CoDeTMS: um sistema cooperativo e descentralizado para o monitoramento e a divulgação das condições de trânsito utilizando redes veiculares

Alan Lucas Silva Matias¹
Ticiana Linhares Coelho Da Silva²
Atslands Rego da Rocha³

Resumo: A capacidade de estimar, prever e apresentar as condições das vias se torna uma necessidade fundamental para aplicações que buscam monitorar tais condições, reduzir congestionamentos e diminuir tempos de viagens no trânsito de forma efetiva. Diante disso, este trabalho propõe o CoDeTMS, um sistema cooperativo e descentralizado que realiza o monitoramento e a divulgação das condições de trânsito por meio de uma rede veicular. Para apresentar o CoDeTMS de forma mais compreensível e mostrar a sua eficiência, realizam-se um estudo de caso e uma avaliação da rede através do *framework* Veins, o qual configura uma agregação do simulador de rede OMNeT++ com o simulador de tráfego SUMO.

Palavras-chave: Monitoramento do trânsito. Redes veiculares. V2I. VANET. Veins.

Abstract: The capacity to estimate, predict and show the conditions of the roads becomes a fundamental requirement for many applications that aim to monitor such conditions, reduce traffic jams and decrease travel time effectively. This paper proposes the CoDeTMS, a cooperative and decentralized system that performs the traffic monitoring and provides information about the traffic conditions to the drivers through a Vehicular Network. Aiming to present the CoDeTMS in a more understandable way and show the efficiency of CoDeTMS, a case study is conducted, as well as an evaluation of the network by using the Veins framework which is an aggregation of the network simulator OMNeT++ with the traffic simulator SUMO.

Keywords: Traffic monitoring. V2I. VANET. Vehicular network. Veins.

1 Introdução

De acordo com estudos recentes [1], somente na cidade de São Paulo, os custos gerados pelos congestionamentos no trânsito chegaram a R\$ 10 bilhões em 2012. Esses custos, comparados aos gerados em 2002, que somam cerca de R\$ 7 bilhões, mostram as crescentes despesas devido à ocorrência de congestionamentos nas vias. Além disso, os custos relacionados ao tempo perdido no trânsito subiram de R\$ 10,3 bilhões para R\$ 30,2 bilhões, no mesmo período, entre 2002 e 2012. Tais fatores contribuem diretamente para o aumento das emissões atmosféricas. Nesse sentido, segundo o Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (Inea) [2], estima-se que os veículos contribuem com cerca de 77% das emissões atmosféricas apenas na região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), incluindo o CO².

Diante dessas adversidades, torna-se de extrema importância o uso de sistemas de monitoramento e de gestão de trânsito para aliviar o fluxo nas vias. Embora já existam ferramentas para a realização do monitoramento do trânsito, os sistemas automatizados começam a surgir para aprimorar a atividade. Dentre esses

http://dx.doi.org/10.5335/rbca.2015.4646

¹ Graduando em Redes de Computadores, UFC, *Campus* Quixadá – Quixadá (CE) – Brasil. {lucasmatias@alu.ufc.br}

² Professora na Universidade Federal do Ceará, UFC, *Campus* Quixadá – Quixadá (CE) – Brasil. {ticianalc@ufc.br}

³ Professora na Universidade Federal do Ceará, UFC, *Campus* Pici – Fortaleza (CE) – Brasil. {atslands@ufc.br}

sistemas, as redes veiculares [6] têm recebido destaque, normalmente com o auxílio de um GPS [7], o qual é utilizado para definir a posição e a velocidade do veículo. Além dos sistemas que realizam o monitoramento do trânsito, são desenvolvidos sistemas capazes de divulgar as condições de trânsito para os condutores nas vias, tais como: Google Maps [4], uma ferramenta capaz de informar as condições de trânsito em tempo real sobre diversas vias em vários países, e a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) [5], que disponibiliza informações sobre as condições do tráfego de veículos em determinadas regiões da cidade de São Paulo em sua página web. Além disso, com a CET, os condutores dos veículos podem obter informações sobre o trânsito por meio do suporte via telefone. Entretanto, esses sistemas são dependentes de um elemento centralizador, responsável por agregar as condições do trânsito e divulgá-las para serem acessíveis mediante conexão com a Internet, ou, como no caso do CET, também por meio de uma rede pública de telefonia.

A capacidade de estimar, prever e apresentar as condições de trânsito se torna uma necessidade fundamental para aplicações que buscam monitorar, reduzir congestionamentos e diminuir os tempos de viagens no trânsito de forma efetiva. Para tal, o advento de redes veiculares (também conhecida como VANETs) [6] surge como uma nova proposta na qual vêm sendo desenvolvidas diversas pesquisas com o intuito de prover um melhor e mais inteligente funcionamento do trânsito. As redes veiculares oferecem novas formas de coletar e disseminar as informações de trânsito, podendo ocorrer por meio da comunicação entre veículos (Vehicle-to-Vehicle-V2V) e/ou entre veículo e infraestrutura (Vehicle-to-Infrastructure-V2I), em que a infraestrutura pode ser caracterizada como nós de rede que são geralmente fixados nas margens das estradas.

Em tal contexto, este artigo propõe o Cooperative and Decentralized Traffic Monitoring System (CoDeTMS), um sistema cooperativo que realiza o monitoramento e a divulgação das condições de trânsito de uma maneira totalmente descentralizada. Para isso, informações sobre o trânsito são obtidas por meio da comunicação V2I, na qual as unidades de acostamento, que correspondem à infraestrutura da rede, são responsáveis por estimar a densidade da via e calcular sua velocidade média com base no tempo (por exemplo, a cada 10 segundos). Por sua vez, as unidades de bordo, que são interfaces de rede montadas a bordo dos veículos, são responsáveis por participar da contagem de veículos nas vias e disponibilizar as condições das vias para seus usuários.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta os trabalhos relacionados; o conceito de redes veiculares é sistematizado na seção 3; a seção 4 apresenta o CoDeTMS; a seção 5 contempla um estudo de caso para melhor esclarecer o CoDeTMS; a seção 6 apresenta uma simulação que avalia a capacidade da unidade de acostamento; e a seção 7 oferece as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 Trabalhos relacionados

A maioria dos métodos existentes para realizar o monitoramento do trânsito ainda utiliza modelos com uma infraestrutura dedicada (por exemplo, sensores nas ruas e nos carros, câmera de vídeo, etc.) [7]. Entretanto, alguns métodos mais atuais tiram proveito do conceito de redes veiculares, o qual infere uma infraestrutura que pode, além de ser utilizada para a realização do monitoramento do trânsito, ser adaptada para aplicações que confiram auxílio à segurança nas vias, ou, até mesmo, para proporcionar entretenimento aos passageiros, como, por exemplo, acesso a internet durante uma viagem.

Dentre as propostas que utilizam redes veiculares, algumas abordam a arquitetura de comunicação V2I. Uma delas é o COTraMS [8], que apresenta uma arquitetura centralizada e uma arquitetura descentralizada. Em ambas as arquiteturas, é calculada a velocidade média das vias por meio de uma média harmônica, onde é necessário conhecer a velocidade dos veículos. Na arquitetura centralizada do COTraMS, as condições de trânsito são disponibilizadas através de uma interface implementada por meio da API do Google Maps, ou utilizando uma tabela de texto para usuários que não dispõem de recursos gráficos.

O Google Maps [4] [9] utiliza a localização dos seus usuários, que concordam em disponibilizá-la por meio do GPS de seus smartphones. Essa localização é enviada pela internet, geralmente via 3G. O Google Maps disponibiliza as condições de trânsito por meio da sua própria API. O Waze [13], uma aplicação de monitoramento de tráfego *on-line*, também utiliza o GPS para a coleta de informações sobre a unidade de bordo. O Waze disponibiliza as informações de trânsito em uma rede social que é formada por usuários do aplicativo, constando, nessa rede, a velocidade média das vias onde as informações foram coletadas.

O CoDeTMS utiliza uma arquitetura descentralizada, cuja vantagem está na facilidade e na capacidade de acessar os dados sobre as vias em tempo real. Além disso, o usuário não fica dependente de acesso a internet

para participar da rede veicular, como é o caso do Google Maps e do Waze, ou para ter acesso às condições de trânsito.

Há, também, trabalhos que utilizam a arquitetura de comunicação *ad hoc* ou V2V, como, por exemplo, o MobSampling [7], que faz uma amostragem da densidade de uma região predefinida e sob demanda. Já o CoDeTMS age de forma reativa e conhece toda a rede de ruas onde ele foi implementado. Outros sistemas operam de maneira reativa para detectar congestionamentos de modo inteligente, como é o exemplo do Coperative Traffic Congestion detECtion (CoTEC) [11]. O CoTEC é capaz de prover parâmetros que definem as características do congestionamento (por ex., localização, tamanho e intensidade do congestionamento) para os gerenciadores de tráfego. Entretanto, o CoTEC age de forma a remediar congestionamentos no trânsito, enquanto o CoDeTMS age oferecendo as condições das vias para os condutores dos veículos com o objetivo de prevenir a ocorrência de congestionamentos e diminuir os tempos de viagem.

3 Redes veiculares

Redes veiculares são redes formadas pela comunicação entre veículos automotores e entre veículos e equipamentos geralmente fixados nas margens das estradas [6]. As arquiteturas de redes veiculares definem a forma como a rede se organiza e como os nós se comunicam. Atualmente, existem três tipos de arquiteturas principais: *ad hoc* puro (*Vehicular Ad hoc NETwork – VANET*), infraestruturada ou híbrida, representadas na Figura 1.

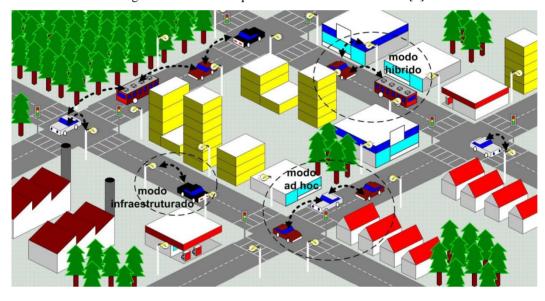


Figura 1: Cenário e arquiteturas de uma rede veicular [6].

Na arquitetura *ad hoc*, as unidades de acostamento se comunicam apenas entre si, sem auxílio de infraestrutura. A vantagem desse tipo de arquitetura é a facilidade de configuração da rede, e a desvantagem é que a conectividade da rede fica dependente do número de veículos. Além disso, uma grande densidade de veículos pode causar sobrecarga na rede. Já na arquitetura infraestruturada, são dispostas interfaces de rede estáticas mediante as quais as unidades de bordo podem se comunicar, ter acesso a serviços, ou, até mesmo, acessar a internet. A arquitetura infraestruturada tem a vantagem de aumentar a conectividade da rede, sanando, assim, os problemas de conectividade característicos da arquitetura *ad hoc*. Já a arquitetura híbrida busca agregar a arquitetura *ad hoc* e a arquitetura infraestruturada para prover uma rede mais dinâmica e inteligente [6].

3.1 Padrão para redes veiculares

Em 1999, os primeiros esforços para a padronização de redes veiculares tiveram início nos Estados Unidos, onde a Federal Communications Commision (FCC) alocou 75 MHz do espectro de frequências, na faixa de 5,9 Ghz, para aplicações Dedicated Short Range Communications (DSRC). Como representado na Figura 2, a

faixa DSRC é livre, porém licenciada, e apresenta canais específicos para os tipos de aplicações e tecnologias utilizadas, não sendo cobrada taxa pelo seu uso [6].

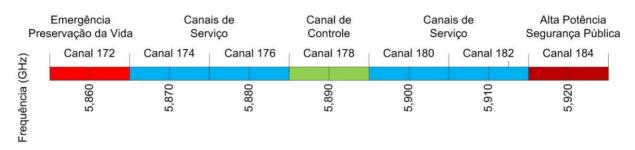


Figura 2: Faixa de frequência para aplicações DSRC [6].

Como pode ser visto na Figura 2, as aplicações DSRC operam em canais específicos, onde são separados quatro canais para serviço, um canal para mensagens de controle, um canal para emergência e preservação da vida e um canal de alta potência para segurança pública.

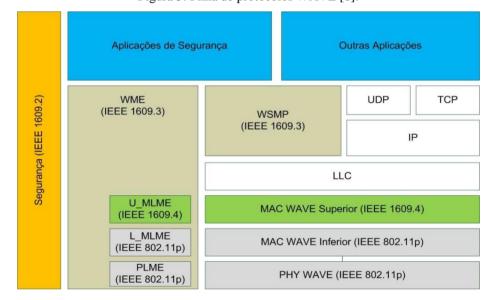


Figura 3: Pilha de protocolos WAVE [6].

Em 2004, iniciou-se a padronização das comunicações em redes veiculares por parte da IEEE dentro do grupo de trabalho IEEE 802.11, sendo o padrão conhecido como IEEE 802.11p WAVE. A arquitetura Wireless Access in the Vehicular Environment (WAVE) é definida em seis documentos: o (1) IEEE P1609.1, que especifica serviços e interfaces da aplicação de gerenciamento de recursos da arquitetura WAVE; o (2) IEEE P1609.2, que é responsável por definir formatos e processamentos seguros de mensagens; o (3) IEEE P1609.3, que contém especificações das camadas de rede e de transporte, incluindo o endereçamento dos nós e o roteamento; (4) o IEEE P1609.4, que define a operação de múltiplos canais na arquitetura WAVE, de acordo com as modificações necessárias no padrão IEEE 802.11; o (5) IEEE 802.11, que determina os padrões de acesso ao meio em um ambiente wireless; e o (6) IEEE 802.11p, que define as diferenças de acesso ao meio em relação ao padrão IEEE 802.11, para adaptar a comunicação em um ambiente WAVE [6]. A Figura 3 mostra a pilha de protocolos WAVE e indica onde cada definição se enquadra.

3.2 O protocolo WSMP

O protocolo WAVE Short Message Protocol (WSMP) [6], utilizado neste trabalho, torna-se uma opção totalmente viável à utilização dos protocolos TCP/UDP e IPv6 em ambientes que inferem uma arquitetura de comunicação WAVE. O WSMP apresenta maior eficiência nesse tipo de ambiente, uma vez que dispõe de baixa latência e oferece um serviço não orientado à conexão. Além disso, as mensagens WSMP podem ser enviadas em qualquer um dos canais DSRC, algo que não é possível pelo protocolo IP, que fica limitado apenas aos canais de serviço. O protocolo WSMP permite, ainda, que as aplicações controlem diretamente características da camada física, na qual se pode operar utilizando técnicas de acesso múltiplo aos canais, podendo especificar em que canal a mensagem será enviada e qual a potência de transmissão será utilizada para o envio. O protocolo WSMP permite o uso de endereço por difusão, além de fornecer o endereço MAC do dispositivo.

A função de encaminhamento de mensagens do protocolo WSMP obedece ao roteiro a seguir. Quando uma aplicação realiza o pedido de envio de uma mensagem WSMP, o WSMP verifica se o tamanho do pacote corresponde ao tamanho especificado pela MIB. Na sequência, a mensagem é repassada para a subcamada Logic Link Control (LLC). Já no que se refere ao destino, ao receber uma resposta por parte da LLC, o WSMP repassa a mensagem para a aplicação de destino baseado no identificar do serviço Provider Service Identifier (PSID) [6].

Neste trabalho, é utilizada a arquitetura WAVE, juntamente com o protocolo WSMP, uma vez que ambos são projetados para operar de forma eficiente em ambientes veiculares. Além disso, utilizar um padrão de comunicação IEEE 802.11 abre portas para novas aplicações em ambientes veiculares, não ficando restrito apenas às tarefas propostas neste trabalho.

4 Solução proposta: CoDeTMS

O CoDeTMS é composto por equipamentos a bordo dos veículos (unidades de bordo) e por equipamentos às margens das vias (unidades de acostamento), ambos portando uma interface de comunicação com o padrão IEEE 802.11p. Além disso, o CoDeTMS utiliza o protocolo WSMP para a realização do aviso do serviço e a coleta de dados sobre o trânsito.

Nas subseções 4.1 e 4.2, serão apresentadas as atividades realizadas, respectivamente, pelas unidades de acostamento e unidades de bordo dentro do CoDeTMS.

4.1 Unidades de acostamento

As unidades de acostamento são fixadas nas vias de acordo com o seu comprimento. Por exemplo, no caso de rodovias, que normalmente são bastante extensas, seriam necessárias mais de uma unidade de acostamento, separando, assim, a rodovia em segmentos, nos quais cada unidade de acostamento representaria um segmento da via. As unidades de acostamento têm seu Basic Service Set Identifier (BSSID) definido a partir do identificador da via. Caso haja a necessidade de mais de uma unidade de acostamento na via, essas unidades são nomeadas, agregando o nome da via com o segmento em que a unidade de acostamento está localizada. Por exemplo, um segmento com o nome "Ax" seria a identificação do segmento "x" na rua "A". Já para vias pequenas, uma unidade de acostamento é suficiente.

As funções das unidades de acostamento dentro do CoDeTMS são estimar a velocidade média das vias, disponibilizar as suas condições para as unidades de bordo e comunicar-se com as unidades de acostamento vizinhas, para que sejam conhecidas as condições das vias no entorno. Essas etapas realizadas pelas unidades de acostamento são descritas a seguir.

4.1.1 Estimar a velocidade da via

A estimativa da velocidade da via é obtida por meio de um modelo determinístico que relaciona a densidade e a velocidade na via. A vantagem de se utilizar um modelo determinístico está na sua simplicidade matemática e tratabilidade analítica [10]. A Tabela 1 mostra modelos utilizados para calcular a velocidade da via a partir de sua densidade.

Tabela 1: Modelos determinísticos [10].

| Modelo determinístico | Função | Parâmetros |
|-----------------------|---|---------------------------------------|
| Greenshields | $V = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right)$ | v_f , \mathbf{k}_j |
| Greenberg | $V=v_m \log \frac{k_j}{k}$ | v_m , k_j |
| Underwood | $V=v_f e^{-\left(\frac{k}{k_0}\right)}$ | v_f , k_0 |
| Northwestern | $V = v_f e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_0}\right)^2}$ | v_f , k_0 |
| Drew | $V = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^{n + \frac{1}{2}} \right]$ | v_f , \mathbf{k}_j , \mathbf{n} |
| Drake | $V = v_f e^{\frac{1}{2} \left(\frac{k}{k_j}\right)^2}$ | v_f , k_j |
| Pipes-Munjal | $V = v_f \left(1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^n \right)$ | v_f , \mathbf{k}_j , \mathbf{n} |

O modelo de Greenberg é incapaz de prever a velocidade com densidades muito baixas, uma vez que, à medida que a densidade se aproxima de zero, a velocidade tende a crescer para o infinito. O modelo Underwood tenta sanar essa limitação do modelo de Greenberg, porém, apresenta a desvantagem de que a velocidade somente se torna zero se a densidade alcançar o infinito. Logo, o modelo Underwood não apresenta a possibilidade de uso para ambientes com altas densidades de veículos [10]. Diante dessas desvantagens, os modelos derivados do modelo de Greenshields se tornam os mais viáveis, que, no caso da Tabela 1, são os modelos de Drew e Pipes-Munjal. Dentre eles, o utilizado para medir a velocidade da via no CoDeTMS é o modelo de Drew.

Os parâmetros utilizados pelo modelo de Drew para realizar a estimativa de velocidade da via são: v_f , fluxo livre de velocidade; k_j , densidade de congestionamento; k, densidade atual; en, um número real onde n > -1, que, quando n = 0.5, a equação pode ser utilizada para produzir o modelo de Greenshields. O parâmetro k_j pode ser utilizado com um valor entre 185-250 veh/mile [10], já a variável k é o que queremos obter.

Uma vez que k é a densidade de veículos na via e que o CoDeTMS funciona de forma temporizada, uma simples contagem dos veículos durante o intervalo de tempo especificado se torna necessária para estimar a velocidade da via naquele instante de tempo. Por exemplo, se a unidade de tempo está definida a cada 30 segundos, a unidade de acostamento contará k veículos que passaram na via durante os 30 segundos e aplicará k no modelo de Drew para estimar a velocidade da via naquele momento.

A contagem dos veículos e a estimativa da velocidade da via são realizadas pela unidade de acostamento obedecendo os seguintes passos: (i) a unidade de acostamento dispara *beacons* por meio do protocolo WSMP, contendo nesses *beacons* o identificador do serviço, ou seja, o *Provider Service Identifier* (PSID) do CoDeTMS e o identificador da unidade de acostamento; (ii) se uma unidade de bordo responde ao *beacon* com uma solicitação da condição das vias, a unidade de acostamento repassa para a unidade de bordo uma tabela que contém a condição da via atual, juntamente com as condições das vias próximas à unidade de acostamento; (iii) a unidade de acostamento, então, conta um veículo -k=k+1; (iv) ao final do tempo especificado, a unidade de acostamento aplica k no modelo de Drew e estima a velocidade da via naquele instante de tempo.

4.1.2 Disponibilizar as condições das vias

Para disponibilizar as condições das vias, as unidades de acostamento mantêm uma tabela contendo os seguintes parâmetros: rua e velocidade, onde "rua" é o identificador da própria rua, nesse caso, o seu nome, e "velocidade" é a velocidade da via na última unidade de tempo. Além disso, como mencionado anteriormente, essa tabela contém informações das vias e dos segmentos próximos. A Tabela 2 apresenta a organização da tabela de condição das vias armazenada pelas unidades de acostamento. Nesse caso, a Rua atual – 1, que indica a

Rua atual no segmento 1, apresenta velocidade de 40 km/h; o mesmo se aplica à Rua atual -2, porém, nela é apresentada uma velocidade de 39 km/h. As ruas próximas à Rua atual apresentam velocidade de 70 km/h na Rua X, 50 km/h na Rua Y e 35 km/h na Rua Z.

Tabela 2: Tabela de texto utilizada pelo CoDeTMS.

| Rua/Segmento | Velocidade |
|---------------|------------|
| Rua atual – 1 | 40 km/h |
| Rua atual – 2 | 39 km/h |
| Rua X | 70 km/h |
| Rua Y | 50 km/h |
| Rua Z | 35 km/h |

4.1.3 Comunicação entre as unidades de acostamento

A comunicação entre as unidades de acostamento se dá de forma reativa, ocorrendo a cada unidade de tempo. Isto é, sempre que estimar uma nova velocidade para a via, a unidade de acostamento comunicará essa nova velocidade para as unidades de acostamento vizinhas, que adicionarão essa informação às suas respectivas tabelas. A Figura 4 mostra a infraestrutura implementada pelas unidades de acostamento. Essas são representadas pela cor azul, e o cinza mais escuro caracteriza a intersecção entre as unidades de acostamento.

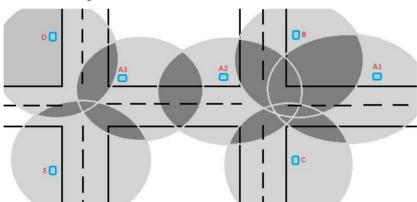


Figura 4: Unidades de acostamento no CoDeTMS.

Com base na Figura 4, quando estima uma nova velocidade para a sua via, o nó A1 envia seu novo valor para as unidades de acostamento vizinhas, que, nesse caso, são os nós A2, B e C. Seguindo a mesma lógica, A1 também é consciente das condições das vias de A2, B e C. O mesmo se aplica para todas as outras unidades de acostamento que implementam o CoDeTMS.

4.2 Unidade de bordo

Os papéis das unidades de bordo dentro do CoDeTMS são: cooperar com a contagem dos veículos nas vias e oferecer uma interface que exibe para o condutor do veículo as condições das vias. Uma unidade de bordo pode consistir em qualquer dispositivo adaptado para ser utilizado no CoDeTMS e que apresente uma interface de comunicação com o padrão IEEE 802.11p.

4.2.1 Contagem dos veículos

As unidades de bordo são responsáveis por cooperar com a contagem dos veículos nas vias para que seja obtida a densidade da via dentro da unidade de tempo determinada. Para realizar essa contagem, a unidade de bordo captura os *beacons* enviados pela unidade de acostamento. Quando captura um *beacon*, a unidade de bordo verifica se a unidade de acostamento oferece o serviço do CoDeTMS a partir do PSID contido no *beacon*. Caso a unidade de acostamento ofereça o serviço do CoDeTMS, a unidade de bordo realiza uma requisição à unidade de acostamento, buscando obter a tabela com as condições das vias (atual e vizinhas). Quando essa

requisição chega à unidade de acostamento, essa, prontamente, conta um veículo e envia a tabela com a condição das vias para a unidade de bordo. A unidade de bordo também armazena o identificador das unidades de acostamento que responderam sua requisição da tabela de condição das vias por um período de tempo para evitar contagem redundante por parte da unidade de acostamento.

4.2.2 Interface de condição das vias

Como citado na subseção 4.1.2, a unidade de acostamento mantém uma tabela que contém a condição da via atual e das vias próximas. Essa tabela fica disponível para o condutor do veículo por meio das unidades de bordo que implementam o CoDeTMS por meio de uma tabela de texto.

5 Estudo de caso

A realização do estudo de caso faz uso de uma rede de ruas, que pode ser definida como um conjunto de ruas interligadas de uma cidade ou de um bairro. Porém, nesse contexto, a rede de ruas foi projetada manualmente como um grafo para o melhor entendimento do CoDeTMS. Além disso, a rede de ruas utilizada neste estudo de caso não é baseada em qualquer modelo existente, tendo sido projetada, especificamente, para explicar melhor a proposta do CoDeTMS. Neste estudo de caso, são apresentadas a estimativa da velocidade média das vias por parte das unidades de acostamento, a disponibilidade das condições das vias e a comunicação entre as unidades de acostamento. Entretanto, não se tem qualquer implementação da rede veicular e assume-se que a contagem de carros para medir a densidade das vias já foi realizada.

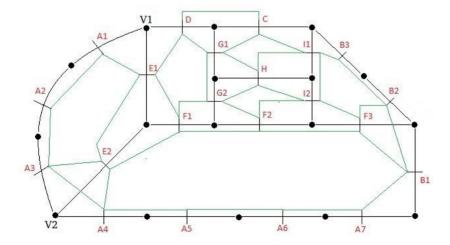
A rede de ruas projetada é ilustrada na Figura 5, onde as arestas podem ser caracterizadas como as vias ou os segmentos; os vértices, como as esquinas, ou como a definição dos segmentos de uma via; e os traços que cortam as arestas, como as unidades de acostamento. As linhas verdes representam os vizinhos conhecidos pelas unidades de acostamento, por exemplo, os vizinhos de A1 são A2 e E.

5.1 Estimar e propagar a velocidade da via

Uma vez que a estimativa da velocidade da via se baseia no tempo, são levadas em conta todas as unidades de bordo que passaram pela unidade de acostamento e foram somadas durante a unidade de tempo determinada. Tomando como exemplos a Figura 5, para determinar a velocidade do segmento A1, e a Tabela 3, deve-se definir os parâmetros para o modelo de Drew, que é caracterizado como em (1):

$$V = v_f \left[1 - \left(\frac{k}{k_j} \right)^{n + \frac{1}{2}} \right] \tag{1}$$

Figura 5: Grafo representando uma rede de ruas.



Aplicando os valores contidos na Tabela 3, a equação fica como mostrado em (2), onde o resultado da equação é multiplicado por 1.609,344 e dividido por 1.000, para obter a velocidade da via em quilômetros por hora (km/h), uma vez que a equação emite um valor medido em milhas por hora (mph). Logo, o valor será 15,81 km/h de velocidade na via na última unidade de tempo.

$$V(t) = \frac{\left(62\left(1 - \left(\frac{150}{200}\right)^{0.1 + \frac{1}{2}}\right)\right) * 1609,344}{1000}$$
(2)

Tabela 3: Parâmetros definidos e resultados.

| Unidades de acostamento | v_f mph | k_j | n | k | Vkm/h |
|-------------------------|-----------|-------|-----|-----|-------|
| A1,A2,A3 | 62 | 200 | 0.1 | 150 | 15,81 |
| A4,A5 | 62 | 200 | 0.1 | 120 | 26,33 |
| A6,A7 | 62 | 200 | 0.1 | 100 | 33,9 |
| B1,B2,B3,I1,I2,F3 | 40 | 185 | 0.1 | 50 | 35 |
| F1,F2 | 40 | 185 | 0.1 | 100 | 19,86 |
| E1,E2 | 40 | 200 | 0.1 | 105 | 20,64 |
| G1,G2,H,C,D | 40 | 185 | 0.1 | 120 | 14,7 |

Com a velocidade da via obtida pela unidade de acostamento, o próximo passo é propagar esse resultado para as unidades de acostamento vizinhas. A troca de mensagens entre as unidades de acostamento não é descrita neste estudo de caso, mas se assume que essa é realizada de forma reativa, onde, uma vez estimada, a velocidade da via deve ser propagada imediatamente para as unidades de acostamento vizinhas. Sabendo disso, e tomando como exemplo o nó A1 da Figura 5, A1 irá propagar sua velocidade para os nós E1 e A2, que irão adicionar esse valor à sua tabela de condições das vias. No mesmo sentido, A1 recebe os valores dos nós E1 e A2 e, baseado nos valores da Tabela 3, cria a sua tabela de condição das vias, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Tabela de A1.

| Rua/Segmento | Velocidade |
|--------------|------------|
| A1 | 15,81 km/h |
| A2 | 15,81 km/h |
| E1 | 20,64 km/h |

Todas as unidades de acostamento na rede veicular geram tabelas, como mostrado na Tabela 4. Uma vez que consegue ter acesso a essas informações, o condutor do veículo pode tomar decisões mais inteligentes em relação à rota que deve ou não seguir.

Com base na Figura 5, vamos tomar como exemplo uma unidade de bordo, vindo no sentido $D \rightarrow V1$, que obteve e está de posse da tabela de condição das vias fornecida pela unidade de acostamento D (Tabela 5) e que deseja ir para o vértice V2. Deve-se supor que o fluxo das vias A e E são no mesmo sentido, onde o sentido da via A será $A1 \rightarrow A2 \rightarrow A3...$ A7, e o sentido do fluxo de E, $E1 \rightarrow E2$. Tendo isso em mente, e de posse da tabela de condição das vias de D, a decisão lógica a se tomar seria pelo segmento E1, uma vez que esse oferece maior mobilidade e vai em direção ao vértice V2. Seguindo para o vértice V2 pelo segmento E1, a unidade de bordo realiza uma requisição à unidade de acostamento E1 e obtém a tabela de condição das vias e seguimentos próximos de E1, que mostram as condições de A1, D, F e E2 (Tabela 6).

Tabela 5: Tabela de D.

| Rua/Segmento | Velocidade |
|--------------|------------|
| D | 14,7 km/h |
| С | 14,7 km/h |
| G1 | 14,7 km/h |
| E1 | 20,64 km/h |

Tabela 6: Tabela de E1.

| Rua/Segmento | Velocidade |
|--------------|------------|
| E1 | 20,64 km/h |
| E2 | 20,64 km/h |
| A1 | 15,81 km/h |
| D | 14,7 km/h |
| F1 | 19.86 km/h |

Uma vez de posse da tabela de E1, e sabendo que E2 leva ao vértice V2, e, além disso, sabendo que o segmento E2 oferece maior mobilidade dentre as ruas próximas do segmento E1, fica fácil para o condutor do veículo tomar a decisão de por onde seguir. O condutor, então, segue seu caminho para o vértice V2 por meio do segmento E2, alcançando o seu destino da forma mais otimizada possível com base nas informações disponibilizadas nas tabelas de condição das vias, onde o caminho seguido foi V1 \rightarrow E1 \rightarrow E2 \rightarrow V2.

6 Experimentos

Para realizar a simulação da rede, foi utilizado o *framework* Veins [12], que funciona com a agregação do simulador de rede OMNeT++ e o simulador de tráfego SUMO. O CoDeTMS foi implementado em formato de aplicação no OMNeT++, utilizando os módulos fornecidos pelo Veins. Para testar a capacidade da unidade de acostamento, foram realizadas simulações em dois cenários de mobilidade:

- cenário 1: as unidades de bordo se movimentam de forma contínua de uma origem para um destino, passando pela unidade de acostamento;
- o cenário 2: as unidades de bordo se movimentam de forma contínua de uma origem até um destino. No entanto, há pequenas pausas no tráfego de veículos próximo à unidade de acostamento.

Nessa simulação, é verificada a métrica de perda de pacotes, para obter o desempenho da unidade de acostamento para diferentes cargas de trabalho. Além disso, é verificado o número de pacotes enviados e recebidos pela unidade de acostamento, para verificar o impacto da troca de mensagens realizada na rede por parte do CoDeTMS.

Os experimentos foram realizados com quantidades diferentes de unidades de bordo, sendo: (i) duzentas unidades de bordo e uma unidade de acostamento; (ii) quatrocentas unidades de bordo e uma unidade de acostamento; (iii) seiscentas unidades de bordo e uma unidade de acostamento; e (iv) oitocentas unidades de bordo e uma unidade de acostamento. Em todos os casos foram simulados os cenários 1 e 2.

A troca de mensagens no CoDeTMS ocorre por meio do protocolo WSMP, utilizando mensagens de *broadcast*. A ordem da troca de mensagem em um ambiente CoDeTMS obedece a seguinte ordem: (i) envio de *beacons*, por parte da unidade de acostamento; (ii) captura dos *beacons* e requisição da tabela de condição das vias, por parte da unidade de bordo (somente se a unidade de acostamento não é conhecida pela unidade de bordo); e (iii) a unidade de acostamento responde à requisição da tabela de condições das vias realizada pela unidade de bordo. Deve-se ressaltar que a unidade de bordo guarda o identificador da unidade de acostamento durante uma unidade de tempo, que, no caso desses experimentos, foi configurada para 50 segundos.

A Figura 6 mostra o gráfico que representa a perda de pacotes na unidade de acostamento nos cenários 1 e 2. O cenário 2 apresenta menos perda de pacotes, demonstrando a eficiência da rede do CoDeTMS em diferentes cargas de trabalho. A única exceção foi o ambiente envolvendo seiscentas unidades de bordo, o qual demonstra mesma eficiência.

Quantidade de nós

Figura 6: Perda de pacotes na unidade de acostamento nos cenários 1 e 2.

Já a troca de mensagens realizada pela unidade de acostamento é variada para os dois cenários. No cenário 1, houve menos tráfego de pacotes em todos os cenários, envolvendo as diferentes quantidades de unidades de bordo, uma vez que o fluxo na via é contínuo. Enquanto isso, o cenário 2 mostra um aumento na troca de mensagens realizada pela unidade de acostamento. É possível observar o aumento na troca de mensagens no cenário em que há a ocorrência de pequenas pausas no tráfego de veículos, onde a maior carga apresentada se deu no cenário 2, envolvendo oitocentos veículos, com 2.720 pacotes de *broadcast* recebidos e 2.720 pacotes enviados. Já no cenário 1, com o mesmo número de veículos, a carga foi de apenas 2.400 pacotes de *broadcast* recebidos e 2.400 pacotes de *broadcast* enviados, representando um aumento de 640 pacotes trafegados na unidade de acostamento. A Figura 7 demonstra o gráfico com relação à troca de mensagens realizada pela unidade de acostamento.

De acordo com a Figura 7, o parâmetro "Cenário 1 R" representa os pacotes recebidos pela unidade de acostamento no Cenário 1, e o parâmetro "Cenário 1 S" representa os pacotes enviados pela unidade de acostamento no Cenário 1. A mesma lógica se aplica para os parâmetros "Cenário 2 R" e "Cenário 2 S". Entretanto, deve-se observar que são contabilizados apenas os pacotes de dados, não sendo levados em conta os beacons. Entretanto, vale salientar que a carga na rede gerada pelos beacons é de 70 bytes por segundo.

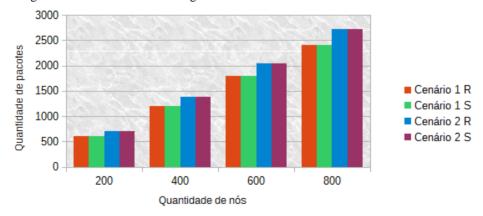


Figura 7: Pacotes de dados trafegados na unidade de acostamento nos cenários 1 e 2.

A Figura 8 segue a mesma lógica da Figura 7, porém, mostra a média dos bytes enviados e recebidos para cada nó em cada cenário. Observando a Figura 8, nota-se que, no cenário 1, a média de bytes trafegados por nó na unidade de acostamento é igual para todas as quantidades de unidades de bordo, totalizando uma média de 498 bytes por nó. Já no cenário 2, com duzentas unidades de bordo, verifica-se uma média maior de bytes trafegados na unidade de acostamento, e essa média diminui no cenário com quatrocentas unidades de bordo, estabilizando-se a partir do cenário com seiscentas unidade de bordo, que é o mesmo valor para o cenário com oitocentas unidades de bordo.

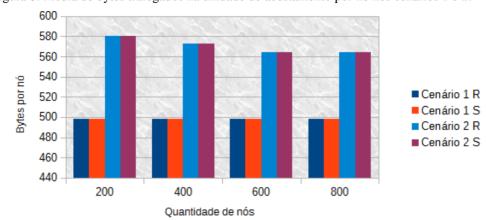


Figura 8: Média de bytes trafegados na unidade de acostamento por nó nos cenários 1 e 2.

7 Conclusão

Neste artigo, foi apresentado o CoDeTMS, um sistema que realiza o monitoramento e a divulgação das condições de trânsito, juntamente com um estudo de caso mostrando as principais funções das unidades de acostamento dentro de um ambiente que implementa o CoDeTMS. Dentre essas funções, discutiu-se a estimativa de velocidade da via com base no tempo e a disponibilização das condições das vias por meio de uma tabela de texto, o que proporciona maior precisão para o condutor do veículo na escolha do caminho a seguir até o seu destino. Além disso, foram realizados experimentos na rede por meio de simulação para avaliar a eficiência da unidade de acostamento e o tráfego de pacotes na rede em diferentes cenários.

Trabalhos futuros deverão envolver a implementação do CoDeTMS em um ambiente veicular mais complexo, com múltiplas unidades de acostamento. Da mesma forma, tais estudos buscarão descobrir a sobreposição mínima entre as unidades de acostamento, para que o CoDeTMS entregue aos veículos a informação sobre as vias com o mínimo fator de erro possível, e a implementação de um algoritmo baseado no algoritmo de Dijkstra, que, a partir da requisição de uma unidade de bordo, estima o caminho de menor custo para determinado destino dentro de uma rede de ruas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Funcap, pelo apoio financeiro, por meio do Projeto Funcap nº PJP-0072-000100/102.

Referências

- [1] CINTRA, M. A crise do trânsito em São Paulo e seus custos. In: Revista de Administração de Empresas RAE. 2013. p. 58-61.
- [2] INEA. Relatório da Qualidade do ar do Estado do Rio de Janeiro Ano base 2010 e 2011. Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_dimfis_gear/documents/document/bmvh/mdey/~edisp/inea012571.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2014.
- [3] JÚNIOR, J. G. R.; Quintanilha, I. M.; Campista, M. E. M.; Costa, L. H. M. K. Sistema para Monitoramento Descentralizado de Trânsito baseado em Redes Veiculares Infraestruturadas. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. 2013. p. 863-876.
- [4] GOOGLE. Google Maps. Disponível em:https://support.google.com/maps. Acesso em: 15 de maio 2014.

- [5] CET. Companhia de Engenharia de Tráfego. Disponível em:http://www.cetsp.com.br. Acesso em: 15 de maio de 2014.
- [6] ALVES, R. S. A.; CAMPBELL, I. V.; COUTO, R. S.; CAMPISTA, M. E. M.; MORAES, I. M.; RUBINSTEIN, M. G.; COSTA, L. H. M. K.; DUARTE, O. C. M. B.; ABDALLA, M. Redes Veiculares: Princípios, Aplicações e Desafios. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores SBRC*. 2009. p. 199- 254.
- [7] GARELLI, L.; CASETTI, C.; CHIASSERINI, C.; FIORE, M. Mobsampling: v2v Communications for Traffic Density Estimation. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2011. p. 1-5.
- [8] JÚNIOR, J. G. R. Sistema oportunístico e colaborativo para o monitoramento de trânsito baseado em redes veiculares infraestruturadas. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro. 2013.
- [9] GOOGLE. The Bright Side of Sitting in Traffic: Crowdsourcing Road Congestion Data. Disponível em:http://googleblog.blogspot.com/2009/08/bright-side-of-sitting-in-traffic.html. Acesso em: 15 de maio de 2014.
- [10] WANG, H.; LI, J.; CHEN, Q. Y.; NI, D. Speed-density relationship: from deterministic to stochastic. *Trb* 88 th Annual Meeting at Washington. 2009. p. 1-20.
- [11] BAUZA R.; GOZOLVEZ J. 2012. Traffic congestion detection in large-scale scenarios using vehicle-to-vehicle communications. *Journal of Network and Computer Applications*. 2012. p. 1295-1307.
- [12] VEINS. Vehicles in Network Simulator. Disponível em:http://veins.car2x.org/>. Acesso em: 15 de maio de 2014.
- [13] WAZE. Waze. Disponível em: https://www.waze.com/>. Acesso em: 8 de novembro 2014.