

# An Urban Traffic Management System based on Vehicle Cooperation

Thiago S. Gomides, Robson E. De Grande, *Senior Member, IEEE*, Rickson S. Pereira, Rodolfo I. Meneguette, Fernanda S. H. de Souza e Daniel L. Guidoni

**Abstract**—The next generation of smart cities will rely on Intelligent Transport Systems (ITSs) due to the increased complexity and dynamism of traffic caused by continuous urbanization and population growth. The traditional techniques to deal with these challenges are expensive and have a great impact on people's lives and, in this scenario, the introduction of computational and technological solutions is necessary. In order to minimize the problems caused by congestion in urban centers, we present Let Me Know!, a traffic management system inspired by the communication among vehicles that allows the request and availability of information related to vehicular traffic. The vehicles request information in order to update a distributed database containing momentary analyzes of road traffic. Through extensive performance analysis, we show our system's ability to reduce traffic congestion with a low impact on the network.

**Index Terms**—Vehicular Networks, Communication, Traffic Jams.

## I. INTRODUÇÃO

Os esforços governamentais para reduzir a desproporcionalidade entre a capacidade rodoviária disponível e a demanda por espaço causada pelo aumento do fluxo de veículos nas grandes cidades têm sido alvo de discussões recentes. Anualmente, países desenvolvidos e em desenvolvimento investem bilhões de dólares em apoio a projetos para expansão das rodovias, visando reduzir a ocorrência dos congestionamentos. No entanto, a ampliação da infraestrutura das estradas como medida única contribui para agravar os problemas relacionados ao trânsito [1], em razão do fenômeno de Demanda Induzida. A Demanda Induzida pode ser resumida em uma premissa única: se os esforços compreenderem apenas na ampliação da infraestrutura urbana disponível, o número de motoristas aumentará rapidamente para corresponder a essa nova capacidade [2], portanto, tais ampliações tornam-se ineficazes. Os impactos dos congestionamentos, sem nenhuma ação para a sua redução, trazem graves problemas, como aumento da poluição do ar, perda de produtividade, estresse, consequências financeiras e ambientais e fatalidades nas estradas [3].

Devido à complexidade e dinamismo do tráfego, é necessário implementar um conjunto de ações coordenadas capazes de proporcionar eficiência no controle e mitigação do problema de congestionamento [4], [5], [6]. Neste cenário,

governos, ambientalistas e pesquisadores buscam por soluções alternativas, como o melhor uso da infraestrutura urbana existente, alternativas ecológicas para os modais de transporte, incentivos ao uso do transporte público e as caronas solidárias e, principalmente, as soluções inteligentes e coordenadas [7]. As soluções inteligentes contribuem com o surgimento e o uso de ferramentas tecnológicas que são alternativas eficientes para minimizar os efeitos do congestionamento. Nesse cenário, os Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS) por meio do Sistemas de Gerenciamento de Tráfego (SGT) desempenham um papel crucial [8], [9]. Os SGTs visam garantir e ampliar a utilização da rede viária, melhorando o tráfego e proporcionando um trânsito mais seguro [10], [9]. Para isso, os SGTs utilizam tecnologias de comunicação e computação para agregar dados relacionados à infraestrutura da cidade e ao comportamento dos usuários. Nesse sentido, faz-se necessário a implantação de mecanismos capazes de identificar congestionamentos de tráfego e formas de minimizá-los através do cálculo de rotas alternativas para veículos.

Com a rápida e constante ascensão da indústria automotiva, os SGTs tem apresentado uma evolução em seu desempenho, principalmente, com a utilização dos veículos conectados/autônomos e as infraestruturas urbanas inteligentes [11]. Essas tecnologias se tornam cada vez mais acessíveis por meio das redes veiculares (*Vehicular Ad hoc Networks (VANETs)*), conforme mostrado em [12], [4], [5], [13]. Motivados pelo desenvolvimento de SGTs que utilizam protocolos de comunicação de VANETs, apresentamos An Urban Traffic Management System based on Vehicle Cooperation. A abordagem proposta inspira-se na capacidade de processamento e comunicação sem fio disponível nas redes veiculares que permitem que os veículos atuem como agentes inteligentes. Assim, os agentes inteligentes são capazes de solicitar e disponibilizar informações relacionadas às suas visualizações de tráfego. O processo de solicitação e disponibilização denomina-se Disseminação Colaborativa de Informações, que atua em (i) na construção de um base de dados distribuída contendo informações sobre o tráfego de veículos nas vias e (ii) na criação de uma forma coordenada para que os veículos sejam capazes de executar a comunicação de dados com um baixo impacto para a rede de comunicação. A base de dados distribuída se refere ao fato de que as comunicações são feitas de forma distribuída entre os veículos da rede na criação de uma base de dados em cada veículo, não necessitando de um sistema centralizado de armazenamento e controle. Considerando as informações sobre as condições de tráfego recebidas por veículos vizinhos, os veículos realizam o cálculo de uma nova rota de menor custo. A partir da análise de desempenho realizada, fica

Thiago S. Gomides, Daniel L. Guidoni and Fernanda S. H. de Souza, Department of Computer Science, Federal University of Ouro Preto, Brazil (e-mail: gomides, guidoni, fsumika@ufop.edu.br)

Robson E. De Grande, Department of Computer Science, Brock University, Canada (e-mail: rdegrande@broku.ca)

Rickson S. Pereira, Rodolfo I. Meneguette, Institute of Mathematics and Computer Science, University of São Paulo (e-mail: meneguette@icmc.usp.br)

evidente a capacidade da abordagem proposta em minimizar os efeitos do congestionamento de tráfego com baixo impacto na rede, atendendo às limitações apresentadas pelas soluções da literatura que dependem do uso de infraestrutura auxiliar de comunicação (*Roadside unit* (RSU)) ou de uma troca excessiva mensagens. O trabalho proposto foi comparado com trabalhos similares da literatura, possuindo melhores resultados sobre o tempo de viagem médio dos veículos. Além disso, a abordagem proposta reduz a quantidade de mensagens para a criação da base de dados distribuída, reduzindo a quantidade de colisões no acesso ao meio sem fio e aumentando a taxa de entrega de informações sobre o tráfego das vias.

As principais contribuições deste trabalho são: (i) Proposição de um novo Sistema de Gerenciamento de Tráfego veicular chamado *Let me Know!* (LMK!). O LMK! é um sistema totalmente distribuído que utiliza apenas a comunicação entre veículos nas trocas de mensagens, não necessitando de uma infraestrutura auxiliar de comunicação. (ii) Apresentação de um novo protocolo distribuído de comunicação para o compartilhamento de informações sobre o tráfego veicular chamado de Disseminação Colaborativa de Informações (DCI). O DCI é dividido em 4 algoritmos: Solicitação da Informação, Recebimento e Processamento da Solicitação, Resposta e Recebimento da Resposta. (iii) Simulações em mapa rodoviário real e com diferentes parâmetros para avaliar o desempenho das soluções.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A seção II apresenta as soluções da literatura. A seção III apresenta nossa solução proposta: *Let Me Know!*. A seção IV detalha a Disseminação Colaborativa de Informações. A seção V descreve a análise de desempenho. Por fim, a Seção VI conclui o artigo e apresenta as direções dos trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nos últimos anos, diversos trabalhos da literatura abordaram o desenvolvimento de novas soluções para gerenciamento de tráfego inspirados nas VANETs [14], [4], [15]. Estas aplicações tem por objetivo reduzir os congestionamentos de tráfego com baixo impacto nas infraestruturas urbanas através da utilização de novas técnicas e tecnologias de comunicação. Portanto, entre os SGTs projetados na centralização do processamento e gerenciamento de tráfego, destacamos o *static - Next Road Rerouting (s-NRR)* [14]. O *s-NRR* utiliza dispositivos inteligentes, como *induction loops*, semáforos inteligentes, infraestrutura auxiliar de sensoriamento entre outros, conectados aos centros de controle de tráfego e infraestrutura das cidades para o gerenciamento dos congestionamentos. Para isso, as interseções das cidades recebem pelo menos um agente inteligente, como um semáforo inteligente ou uma *Roadside Unit* (RSU), que estabelece a comunicação entre o centro controle de trânsito e os veículos. Além disso, cada agente inteligente é conectado a um *induction loop* que realiza a detecção das variações do fluxo de veículos. Sempre que o fluxo de tráfego cresce, os agentes inteligentes devem reportar ao servidor central e o servidor central calcula novas rotas para veículos que trafegam em vias próximas aos congestionamentos.

Em [4] os autores apresentam uma abordagem de SGT distribuída chamada FIRE-NRD: A fully-distributed and Vanet-

based Traffic Management System for Next Road Decision. O FIRE-NRD é um sistema que auxilia no processo de detecção e classificação dos congestionamentos e no redirecionamento de veículos. Para isso, cada veículo coleta e dissemina as informações dos seus deslocamentos com sua vizinhança imediata (*1-hop*) sempre que as variações no fluxo são detectadas. O FIRE-NRD também introduziu uma nova abordagem para a análise do deslocamento dos veículos que considera a relação entre o tempo esperado para a viagem sobre o tempo de fato percorrido pelo veículo. A partir das informações recebidas, os veículos calculam novas rotas que sejam capazes de balancear o tráfego rodoviário, evitando o crescimento e o surgimento de novos congestionamentos. Por fim, o FIRE-NRD determina que o processo de escolha de novas rotas ocorra durante todo o trajeto e sempre que uma decisão de "*next road*" deve ser realizada.

O *Preventing traffic congestion through a fully-Distributed Rerouting Algorithm* (PANDORA) [15] concentra-se na descentralização da operação de um SGT. Durante as viagens, os veículos do PANDORA analisam os seus deslocamentos considerando as métricas propostas no Highway Capacity Manual (HCM) [16], [17]. Em intervalos predefinidos, os veículos compartilham as análises dos seus deslocamentos, e este compartilhamento é feito considerando um protocolo de comunicação oportunista para disseminação do conhecimento que fornece conteúdo flutuante com base na localização geográfica. Os autores, para isso, dividem a cidade em *critical areas*, ou seja, áreas com maior ocorrência dos congestionamentos onde o PANDORA realiza o gerenciamento do tráfego veicular. Os veículos que deslocam-se dentro de uma *critical area* recebem o tempo de viagem de todas as estradas dentro da mesma área e, a partir dos tempos de viagens recebidos, periodicamente, os veículos calculam uma nova rota. Destaca-se que para evitar o redirecionamento do congestionamento para uma outra região da cidade, o PANDORA utiliza um algoritmo de redirecionamento não-determinístico.

O *Let Me Know!* se diferencia dos trabalhos anteriores por atuar de forma totalmente distribuída, sendo capaz de reduzir a carga da rede e garantir a colaboração no compartilhamento das informações de tráfego entre os veículos. Nesse sentido, o *Let Me Know!* visa superar as seguintes limitações encontradas nos trabalhos da literatura: (i) ausência de mecanismos para o controle do uso do canal de comunicação, (ii) ausência de protocolos de comunicação inteligentes capazes de suprimir solicitações desnecessárias e (iii) ausência de protocolo de comunicação com alta taxa de entrega de pacotes.

## III. LET ME KNOW! (LMK!)

O sistema de gerenciamento de tráfego proposto neste trabalho tem como principal objetivo minimizar os impactos causados pelos congestionamentos através da cooperação entre os veículos na disseminação de informações, auxiliando na tomada de decisão e na redução do uso do meio sem fio. Para isso, o **Let Me Know!** permite que os veículos solicitem e disponibilizem os tempos de viagens das vias urbanas (tv) e os armazenem em seus bancos de dados. A solução utiliza-se de um mecanismo de comunicação colaborativa e distribuída,

onde não é necessário o uso de infraestrutura auxiliar de comunicação/processamento na troca de dados. Além disso, o projeto da solução considera um protocolo de comunicação eficiente que permite que os veículos compartilhem as informações e, ao mesmo tempo, evitem problemas como a sobrecarga no canal de comunicação e o *Broadcast storm* [18], [19]. As principais tarefas do **Let Me Know!** incluem solicitar e compartilhar informações, processo realizado pelo protocolo de **Disseminação Colaborativa de Informações (DCI)** e a tomada de **Decisão** onde uma nova rota é escolhida, como mostrado na Figura 1.

O **Let Me Know!** executa a Disseminação Colaborativa de Informações em turnos, ou seja, em períodos de tempo ( $\omega$ ). Os veículos inicializam  $\omega$  e quando  $\omega = 0$  os veículos solicitam as informações necessárias para a tomada de decisão. Além disso, após a execução do DCI, cada veículo deve possuir informação suficiente sobre as condições de tráfego em sua vizinhança em seu respectivo banco de dados para a tomada de decisão. A tomada de decisão é executada em todos os turnos e é responsável por encontrar rotas alternativas com menores congestionamentos. Os veículos calculam uma nova rota por meio de um algoritmo de caminho de custo de viagem mais curto, onde o custo do caminho está relacionado com o congestionamento das vias. O LMK! utiliza o algoritmo de Dijkstra para o cálculo de caminho mais curto. Os veículos utilizam a nova rota recém-calculada para guiar o restante da viagem. O processo apresentado na Figura 1 é executado por todos os veículos durante suas viagens. Adicionalmente, para o desenvolvimento do sistema Let Me Know!, foram considerados os modelos dos dispositivos veiculares, rede e comunicação, descritos a seguir.

**Modelo dos dispositivos veiculares.** Os dispositivos veiculares empregam os seguintes recursos: *On-Board Unit* (OBU), Sistema de Posicionamento Global (GPS), interface de comunicação veicular IEEE 802.11p e mapas digitais com informações detalhadas sobre a cidade como características do segmento viário, dimensões, número de pistas, entre outras. Além disso, cada veículo também implementa um banco de dados ( $\Psi$ ), que armazena os tempos de viagens dos segmentos rodoviários que foram observados pelo veículo ou recebidos. A OBU é capaz de identificar a falta de informações no banco de dados e solicitá-las quando necessário. Além disso, a OBU notifica os motoristas sobre sugestões de novas rotas.

**Modelo da rede.** O ambiente VANET é representado por um grafo direcionado e ponderado  $G = (V, E)$ , em que  $V$  e  $E$  representam, respectivamente, as interseções entre as junções (esquinas) e as vias. O conjunto  $V$  (vértices) é descrito por  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n-1}\}$ , onde  $n$  representa a quantidade de interseções entre junções da malha viária (esquinas entre vias), e o conjunto  $E$  (arestas) é descrito por  $E = \forall(v_i, v_j)$ . Cada aresta  $e_{ij} = (v_i, v_j)$  representa o segmento da via que liga as interseções  $v_i$  e  $v_j$ . O custo para percorrer o segmento  $e_{ij}$  é um custo associado  $w_{ij}$ . O conjunto de ponderação é representado por  $W = \{w_{ij}, i \neq j\}$  e  $w_{ij} \rightarrow R_+^*$ . Os veículos são representados pelos elementos do conjunto  $N = \{n_0, n_1, \dots, n_{m-1}\}$ , onde  $m$  é a quantidade de veículos nas vias. A quantidade de vértices do grafo  $G$  depende da malha viária considerada

(mapa das vias da cidade, representada na Figura 4) e a quantidade de veículos considerados é descrita na Tabela 1.

**Modelo de comunicação.** A comunicação ocorre através do meio sem fio utilizando um canal assíncrono, onde as perdas de pacotes, os ruídos e as posições dos veículos podem afetar a qualidade da transmissão. As mensagens trocadas na rede são classificadas com base nas informações que elas transportam: (i) informações de tráfego, que auxiliam os veículos no compartilhamento de seus tempos de viagens, e (ii) mensagens de solicitação, que auxiliam os veículos a solicitar informações de tráfego.

#### IV. DISSEMINAÇÃO COLABORATIVA DE INFORMAÇÕES (DCI)

O protocolo de Disseminação Colaborativa de Informações é o módulo do **Let Me Know!** que auxilia no processo de disponibilização de informações para a construção da base de dados. Utilizando apenas a comunicação distribuída, os veículos devem solicitar, periodicamente, os tempos de viagem dos veículos que viajam nas vias vizinhas. Por outro lado, os veículos que recebem essas solicitações devem disponibilizar seus tempos de viagem. Em outras palavras, os veículos colaboram no compartilhamento das suas análises de tráfego e solicitam as informações que faltam e suas bases de dados. Quando um veículo recebe o tempo de viagem de uma via vizinha ele armazena em sua base de dados ( $\Psi(tv_{e_{ij}})$ ) que é composta pelo tempo de viagem ( $tv$ ) da via ( $e_{ij}$ ). Assim, o custo total da viagem em  $e_{ij}$  é representado por  $w_{ij} = tv_{e_{ij}}$ . As vias armazenadas em  $\Psi$  são classificadas conforme sua disponibilidade, considerando um dos três estados: Indisponível ( $\times$ ), Disponível ( $\checkmark$ ) e Inconclusivo (?). O estado Indisponível ( $\times$ ) é utilizado para os casos em que a informação no banco de dados está desatualizada ou em falta. Uma informação é considerada desatualizada se ela não foi recebida no último turno ( $\omega$ ) para a execução da disseminação colaborativa de informações. O estado Disponível ( $\checkmark$ ) caracteriza a disponibilidade de informações no banco de dados, sendo estas obtidas por meio de solicitações próprias ou por algum dos veículos vizinhos. O estado Inconclusivo (?) é utilizado quando a informação solicitada não é recebida. É importante mencionar que um veículo pode receber/armazenar uma mensagem de resposta destinada para um veículo vizinho, suprimindo a sua própria solicitação.

Exemplificamos na Figura 2 como as informações solicitadas são armazenadas pelos veículos no DCI, considerando os tempos  $t_0$  e  $t_1$  e o intervalo entre  $t_2$  para  $t_{10}$ . O nó  $n_0$ , marcado pelo triângulo roxo e de cor branca, inicia em  $t_0$  o processo de solicitação de informações. Observe que na área avaliada todos as vias possuem o estado Indisponível ( $\times$ ) na base de dados  $\Psi$  do veículo  $n_0$ ; em outras palavras, nenhuma informação está disponível para  $n_0$ . Assim,  $n_0$  solicita os tempos de viagem das vias adjacentes à sua via. Em  $t_1$ , na Figura 2(b),  $\Psi_{n_0}$  é atualizado com informações recebidas, alterando os estados das vias de Indisponível ( $\times$ ) para Disponível ( $\checkmark$ ). Além disso, para as vias solicitadas sem resposta o estado foi alterado de Indisponível ( $\times$ ) para Inconclusivo (?). Na Figura 2(c) durante o intervalo entre  $t_2 \sim t_{10}$  o conjunto de veículos (na cor

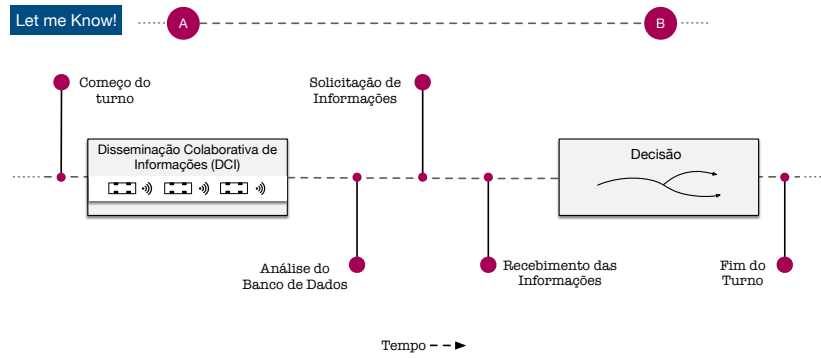


Fig. 1. Execução do sistema LMK!. Os veículos executam a disseminação colaborativa de informações para disponibilizar informações sobre o tempo de viagem das vias. As informações recebidas são armazenadas em um banco de dados e, posteriormente, são utilizadas para verificar se existem rotas alternativas.

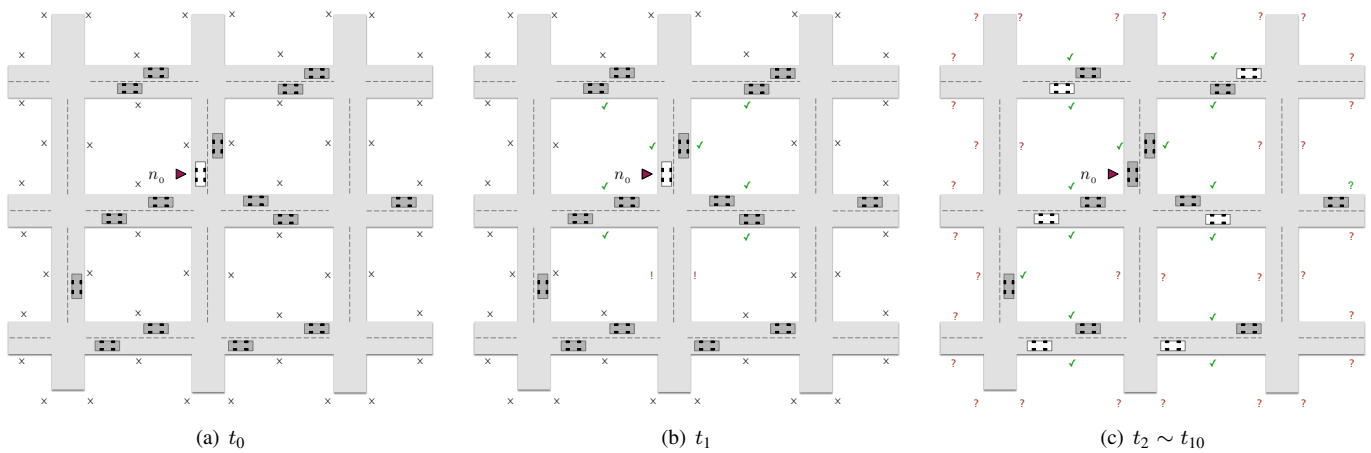


Fig. 2. Colaboração na construção do conhecimento. As três figuras ilustram a execução da solicitação de informação pelo veículo indicado no rótulo  $n_0$ . O veículo solicita informações sobre o tempo de viagem das vias adjacentes.

branca) solicitou mais informações, alterando o estado de mais vias em  $\Psi_{n_0}$ . Neste caso, o veículo  $n_0$  recebeu, devido a sua proximidade geográfica, a resposta de requisições realizadas por outros veículos. Destaca-se que o estado Inconclusivo (?) representa dois cenários: (i) a falta de informação causada pela inexistência de veículos viajando em uma determinada via ou (ii) a falta de informação causada por problemas no canal de comunicação, como por exemplo, colisões de pacotes.

Descrivemos formalmente o protocolo DCI através do fluxograma na Figura 3, onde a disseminação colaborativa de informações é dividida em quatro procedimentos/fases, sendo: **Solicitação (S)**, **Recebimento e Processamento (RP)**, **Resposta (R)** e **Recebimento da Resposta (RR)**. Os procedimentos **S** e **RR** descrevem o processo de requisição dos tempos de viagens cujo objetivo é manter os bancos de dados atualizados para a tomada de decisão. Por outro lado, os procedimentos **RP** e **R** são executados quando uma mensagem de solicitação de informações é recebida e deve ser respondida. Observe que a interação entre os pares de módulos **S–RP** e entre **R–RR** é realizada através do canal de comunicação sem fio utilizando o IEEE 802.11p.

Durante o processo de **Solicitação (S)**, o DCI deve garantir o uso controlado do canal de comunicação através do controle

do número de solicitações realizadas. Para isso, dois conceitos são introduzidos: ( $\omega$ ) – turno de solicitação e ( $\Phi$ ) – limiar de conhecimento. ( $\omega$ ) representa o tamanho do período que um determinado veículo deve aguardar para solicitar as informações, onde cada veículo possui um período diferente. Assim,  $\omega$  é representado por  $\omega \leftarrow \omega_{start\_time} + \omega_{delay}$ , onde  $\omega_{start\_time}$  é o intervalo base entre as execuções do DCI e  $\omega_{delay}$  é um atraso aleatório gerado para cada veículo. A variação de  $\omega$  tem como objetivo minimizar a ocorrência dos seguintes problemas: (i) permitir que o **Let Me Know!** reduza o número de colisões de pacotes, minimizando o número de solicitações simultâneas e (ii) auxiliar o **Let Me Know!** na redução do número de requisições através do reaproveitamento das informações solicitadas por veículos próximos. Por exemplo, considerando (ii), se um veículo recebeu informações de seu interesse solicitadas por veículos vizinhos, uma nova solicitação não será necessária. O limiar  $\Phi$ , entretanto, define a porcentagem mínima de informações que satisfaça os critérios de construção de  $\Psi$ . Em outras palavras,  $\Phi = 80\%$  significa que um veículo deve conhecer os tempos de viagens de 80% das vias adjacentes. Por exemplo, seja um veículo  $n_k$  que está viajando em uma via  $e_{ij}$  com 10 vias adjacentes e  $\Phi = 80\%$ ,  $n_k$  não solicitará  $tv$  se  $\Psi$  possuir informações sobre, pelo



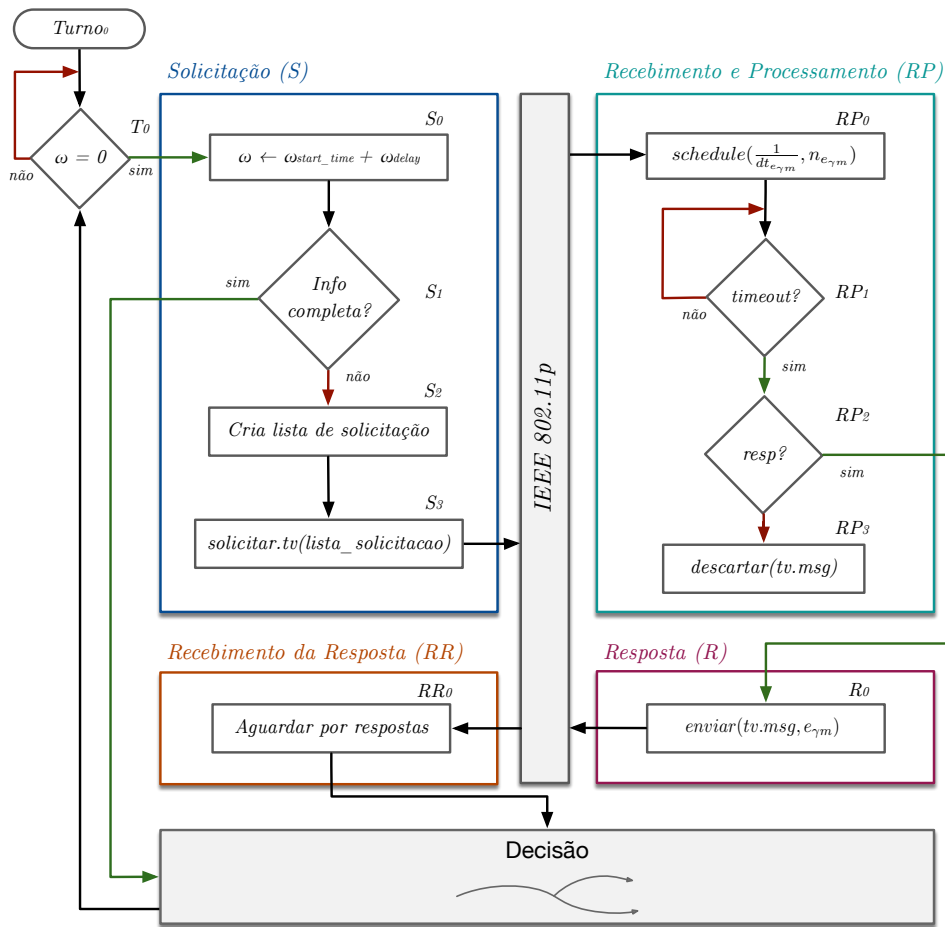


Fig. 3. Representação formal da Disseminação Colaborativa de Informações.

menos, 8 das 10 vias adjacentes. As vias adjacentes são calculadas utilizando o grafo  $G = (V, E)$  descrito no modelo da rede e que estão dentro do raio de comunicação do veículo.

Os veículos executam o protocolo DCI durante toda a viagem. Cada veículo aguarda até que seu turno de **Solicitação (S)** seja iniciado. Dessa forma, quando  $\omega = 0$ , o veículo inicia a sua fase de solicitação (marcador  $T_0$  – Figura 3). A primeira tarefa na fase de **S** é reinicializar o valor de  $\omega$ , agendando a próxima fase de solicitação (marcador  $S_0$  – Figura 3). O próximo passo é avaliar se o critério  $\Phi$  é satisfeito (marcador  $S_1$  – Figura 3), ou seja, se as informações em  $\Psi$  atende os critérios de disponibilidade de informações  $\Phi$ . Se as informações estiverem disponíveis, o veículo executará o processo de tomada de decisão e, por fim, aguardará até o próximo turno. Por outro lado, se as informações disponíveis não atenderem o critério  $\Phi$ , o veículo deve criar uma lista com as vias adjacentes que faltam em sua base de dados (marcador  $S_2$  – Figura 3). Para todos os segmentos contidos nesta lista, o veículo deverá solicitar o *tv*. Observe que o veículo encaminhará a mensagem de solicitação para todas as vias na lista de vias que faltam informação em sua base de dados. Neste caso, todos os demais veículos dentro do seu raio de comunicação irão receber as mensagens, entretanto, apenas os veículos que viajam nas vias solicitadas irão processá-la. Assim, o veículo executa o procedimento  $solicitar.tv(lista\_solicitacao)$  ( $S_3$  –

Figura 3.

Para o conjunto de veículos viajando em uma via  $e_{ij}$  que receberam uma solicitação de  $tv_{e_{ij}}$ , os procedimentos **RP** e **R** são executados para processar e responder à solicitação. Observe que se todos os veículos em  $e_{ij}$  responderem a solicitação, é possível que uma sobrecarga no canal de comunicação aconteça. Portanto, o procedimento **RP** tem como objetivo selecionar somente um veículo para responder à solicitação, onde este veículo é selecionado com base em seu tempo de viagem em  $e_{ij}$ . Em outras palavras, o veículo que tem maior  $tv_{e_{ij}}$ , **Veículo Mais Velho (VMV)**, acionará o procedimento **R**. VMV de uma via é o veículo responsável por responder a qualquer mensagem de solicitação recebida. Nesse sentido, os veículos em  $e_{ij}$  que receberem uma mensagem de solicitação devem identificar qual é o VMV da via. Para identificar o VMV, cada veículo deve agendar uma mensagem de resposta considerando um atraso que é inversamente proporcional a distância viajada em  $e_{ij}$  (marcador  $RP_0$  – Figura 3). Nesse sentido, quanto maior a distância viajada, menor será o atraso para a resposta. Este atraso é verificado constantemente em (marcador  $RP_1$  – Figura 3). Assim sendo, em  $RP_2$  – Figura 3, os veículos verificarão se o VMV respondeu à solicitação. Se o VMV respondeu, os veículos irão descartar as mensagens agendadas (marcador  $RP_3$  – Figura 3). Se até o momento o VMV não respondeu, significa que o veículo atual é o VMV e

ele deve responder à solicitação. O procedimento de resposta é realizado em (marcador  $R_0$  – Figura 3). Os veículos que solicitaram informações devem aguardar um intervalo por respostas (marcador  $RR_0$  – Figura 3) e prosseguir para a tomada de decisão. Cada solicitação realizada é aguardada pelos veículos durante um intervalo de 5 segundos e, caso a resposta não chegue, os veículos realizarão as decisões com o conhecimento disponível em  $\Psi$ , mesmo que não atendam ao critério  $\Phi$ . Por fim, todos os veículos que recebem uma resposta, por estarem no raio de comunicação do veículo emissor, devem atualizar os bancos de dados com essas informações.

## V. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Conduzimos a análise de desempenho do Let Me Know! a partir dos uso de simuladores de mobilidade urbana e da comunicação entre veículos, considerando parâmetros e características de um cenário urbano realístico. O SUMO 0.25 (*Simulation of Urban Mobility* [20]) cria e gerencia a mobilidade veicular. O OMNET++ 5.1.1 [21] e o Veins 4.6 [22] executam a simulação da comunicação. Além disso, os experimentos foram executados considerando um mapa realístico da região metropolitana da cidade de Los Angeles, EUA, obtido através da ferramenta OpenStreetMap (OSM), apresentado na Figura 4. A trajetória inicial de cada veículo é calculada de maneira aleatória, ou seja, a via inicial e final são escolhidas de maneira aleatória considerando todas as possíveis vias do mapa, e o trajeto entre as vias é realizado pelo caminho com a menor distância entre elas.

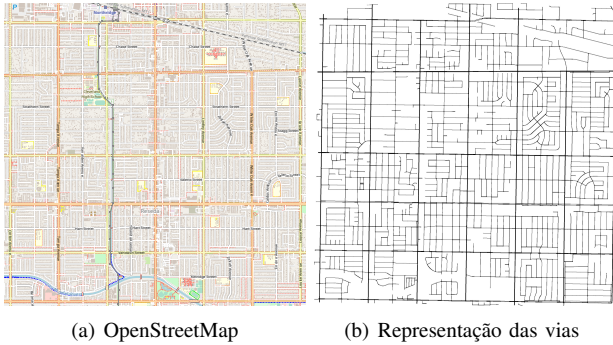


Fig. 4. Mapa da cidade de Los Angeles, EUA. Área de 25km<sup>2</sup>.

Os parâmetros utilizados nas simulações e nas execuções do sistema proposto são apresentados na Tabela I. Os parâmetros  $\omega_{start\_time}$ ,  $\omega_{delay}$  e  $\Phi$  impactam diretamente a eficiência do sistema, portanto, avaliamos diferentes valores para cada um deles. Através de um conjunto extenso de análises, obtivemos as configurações que maximizam o desempenho do DCI para o mapa da cidade Los Angeles, como apresentado na Tabela I. Destaca-se que a topologia das cidades é um fator que impacta diretamente na escolha dos parâmetros, assim, número de vias, posições de semáforos e cruzamentos são características que podem promover resultados distintos em cada mapa. Para  $\omega_{start\_time}$  os valores 30, 60, 90 e 120s foram avaliados, onde  $\omega_{start\_time} = 60s$  maximiza o desempenho do sistema. Para o atraso  $\omega_{delay}$ , escolhemos um valor aleatório obtido do intervalo [1 – 10s]. Cada veículo calcula o seu atraso dentro

TABELA I  
CONFIGURAÇÕES DE SIMULAÇÃO.

| Parâmetros                | Valores                                |
|---------------------------|--|
| Quantidade de veículos    | 1250, 2500, 3750, 5000 e 6250 veículos |
| Frequência do canal       | 5.890e9 Hz                             |
| Modelo de propagação      | Two ray                                |
| Alcance de comunicação    | 300 m                                  |
| Modelo de antena          | Omnidirecional                         |
| Bit rate                  | 18 Mbit/s                              |
| PHY                       | IEEE 802.11p                           |
| MAC                       | EDCA                                   |
| $\omega_{start\_time}(s)$ | 30, <b>60</b> , 90 e 120               |
| $\omega_{delay}(s)$       | 1 ~ 10                                 |
| $\Phi(\%)$                | 70, <b>80</b> , 90 e 100               |

do intervalo proposto, minimizando as colisões e maximizando as taxas de entregas de pacotes. Os valores avaliados para ( $\Phi$ ) foram 70%, 80%, 90% e 100%, onde 100% significa que cada veículo precisa das informações de 100% das vias adjacentes à via atual. Portanto, quando necessário, os veículos devem solicitar as informações que faltam para satisfazer o critério  $\Phi$ . Durante as nossas análises, o valor mais significativo foi  $\Phi = 80\%$ .

As soluções FIRE-NRD, PANDORA e o s-NRR da literatura descritas na Seção II foram utilizadas na avaliação de desempenho deste trabalho. Além disso, o *Original Vehicle Mobility Trace (OVMT)* também foi considerado em nossas avaliações. Destaca-se que o OVMT considera sempre a menor rota dado um par origem-destino de vias e, portanto, não realiza disseminação de informação ou re-roteamento (tomada de decisão). O conjunto de métricas avaliadas incluem: (i) *Taxa de Supressão de Solicitações*: número de solicitações suprimidas devido a reutilização de informações. (ii) *Taxa de Resposta das Solicitações*: analisa a eficiência do LMK! na entrega de informações, o sucesso na entrega de informações é computado quando um veículo solicita informações de tráfego e recebe a resposta; não consideramos o caso em que não há veículos na via. (iii) *Mensagens transmitidas*: número de mensagens transmitidas para realizar o controle de congestionamento. (iv) *Colisão de pacotes*: o número de pacotes que sofreram colisões durante sua transmissão. (v) *Taxa de entrega*: o sucesso na entrega das mensagens. (vi) *Tempo de viagem*: tempo médio de viagem de todos os veículos. Os gráficos apresentados foram obtidos a partir de 33 simulações de cada cenário com um intervalo de confiança de 95%.

Na Figura 5, discutimos os resultados obtidos na avaliação dos mecanismos propostos no DCI para o controle e minimização das solicitações de informação. Na Figura 5(a), avaliamos a capacidade do sistema de minimizar o número de transmissões reutilizando informações sem qualquer impacto na eficiência do sistema. Observe que o aumento do número de veículos é proporcional ao aumento da demanda por informações, elevando o número de solicitações executadas e suprimidas. Para 1250 veículos, o mecanismo de reaproveitamento é capaz de atender à demanda por informações e, ao mesmo tempo, reduzir o número de solicitações em 23%, cerca de 1000 mensagens. Considerando 6250 veículos, a diferença entre as Solicitações e Supressões aumenta para cerca de 30%, o que representa cerca de 11.000 transmissões suprimidas.

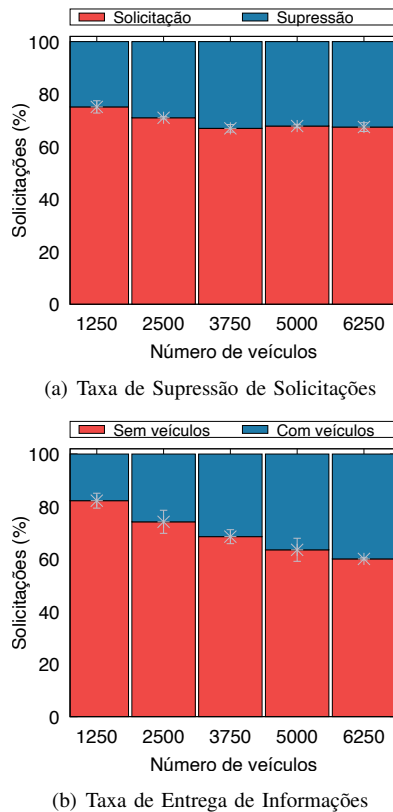


Fig. 5. Avaliação de resultados de performance.

Observe que a supressão ocorre quando as informações no banco de dados são atualizadas pelo mecanismo de reutilização de informações e o sistema pode garantir que  $\Psi$  atenda os critérios  $\Phi$ . Na Figura 5(b) apresentamos os resultados para a Taxa de Resposta das Solicitações, considerando vias com veículos e vias sem veículos durante a solicitação de informação. Destaca-se que nosso sistema pode entregar as respostas para as informações solicitadas com alta precisão. Esse desempenho acontece devido ao mecanismo de escolha do VMV do DCI. Portanto, se o VMV não puder enviar uma resposta devido algum motivo, como problemas nos sensores ou perda de sinal do GPS, o LMK! designará automaticamente o segundo veículo mais velho para responder à solicitação. Portanto, o processo para definir escolha do VMV será repetido até que as informações de tráfego sejam respondidas ao veículo solicitado, obtendo assim uma alta Taxa de Resposta das Solicitações. Em vias com veículos, ou seja, entre 20% à 40% das vias solicitadas, nosso sistema entrega todas as informações. De 80% à 60% das vias não tinham veículos durante o momento da requisição, implicando na falta de resposta para tais solicitações.

Na Figura 6 apresentamos as comparações realizadas entre o nosso sistema e as soluções da literatura considerando diferentes métricas e densidades de veículos na rede. Para as avaliações de rede, foram consideradas apenas as soluções distribuídas por apresentarem desafios semelhantes na disseminação de informações com o LMK!. Destaca-se que o PANDORA e o LMK! são soluções *Turn-by-turn*, o que

significa que suas execuções são realizadas de forma periódica, a cada 60 segundos. Por outro lado, o FIRE-NRD é uma solução proativa onde o protocolo de disseminação envia mensagens sempre que mudanças no fluxo de tráfego são detectadas. O principal desafio para soluções periódicas é garantir que as informações fornecidas sejam suficientes até o próximo turno do algoritmo. O principal desafio para as soluções proativas é minimizar a sobrecarga de mensagens na rede devido a disseminação frequente de informações. A Figura 6(a) apresenta os resultados em termos de mensagens transmitidas, ou seja, o custo de comunicação para cada estratégia. O eixo-x é a variação de densidade de veículos, enquanto o eixo-y é a média de mensagens enviadas em uma escala logarítmica  $10^6$ . PANDORA utiliza um alto número de mensagens para realizar o gerenciamento de tráfego, por volta de  $10^2$  mais mensagens que FIRE-NRD e LMK!. Este alto número de transmissões é resultado da classificação de congestionamento de PANDORA que usa comunicação periódica do tipo *beacons* em uma frequência de 2 segundos. Para 1250 veículos, existe uma diferença de 5% entre LMK! e FIRE-NRD. No entanto, conforme o número de veículos aumenta, a diferença entre LMK! e FIRE-NRD aumenta. Para 5000 veículos/km<sup>2</sup>, LMK! envia 30% menos mensagens em relação ao FIRE-NRD.

Na Figura 6(b) apresentamos a análise de colisão de pacotes para cada densidade veicular. Como apresentado na Figura 6(a), o número de colisões de pacotes apresentados pelo PANDORA é muito superior quando comparado ao LMK! e FIRE-NRD. Observe que as colisões de pacotes resultam das tentativas de uso simultâneo da rede, aumentando o número de pacotes descartados e contribuindo para a diminuição de performance do sistema. A disseminação proativa, utilizada no FIRE-NRD, dificulta o controle do número de colisões de pacotes. Assim, para 3750 veículos, PANDORA e FIRE-NRD possuem 98% e 88% mais colisões que o LMK!. Essa diferença persiste para todas as densidades de veículos avaliadas. Considerando 6250 veículos, PANDORA colide 96% mais mensagens que FIRE-NRD. FIRE-NRD possui 94% mais colisões que o LMK!. Por fim, a Figura 6(c), descreve a habilidade de cada protocolo na entrega de informações. Essa análise investiga a relação entre a porcentagem de mensagens enviadas e recebidas corretamente. O LMK! possui uma alta taxa de entrega de informações, acima de 95%, para todas as densidades. A eficiência na entrega de informações pelo LMK! acontece devido à utilização do parâmetro  $\omega_{delay}$  que minimiza as transmissões simultânea e, conseqüentemente, o problema de *broadcast storm* na fase de requisição. PANDORA possui uma taxa de entrega superior ao FIRE-NRD para todas as densidades.

Na Figura 6(d) descrevemos a performance em relação à análise de deslocamento. Essa avaliação contempla todas as soluções, inclusive a OVMT e a abordagem centralizada s-NRR. O resultado do aumento da densidade veicular é o surgimento de mais pontos de congestionamento e, conseqüentemente, maiores valores para o tempo de viagem. Todas as soluções descrevem um comportamento semelhante para a menor densidade de veículos. O FIRE-NRD e LMK!, considerando apenas as informações locais, apresentam um desempenho

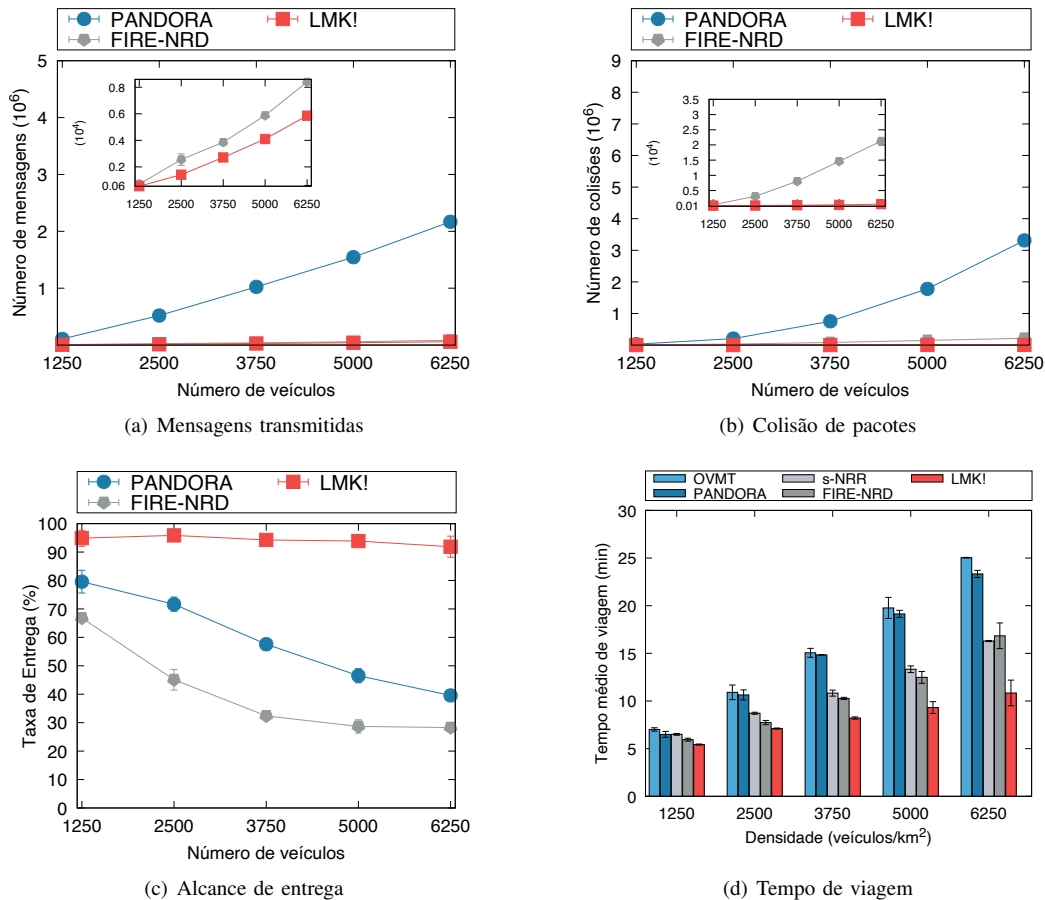


Fig. 6. Avaliação de resultados de performance.

melhor do que o *s-NRR*, que utiliza um mecanismo de controle de congestionamento com uma visão global da rede. Considerando 5000 veículos, as soluções OVMT, PANDORA, *s-NRR* e FIRE-NRD aumentam o tempo de viagem em 52%, 51%, 30%, e 25% em comparação com LMK!.

## VI. CONCLUSÃO

Esse trabalho propôs o Let Me Know!, An Urban Traffic Management System based on Vehicle Cooperation. A solução apresentou conceitos e introduziu uma nova técnica de disseminação colaborativa de informações que possui como objetivo tornar informações do tráfego veicular acessíveis para o serviço de gerenciamento de tráfego. Os veículos constantemente analisam os seus bancos de dados para garantir que os critérios de disponibilidade de informações sejam atendidos. Sempre que o banco de dados não atende os critérios de disponibilidade, os veículos devem solicitar as informações e os veículos com as informações disponíveis devem disponibilizá-las. Toda informação coletada é utilizada na tomada de decisão que é realizada de forma distribuída. Os resultados obtidos através de uma extensa análise mostraram que o Let Me Know! é capaz de melhorar o fluxo do tráfego nos centros urbanos com um baixo impacto no meio de comunicação quando comparado a outras abordagens da literatura, como FIRE-NRD, NRR, e PANDORA. Os desafios que conduzem nossas pesquisas futuras incluem: implementação de um mecanismo/protocolo

que utiliza-se de técnicas *store-and-forward* cujo o objetivo é aumentar a disponibilidade das informações, a utilização de *traces* realísticos na avaliação de desempenho das soluções e a implementação de mecanismos de informação por demanda.

## AGRADECIMENTOS

This research was partially funded by the FAPESP (São Paulo Research Foundation) grant 2020/05126-6 and 2020/07162-0, FAPEMIG (Minas Gerais Research Foundation) grant APQ-02675-21.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Speck, *Understand Induced Demand*, pp. 64–65. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2018.
- [2] A. Downs, “The law of peak-hour expressway congestion,” *Traffic Quarterly*, vol. 16, no. 3, 1962.
- [3] S. Djahel, R. Doolan, G. M. Muntean, and J. Murphy, “A communications-oriented perspective on traffic management systems for smart cities: Challenges and innovative approaches,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 125–151, 2015.
- [4] T. S. Gómeides, M. L. Fernandes, F. Sumika Hojo de Souza, L. Villas, and D. L. Guidoni, “Fire-nrd: A fully-distributed and vanets-based traffic management system for next road decision,” in *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pp. 554–561, May 2019.
- [5] D. L. Guidoni, G. Maia, F. S. H. Souza, L. A. Villas, and A. A. F. Loureiro, “Vehicular traffic management based on traffic engineering for vehicular ad hoc networks,” *IEEE Access*, 2020.



- [6] T. S. Gomides, R. E. De Grande, A. M. de Souza, F. S. Souza, L. A. Villas, and D. L. Guidoni, "An adaptive and distributed traffic management system using vehicular ad-hoc networks," *Computer Communications*, vol. 159, pp. 317 – 330, 2020.
- [7] U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, "Intelligent Transportation Systems (ITS) Program." <https://www.fhwa.dot.gov/fastact/factsheets/itsprogramfs.cfm>, 2022.
- [8] M. N. O. Sadiku, N. Gupta, K. K. Patel, and S. M. Musa, *An Overview of Intelligent Transportation Systems in the Context of Internet of Vehicles*, pp. 3–11. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [9] H. Yuan and G. Li, "A survey of traffic prediction: from spatio-temporal data to intelligent transportation," *Data Science and Engineering*, vol. 6, pp. 63–84, 2021.
- [10] J. M. Sussman, *ITS: A Short History and a Perspective on the Future*, pp. 3–17. Springer US, 2005.
- [11] I. J. Cox and G. T. Wilfong, eds., *Autonomous Robot Vehicles*. Springer New York, 1990.
- [12] H. Shahwani, S. Attique Shah, M. Ashraf, M. Akram, J. P. Jeong, and J. Shin, "A comprehensive survey on data dissemination in vehicular ad hoc networks," *Vehicular Communications*, vol. 34, p. 100420, 2022.
- [13] K. Jurczenia and J. Rak, "A survey of vehicular network systems for road traffic management," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42365–42385, 2022.
- [14] S. Wang, S. Djahel, and J. McManis, "A multi-agent based vehicles re-routing system for unexpected traffic congestion avoidance," in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2541–2548, Oct 2014.
- [15] A. M. de Souza, N. L. S. da Fonseca, and L. A. Villas, "A fully-distributed advanced traffic management system based on opportunistic content sharing," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, 2017.
- [16] T. R. Board, *Proposed Chapters for Incorporating Travel Time Reliability into the Highway Capacity Manual*, ch. 36. Washington, DC: The National Academies Press, 2013.
- [17] B. J. Schroeder, "Part 5 - traffic operations," in *Highway Engineering* (D. J. Findley, B. J. Schroeder, C. M. Cunningham, and T. H. Brown, eds.), pp. 255 – 432, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [18] E. Feukeu and T. Zuva, "Dynamic broadcast storm mitigation approach for vanets," *Future Generation Computer Systems*, vol. 107, pp. 1097–1104, 2020.
- [19] A. Khan, A. A. Siddiqui, F. Ullah, M. Bilal, J. Piran, and H. Song, "Vp-cast: Velocity and position-based broadcast suppression for vanets," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–14, 2022.
- [20] P. A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wießner, "Microscopic traffic simulation using sumo," in *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 2575–2582, IEEE, Nov 2018.
- [21] A. Varga and R. Hornig, "An overview of the omnet++ simulation environment," in *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, Simutools '08, (ICST, Brussels, Belgium, Belgium)*, pp. 60:1–60:10, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [22] C. Sommer, R. German, and F. Dressler, "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, pp. 3–15, January 2011.



Science at Brock University, Canada.

**Thiago S. Gomides** is a Visiting Researcher in the Department of Computer Science at Brock University, Canada. He received his Master in Computer Science degree (2020) and Bachelor in Computer Science degree (2017) from the Federal University of São João Del Rei, Brazil. His research topics include urban mobility, vehicular networks, smart cities solutions, distributed system, and data communication. He has served as a visiting researcher through the Emerging Leaders in the Americas Program - ELAP (2019-2020) in the Department of Computer



**Rickson Simioni Pereira** is a Technologist in Systems Analysis and Development at the Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo (IFSP) in 2018. He is currently a regular Master in Computer Science student at the Post-Graduate Program at the Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho (UNESP), with an emphasis on the areas of intelligent transport and resource management in vehicular networks.



**Robson E. De Grande** is an Associate Professor in the Department of Computer Science at Brock University, Canada. He received his Ph.D. degree in Computer Science from the University of Ottawa, Canada, in 2012. His research interests include large-scale distributed and mobile systems, cloud computing, performance modelling and simulation, computer networks, vehicular networks, intelligent transportation systems, and distributed simulation systems, actively contributing in these areas. He has served as technical program and special session co-chair of several IEEE and ACM sponsored conferences, including IEEE/ACM DS-RT, ACM MobiWac, ACM DIVANet, and IEEE DCOSS International Workshop on Urban Computing.



urban computing. His line of research is in intelligent transport systems, vehicular networks, clouds, mobility management.

**Rodolfo Ipolito Meneguette** Bachelor of Computer Science from Universidade Paulista (UNIP) in 2006. Master of Computer Science from Federal University of São Carlos (UFSCar) in 2009. Doctor of Computer Science from Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) in 2013. Post-doctoral student from the University of Ottawa (UOttawa) in 2017. He is currently a professor at the Institute of Mathematical and Computer Sciences (ICMC) at the University of São Paulo (USP). Leader of the Internet of Things research group with a focus on



**Fernanda S. H. Souza** é Doutora em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, em 2013. Atualmente é Professora Associada em Ciência da Computação na Universidade Federal de Ouro Preto. Seus interesses de pesquisa incluem metaheurísticas, otimização combinatória, gerenciamento de tráfego e redes de comunicação.



**Daniel L. Guidoni** received his Ph.D. degree in computer science from the Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, in 2011. He was awarded the best doctoral thesis in Brazil considering the computer science theses. He is currently an Associate Professor with the Federal University of Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. His research interests include wireless networks, vehicular networks, IoT, Smart Cities, and communication protocols.