

Modelagem e Análise da Comunicação em VANETs com uso de RSUs

Jorge Macêdo¹, Vicente Carvalho¹, Ermeson Andrade² e Francisco Airton Silva¹

¹ Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina - PI

² Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife - PE
Brasil

E-mail: {jorge.rafael, vicentemcarvalho, faps}@ufpi.edu.br,
ermeson.andrade@ufrpe.br

Abstract. Scalability and parallel processing are inherent characteristics of vehicular networks or VANETs (Vehicular Ad hoc NETWORKs). The implementation of VANETs can involve high costs and because they are critical systems, they have specific requirements that require heterogeneous configurations. Network growth increases complexity and is prone to errors such as data scattering, packet loss, and delay. Given the cost of implementing VANETs, simulation tools emerge as an alternative to evaluate appropriate configurations. Simulators allow verifying complex interactions in different configurations, understanding the behavior of the system and proposing optimizations. The previous analysis allows to correctly size the system and minimize the cost involved, whether in the expansion or in the reduction of the number of devices. This work presents a Stochastic Petri Net model aimed at VANETs with Road Side Units (RSU), where the metrics average response time (MRT), message discard rate, WIFI network layer utilization rate and network utilization rate were evaluated. Edge RSU layer. The battery of tests was performed with variations in the arrival rate of requests. From the study carried out, it was possible to verify that the high performance in the Wifi layer leaves the Edge RSU layer underused.

Resumo. Escalabilidade e processamento paralelo são características inerentes às redes veiculares ou VANETs (Vehicular Ad hoc NETWORKs). A implementação de VANETs pode envolver elevado custo e por serem sistemas críticos, possuem requisitos específicos que exigem configurações heterogêneas. O crescimento da rede aumenta a complexidade e fica propenso a erros, tais como disseminação de dados, perda de pacotes e atraso. Dado o custo de implementação de VANETs, as ferramentas de simulação surgem como alternativa para avaliar configurações apropriadas. Simuladores permitem verificar interações complexas em diversas configurações, compreender o comportamento do sistema e propor otimizações. A análise prévia permite dimensionar corretamente o sistema e minimizar o custo envolvido, seja na ampliação, seja na redução da quantidade de dispositivos. Este trabalho apresenta um modelo Stochastic Petri Net voltado para VANETs com Road Side Units (RSU), onde foram avaliadas as métricas tempo médio de resposta (MRT), probabilidade de descarte de mensagens, taxa de utilização da camada network WIFI e taxa de utilização da camada Edge RSU. A bateria de testes foi executada com variações na taxa chegada de requisições. A partir do estudo realizado foi

possível verificar que a alta performance na camada Wifi deixa subutilizada a camada Edge RSU.

1. Introdução

Em 2021 foram vendidos 1.275.878 veículos novos no Brasil [Motor1 2021] e estimativas apontam que em 2030 haverá cerca de 20,8 milhões de veículos autônomos só nos Estados Unidos [WIRE 2018]. O trânsito de veículos é dinâmico e exige respostas rápidas que otimizem o seu fluxo, bem como evitem acidentes. O aumento anual da frota aumenta a complexidade do trânsito. A utilização de redes veiculares permite melhores tomadas de decisão, seja em veículos conduzidos por pessoas, seja em veículos de condução autônoma.

Escalabilidade e processamento paralelo são características inerentes às redes veiculares ou VANETs (*Vehicular Ad hoc NETWORKS*). A implementação de VANETs pode envolver elevado custo por conta da infraestrutura a ser instalada, tais como cabeamento, pontos de acesso WIFI, *Road Side Units* (RSUs), dentre outros componentes. A adaptação de veículos que não possuam recursos de comunicação Vehicle-to-vehicle (V2V) ou Vehicle-to-infrastructure (V2I), também é um fator que limita a adoção de VANETs. Redes veiculares são sistemas críticos e possuem requisitos específicos que exigem configurações heterogêneas. A medida que a rede cresce, também aumenta a complexidade e fica propensa a erros, tais como disseminação de dados, perda de pacotes e atraso. Interações complexas entre as partes dos sistema costumam impedir a geração detalhada de modelos analíticos [Bagrodia and Shen 1991].

Avaliar grandes sistemas distribuídos (SDs) no mundo real nem sempre é possível, além de implicar em testes caros, demorados e de difícil reprodução [Hirofuchi et al. 2015]. Dado o custo de implementação de SDs, as ferramentas de simulação surgem como alternativa atraente [Casanova et al. 2013], devido à sua eficiência e escalabilidade [Dobre et al. 2008] para avaliar configurações apropriadas. Ferramentas de simulação permitem criar cenários realistas [Dobre et al. 2008], bem como verificar interações complexas em diversas configurações e compreender o comportamento do sistema propondo otimizações. A análise prévia permite dimensionar corretamente o sistema e minimizar o custo envolvido, seja na ampliação, seja na redução da quantidade de dispositivos no SD.

Diversos trabalhos na literatura apresentam análises e modelos relacionados ao tema de VANETs. As principais métricas abordadas foram MRT [Junior et al. 2017, Li et al. 2017], taxa de transferência [Li et al. 2017, Shah and Mustari 2017, Zhou et al. 2020], tamanho da fila [Li et al. 2017, Raskar and Nema 2022], dentre outras como número de unidades VCTS [Verma et al. 2021] e taxa de veículos maliciosos [Zhou et al. 2020]. [Li et al. 2017] e [Shah and Mustari 2017] utilizaram modelos *Markov Chain* para avaliar o desempenho do protocolo IEEE 802.11p (WAVE). [Raskar and Nema 2022] usaram um modelo *Modified Hidden Markov Model* na previsão do fluxo de tráfego. [Hussain et al. 2018] apresentam a modelagem baseada em *Colored Petri Net* para avaliação de algoritmo para seleção de nó mestre (RSU). [Verma et al. 2021] aplicam *Stochastic Colored Petri Net* para modelar um protocolo de acoplamento virtual de trens. [Junior et al. 2017] usam modelos *Stochastic Petri Net* para avaliar de estrutura de VANETs e [Zhou et al. 2020]

usam para definir um estado de segurança.

O propósito deste trabalho é avaliar uma VANET através de SPN, que é simulada por meio da ferramenta de modelagem *Mercury* [MODCS 2021]¹. Como estudo de caso foram propostos 2 cenários onde foram avaliadas as métricas tempo médio de resposta (MRT), probabilidade de descarte de mensagens, taxa de utilização da camada *Network* WIFI e taxa de utilização da camada *Edge* RSU. Portanto, as principais contribuições deste trabalho são:

- (i) um modelo de Redes de Petri Estocásticas voltado para VANTES, voltado para projetistas analisarem o desempenho da capacidade de RSUs cooperativas antes de sua implementação. O modelo possui sete parâmetros incluindo transições e capacidades (fila ou processamento) que podem ser facilmente ajustados de acordo com necessidades específicas do avaliador.
- (ii) dois estudos de caso da aplicação do modelo, que mostram de forma prática seu funcionamento, expondo vantagens e desvantagens de cada cenário.

O restante do artigo está dividido da seguinte forma: A Seção 2 mostra os trabalhos relacionados. A Seção 3 mostra uma visão geral da arquitetura avaliada. A Seção 4 apresenta o Modelo de Redes de Petri Estocásticas proposto. A Seção 5 mostra a configuração que foi utilizada durante o experimento. Na Seção 6 serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos. Por fim, a Seção 7 conclui o trabalho e apresenta planos para o futuro.

2. Trabalhos Relacionados

Nesta seção, sete trabalhos relacionados são discutidos. A discussão buscou categorizar os trabalhos em três grupos relevantes: 1) modelo analítico de avaliação adotado; 2) se o modelo abordou múltiplas RSUs e 3) as métricas utilizadas para avaliação. A Tabela 1 apresenta a listagem com um resumo comparativo dos trabalhos coletados com o trabalho atual. A avaliação dos modelos dos trabalhos relacionados na Tabela 1 levou em conta diversas métricas, as principais foram MRT [Junior et al. 2017, Li et al. 2017], taxa de transferência [Li et al. 2017, Shah and Mustari 2017, Zhou et al. 2020], tamanho da fila [Li et al. 2017, Raskar and Nema 2022]. Outras métricas observadas foram bastante específicas para os modelos e problemas abordados, como número de unidades VCTS [Verma et al. 2021] e taxa de veículos maliciosos [Zhou et al. 2020]. As métricas do presente trabalho coincidem com a escolha de métricas de outros trabalhos dada a relevância para a avaliação do modelo proposto.

Modelos de *Markov Chain* foram utilizados em [Li et al. 2017] e [Shah and Mustari 2017] para avaliar o desempenho do protocolo IEEE 802.11p (WAVE); [Raskar and Nema 2022] aplicou modelo *Modified Hidden Markov Model* para realizar previsão aprimorada do fluxo de tráfego no contexto de VANETs. [Hussain et al. 2018] apresenta a modelagem baseada em *Colored Petri Net* para avaliação de algoritmo para seleção de nó mestre (RSU); em [Verma et al. 2021] é aplicado *Stochastic Colored Petri Net* para representar trocas de informações necessárias para realizar operação de acoplamento virtual de trens. *Stochastic Petri Net* são modelos utilizados em [Junior et al. 2017] - para avaliação de estrutura de VANETs - e

¹https://www.modcs.org/?page_id=2392

[Zhou et al. 2020] - para descrever o estado do sistema e assim definir um estado de segurança. Todos os modelos relatados focam em VANETs, mas não abordam múltiplas camadas na infraestrutura de comunicação como *Network WiFi* e *Edge* RSU. Este trabalho também aborda métricas como taxa de utilização das camadas e de probabilidade de descarte.

Tabela 1. Comparação das principais características dos trabalhos relacionados

Trabalho	Modelo Analítico de Avaliação	Múltiplas RSUs	Métricas
[Junior et al. 2017]	<i>Stochastic Petri Net</i>	✓	Utilização da RSU, MRT, probabilidade de descarte.
[Li et al. 2017]	<i>Markov Chain</i>	✓	Tamanho da fila, perda de pacotes, MRT, taxa de transferência.
[Hussain et al. 2018]	<i>Colored Petri Net</i>	×	-
[Shah and Mustari 2017]	<i>Markov Chain</i>	×	Probabilidade de canal ocupado, probabilidade de colisão, probabilidade de transmissão, taxa de transferência.
[Raskar and Nema 2022]	<i>Modified Hidden Markov Model</i>	×	Tempo computacional, tamanho da fila, tempo de espera.
[Zhou et al. 2020]	<i>Stochastic Petri Net</i>	×	Taxa de veículos maliciosos, taxa de detecção para diferentes meios de ataque.
[Verma et al. 2021]	<i>Stochastic Colored Petri Net</i>	✓	Erro de transmissão, latência de transmissão, número de unidades VCTS.
Este trabalho	<i>Stochastic Petri Net</i>	✓	Utilização da WiFi, utilização da RSU, MRT, probabilidade de descarte.

3. Arquitetura do Sistema

3.1. Visão Geral

Esta seção apresenta uma arquitetura VANET com RSU, que servirá de referência para a modelagem e análise de desempenho. A Figura 1 representa a arquitetura proposta, que é dividida em três camadas chamadas (i) Admissão, (ii) *Network* WIFI e (iii) *Edge* RSU. A camada de Admissão representa um servidor central na Internet, que processa e envia para a próxima camada. A arquitetura abstrai o envio de dados entre os veículos, bem como envio de dados dos veículos para a infraestrutura. A camada *Network* WIFI é responsável por processar os dados de controle recebidos do servidor central na Internet. Os pontos de acesso determinam quais RSUs receberão os dados. As máquinas na camada *Edge* RSU processam os dados e transmitem a informação aos veículos, de forma a garantir que eles recebam a instrução no momento correto para realizar determinada ação.

3.2. Suposições e discussões

Para a simplificação da modelagem, várias suposições sobre a arquitetura e as operações da infraestrutura em questão são dadas a seguir:

- Pontos de acesso de configurações heterogêneos são desconsiderados. No modelo a representação é de um dispositivo genérico e novos serão sempre do mesmo tipo.
- Os protocolos de comunicação entre as camadas e dispositivos não foram levados em consideração.
- Para diminuir a complexidade do modelo, foi estabelecido que não haveria barreiras ou sombra na comunicação sem fio.

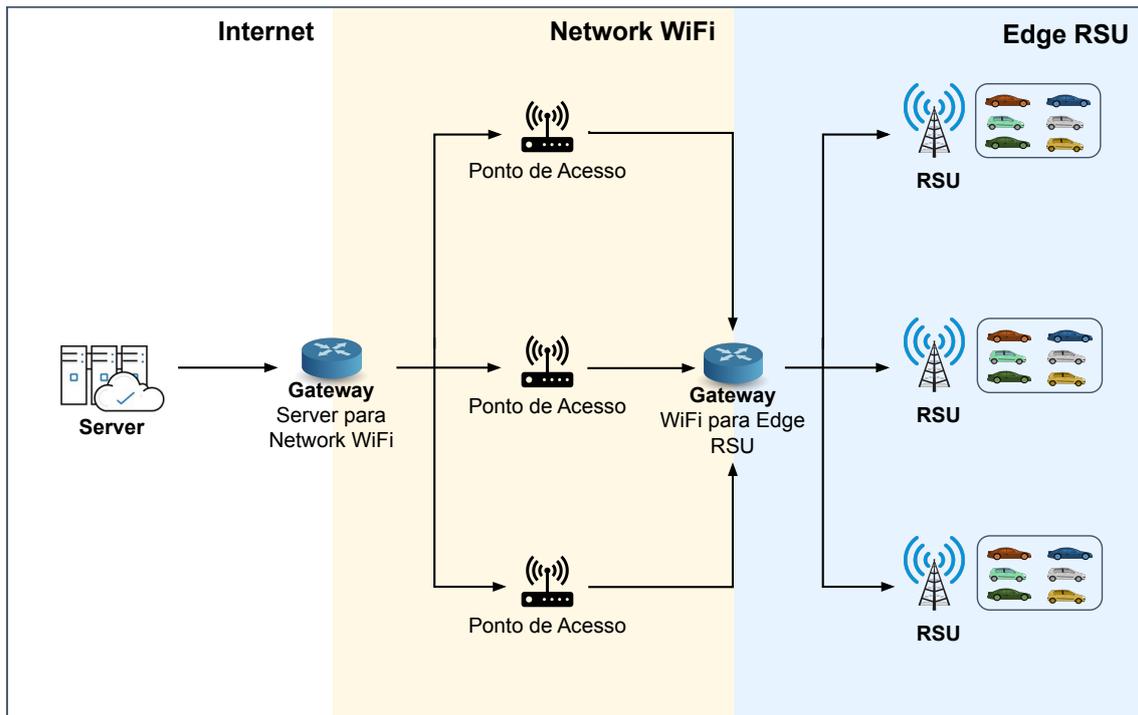


Figura 1. Arquitetura em duas camadas de VANETs que trabalham com RSUs e representa a transmissão em *broadcast* de dados de controle para os veículos.

- O aumento na quantidade de veículos em determinados horários aumenta o envio de mensagens a partir do servidor central, o que é representado pela taxa de envio de mensagens.
- Considerou-se que os veículos são equipados com on-board unit (OBU).

4. Modelo de SPN

Redes de Petri permitem modelar propriedades de concorrência e sincronia de sistemas [Santos et al. 2021]. A Figura 2 representa um modelo SPN, para a arquitetura proposta na Figura 1. O modelo foi gerado na ferramenta *Mercury* [Oliveira et al. 2017], que também gera a avaliação conforme cenários propostos. A interpretação da transmissão de dados ocorre da esquerda para a direita. O Modelo possui apenas uma entrada, representada pelo Servidor central, que fica localizado na Internet. Na camada admissão, o *place* identificado por $P_Chegada$ representa o envio de mensagens pelo servidor. O *place* P_Fila indica a requisição aceita. O Servidor se comunica através de um *gateway* com os pontos de acesso na *Network WiFi*.

A taxa de chegada na camada *Network WiFi* varia conforme os eventos são processados pelo Servidor Central. Cada ponto de acesso possui uma fila e vários núcleos de processamento. O *place* $P_TransCap2$ é a capacidade da fila, que tem tamanho máximo C_WN . Os *tokens* migram de $P_TransCap2$ para P_Fila_WiFi , que representa a fila crescendo até o tamanho C_WN . O *place* $P_TransProc2$ representa a capacidade de processamento, onde possui P_WN núcleos de processamento. Um *token* em P_Fila_WiFi migrará para P_Trans2 se houver núcleo (*token*) disponível em $P_TransProc2$.

Os dados processados são enviados através de um segundo *gateway* para a camada

Edge RSU. De forma similar a camada anterior, cada RSU é representado por uma fila com nó de processamento. O *place* $P_TransCap3$ é a capacidade da fila de uma RSU, que tem tamanho máximo C_RSU . Os *tokens* migram de $P_TransCap3$ para P_Fila_RSU , que representa a fila crescendo até o tamanho C_RSU . O *place* $P_TransProc3$ representa a capacidade de processamento de uma RSU, onde possui no P_RSU núcleos de processamento. Um *token* em P_Fila_RSU migrará para P_Trans3 se houver núcleo (*token*) disponível em $P_TransProc3$.

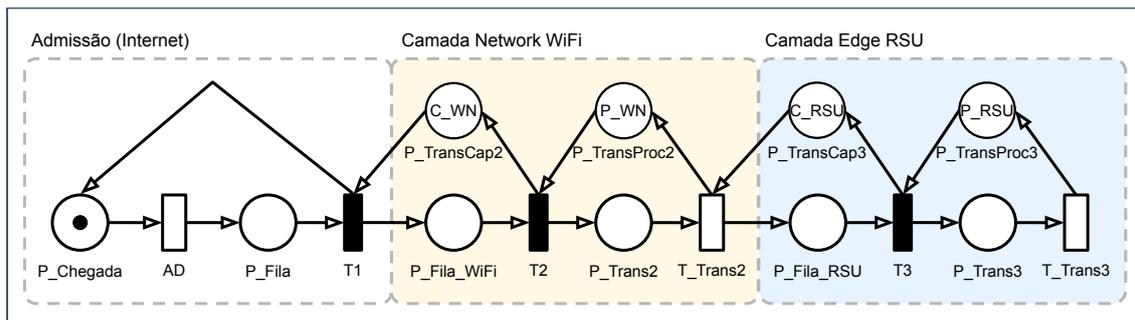


Figura 2. Modelo SPN de uma VANET com camadas WIFI e RSU.

Tabela 2. Expressões das métricas utilizadas no modelo SPN

Métrica	Expressão	Descrição
U_WN	$(E\{\#P_Trans2\}/P_WN) * 100$	Utilização da camada WIFI
U_RSU	$(E\{\#P_Trans3\}/P_RSU) * 100$	Utilização da camada Edge RSU
MRT	$((E\{\#P_Fila_WiFi\}) + (E\{\#P_Trans2\}) + (E\{\#P_Fila_RSU\}) + (E\{\#P_Trans3\})) * AD / (1 - (P\{\#P_Fila > 0\} and (\#P_TransCap2 = 0)))$	Tempo médio de resposta
DROP_PROB	$(P\{\#P_Fila > 0\} and (\#P_TransCap2 = 0)) * 100$	Probabilidade de descarte

5. Setup

Essa seção apresenta a configuração utilizada nesse trabalho. O modelo SPN foi configurado para realizar análise de acordo com as equações listadas na Tabela 2. Os termos **máquina** e **núcleo** são abstrações para representar o valor da capacidade nas camadas ($Capacidade = Máquina * Núcleo$). Dois cenários de testes foram realizados. As configurações da camada WIFI para o Cenário 1 estão listadas na Tabela 3. O valor do componente $P_TransProc2$ é alocado em P_WN . A camada *Edge* RSU não sofre variação e conta com cinco máquinas, onde cada uma possui três núcleos e totaliza o valor 15 em $P_TransProc3$ alocado em P_RSU .

As configurações da camada *Edge* RSU para o Cenário 2 estão listadas na Tabela 4. O valor do componente $P_TransProc3$ é alocado em P_RSU . A camada *Network* WIFI não sofre variação e conta com oito máquinas, onde cada uma possui dois núcleos e totaliza o valor 16 em $P_TransProc2$. A política de fila utilizada nos componentes das duas camadas é Não-Preemptiva e usa a estratégia *First Come First Served* (FCFS). A estratégia de descarte da fila é *drop* ao atingir o limite estabelecido para o tamanho da fila, que é de 20 em cada camada (C_WN e C_RSU). A Fonte de Dados (admissão) é o *Server*

na camada de Internet, que envia dados com taxa de chegada (AR) variando de 0,01 a 0,2 mensagens por milissegundos (msg/ms), com incremento de 0,01. O valor utilizado na transição AD é calculado conforme a expressão: $AD = 1/AR$. As transições T_Trans2 e T_Trans3 possuem valor igual a 100 milissegundos. Na próxima seção serão expostos os resultados.

Tabela 3. Parâmetros para camada WIFI - Cenário 01

Configuração	Componente (P_WN)	Máquinas	Núcleos
A	4	2	2
B	8	4	2
C	12	6	2
D	16	8	2

Tabela 4. Parâmetros para camada Edge RSU - Cenário 02

Configuração	Componente (P_RSU)	Máquinas	Núcleos
A	6	2	3
B	9	3	3
C	12	4	3
D	15	5	3

6. Resultados das Análises

6.1. Cenário 1

Na Figura 3(a), a Configuração A conta com duas máquinas na camada *Network* WIFI, onde a taxa de utilização inicia em 25% e cresce de forma quase linear até atingir 74,98%, com uma taxa de chegada de 0,03 msg/ms. O aumento da taxa de utilização foi de 199,92% com dois passos no incremento da taxa de chegada. A camada sobrecarrega quando a taxa de chegada atinge 0,05 msg/ms, onde a taxa de utilização alcança 99,88% e chega aos 100% quando a taxa de chegada é de 0,06 msg/ms. Em relação a camada *Edge* RSU, a taxa de utilização cresce de forma similar a uma função linear, porém de forma mais lenta que o observado na camada *Network* WIFI, conforme mostra a Figura 3(b). A taxa de utilização na camada *Edge* RSU estabiliza em 26,67% quando a taxa de chegada é 0,06%, correspondendo ao observado na camada *Network* WIFI. De acordo com a Figura 3(c), a Configuração A apresenta MRT que começa em 200ms, mas cresce rápido e estabiliza pouco a cima de 680ms quando a taxa de chegada é 0,07 msg/ms e chega ao máximo de 698 ms quando taxa de chegada é de 0,2 msg/ms. A Figura 3(d) mostra que a probabilidade de descarte é quase nula, mas que começa a crescer quando a taxa de chegada está em 0,04 msg/ms e atinge o pico de 80% quando a taxa de chegada está em 0,2 msg/ms. O crescimento do MRT e da probabilidade de descarte correspondem ao verificado na taxa de utilização das duas camada. Assim, quanto mais rápido for a saturação da camada *Network* WIFI, menor será a taxa de utilização da camada *Edge* RSU, bem como serão maiores o MRT e a probabilidade de descarte.

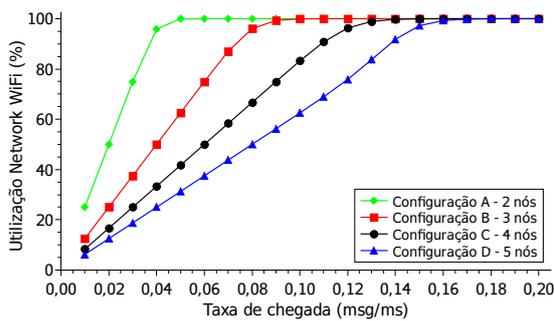
A Configuração B possui o dobro de máquinas na camada *Network* WIFI e reduz a taxa de utilização inicial em 50%, em comparação com a Configuração A. A taxa de

utilização também cresce de forma quase linear até 87,06%, quando a taxa de chegada é de 0,07 msg/ms. A taxa de utilização estabiliza a cima de 99,91% quando a taxa de chegada é 0,10 msg/ms e atinge 100% com taxa de chegada 0,12 msg/ms. Na camada *Edge* RSU, o crescimento na taxa de utilização se sobrepõe inicialmente ao da Configuração A, porém cresce até 46,43% para uma taxa de chegada de 0,07 msg/ms e estabiliza em 53,33% com uma taxa de chegada de 0,10 msg/ms. As duas camadas convergem para estabilização na faixa de 0,07 msg/ms a 0,10 msg/ms da taxa de chegada. O aumento de capacidade da camada *Network* WIFI eleva em 99,96% a taxa de utilização na camada *Edge* RSU. A Configuração B inicia com MRT em 200ms e possui crescimento significativo apenas quando a taxa de chegada está no intervalo de 0,06 msg/ms a 0,10 msg/ms. O MRT chega ao máximo de 446 ms quando taxa de chegada é de 0,2 msg/ms e é 36,10% menor do que na Configuração A. A probabilidade de descarte inicial é quase nula, mas começa a crescer quando a taxa de chegada está de 0,07 msg/ms, correspondendo ao momento em que a taxa de utilização da camada *Edge* RSU inicia a curva de estabilização. A probabilidade de descarte na Configuração B chega ao máximo de 60% e é 25% melhor do que a Configuração A.

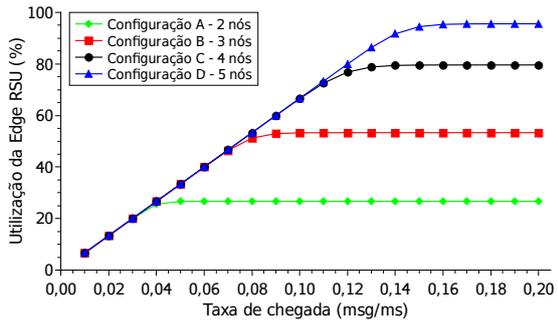
Na camada *Network* WIFI, a Configuração C possui taxa de utilização iniciando em 8,33% e a Configuração D inicia com 6,25%. As Configurações C e D são menores 66,68% e 75%, respectivamente, em comparação com a Configuração A. A taxa de utilização inicial diminui proporcionalmente ao aumento da quantidade de máquinas na camada *Network* WIFI. As quatro configurações apresentam comportamento similar, onde o aumento na quantidade de máquinas em cada configuração faz a com que a taxa de utilização sature apenas com Taxas de Chegada cada vez mais altas. A Figura 3(b) mostra uma proporção de aumento compatível na camada *Edge* RSU. Na Configuração C, a taxa de utilização estabiliza entre 79% e 80%, com taxa de chegada de 0,14 msg/ms. A Configuração D atinge a taxa de utilização máxima de 95,59% com taxa de chegada de 0,19 msg/ms. A Configuração A subutiliza a camada *Edge* RSU, pois utiliza 66,5% menos recurso do que a Configuração C e 72,1% menos recurso do que a Configuração D. O MRT nas Configurações C e D inicia em 200ms, onde o valor máximo é de 368ms e é 47,28% melhor do que na Configuração A. O aumento na quantidade de computadores também se reflete na probabilidade de descarte, onde as Configurações C e D atingem taxas de 40,29% e 28,31%, respectivamente. Em comparação com a Configuração A, a probabilidade de descarte é 49,64% menor na Configuração C e 64,61% Configuração D.

6.2. Cenário 2

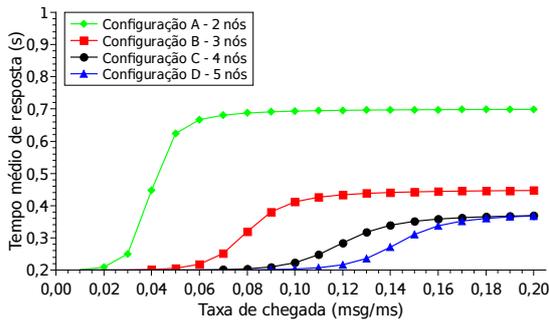
A Figura 4 apresenta os resultados para o Cenário 2 considerando a variação da quantidade de nós na camada *Edge* RSU. A camada *Network* WIFI conta com 8 Nós e cada Nó conta com 2 núcleos, sendo que essa quantidade permanece inalterada nas quatro configurações. A Figura 4(a) mostra sobreposição inicial das Taxas de Utilização em 6,25% e se mantém até a taxa de chegada 0,04 msg/ms, onde registram 25% de utilização. O crescimento inicial é aproximadamente linear para as quatro configurações, mas mostra crescimento abrupto na taxa de utilização para a Configuração A. A taxa de utilização salta de 32,35% quando a taxa de chegada é 0,05 msg/ms, para 98,9% quando a taxa de chegada é 0,07 msg/ms, caracterizando aumento de 205,72%. A saturação ocorre com taxa de chegada de 0,09 msg/ms. Na camada *Edge* RSU, a Configuração A inicia com taxa de utilização em 16,67%, mantém crescimento próximo ao linear até atingir 83,33%



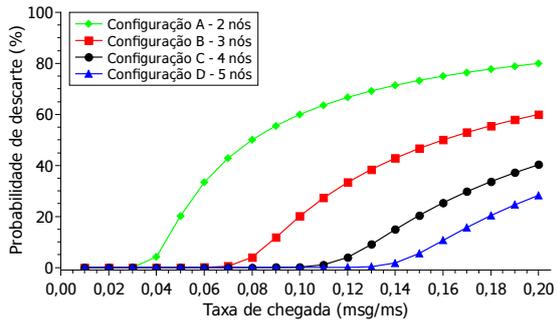
(a) Utilização da Network WIFI



(b) Utilização da Edge RSU



(c) Tempo médio de resposta



(d) Probabilidade de descarte

Figura 3. Métricas resultantes do Cenário 1, considerando a variação na quantidade de nós (máquinas) da camada Network WIFI, cada um com dois núcleos. A camada Edge RSU é constante com cinco nós, cada um com três núcleos.

com taxa de chegada de 0,05 msg/ms. A camada *Edge* RSU inicia a estabilização com taxa de chegada de 0,05 msg/ms a 0,07 msg/ms, coincidindo com o rápido crescimento observado na camada *Network* WIFI, conforme a Figura 4(b). A Saturação da camada *Edge* RSU limita a vazão de mensagens na camada *Network* WIFI e enche a fila de processamento, onde as máquinas tem mensagens para processar em 100% do tempo. As mensagens passam mais tempo no sistema, o que corresponde a elevação do MRT a medida que a taxa de chegada e aumenta a probabilidade de descarte. Conforme observado na Figura 4(c), o MRT salta de 259 ms com taxa de chegada de 0,05 msg/ms, para 848 ms em dois passos da taxa de chegada, representando crescimento de 227,41% e alcança o máximo de 931 ms. De acordo com a Figura 4(d), a probabilidade de descarte permanece nula com Taxas de Chegada menores 0,05 msg/ms e chega ao máximo de 70%.

A Configuração B possui três máquinas na camada *Edge* RSU, onde a capacidade aumenta em 50% e a saturação da camada *Network* WIFI ocorre com Taxas de Chegada maiores. Na camada *Edge* RSU a taxa de utilização inicia em 11,11%, sendo 50,05% menor do que na Configuração A. A taxa de utilização na camada *Edge* RSU também cresce de forma similar ao crescimento linear, porém mais lenta se comparada com a Configuração A. A saturação na camada *Edge* RSU ocorre com taxa de utilização de 99,85%, quando a taxa de chegada é de 0,10 msg/ms e estabiliza em 99,98% a partir de 0,12 msg/ms. A taxa de utilização da camada *Network* WIFI cresce de 44,10% para 97,35% quando a Taxa de Chega está na faixa de 0,07 msg/ms a 0,10 msg/ms. A variação na taxa de utilização representa um crescimento é de 120,75%. Conforme a Figura 4(c), o MRT cresce demora mais a aumentar, mesmo com Taxas de Chegada mais

elevadas. O MRT cresce mais lento e chega ao máximo de 618 ms, sendo 33,62% menor do que na Configuração A. A probabilidade de descarte é quase nula e só começa a crescer quando a taxa de chegada é maior do que 0,08 msg/ms. A probabilidade de descarte chega ao máximo de 55,01% na Configuração B e é 21,41% menor do que na Configuração A. Comparando as duas configurações é possível observar o aumento da capacidade de processamento da camada *Edge* RSU melhora significativamente o desempenho do sistema.

Na Configuração C a camada *Edge* RSU passa a trabalhar com 4 nós e na Configuração D trabalha com 5 nós. O incremento na quantidade de nós permite que o crescimento na taxa de utilização seja mais suave do que o observado na Configuração B. A saturação ocorre com taxa de chegada a cima de 0,14 msg/ms para a Configuração C e com taxa de chegada a cima de 0,16 msg/ms na Configuração D. Na camada *Edge* RSU, a Configuração C possui taxa de utilização inicial de 8,33% e chega a 99,41%. Na configuração D, a taxa de utilização inicia em 6,67% e chega ao máximo de 95,59%. Em relação a camada *Network* WIFI, a Configuração C apresenta leve crescimento na taxa de utilização com taxa de chegada a partir de 0,10 msg/ms até saturar quando a Taxa de Chega é de 0,15 msg/ms. A Configuração D apresenta crescimento quase linear e satura com taxa de chegada a cima de 0,16 msg/ms. A Figura 4(c) mostra que o crescimento do MRT é compatível com o crescimento observado camada *Network* WIFI. As Configurações C e D possuem MRT máximo de 459 ms e 368 ms, respectivamente. Em comparação com a Configuração A, as Configuração C possui MRT 50,70% melhor do que a Configuração A e a Configuração D possui 60,47%. A Configurações C possui MRT máximo de 459 ms, onde é 50,70% melhor do que a Configuração A. Da mesma forma, a Configuração D possui o melhor MRT das quatro configurações e chega ao máximo de 368 ms. Em comparação com a Configuração A, o MRT da Configuração D é 60,47% melhor. Na Figura 4(d), a Configuração D apresenta a menor probabilidade de descarte, que chega ao máximo de 28,31% e é 59,56% menor do que na Configuração A.

7. Conclusão

Este trabalho propôs um modelo de *Stochastic Petri Net* para avaliar o desempenho de VANETs com RSUs, onde avaliou métricas como taxa de utilização das camadas, MRT e probabilidade de descarte. No Cenário 1, a capacidade da camada *Network* WIFI variou e a capacidade da camada *Edge* RSU permaneceu fixa. No Cenário 2, a capacidade da camada *Network* WIFI permaneceu fixa e a capacidade da camada *Edge* RSU variou. A partir do experimento podemos concluir que no Cenário 1, a Configuração D apresenta melhores resultados, pois em ambas as camadas a maior utilização das máquinas e a saturação ocorrem somente com taxas de chegada elevadas. A Configuração D possui MRT máximo de 368 ms e probabilidade de descarte máxima é de 28,31%. A Configuração C apresenta o mesmo MRT máximo de 368ms, porém a probabilidade de descarte é 40,29%, sendo 42,32% maior do que na Configuração D. De forma geral, a camada *Network* satura rápido quando máquinas de baixa capacidade, ao passo que a camada *Edge* RSU fica subutilizada.

No Cenário 2, a Configuração D também é a que apresenta melhores resultados e são similares aos da Configuração D no Cenário 1. Todavia o MRT máximo da Configuração D é 368 ms e não coincide com o MRT máximo da Configuração C, que é 459 ms, como ocorre no Cenário 1. A Configuração C possui MRT 24,73% maior do que a Configuração D. Observa-se que a camada *Edge* RSU satura com baixas taxas de

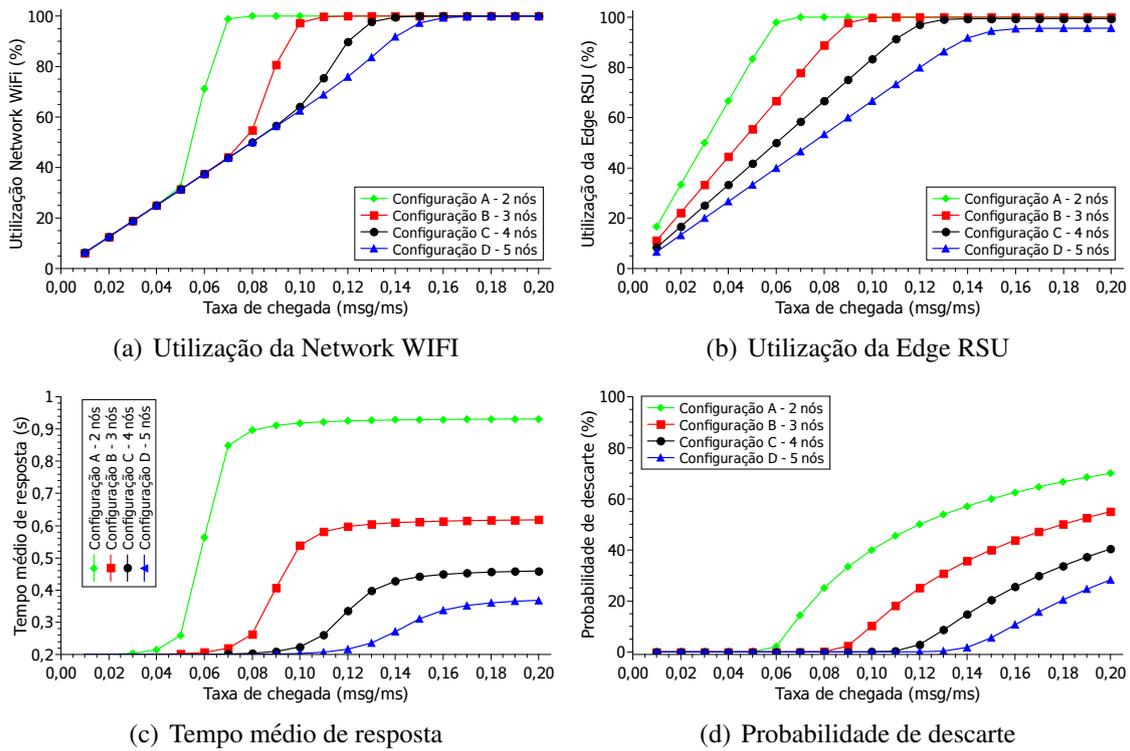


Figura 4. Métricas resultantes do Cenário 2, considerando a variação na quantidade de nós (máquinas) da camada *Edge RSU*, cada um com três núcleos. A camada *Network WiFi* é constante com oito nós, cada um com dois núcleos.

chegada, quando utiliza máquinas de baixa capacidade. Desta forma, no momento que a camada *Edge RSU* satura, ocorre um salto na taxa de utilização da camada *Network*, fazendo que fique saturada devido ao processamento e descarte de mensagens. Assim, a Configuração C do Cenário 1 possui a melhor relação entre desempenho e custo de implantação. Como trabalhos futuros, pretende-se estender o modelo incluindo o envio de dados a partir dos veículos, bem como acrescentar a avaliação de métricas disponibilidade e confiabilidade.

Referências

- Bagrodia, R. L. and Shen, C.-C. (1991). Midas: Integrated design and simulation of distributed systems. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 17(10):1042.
- Casanova, H., Giersch, A., Legrand, A., Quinson, M., and Suter, F. (2013). Simgrid: a sustained effort for the versatile simulation of large scale distributed systems. *arXiv preprint arXiv:1309.1630*.
- Dobre, C., Pop, F., and Cristea, V. (2008). A simulation framework for dependable distributed systems. In *2008 International Conference on Parallel Processing-Workshops*, pages 181–187. IEEE.
- Hirofuchi, T., Lebre, A., and Pouilloux, L. (2015). Simgrid vm: Virtual machine support for a simulation framework of distributed systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 6(1):221–234.

- Hussain, S. A., Khan, N. A., Sadiq, A., and Ahmad, F. (2018). Simulation, modeling and analysis of master node election algorithm based on signal strength for vanets through colored petri nets. Neural Computing and Applications, 29:1243–1259.
- Junior, A. L., Matos, R., Silva, B., and Maciel, P. (2017). Exponential modelling for supporting vanet infrastructure planning. pages 86–91. IEEE Computer Society.
- 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.
- MODCS (2021). Mercury tool.
- Motor1 (2021). Como estão as vendas de carros em 2021 em comparação com 2019 e 2020?
- Oliveira, D., Matos, R., Dantas, J., Ferreira, J., Silva, B., Callou, G., Maciel, P., and Brinkmann, A. (2017). Advanced stochastic petri net modeling with the mercury scripting language. In Proceedings of the 11th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, pages 192–197.
- Raskar, C. and Nema, S. (2022). Metaheuristic enabled modified hidden markov model for traffic flow prediction. Computer Networks, 206:108780.
- Santos, L., Cunha, B., Fé, I., Vieira, M., and Silva, F. A. (2021). Data processing on edge and cloud: a performability evaluation and sensitivity analysis. Journal of Network and Systems Management, 29(3):1–24.
- Shah, A. F. and Mustari, N. (2017). Modeling and performance analysis of the ieee 802.11p enhanced distributed channel access function for vehicular network. pages 173–178. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Verma, S., Ghazel, M., and Berbineau, M. (2021). Model-based dependability evaluation of a wireless communication system in a virtually coupled train set. volume 54, pages 179–186. Elsevier B.V.
- WIRE, B. (2018). U.s. autonomous car market 2018-2023 - there will be some 20.8 million autonomous vehicles in operation in the u.s. by 2030 - researchandmarkets.com.
- Zhou, M., Han, L., Lu, H., and Fu, C. (2020). Distributed collaborative intrusion detection system for vehicular ad hoc networks based on invariant. Computer Networks, 172.