Este artigo apresenta um modelo SPN para modelar uma arquitetura VANET de múltiplos semáforos inteligentes. O modelo proposto permite avaliar a utilização do conjunto de RSUs, o tempo médio de resposta (MRT), o número de descarte e a probabilidade de descarte de mensagens. As principais contribuições deste artigo são: (i) um modelo analítico constituído de métricas de desempenho; que é uma ferramenta útil para avaliadores de redes VANETs checar o desempenho de mudanças no sistema, antes que elas sejam implementadas no contexto de semáforos inteligentes; (ii) duas análises numéricas que servem como um guia prático para análise de desempenho em arquiteturas VANET com o modelo proposto.

O presente artigo está dividido da seguinte forma: na Seção 2 são mencionados os trabalhos correlatos a este; a Seção 3 mostra a arquitetura base levada em consideração; a Seção 4 mostra o modelo SPN proposto; a Seção 5 descreve análises numéricas que indicam a utilidade do modelo; a Seção 6 apresenta a validação do modelo proposto; por fim, a Seção 7 faz uma conclusão sobre o artigo.

¹Por exemplo, um aparelho RSU da marca Cohda custa \$ 4463,11, de acordo com o preço anunciado em <https://www.yoycart.com/Product/527650716827/> na data de escrita desse artigo

2. Trabalhos Relacionados

Semáforos inteligentes e monitoramento do tráfego de veículos em vias públicas tem ganhado foco das pesquisas sobre sistemas inteligentes de transporte, contribuindo para o rápido desenvolvimento da área [Ngo et al. 2019]. A infraestrutura para esses sistemas apresentam como elemento básico a RSU. Algoritmos para controle adaptativo de semáforos [Younes and Boukerche 2015a, Silva and Soares 2019, Xiao et al. 2015] requerem ao menos uma RSU como ponto central de processamento e tomada de decisões. As RSUs também auxiliam os protocolos distribuídos de coleta de informações sobre densidade e velocidade do tráfego como o ECODE [Younes and Boukerche 2015b]. Adicionalmente, a comunicação entre RSUs é fundamental para as novas abordagens que visam eliminar colisões entre veículos, como em [Ngo et al. 2019] que propõe o uso de três RSUs no dilema do sinal amarelo (YLD). Essas pesquisas e seus possíveis produtos devem se beneficiar do nosso modelo para analisar o impacto de vários padrões de tráfego à infraestrutura e ajustá-la aos níveis de desempenho desejáveis.

Diferentes trabalhos propuseram modelos analíticos para avaliação de desempenho de infraestruturas VANETs. Contudo, esses modelos focam em aspectos específicos da camada física ou aplicações específicas em VANETs, e são apenas parcialmente aplicáveis ao domínio de semáforos inteligentes, que deve ser mais amplo, abrangendo inclusive a comunicação entre RSUs. Na Tabela 1, resumimos os trabalhos mais relevantes sobre avaliação do desempenho de infraestruturas em VANETs com modelos analíticos, que discutimos a seguir.

Tabela 1. Trabalhos Relacionados a Avaliação de Desempenho de Infraestruturas VANETS

Trabalho	Avaliação	Atraso/Tempo de Resposta	Utilização da Infraestrutura	Múltiplas RSUs
[Li et al. 2017]	QoS para Camada Física e MAC	x		
[Shah et al. 2019]	QoS para Camada Física e MAC	x		
[Malik and Pandey 2018]	Protocolos de autenticação	x		
[Alheeti et al. 2016]	Deteção de veículos maliciosos	x		
[Zhang et al. 2016]	Tempo para estacionar	x		
[Junior et al. 2017]	Planejamento de infraestrutura	x	x	
Nossa proposta	Planejamento de infraestrutura	x	x	x

Modelos de fila vêm sendo utilizados eficientemente para avaliar aspectos da camada física e de controle de acesso ao meio (MAC) sem fio em VANETs, especificados no padrão IEEE 802.11p [IEEE 2010]. Um modelo baseado em cadeias de Markov com duas dimensões foi proposto em [Li et al. 2017] para analisar *broadcast* e enfileiramento de processos simultaneamente. Em [Shah et al. 2019] um novo modelo Markoviano foi proposto com foco na mobilidade dos veículos, onde os autores correlacionaram QoS com número, densidade e velocidade dos veículos. Esses modelos focam especificamente em métricas de qualidade de serviço (QoS) como colisão, probabilidade de sucesso na transmissão, atraso e vazão.

Modelos de redes de Petri foram propostos para avaliar desempenho de múltiplas aplicações em VANETs. Em [Malik and Pandey 2018], foi proposto um modelo de Redes de Petri para analisar o desempenho de protocolos de autenticação de veículos na infraestrutura quanto à possibilidade de falhas e aplicabilidade em tempo real. Métodos para detecção de veículos maliciosos em VANETs são analisados em [Alheeti et al. 2016]

com um modelo baseado em Redes de Petri Difusas (FPNs) para analisar padrões de comunicação entre veículos e assim detectar suspeitos. Um modelo para analisar busca de vagas em estacionamentos foi proposto em [Zhang et al. 2016] utilizando Redes de Petri Programadas para estimar o tempo para estacionar, considerando tempo de condução, ocupação do estacionamento e tempo de confirmação do provedor. Esses modelos focam em aplicações específicas em VANETs, e não tratam cenários para uso de semáforos inteligentes, que é o foco do nosso trabalho.

O planejamento e dimensionamento de infraestruturas para VANETs foi o foco de apenas um dos trabalhos relacionados. Em [Junior et al. 2017], um modelo SPN foi proposto para analisar o desempenho da comunicação V2I em arquiteturas VANETs com foco em uma única RSU. Os autores analisam tempo de resposta, atrasos e utilização da infraestrutura dado a variação do tráfego de veículos, mas não tratam da comunicação entre múltiplas RSUs, aspecto relevante no monitoramento de tráfego para os semáforos inteligentes [Younes and Boukerche 2015b, Ngo et al. 2019]. Para nosso conhecimento, nossa proposta é a única até o momento que foca nesse aspecto, assim como provê, em um único modelo, as métricas para avaliação de infraestruturas mencionadas, que podem ser utilizadas para configuração de semáforos inteligentes em diferentes cenários.

3. Cenário Avaliado

Esta seção apresenta um cenário VANET com múltiplos semáforos que trabalham de forma cooperativa para prover informações de tráfego aos veículos na via. A Figura 1 ilustra tal cenário. Assume-se que todos os semáforos atuam como RSUs e cada veículo está equipado com um On Board Unit (OBU). As RSUs possuem capacidade de processamento e armazenamento limitadas. As OBUs possuem a capacidade de localização GPS. As RSUs estão conectadas a princípio por um cabeamento físico óptico, porém podem estar conectadas, por exemplo, por conexão wireless como Lora, 5G C-V2X ou IEEE 802.11p. Vale ressaltar que a escolha destas tecnologias impacta diretamente no tempo médio de resposta. É importante notar também que nosso cenário e subsequente modelo SPN apresentam apenas quatro semáforos. No entanto, a proposta se adequa a qualquer quantidade de semáforos. Considere que cada um dos quatro semáforos/RSUs² possuem uma área de cobertura que está constantemente disponível ouvindo os veículos que entram no alcance.

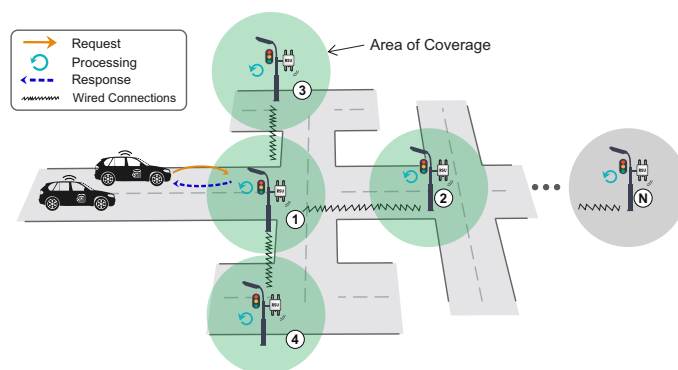


Figura 1. Cenário VANET com Múltiplos Semáforos Cooperativos

²Iremos a partir daqui tratar semáforo e RSU como sinônimos por estarem integrados.

Com relação às etapas de comunicação, quando o veículo entra no alcance da RSU1, ele requisita informações do tráfego daquela região. A chegada de novas requisições dependerá da quantidade e velocidade dos veículos na via, obedecendo assim a uma taxa de chegada que está normalmente alinhada com o período do dia. Horários de pico possuem maior tráfego. A requisição do veículo à RSU contém dados do próprio veículo, tais como velocidade, condições do veículo, rota previamente traçada, etc. A RSU1 por sua vez solicita informações sobre as regiões das três outras RSUs. Por fim, a RSU1 processa e agrupa tais informações e retorna uma resposta ao veículo requisitante. Quando os veículos receberem as informações dos semáforos, a OBU calculará uma velocidade recomendada para o motorista. De acordo com a velocidade recomendada, o motorista pode alterar ou manter a velocidade atual para atravessar os cruzamentos com menor tempo de espera ou menos tempo de parada. Ao receber informações do semáforo a OBU também será responsável por alertar ao motorista sobre possíveis acidentes e as melhores rotas a serem utilizadas com base no trânsito.

Dada este cenário, o desafio existente é planejar a configuração física dos elementos do sistema. A pergunta de pesquisa é portanto: **Como prever a capacidade de processamento e comunicação de RSUs que atendam demandas de tráfego específicas utilizando modelos de redes de Petri?** Obviamente tal resposta dependerá do tipo de serviço que as RSUs irão prover, bem como a quantidade de dados trafegados na rede. A próxima seção apresenta um modelo SPN que considera todas estas questões.

4. Modelo SPN

Esta seção apresenta a estrutura do modelo SPN, com detalhamentos sobre o fluxo de execução. Logo em seguida apresentamos as métricas calculadas pelo modelo, incluindo tempo médio de resposta, utilização e descarte.

4.1. Estrutura do Modelo

A Figura 2 apresenta o modelo SPN para o cenário anteriormente detalhado. O foco do modelo é auxiliar engenheiros e analistas a avaliarem o desempenho de um cenário VANET V2I com múltiplos semáforos. O modelo está organizado em seis partes principais: *Admission*, *RSU1_C*, *RSU2*, *RSU3*, *RSU4* e *RSU1_P*. A sub-rede *Admission* representa a geração das mensagens. A sub-rede *RSU1_C* representa a comunicação entre a RSU1 e as demais RSUs considerando envio e retorno da requisição. As sub-redes *RSU2*, *RSU3*, e *RSU4* representam o processamento e a distribuição de informações dos semáforos numerados por 2, 3 e 4 respectivamente. A sub-rede *RSU1_P* representa o processamento dos dados advindos dos outros três semáforos que estão instalados próximos ao semáforo principal. Na parte inferior do modelo ressaltamos a possibilidade de adicionar N RSUs simplesmente incluindo uma nova sub-rede, Ao adicionar um novo bloco *RSUN*, deve-se apenas ligar os arcos ligados a *T_Transmit1* e *P_Retransmit*. Esse novo bloco estará em paralelo aos demais, conectada à RSU1.

Dada a visão geral do modelo, descrevemos agora detalhes do seu funcionamento. A sub-rede *Admission* é composta por dois lugares: *P_Arrival* e *P_InputQueue*. *P_Arrival* representa o estado do sistema esperando novas mensagens serem geradas. *P_InputQueue* representa a aceitação dessas mensagens na fila de entrada no sistema. Os tokens em *P_Arrival* e *P_InputQueue* representam quaisquer tipos de mensagens

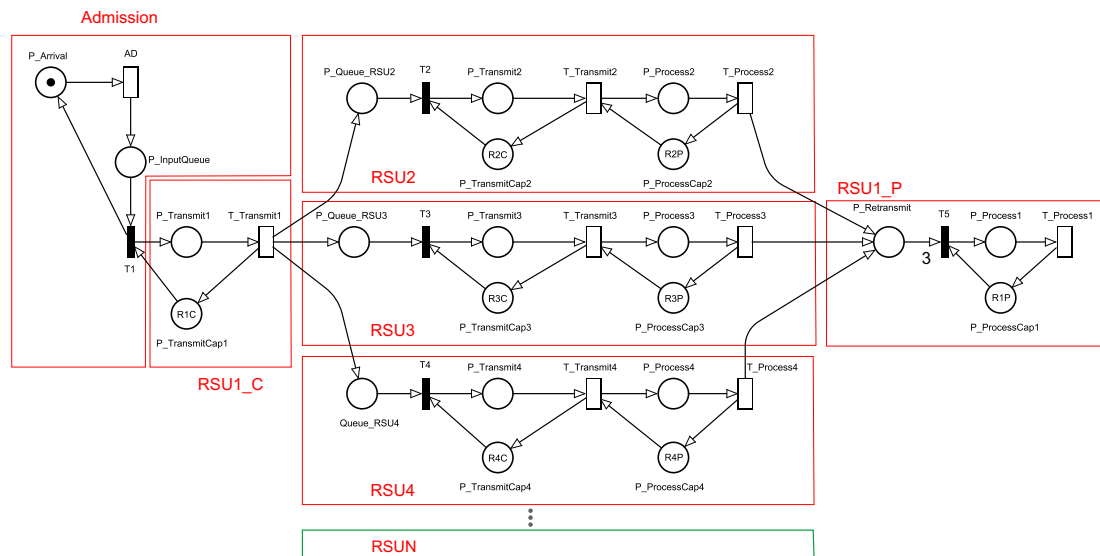


Figura 2. Modelo SPN para o cenário VANET

que envolvam entrada de dados e que possam ser distribuídos. Os tempos entre chegadas de trabalhos são atribuídos à transição AD (*arrival delay*). Apesar de considerarmos que os tempos entre disparos são exponencialmente distribuídos, tal suposição pode ser modificada, alterando a distribuição. A sub-rede Admission também não considera o atraso proveniente do sistema, ou seja, não são levadas em conta as perdas provenientes da rede. A transição imediata T1 representa simplesmente a entrada de mensagens no sistema. Como esta transição é imediata, não apresenta atraso associado à sua execução.

A sub-rede RSU1_C é composta por uma transição temporizada e dois lugares: P_Transmit1 e P_TransmitCap1. P_Transmit1 é alcançado quando T1 dispara. P_TransmitCap1 representa a capacidade de envio e recebimento de requisições para os outros semáforos. Quando T1 dispara, um token é retirado de P_Transmit1 e enviado para os blocos que representam as três RSUs. As sub-redes RSU2, RSU3 e RSU4 são compostas por três etapas: filas de chegada, transmissão e processamento. As três RSUs são acionadas de paralelamente através da transição T_Transmit1. A transição T_Transmit1 representa o tempo para uma requisição sair da RSU1, coletar informações dos demais semáforos, retornar tais informações à RSU1 e finalmente transmitir o resultado ao veículo requisitante. Como as três sub-redes possuem o mesmo funcionamento, a explicação seguinte focará apenas na RSU2.

Quando o token chega no lugar P_QueueRSU2 indica que a requisição já saiu da RSU1. A quantidade de tokens acumulados em P_QueueRSU2 significa que existe um enfileiramento sob os recursos de transmissão para a RSU2. Tais recursos de transmissão são limitados pela marcação R2C no lugar P_TransmitCap2. O token localizado no lugar P_Transmit2 representa que a RSU alocou um recurso de transmissão para a requisição em questão. A seguir, esta requisição levará um tempo de transmissão para poder chegar à próxima etapa de processamento. Este tempo de transmissão é representado pela transição T_Transmit2. A etapa de processamento é regida pela capacidade de processamento da RSU, através da marcação R2P em P_ProcessCap2. O tempo associado ao processamento de uma requisição é dado pela transição T_Process2.

Quando as três RSUs finalizam seus respectivos processamentos o lugar $P_Retransmit$ conterá 3 tokens. Somente com esta condição é que a transição $T5$ poderá ser acionada — observe o peso “3” no respectivo arco. A sub-rede $RSU1_P$ representa o processamento das informações advindas dos três semáforos. A ideia é sintetizar os dados das quatro RSUs e retornar as informações ao veículo que realizou a requisição. $P_ProcessCap1$ indica a capacidade de processamento da $RSU1$. $T_Process1$ trata do tempo para processar e agrupar as informações das quatro RSUs.

4.2. Métricas

Esta seção apresenta as métricas de interesse obtidas a partir da resolução do modelo. Especificamente, calculamos o tempo médio de resposta, erros de comunicação de dados pela probabilidade/número de descartes de mensagens de veículos ao sistema, e por fim, o nível de utilização das RSU somadas. Descrevemos a seguir como obtemos cada uma dessas métricas com o modelo SPN.

O tempo médio de resposta (MRT) pode ser obtido a partir da Lei de Little [Little 1961]. A Lei de Little relaciona o número médio de requisições em progresso em um sistema ($RequestsInProgress$), a taxa de chegada ($ArrivalRate$) e o tempo médio de resposta (MRT). A taxa de chegada é o inverso do tempo entre chegadas (do inglês Arrival Delay - AD). Considerando a transição para tempo entre chegadas do modelo, temos que $ArrivalRate = \frac{1}{AD}$. Vale ressaltar que a Lei de Little requer um sistema estável, ou seja, que possua uma taxa de requisições menor que a taxa de processamento dos servidores. Uma grande característica das redes veiculares é a mobilidade e alta velocidade dos nós. Um veículo pode entrar e sair do alcance de uma RSU em um curto intervalo de tempo. Nesse contexto, é necessário ter noções sobre o tempo médio de resposta e que esse tempo médio de resposta seja baixo para que uma VANET apresente desempenho satisfatório. Para obter o MRT basta multiplicar o número de requisições dentro do sistema pelo tempo entre chegadas. O número de requisições é dado pela soma dos valores esperados em cada Lugar por onde passa o fluxo de requisições no sistema. A expressão $Esp(Lugar)$ indica quantos tokens ocupam aquele Lugar. Assim, a Equação 1 apresenta a forma de calcular o MRT:

$$\begin{aligned}
 MRT = & ((Esp(P_Queue_RSU2)) + (Esp(P_Queue_RSU3)) + (Esp(P_Queue_RSU4)) + \\
 & (Esp(P_Transmit2)) + (Esp(P_Transmit3)) + (Esp(P_Transmit4)) + \\
 & (Esp(P_Process2)) + (Esp(P_Process3)) + (Esp(P_Process4)) + \\
 & (Esp(P_Retransmit)) + (Esp(P_Process1)) + (Esp(P_Transmit1))) \times AD
 \end{aligned} \tag{1}$$

No modelo é possível ter noções sobre o nível de utilização do sistema, o que permite planejar qual a configuração correta dos equipamentos do cenário estudado. Com essa noção, é possível saber, sem gastar recursos reais, se o valor que o projetista pretende investir está acima ou abaixo da quantidade necessária. Imagine que o projetista sabe a média de veículos que trafegam na via e quer que a infraestrutura consuma apenas 50% de sua capacidade para evitar sobrecarga. O projetista configura os parâmetros no modelo e pode obter a utilização que o sistema apresentará. A utilização é calculada para cada tipo de recurso das diversas RSUs. Os recursos podem ser de comunicação (Equação 2) ou processamento (Equação 3). Em ambos os casos basta dividir a esperança de existir tokens em um “Lugar” dividido pela quantidade de recursos disponíveis na respectiva RSU. A letra N representa o índice da RSU, “C” representa comunicação e “P” processamento.

$$\text{UNC} = \frac{Esp(P_TransmitN)}{RNC} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{UNP} = \frac{Esp(P_ProcessN)}{RNP} \times 100 \quad (3)$$

Em uma rede veicular, um ou vários descartes no sistema pode fazer com que o veículo saia do alcance de uma RSU sem obter informações sobre a estrada. Com a modelagem proposta, é possível saber qual a porcentagem e qual o número de mensagens descartadas no sistema. Para calcular o descarte é necessário existir token na fila de entrada $P_Arrival$ e ter probabilidade zero de existir recursos suficientes para atender às requisições na entrada do sistema. Relaciona-se a entrada do sistema à RS1 no modelo proposto. $P(Lugar = n)$ calcula a probabilidade de existirem n tokens em “Lugar”. Portanto, a equação que define a probabilidade de descarte é dada pela Equação 4, e o número de descartes é dada pela Equação 5.

$$\text{DiscardProbability} = P((P_InputQueue = 1) \wedge (P_TransmitCap1 = 0)) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{DiscardNumber} = \text{DiscardProbability} \times (1/AD) \quad (5)$$

5. Análises Numéricas

Esta seção apresenta duas análises numéricas de desempenho do cenário VANET proposto neste trabalho. Em ambas análises consideramos que o tempo médio de resposta possui uma natureza crítica, normalmente inerente a contextos que a segurança dos passageiros é muito importante e toda comunicação da rede deve ocorrer praticamente em tempo real. O primeiro estudo analisa uma variação da taxa de chegada de veículos no campo de cobertura da RSU1. O segundo estudo analisa a possibilidade de utilizar três tipos de tecnologias de comunicação. Tanto a modelagem da rede de Petri quanto as análises foram executadas na ferramenta Mercury [Maciel et al. 2017]. O Mercury possui recursos avançados de modelagem tanto para modelos de desempenho quanto de disponibilidade, confiabilidade, dentre outros.

5.1. Variação do Tempo entre Chegada de Veículos

Analisamos o efeito da variação do tempo entre chegadas (*arrival delay*) dos veículos nas métricas de desempenho apresentadas na Seção 4.2. Observe que esse tempo se refere ao momento em que o veículo atinge a área de cobertura da RSU1 e automaticamente solicita as informações de tráfego da região. A RSU1, por sua vez, realiza todo o processo de comunicação com as RSUs secundárias para agrupamento de informações.

Foram atribuídos valores hipotéticos tanto para as transições quanto para os lugares. Os valores utilizados para as transições foram: AD variando de 1,0 até 10,0ms com incrementos de 1,0ms; o tempo de 40,0ms atribuído aos tempos de processamentos incluindo $T_Process1$, $T_Process2$, $T_Process3$ e $T_Process4$; o tempo de 5,0ms atribuído aos tempos de transmissão incluindo $T_Transmit1$, $T_Transmit2$, $T_Transmit3$ e $T_Transmit4$. Em termos de quantidade de recursos atribuiu-se o valor 100 para marcações de comunicação (R1C, R2C, R3C e R4C) e o valor 200 para marcações de processamento (R1P, R2P, R3P e R4P). Esses valores foram utilizados para gerar análises, onde os resultados podem ser observados na Figura 3.

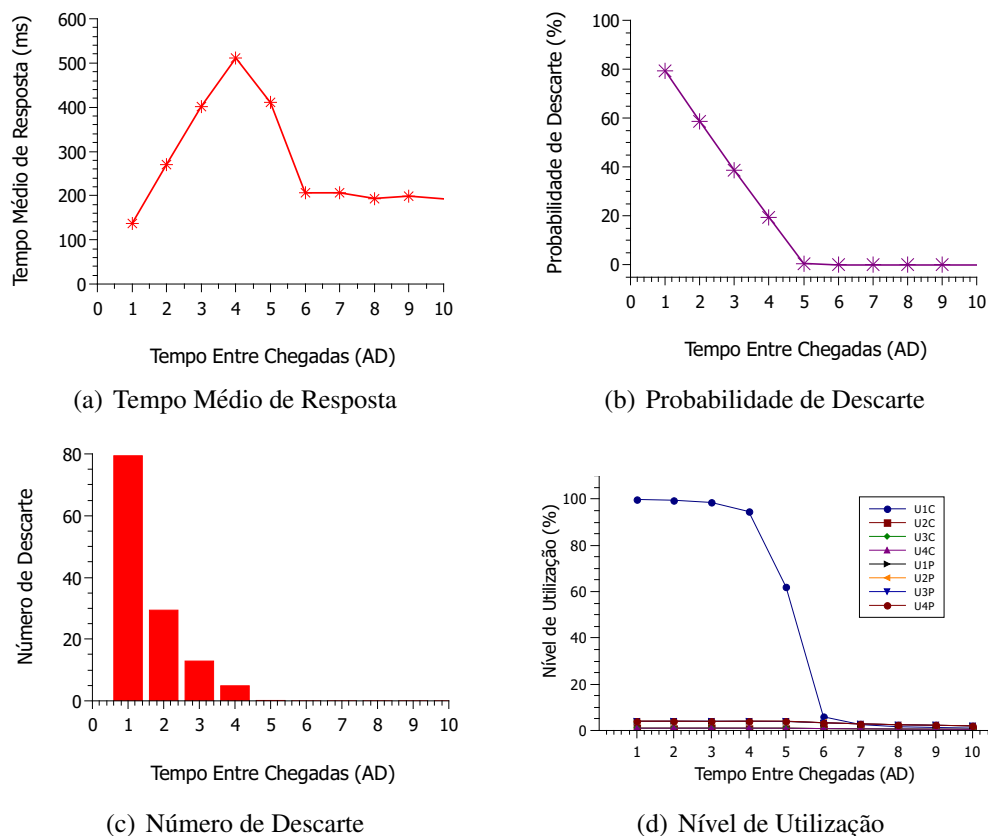


Figura 3. Resultados da Análise Numérica Variando Tempo entre Chegadas

A Figura 3a apresenta os resultados para o MRT. Dois comportamentos são observados nos resultados da análise numérica, separados por um pico no gráfico. Na primeira metade, com o aumento de AD o sistema se mantém com carga máxima de requisições, ou seja, o número de requisições dentro do sistema se mantém praticamente constante. Dessa forma o MRT então aumenta proporcionalmente ao valor de AD. Após o pico (AD = 4,0ms), a quantidade de elementos no sistema começa a cair numa proporção maior do que o aumento de AD, fazendo com que o MRT decaia também até estagnar em AD = 6,0ms. A Figura 3b apresenta a probabilidade de descarte. Conforme AD aumenta, a probabilidade de haver descarte diminui pois terão menos requisições a serem atendidas. A partir do AD = 5,0ms as chances de haver descarte é zero.

A Figura 3c apresenta o número de descartes de requisições que ocorreram no sistema em um determinado período de tempo t. Pode-se observar que quanto maior o AD, menor é o número de mensagens descartadas. Quando AD é maior que 5,0ms, o número de mensagens descartadas é zero. Quando AD é baixo (AD=1,0ms por exemplo), o número de descartes é de 80 descartes. A Figura 3d apresenta o nível de utilização dos recursos do cenário VANET. São quatro conjuntos de recursos para comunicação (U1C, U2C, U3C, U4C) e quatro conjuntos de recursos para processamento (U1P, U2P, U3P, U4P). Ocorreram altíssimos níveis de utilização apenas no recurso de comunicação da RSU1 pois é o primeiro componente alcançado pelas requisições, nos demais recursos a utilização foi sempre próxima de zero. A baixa utilização nos demais recursos foi causada pelo gargalo ocorrido na RSU1. Para contornar este problema seria sugerível aumentar a

quantidade de recursos de comunicação da RSU1. A partir de $AD=6,0ms$ o gargalo deixa de existir, porém as utilizações dos demais recursos não se elevam pois a quantidade de requisições se torna baixa suficiente para os recursos suportarem.

5.2. Variação do Tempo de Comunicação entre RSUs

Nesta seção analisamos o impacto da tecnologia de comunicação usada para a conexão entre as RSUs. Em [Djilali et al. 2018] foi apresentado os principais indicadores chave de performance para três tecnologias de comunicação Wireless em redes VANETs, como pode ser visto na Tabela 2. Observando o critério Velocidade de Transmissão, pode-se notar que 5G ($\cong 28GHz$) é mais rápida do que a tecnologia IEEE 802.11p ($\cong 5.9GHz$), que por sua vez é mais rápida do que a tecnologia Lora ($\cong 868MHz$).

Tabela 2. Indicadores Chave de Performance (KPIs) para Lora, 5G C-V2X, IEEE 802.11P [Djilali et al. 2018]

KPIs	LoRA	IEEE 802.11p	5G C-V2X
Grau de Cobertura	+++	+	+++
Confiabilidade	+	+++	+++
Escalabilidade de Rede	+	+++	+++
Velocidade de Transmissão	+	++	+++
Segurança	+++	+++	+++
Suporte a Mobilidade	+	+++	+++

Agora analisamos diferentes configurações para um cenário de semáforos cooperativos, comparando as três tecnologias mencionadas para conexão entre as RSUs, assim como desenvolvedores e administradores tipicamente analisam o desempenho de VANETs. Nesse sentido, consideramos que os tempos de comunicação atribuídos às transições do tipo $T_{TransmitN}$ foram configuradas com três tempos: 2,5ms para 5G C-V2X, 5,0ms para IEEE 802.11p e 7,5ms para Lora. Os valores utilizados para as demais transições foram: $AD = 5,0ms$, e o tempo de 20,0ms atribuído às transições de processamento, ou seja, transições do tipo $T_{ProcessN}$; Em termos de quantidade de recursos, atribuiu-se o valor 100 para marcações de comunicação (R1C, R2C, R3C e R4C) e o valor 200 para marcações de processamento (R1P, R2P, R3P e R4P). Os resultados desta análise podem ser observados na Figura 4.

A Figura 4(a) apresenta os resultados para o MRT. Percebe-se que o comportamento é bem distinto da análise anterior. Inicialmente o tempo de comunicação é mínimo, e não ocasionam descarte no modelo. Mas ao aumentarmos o tempo de comunicação o MRT passa a ter valor maior que o dobro do valor anterior. Isso ocorre porque mais de uma transição está sendo alterada em relação ao tempo de comunicação. Quando o tempo de comunicação chega a 7,5ms podemos perceber que o MRT chega ao valor máximo observado. Isso ocorre não somente devido ao aumento do processamento de dados, mas também devido ao tempo de espera nas filas serem maiores. A Figura 4(b) apresenta a probabilidade de descarte de novas requisições. Inicialmente a probabilidade está em 0% tanto para a tecnologia 5G quanto a tecnologia IEEE 802.11p. Porém, com o tipo Lora, que é mais lento, a probabilidade de descarte é de aproximadamente 50%.

A Figura 4(c) apresenta o número de descartes que ocorreram no sistema. Para Lora observa-se um número de descarte de 10 requisições. A Figura 4(d) apresenta o nível de utilização das RSUs. A utilização de comunicação da RSU1 (U1C) é o único recurso afetado à medida que se aumenta o tempo médio de comunicação das RSUs, novamente

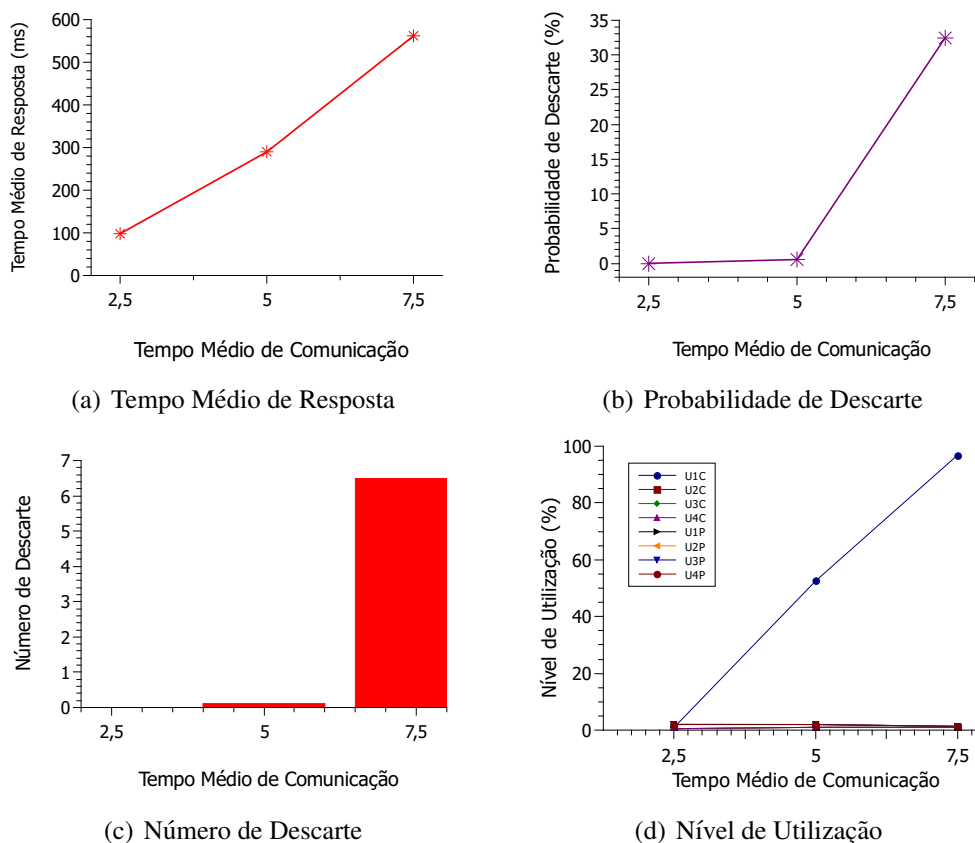


Figura 4. Resultados da Análise Numérica Variando Tempo de Comunicação

porque esta é o primeiro componente alcançado pelas requisições. A utilização U1C aumenta proporcionalmente ao tempo médio de comunicação, chegando a 100% com a tecnologia Lora. Os demais recursos sempre ficam próximos de zero pois o AD fixo na análise foi de 5,0ms, o que gera poucas requisições, como visto na análise anterior.

6. Validação

Esta seção apresenta a validação do modelo SPN proposto. O objetivo desta validação foi comparar o MRT calculado pelo modelo e o MRT coletado por experimentos em um cenário real. Escolhemos a métrica MRT para a validação mas outras métricas poderiam também ser utilizadas.

6.1. Ambiente Experimental

Diferente das análises anteriores, nesta análise consideramos um contexto onde o tempo médio de resposta não é ponto crítico do sistema. Portanto, consideramos valores menores para capacidades de comunicação e processamento das RSUs. Desenvolvemos um protótipo de aplicação que simula a comunicação entre quatro RSUs com base no cenário proposto na Seção 3. A RSU1 é a unidade concentradora que retransmite cada requisição recebida para ser processada pelas demais RSUs. Em outras palavras, a RSU1 recebe requisições, as encaminha para as outras três RSUs, obtém o retorno das tarefas executadas por essas RSUs, processa um resultado final e o transmite aos veículos na sua área de cobertura. Para representar as RSUs foram utilizados quatro microcontroladores Raspberry Pi mostrados na Tabela 3. Os recursos de processamento e comunicação

da aplicação foram representados pelo número de *threads* configuradas para cada micro-controlador. Tais recursos podem ser representados também por número de núcleos do processador, número de containers/VMs, assim como número de portas ou canais para recursos de comunicação. A aplicação recebe requisições com o tempo entre chegadas obedecendo a uma determinada distribuição de probabilidade. Para avaliação do modelo utilizamos uma distribuição exponencial. A tarefa executada em cada RSU foi um algoritmo de ordenação com complexidade quadrática, que recebe e processa um vetor de números. Outras tarefas podem ser facilmente adaptadas à aplicação em trabalhos futuros.

Tabela 3. Dispositivos Adotados nos Experimentos

Configuração dos Dispositivos	Perfis	Funções
Intel Core i5 2,5GHz 12GB	Gerador de requisições	Gera requisições para serem processadas nas RSUs
Raspberry Pi 3 modelo B+ 1,4 GHz 1GB	RSU1	Recebe, agrupa e encaminha os dados
Raspberry Pi 3 modelo B 1,2 GHz 1 GB	RSU2	Recebe, processa e retorna os dados
Raspberry Pi 3 modelo B 1,2 GHz 1 GB	RSU3	Recebe, processa e retorna os dados
Raspberry Pi 3 modelo B 1,2 GHz 1 GB	RSU4	Recebe, processa e retorna os dados

Realizamos um experimento inicial para coletar os tempos médios de cada etapa do sistema à fim de alimentar as transições do modelo, dado que a aplicação registra em cada etapa de comunicação e processamento os respectivos tempos associados. A partir desse experimento, obtivemos as seguintes tempos das transições para alimentar o modelo: $T_{Process1} = 23,5ms$, $T_{Process2} = 11,0ms$, $T_{Process3} = 11,0ms$, $T_{Process4} = 11,0ms$. Todas as marcações de capacidade de processamento (RnP) e de comunicação (RnC) foram configuradas com o valor 4. Esta configuração representa que cada RSU possui apenas quatro *threads* para tratar da transmissão de dados e quatro *threads* para tratar do processamento de requisições. Vale ressaltar que no experimento, para cada AD foram disparadas 15 requisições. Quanto ao modelo, o mesmo foi configurado para disparar somente 15 requisições para ser compatível com o experimento real. Quantidades de requisições diferentes teriam impacto sobre o MRT por causa das filas que são geradas.

6.2. Resultados da Validação

A Figura 5 compara os MRTs do experimento com os do modelo, para três casos distintos de tempo de chegada entre requisições. Quanto maior o *AD*, menos requisições são enviadas e menor é o valor para o MRT. Pode-se observar que um desvio padrão (linha vertical sobre a barra) é expressivo para os MRTs do experimento. Isso ocorre devido ao crescente número de filas geradas, pois simulamos um número pequeno de recursos de comunicação e processamento nas RSUs (quatro *threads*). Apesar disso, os resultados dos MRTs foram próximos para cada um dos três casos.

Após verificar que as amostras de MRT obtidas no experimento possuíam distribuição normal, aplicamos o Teste T para comparar o MRT gerado pelo modelo com o MRT obtido nas execuções da nossa aplicação nos três casos mostrados na Figura 5. A seguir, verificamos a hipótese nula, ou seja, a hipótese que as médias são iguais, a partir do valor p . Considerando um intervalo de confiança de 95%, os valores p foram: $AD = 30,0ms$, $p = 0,070$; $AD = 40,0ms$, $p = 0,471$; $AD = 50,0ms$, $p = 0,573$. Em todos os casos, o valor p é maior que 0,05, rejeitando a hipótese nula e indicando que os resultados gerados pelo modelo são equivalentes estatisticamente ao experimento.

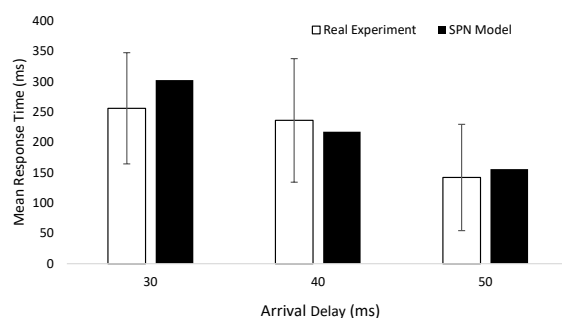


Figura 5. Comparação entre os MRTs do Modelo e do Experimento

7. Conclusão

Este trabalho propôs um modelo SPN para representar e avaliar o desempenho de um cenário VANET com múltiplos semáforos cooperativos. O modelo permite estimar o MRT, o nível de utilização de RSUs, a probabilidade de descarte e o número de mensagens descartadas. O projetista pode configurar até 18 parâmetros no modelo, o que permite um alto nível de flexibilidade de avaliação. As análises numéricas permitiram observar o comportamento das quatro métricas de duas formas: em função da variação do tempo entre chegadas de novas mensagens e em função da variação do tempo de comunicação entre as RSUs, porém muitas outras análises podem ser realizadas. Os resultados permitem concluir que o tempo médio de resposta é dependente do enfileiramento de mensagens nas RSUs. Os descartes e o nível de utilização decaem com o aumento progressivo do tempo entre chegadas. Por fim, o modelo foi validado com um experimento real usando microcontroladores. Como trabalho futuro, pretendemos estender o modelo para explorar a comunicação entre OBU's sem infraestrutura intermediária, ou seja, arquiteturas V2V.

Agradecimentos

Este trabalho possui o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e da empresa Virtex Telecom.

Referências

- Alheeti, K. M. A., Gruebler, A., McDonald-Maier, K. D., and Fernando, A. (2016). Prediction of dos attacks in external communication for self-driving vehicles using a fuzzy petri net model. In *2016 IEEE Int. Conf. on Consumer Electronics (ICCE)*, pages 502–503. IEEE.
- Djilali, Y. D., Bakhtil, Y., Kouninef, B., and Senouci, B. (2018). Performances evaluation study of vanet communication technologies for smart and autonomous vehicles. In *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pages 79–84. IEEE.
- IEEE (2010). Ieee standard for information technology– local and metropolitan area networks– specific requirements– part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments. *IEEE Std 802.11p-2010*, pages 1–51.

- Junior, A. L., Matos, R., Silva, B., and Maciel, P. (2017). Exponential modelling for supporting vanet infrastructure planning. In *2017 IEEE 22nd Pacific rim international symposium on dependable computing (PRDC)*, pages 86–91. IEEE.
- Júnior, L. and Ferreira, A. (2016). Modelos para o planejamento de infraestruturas de comunicações veiculares. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco.
- Li, B., Sutton, G. J., Hu, B., Liu, R. P., and Chen, S. (2017). Modeling and qos analysis of the ieee 802.11p broadcast scheme in vehicular ad hoc networks. *Journal of Communications and Networks*, 19(2):169–179.
- Little, J. D. (1961). A proof for the queuing formula: $L = \lambda w$. *Operations research*, 9(3):383–387.
- Maciel, P., Matos, R., Silva, B., Figueiredo, J., Oliveira, D., Fé, I., Maciel, R., and Dantas, J. (2017). Mercury: Performance and dependability evaluation of systems with exponential, exponential, and general distributions. In *2017 IEEE 22nd Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC)*, pages 50–57. IEEE.
- Malik, A. and Pandey, B. (2018). Security analysis of discrete event based threat driven authentication approach in vanet using petri nets. *IJ Network Security*, 20(4):601–608.
- Ngo, T., Huynh-The, T., and Kim, D. (2019). A novel vanets-based traffic light scheduling scheme for greener planet and safer road intersections. *IEEE Access*, 7:22175–22185.
- Shah, A. S., Ilhan, H., and Tureli, U. (2019). Modeling and performance analysis of the ieee 802.11 p mac for vanets. In *2019 42nd Int. Conf. on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pages 393–396. IEEE.
- Silva, A. and Soares, A. (2019). Controle adaptativo de semáforo com pelotões veiculares mais acurados. In *37o. Simpósio Brasileiro de Redes e Sistemas Distribuídos (SBRC)*. SBC.
- Silva, F. A., Silva, T., Ruiz, L. B., and Loureiro, A. (2013). Um middleware para provisionamento de contextos para redes veiculares. *XXXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos-SBRC*, pages 615–628.
- Xiao, Z., Zhu Xiao, Dong Wang, and Xiaohong Li (2015). An intelligent traffic light control approach for reducing vehicles co2 emissions in vanet. In *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*.
- Younes, M. B. and Boukerche, A. (2015a). Intelligent traffic light controlling algorithms using vehicular networks. *IEEE trans. on vehicular technology*, 65(8):5887.
- Younes, M. B. and Boukerche, A. (2015b). A performance evaluation of an efficient traffic congestion detection protocol (ecode) for intelligent transportation systems. *Ad Hoc Networks*, 24:317–336.
- Zhang, X., Li, D., Wang, J., Zhang, G., and Jiang, X. (2016). Faster parking and less cruise for public parking spot discovery: Modeling and analysis based on timed petri nets. In *2016 IEEE 13th Int. Conf. on Networking, Sensing, and Control (ICNSC)*, pages 1–6. IEEE.