

CO-OP: Uma Solução para a Detecção, Classificação e Minimização de Congestionamentos de Veículos utilizando Roteamento Cooperativo

Allan Mariano de Souza¹, Daniel Guidoni², Leonardo C. Botega³ e Leandro A. Villas¹

¹Instituto de Computação – UNICAMP

allan@lrc.ic.unicamp.br, leandro@ic.unicamp.br

²Departamento de Ciência da Computação – UFSJ

guidoni@ufs.j.edu.br

³Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM

botega@univem.edu.br

Abstract. *Most large cities suffer with congestion problem, one of the main causes of congestion is the sudden increase of vehicle traffic during peak hours, mainly in areas with bottlenecks. Current solutions in the literature are based on perceiving road traffic conditions and re-routing vehicles to avoid the congested area. However, they do not consider the impact of these changes on near future traffic patterns. Hence, these approaches are unable to provide a long-term solution to the congestion problem, since when suggesting alternative routes, they create new bottlenecks at roads closer to the congested one, thus just transferring the problem from one point to another one. With this issue in mind, we propose an intelligent traffic cooperative routing application called CO-OP, which improves the overall spatial utilization of a road network and also reduces the average vehicle travel costs by avoiding vehicles from getting stuck in traffic. Simulation results show that our proposal is able to forecasting congestion and re-route vehicles properly, performing a load balance of vehicular traffic.*

Resumo. *A maioria das cidades grandes sofrem com problema de congestionamento, uma das principais causas de congestionamento é o aumento do tráfego de veículos durante o horários de pico, principalmente em áreas com gargalos de infraestrutura. Existem soluções atuais na literatura baseadas em detecção nas condições de tráfego e em redirecionamento de veículos para evitar a áreas congestionadas. No entanto, essas soluções não consideram o impacto dessas mudanças nos próximos padrões de tráfego. Assim, essas abordagens são incapazes de fornecer uma solução de longo prazo para o problema do congestionamento, desde quando sugerindo rotas alternativas, criam novos gargalos em um futuro próximo, assim, apenas transferindo o problema de um ponto a outro. Com esta questão em mente, propomos uma solução cooperativa de roteamento chamado CO-OP, o qual melhora a utilização do espaço global e como consequência reduz o tempo de viagem, evitando congestionamentos. Os resultados das simulações mostram que a nossa proposta é capaz controlar congestionamento e prevenir o surgimento de congestionamentos em um futuro próximo.*

1. Introdução

Devido ao crescimento urbano de maneira desorganizada, as grandes cidades estão enfrentando sérios problemas socioeconômicos. Esse crescimento urbano, tipicamente, possui impacto significativo nas estruturas da cidade, uma vez que a demanda por diversos serviços, entre eles os sistemas de transportes, que fazem parte do cotidiano das pessoas [Naphade et al. 2011]. Com relação a esse serviço em particular, estima-se que 23% dos moradores da cidade de São Paulo gastam no mínimo duas horas para chegar ao destino¹. Existem vários impactos negativos relacionados aos congestionamentos em uma cidade. Além da diminuição da atividade econômica, aspectos como aumento da emissão de CO_2 , qualidade do ar entre outros [Bauza and Gozalvez 2013, Karagiannis et al. 2011] também podem ser considerados.

Com o avanço da tecnologia de comunicação sem fio, comunicação móvel e com a padronização das redes veiculares, é possível o desenvolvimento de sistemas de transporte inteligentes (ITS) [Wang et al. 2015]. Um sistema de transporte inteligente integra dados, comunicação e computação para resolver diversos problemas nos sistemas de transportes tradicionais de grandes cidades, visando, por exemplo, reduzir engarrafamentos, aumentar a capacidade das estradas, reduzir acidentes, reduzir custos dos sistemas de transportes, diminuir o tempo de viagens e aumentar a qualidade e segurança dos deslocamentos. Nesse contexto, uma rede veicular possui um papel importante para a realização dos sistemas de transporte inteligentes através de soluções que consideram a comunicação entre carros, *road side units* (RSU), sensores e outros dispositivos com capacidade de comunicação [Maia et al. 2013]. Um sistema de transporte pode criar padrões na movimentação dos carros baseados na coleta de dados on-line, tal como densidade de veículos na rede, velocidade, tempo de viagem entre outros com o objetivo de detectar, controlar e reduzir congestionamentos [Pan et al. 2012, Doolan and Muntean 2013, Bauza and Gozalvez 2013, Wang et al. 2015, Brennad et al. 2015]. O principal desafio no gerenciamento de congestionamento é modificar a rota de alguns veículos sem causar congestionamentos em outros lugares da rede.

Atualmente, existem aplicações comerciais, como o Waze [WAZE], que disponibilizam rotas alternativas baseadas nas informações sobre o tráfego disponibilizadas por seus usuários. Entretanto, essas aplicações disponibilizam novos trajetos individuais e dependem das informações coletadas das redes sociais, que podem não representar o real estado das condições de engarrafamento além de não possuírem um pequeno tempo de resposta em situações emergenciais, causadas por um acidente, por exemplo. Para explorar a coleta de informações em tempo real, várias abordagens foram propostas com o objetivo de encontrar as melhores rotas individuais para contornar congestionamentos [Doolan and Muntean 2013, Pan et al. 2012]. Entretanto, ao encontrar novas rotas individuais, novos congestionamentos podem ser criados em diferentes regiões da cidade. Para minimizar esse problema, algumas abordagens projetam k melhores rotas, e a seleção da rota escolhida pode ser feita de maneira aleatória [Pan et al. 2012] ou utilizando métodos probabilísticos [Brennad et al. 2015].

Para abordar os problemas mencionados, este trabalho propõe uma abordagem para a prevenção e controle de congestionamentos baseado em roteamento cooperativo.

¹<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-09/tempo-gasto-no-transito-ultrapassa-duas-horas-para-23-dos-paulistanos>.

Para isso, é descrita uma abordagem de classificação de tráfego em diferentes níveis. Após, o roteamento cooperativo é realizado considerando as condições globais de mobilidade do tráfego de veículos com o objetivo de planejar rotas que não irão gerar novos congestionamentos. Dessa forma, a abordagem proposta nesse trabalho é capaz de planejar em tempo real novas rotas, prevenir a criação de novos congestionamentos e melhorar as condições de fluxo de carros nas vias a partir de uma perspectiva global da mobilidade. A abordagem proposta é comparada com três diferentes abordagens da literatura que abordam o problema estudado nesse trabalho, que são *WithRouting* [Brennad et al. 2015], DSP and RkSP [Pan et al. 2012]. Os resultados de simulação mostram que a abordagem proposta é mais eficiente na prevenção de congestionamentos e criação de novas rotas considerando o balanceamento de tráfego de veículos nas vias.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve a nova abordagem para o problema de prevenção e controle de congestionamentos. Os resultados de simulação são apresentados na Seção 4. A Seção 5 apresenta a conclusão e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Os autores em [Bauza and Gozalvez 2013] propõem um sistema de cooperação veicular baseado na comunicação entre veículos para detectar congestionamento utilizando lógica Fuzzy, chamado de CoTEC (COperative Traffic congestion detECTION). O sistema proposto utiliza mensagens de alerta, onde todos os veículos enviam periodicamente para seus vizinhos informações sobre as condições de tráfego. Após um veículo receber informações sobre o tráfego, um algoritmo baseado em lógica fuzzy é executado para detectar se existe congestionamento na rodovia onde o veículo está. Quando um congestionamento é detectado por um veículo, o mesmo envia essa informação para seus vizinhos. Após receber várias informações sobre congestionamentos, os veículos, de maneira colaborativa, conseguem caracterizar o congestionamento detectado. Entretanto, ao enviar mensagens periódicas sobre condições do tráfego e a disseminação de congestionamento detectado, o sistema CoTEC pode diminuir a capacidade de fluxo de dados da rede. Apesar de ser capaz de detectar congestionamentos, o CoTEC não considera mecanismos para evitar, diminuir ou controlar o congestionamento. Além disso, o sistema proposto opera somente em rodovias.

Uma solução para sistemas de transporte inteligentes que coleta informações em tempo real, detecta e gerencia o congestionamento é proposto em [Brennad et al. 2015]. O sistema proposto utiliza um conjunto de RSU distribuídas na cidade com capacidade de obter uma cobertura de comunicação de todas as ruas. Cada RSU é responsável por gerenciar e detectar congestionamentos de veículos em sua área de cobertura. O sistema proposto utiliza uma mensagem de controle que, periodicamente, realiza a atualização de todas as rotas dos veículos para que os mesmos não encontrem congestionamentos. Entretanto, o sistema proposto não gerencia o congestionamento quando o mesmo acontece, já que as rotas serão atualizadas na fase de atualização de rotas.

Outra solução para a aquisição em tempo real de informações sobre veículos é proposto em [Pan et al. 2012]. A solução proposta, projetada de maneira centralizada, obtém informações sobre a localização geográfica dos veículos, suas velocidades e direção do percurso para detectar congestionamentos. Quando o veículo se aproxima de um

congestionamento detectado, o sistema calcula uma nova rota baseada em dois algoritmos diferentes, que são: *Dynamic Shortest Path* (DSP), onde as rotas são calculadas combinando o menor caminho e o menor tempo de viagem e *Random k Shortest Paths* (RkSP), onde k rotas são calculadas e aleatoriamente o sistema escolhe uma rota para o veículo. O objetivo da escolha aleatória entre k rotas é não causar novos engarrafamentos em outros pontos da cidade. O sistema proposto em [Pan et al. 2012] possui a mesma desvantagem do sistema proposto em [Brennad et al. 2015], onde as novas rotas são calculadas apenas na fase de atualização de rotas.

[Doolan and Muntean 2013] propõem o EcoTrec, um algoritmo de roteamento baseados nos conceitos ecológicos que utiliza comunicação V2V. O algoritmo considera as características dos engarrafamentos para melhorar o consumo de combustível e diminuir a emissão de gás carbônico, um dos principais problemas dos engarrafamentos do ponto de vista ecológico. O EcoTrec funciona da seguinte forma. Os veículos disseminam para a rede suas informações de trajeto e consumo de combustível durante sua viagem. De posse desses dados, o sistema cria um grafo, onde as interseções são consideradas vértices e as ruas são consideradas as arestas. Toda a aresta possui um peso, que é calculado a partir das informações disseminadas pelos veículos. Após a criação do grafo, o sistema informa a melhor rota, em termos de consumo de combustível, que deve ser utilizada pelo veículo. Entretanto, o sistema EcoTrec não é capaz de detectar congestionamentos, calculando apenas novas rotas para os veículos. Além disso, o sistema utiliza um algoritmo de caminho mínimo em grafos para o cálculo da nova rota, fazendo com que engarrafamentos possam ser criados em pontos diferentes da cidade, uma vez que vários veículos podem ter a mesma rota com o menor consumo de combustível.

Com base nos problemas das soluções encontradas na literatura, que são: (i) sobrecarga de comunicação [Bauza and Gozalvez 2013]; (ii) visão limitada (local) da movimentação de carros [Pan et al. 2012, Doolan and Muntean 2013, Brennad et al. 2015] e (iii) atraso na criação de novas rotas para evitar congestionamentos [Pan et al. 2012, Doolan and Muntean 2013, Brennad et al. 2015], o presente trabalho propõe uma nova solução cooperativa eficiente para a prevenção e gerenciamento de congestionamentos.

3. CO-OP

Nesta seção é descrito CO-OP (Uma Solução para a Detecção, Classificação e Minimização de Congestionamentos de Veículos utilizando Roteamento Cooperativo), um sistema de transporte inteligente que utiliza uma abordagem cooperativa para roteamento de veículos que estão dentro de uma área de roteamento (*RA - Routing Area*) de alguma via congestionada, definida pelo sistema, para minimizar e controlar congestionamentos em centros urbanos. A RA é uma área utilizada para evitar roteamentos desnecessário de veículos, de modo que apenas sejam roteados os veículos com maior urgência, ou seja, veículos que estão mais próximos do congestionamento e possuem maior probabilidade de ficarem presos no mesmo. O restante da seção é dividida da seguinte forma: a arquitetura do CO-OP é descrito na Subseção 3.1. A Subseção 3.2 apresenta o modelo usado para representar o cenário e os veículos. A Subseção 3.3 descreve o método utilizado para classificar a condição de tráfego em cada rua do cenário. Por fim, a Subseção 3.4 apresenta o algoritmo de roteamento cooperativo, o qual faz um balanceamento do tráfego para minimizar e controlar congestionamentos de acordo com a condição de tráfego em cada rua do cenário.

3.1. Arquitetura do Sistema

O CO-OP é dividido em quatro partes: (i) Coleta de informações; (ii) Classificação do tráfego; (iii) Análise de rota e; (iv) Sugestão de rota. A Figura 1 descreve a arquitetura do CO-OP e como cada módulo interage entre si.

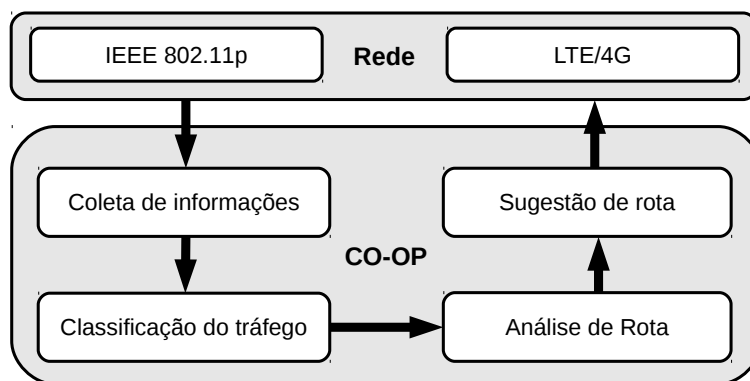


Figura 1. Arquitetura do sistema CO-OP organizada em quatro módulos principais, sendo: Coleta de informações, Classificação do tráfego, Análise de rota e Sugestão de rota.

1. **Coleta de informações:** módulo responsável por receber as informações dos veículos (ID, posição atual, rota e velocidade) e manter os dados sobre o tráfego (velocidade média e densidade) atualizados. O módulo *coleta de informações* recebe as informações dos veículos que são enviadas periodicamente através da rede, a qual pode implementar não só o protocolo IEEE 802.11p, mas também LTE/4G;
2. **Classificação do tráfego:** recebe as informações atualizadas obtidas pelo módulo de *coleta de informações* e periodicamente faz a *classificação do tráfego* de todas as vias do cenário. O intervalo de classificação (*CI - Classification Interval*) é definido pelo sistema;
3. **Análise de rota:** após a *classificação do tráfego* de todas as vias do cenário, o módulo *análise de rota* analisa quais veículos devem ser re-roteados. Para isso, para cada via congestionada o sistema define uma área de roteamento (RA). Além disso, é verificado se um veículo está dentro de uma área de roteamento (RA) e se ao menos uma via congestionada está contida na rota do veículo. Caso essa condição for satisfeita, o veículo precisa ser roteado, caso contrário o veículo permanece com sua rota original;
4. **Sugestão de rota:** calcula uma nova rota utilizando a abordagem cooperativa proposta para os veículos selecionados no módulo *análise de rota*. A abordagem cooperativa visa melhorar o fluxo do cenário todo, assim não calculando as melhores rotas para cada veículo, mas sim as melhores rotas para manter um tráfego contínuo em todo o cenário. Por fim, a nova rota é enviada para os veículos através da rede utilizando tanto protocolo IEEE 802.11p ou LTE/4G.

3.2. Modelo de Representação da Rede

A rede é representada por um grafo ponderado e dirigido $G = (V, E)$, onde o conjunto $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$ representa o conjunto de cruzamentos do cenário (vértices), enquanto o conjunto $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i\}$ corresponde ao conjunto de ruas do cenário (arestas). Além disso, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$ é o conjunto de pesos de cada rua $e_i \in E$. Seja $N = \{n_1, n_2, \dots, n_j\}$ o conjunto de veículos (nós) na rede e $R = \{r_1, r_2, \dots, r_j\}$ o conjunto de rotas para cada veículo $n_j \in N$.

Todos os veículos n_j na rede periodicamente enviam uma mensagem $mgs^j \leftarrow \{\text{posição}^j, \text{rota}^j, \text{velocidade}^j\}$ para o CO-OP. Assim que novas informações estão disponíveis, CO-OP calcula a velocidade média s_i e a densidade d_i de cada rua $e_i \in E$. Depois disso, atualiza o peso de cada rua, $w_i \leftarrow (s_i, d_i, ms_i)$, onde ms_i é a velocidade máxima da rua e_i . Além disso, baseado nos pesos de cada rua, CO-OP classifica o nível de congestionamento de todo conjunto E periodicamente definido por um intervalo CI e cria um conjunto $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i\}$ onde C é um subconjunto de E . Por fim, para cada rua congestionada c_i é criada uma área de roteamento RA_i e, para todos os veículos n_j dentro de uma RA_i onde pelo menos uma rua e_i de sua rota r_j esteja contida no conjunto C , é calculada uma nova rota para que o veículo evite o congestionamento.

O peso w_i para cada rua e_i é calculado utilizando a Equação 1. A equação foi desenvolvida para o peso ser inversamente proporcional a condição de tráfego de veículos. Dessa forma, quanto melhor a condição do tráfego, menor é seu peso. Portanto, ruas congestionadas possuem maior peso do que rua com fluxo livre de veículos. A Equação 1 é definida da seguinte forma:

$$w_i = 1 - \frac{s_i}{d_i \cdot ms_i} \quad (1)$$

onde s_i , d_i e ms_i são definidas pela rua e_i e, representam respectivamente a velocidade média, densidade e velocidade máxima da rua e_i .

3.3. Classificação dos Níveis de Congestionamento

Detectar e classificar níveis de congestionamentos não é um processo simples. Devido à complexidade de tratar diversas informações, tais como: acidentes, questões relacionadas ao clima, problemas de sinalização, horários de pico e gargalos na infraestrutura de transporte. Neste contexto, há diversas abordagens para detecção de congestionamento [Zhong et al. 2008, Souza et al. 2014, Brennad et al. 2015] e outras abordagens que focam na classificação da condição de tráfego utilizando lógica *fuzzy* [Bauza and Gozalvez 2013, Araujo et al. 2014]. Diferentemente destes trabalhos, CO-OP implementa o algoritmo k -NN (*K-Nearest Neighbor*) [Larose 2005] para classificar os níveis de congestionamentos em todo cenário. Além disso, como o CO-OP mantém as informações atualizadas do cenário todo, o mesmo é ciente das condições de tráfego globais, permitindo um roteamento cooperativo dos veículos visando melhorar a condição do tráfego a longo prazo. Isto evita a criação de novos congestionamentos, o que pode acontecer quando o roteamento utilizado calcula as melhores rotas para cada veículo sem balanceamento de tráfego global, como consequência, os congestionamentos se deslocam para outros locais.

Em geral, o k -NN precisa de uma base de dados de amostra para treinar o classificador. Para isso, foi empregado um conjunto de dados sintéticos construído de acordo

com a *Highway Capacity Manual* (HCM) [Board 2010]. O HCM contém conceitos, diretrizes e procedimentos para medir a capacidade, o desempenho e a qualidade do tráfego, com base na velocidade e densidade de veículos nas estradas. O conjunto de dados foi construído com base nos Níveis-de-Serviços (*LOS - Level-of-Service*) presentes no HCM. O LOS representa uma medição da qualidade utilizado para descrever as condições operacionais dentro de um fluxo de tráfego. Seis diferentes níveis de serviço são definidos, *LOS A* representa condições de fluxo livre e *LOS F* representa congestionamento intenso. Cada nível define a velocidade mínima e máxima com base na velocidade máxima da estrada. Com o conjunto de dados de treinamento empregado, é possível identificar quatro condições de tráfego, onde cada um deles é baseado em limites de velocidade apresentados nos LOS da HCM. Além disso, para eliminar falsos positivos, utilizou-se a densidade de veículos nas estrada em combinação com a velocidade média para definir uma condição de tráfego. A densidade é baseada na porcentagem de veículos na estrada de acordo com a sua capacidade máxima. Portanto, a classificação dos níveis de congestionamento é definida da seguinte forma *fluxo livre* = 0, *congestionamento leve* = 1/3, *congestionamento moderado* = 2/3 e *congestionamento intenso* = 1. Tabela 1 mostra a classificação dos níveis de congestionamento.

Tabela 1. Classificação da condição de tráfego

Velocidade	Densidade			
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Rápida	Fluxo livre	Fluxo livre	Fluxo livre	Leve
Média	Fluxo livre	Fluxo livre	Leve	Moderado
Lenta	Fluxo livre	Fluxo livre	Moderado	Moderado
Muito lenta	Leve	Moderado	Moderado	Intenso

A classificação é feita periodicamente em um intervalo pré-definido *CI*. Portanto, para fazer a classificação, o classificador recebe como entrada a velocidade média s_i e a densidade d_i e disponibiliza como resultado o nível de congestionamento baseado na base de dados, como mostrado na Tabela 1. Sendo assim, após a classificação, CO-OP sabe de todas as ruas congestionadas no cenário.

3.4. Roteamento Cooperativo

O roteamento cooperativo ocorre depois da classificação dos níveis de congestionamento. Assim, novas rotas são calculadas para os veículos dentro de uma área de roteamento que passarão por uma rua congestionada. No entanto, o cálculo das novas rotas é feito em uma perspectiva global para melhorar o fluxo no cenário todo. Diferente do cálculo de melhor caminho, onde a melhor rota é calculada para cada veículo individualmente, o roteamento cooperativo visa evitar o congestionamento e equilibrar o tráfego em vez de descobrir melhores rotas para cada veículo. Assim alguns veículos podem ser penalizados, mas minimiza a probabilidade de ocasionar novos congestionamentos o que é comum nas abordagens de melhor caminho.

A Figura 2 mostra todo o procedimento realizado pelo CO-OP. Primeiramente, os veículos enviam suas informações para o CO-OP, assim que o sistema recebe essas informações, o mesmo atualiza os pesos das arestas no grafo. Além disso, o sistema verifica se deve realizar a classificação (Figura 2 *label A*). Caso não for, o sistema continua

a receber as informações dos veículos, caso contrário o mesmo faz a classificação de todas as ruas do cenário e em seguida define as respectivas áreas de roteamento.

Logo após, o CO-OP verifica quais veículos estão dentro de alguma área de roteamento (Figura 2 *label B*). Para os veículos que não estão dentro de uma área de roteamento, a rota original é mantida para os mesmos. Entretanto, para os veículos que estão dentro de uma área de roteamento, é verificado se os mesmos irão passar por algum congestionamento (Figura 2 *label C*). Se a condição for satisfeita, uma nova rota é calculada.

Durante o cálculo da rota, CO-OP verifica a rota, a posição atual e o destino de todos os veículos. Além disso, para todos os veículos que irão passar por uma rua congestionada e estão dentro de uma área de roteamento, todos os possíveis caminhos a partir da posição atual do veículo até seu destino são calculados. O roteamento cooperativo implementa um algoritmo de busca gulosa. A partir daí, para construir uma nova rota, CO-OP não só verifica todos os caminhos possíveis que o veículo pode percorrer a partir da sua posição atual, com exceção dos caminhos que impedem o veículo de chegar ao seu destino, mas também seleciona a rua com menor peso como próxima rua da nova rota. Além disso, depois de selecionar a próxima rua da nova rota, CO-OP atualiza o peso da rua selecionada e o procedimento seleção continua até que construir toda a rota (Figura 2 *label D e label E*).

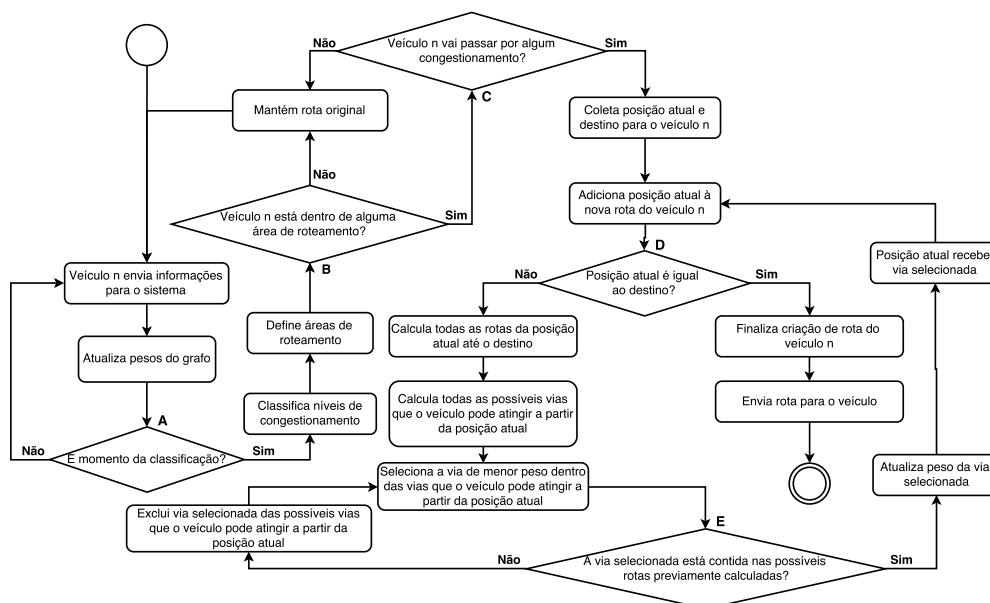


Figura 2. Fluxo de operação do CO-OP para detecção de congestionamentos, roteamento e controle de veículos

A atualização do peso da rua selecionada é feito de acordo com o impacto que aquele veículo terá na mesma. Dessa forma, a atualização do peso é feito utilizando a Equação 2

$$w_i = w_i + \left(w_i \cdot \frac{l_n^j}{l_e^i} \right) \quad (2)$$

onde, w_i é o peso atual da rua e_i , l_n^j é o comprimento do veículo n_j e l_e^i é o comprimento

da rua e_i . Selecionar ruas com menor peso melhora a eficiência do tráfego evitando ruas congestionadas e o processo de atualizar o peso da rua selecionada é importante para balancear o tráfego e contribuir para um fluxo de tráfego contínuo.

A Figura 3 descreve como o cálculo de rota é feita pelo CO-OP. A figura mostra o planejamento de rota para um veículo que vai passar por uma estrada congestionada com a posição atual no vértice A e destino no vértice H . Na Figura 3(a) depois de calcular todas as possíveis rotas de A à H , CO-OP inicia o planejamento da rota. A partir do vértice A o veículo pode alcançar B e E (ambos estão dentro de todos os caminhos possíveis calculado anteriormente). No entanto, a aresta que conecta vértice A e E tem o menor peso, portanto, esta aresta é selecionada como a próxima aresta da rota do veículo e seu peso é atualizado. Na Figura 3(b) a partir do vértice E o veículo pode atingir os vértices C , D , F e G , mas os vértices D e F são excluídos dos possíveis próximos vértices porque eles não fazem parte das possíveis rotas calculadas anteriormente. Além disso, entre os vértices C , G e H a aresta que conecta vértice E e o vértice C tem o menor peso, por isso é selecionada como a próxima aresta e seu peso é atualizado. Por fim, na Figura 3(c), a partir do vértice C o veículo pode chegar aos vértices G e H e ambos estão em vias possíveis, no entanto, a aresta que conecta vértice C e H tem o menor peso, portanto, é selecionado como próxima aresta a aresta que conecta vértice C e H e o seu peso é atualizado e, a nova rota calculada é $r_j \leftarrow \{A, E, C, H\}$. Além disso, como o peso das estradas que formam a nova rota foram atualizados, o novo percurso para outro veículo com a mesma posição atual e destino pode ser $r_j \leftarrow \{A, B, E, C, G, H\}$. No entanto, usando um outro algoritmo, sem perspectiva global para construir a nova rota, como *Shortest Path*, a rota para dois ou mais veículos com origem no vértice A e destino no vértice H , as duas novas rotas seriam $r_j \leftarrow \{A, E, H\}$.

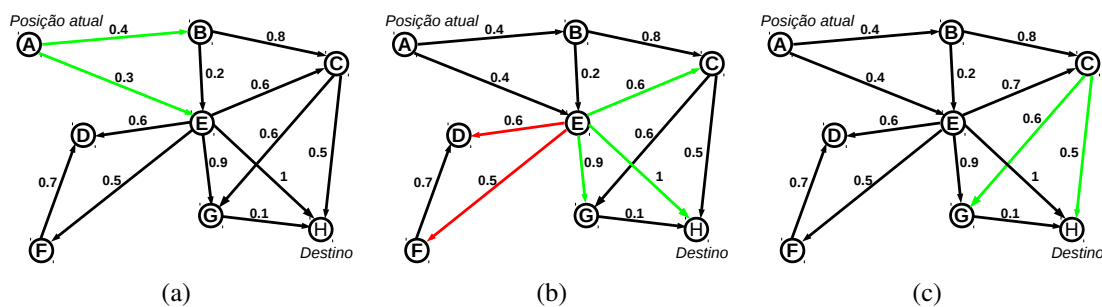


Figura 3. Cálculo de uma rota para um veículo com posição atual no vértice A e com destino no vértice H

4. Resultados

Esta seção descreve a metodologia aplicada, as ferramentas utilizadas, o cenário de simulação e os resultados de simulações comparando o CO-OP com as soluções da literatura DPS, RkSP e With routing.

4.1. Metodologia

Para nossa avaliação, foi utilizado o simulador de mobilidade SUMO (*Simulator for Urban MObility*) [Behrisch et al. 2011], versão 0.17.0. A implementação do gerenciamento do tráfego no SUMO é feita pelo TraCI (*Traffic Control Interface*) [Wegener et al. 2008],

o qual permite o gerenciamento em tempo real durante a simulação. Além disso, ele provê acesso e controle à objetos de simulação, alterando seu comportamento em tempo de execução. Para calcular as emissões de CO₂ e o consumo de combustível, foi utilizado o modelo EMIT implementado pelo SUMO. EMIT é um modelo estatístico baseado na fórmula HBEFA², a qual calcula as emissões de CO₂ e o consumo de combustível baseado na aceleração e velocidade dos veículos.

É importante salientar que foi utilizado um cenário real para as simulações, retirado do OpenStreetMap³. Foi selecionado uma parte da cidade de Manhattan Nova York, Estados Unidos, com um tamanho de 5 km², como mostra a Figura 4. A mobilidade dos veículos foi gerada de forma aleatória com as seguintes densidades: 250, 500, 750 e 1000 veículos/km².

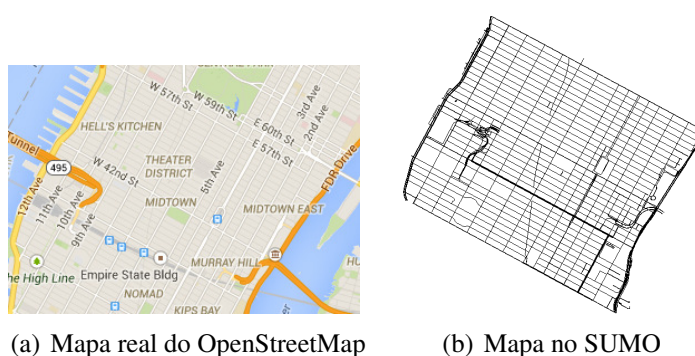


Figura 4. Mapa de Manhattam.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de simulação utilizados. Por uma questão de simplicidade, foi utilizado o algoritmo de KNN como classificador com $k=5$, valor no qual obteve-se melhores resultados em nossas avaliações preliminares. Por fim, para cada análise, os resultados representam a média de 33 replicações com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 2. Parâmetros de simulação

Parâmetros	Valores
Cenário	5 km ²
Intervalo de classificação (<i>CI</i>)	30 s
Área de roteamento (RA)	1000 m
Densidade	250, 500, 750, 1000 v/km ²
# vizinhos mais próximos	5
Intervalo de Confiança	95%

CO-OP foi comparado com o tráfego de veículos original, isto é, abordagem tradicional sem a presença de nenhum mecanismo de re-roteamento de veículos. Além disso, CO-OP foi comparado com três soluções encontradas na literatura, sendo elas: DSP e RkSP [Pan et al. 2012] e With routing solução proposta por Brennan et al. [Brennad et al. 2015]. Para analisar a performance das soluções, as seguintes métricas

²<http://www.hbefa.net>

³<http://www.openstreetmap.org/>

foram utilizadas: *i*) velocidade média: velocidade média dos veículos durante a simulação; *ii*) tempo médio de viagem: tempo médio em que os veículos levaram para atingir seu destino; *iii*) tempo de congestionamento: tempo médio em que os veículos ficaram presos em um congestionamento; *iv*) distância percorrida: distância média percorrida por todos os veículos; *v*) consumo de combustível: consumo médio de combustível de todos os veículos; e *vi*) emissão de CO₂ : emissão média de CO₂ emitida por todos os veículos na simulação.

4.2. Avaliação de Desempenho

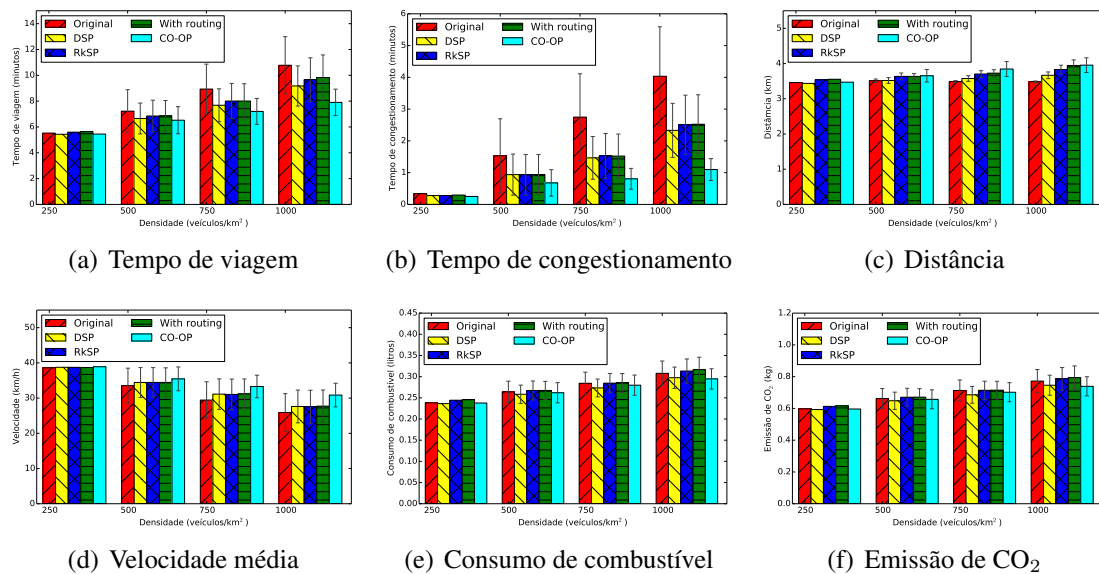


Figura 5. Avaliação de desempenho do CO-OP em comparação com soluções da literatura.

As soluções DSP, RkSP and With routing necessitam de uma configuração inicial de alguns parâmetros relacionados ao intervalo de roteamento. Foram feitos vários testes com diferentes valores de intervalo de roteamento e o melhor intervalo de roteamento encontrado para o cenário avaliado foi de 300 segundos. Além do intervalo de roteamento, a solução RkSP e With routing necessitam encontrar k menores caminhos mínimos para realizar o roteamento. Após vários testes com diferentes valores de k , ambos algoritmos encontraram os melhores resultados para $k = 5$.

A Figura 5 ilustra os resultados de todas as métricas para a avaliação de desempenho considerando diferentes densidades de veículos na rede. Para todos os resultados, pode-se observar que, a medida que a densidade da rede aumenta, o tempo de viagem, distância percorrida, consumo de combustível, emissão de CO₂ e tempo de congestionamento também aumentam e a velocidade média diminui. O objetivo de variar a densidade de carros é "estressar" o cenário avaliado para verificar os resultados dos algoritmos em cenários de congestionamentos. Os resultados descritos abaixo consideram uma densidade de 1000 veículos por km² para efeito de comparação entre as soluções.

Como pode ser encontrado, o solução que não modifica as rotas dos veículos (Original) possui uma média de distância percorrida de 3.4 km, uma média de tempo gasto de 10.77 minutos e uma média de velocidade de 25.9 km/h considerando uma densidade

de carros de 1000. Entretanto, usando essa solução, os veículos gastam cerca de 37% do tempo de viagem parados em engarrafamentos (Figura 5(b)). Em comparação com a solução Original, o DSP diminui a média do tempo de viagem em aproximadamente 14%. Essa redução é causada pela periodicidade de troca de rotas dos veículos. A velocidade média é aumentada em aproximadamente 6%. Por outro lado, a modificação das rotas aumenta em aproximadamente 5% a distância percorrida quando o DSP é utilizado (Figura 5(c)). O DSP modifica as rotas dos veículos utilizando rotas ótimas individuais, fazendo com que novos congestionamentos sejam criados. Considerando o DSP, os veículos gastam, aproximadamente, 25% do tempo de viagem em engarrafamentos (Figura 5(b)).

Diferentemente do DSP que seleciona rotas ótimas individuais, o algoritmos RkSP e With routing selecionam k rotas, evitando futuros congestionamentos. Entretanto, os resultados mostram que RkSP, em comparação com o Original, diminui o tempo de viagem em 10%, aumenta a distância percorrida em 10% e aumenta a velocidade média em 6%. O aumento da distância percorrida deve-se ao fato da escolha aleatória de uma das k rotas existentes, ou seja, possivelmente uma rota com tamanho superior ao tamanho da rota ótima. Mesmo com essa política de seleção de rotas, os veículos, utilizando o RkSP, gastam 26% do tempo de viagem em congestionamentos. Para contornar o problema relacionado a escolha aleatória de rotas, o algoritmo With routing utiliza um método probabilístico na escolha das novas rotas dos veículos. O método probabilístico tem como objetivo o balanceamento do tráfego das novas rotas. Em comparação com o Original, a solução With routing diminui o tempo de viagem em 8%, aumenta a distância percorrida em 13% e aumenta a velocidade média em 7%. O tempo gasto em engarrafamento pelo With routing é de 26%.

Diferentemente das outras abordagens, o CO-OP detecta e controla o engarrafamento com o objetivo de criar novas rotas que não gerem novos engarrafamentos em outros pontos da cidade utilizando, ao mesmo tempo, um roteamento colaborativo. O tempo gasto em congestionamentos pelo CO-OP (Figura 5(b)) é cerca de 13% do tempo de viagem, inferior aos 26% do With routing, 26% do RkSP, 25% do DSP e 37% quando nenhuma estratégia é utilizada (Original). Também como consequência da estratégia utilizada pelo CO-OP, a velocidade média dos veículos é de 30 km/h, aproximadamente 20% superior comparado com as demais soluções. Por outro lado, para evitar futuros congestionamentos na criação de novas rotas, a distância percorrida quando a solução CO-OP é utilizada é cerca de 13% superior em comparação quando nenhuma rota é alterada.

Finalmente, os resultados relacionados ao consumo de combustível e emissão de CO_2 são mostrados nas Figuras 5(e) e 5(f). Esses resultados estão diretamente relacionados ao tempo de viagem e o tempo que os carros ficaram parados em congestionamentos. Pode-se perceber que quando nenhuma rota é alterada (Original), o consumo de combustível 0.30 litros para realizar o percurso. O DSP, RkSP, With routing e CO-OP possuem um consumo de 0.29, 0.31, 0.31 e 0.29 litros respectivamente. Em comparação com todas as soluções, o CO-OP é a solução que consome menos combustível para realizar o mesmo percurso. A emissão de CO_2 está diretamente relacionada com o consumo de combustível. A emissão de CO_2 pelas soluções Original, DSP, RkSP e With routing são, respectivamente, 0.77, 0.74, 0.78 e 0.79 superior em comparação com a solução proposta CO-OP.

Ao realizar uma comparação quando a rede possui 250 e 1000 veículos, foi obtido os seguintes resultados. Para a solução que não modifica as rotas (Original), o tempo de viagem, tempo de congestionamento, consumo de combustível e emissão de CO_2 aumentaram, respectivamente, 105%, 911%, 25% e 26%, entretanto, para a velocidade média teve uma redução de 35% e a distância percorrida permanece a mesma. Considerando o DSP, RkSP e With routing, que obtiveram resultados similares, o aumento, considerando a mesma sequência das métricas foi de aproximadamente 70%, 534%, 25% e 26%, porém a velocidade média teve uma redução de 30% e a distância percorrida aumentou aproximadamente 10%. Considerando a solução proposta nesse trabalho (CO-OP), o aumento, considerando a mesma sequência das métricas foi de 27%, 172%, 20% e 21%, entretanto a velocidade média foi reduzida em apenas 19% e a distância aumentou em apenas 13%. Dessa forma, é importante observar que, ao aumentar a densidade de veículos na rede, a solução CO-OP obteve a menor variação das métricas avaliadas, demonstrando que o roteamento cooperativo é uma solução interessante na prevenção e gerenciamento de congestionamentos nos cenários avaliados.

5. Conclusões

Neste trabalho, foi proposto CO-OP, uma solução para detecção, classificação e controle de congestionamentos utilizando um roteamento cooperativo. A solução proposta visa reduzir o tempo de viagem, tempo de congestionamento. Os resultados das simulações mostram a eficácia da nossa solução. Quando comparado com mobilidade original dos veículos, o CO-OP reduz o tempo médio de viagem em aproximadamente 37%, e a média do tempo de congestionamento em 72%, aumentando a distância percorrida em apenas 13%. Como trabalho futuro, pretende-se analisar o desempenho da nossa solução em cenários mais realistas, utilizando *traces* de ambientes reais.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro concedido da CAPES e FAEPEX para o bolsista de doutorado Allan Mariano de Souza. Ainda, os autores também agradecem a FAPEMIG e CNPq por financiarem partes dos seus projetos de pesquisas. Por fim, Leandro Villas agradece o apoio financeiro da FAPESP por meio do processo nº 2016/05392-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

- Araujo, G., Queiroz, M., Duarte-Figueiredo, F., Tostes, A., and Loureiro, A. (2014). Car-tim: A proposal toward identification and minimization of vehicular traffic congestion for vanet. In *Computers and Communication (ISCC), 2014 IEEE Symposium on*, pages 1–6.
- Bauza, R. and Gozalvez, J. (2013). Traffic congestion detection in large-scale scenarios using vehicle-to-vehicle communications. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(5):1295 – 1307.
- Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., and Krajzewicz, D. (2011). SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview. In *International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL '11)*, pages 63–68.
- Board, T. R. (2010). *HCM 2010 - Highway capacity manual*. National Research Council.

- Brennad, C., Souza, A., Maia, G., Boukerche, A., Loureiro, A., and Villas, L. (2015). An intelligent transportation system for detection and control of congested roads in urban centers. In *Computers and Communications (ISCC), 2015 IEEE Symposium on*.
- Doolan, R. and Muntean, G. (2013). Vanet-enabled eco-friendly road characteristics-aware routing for vehicular traffic. In *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th*, pages 1–5.
- Karagiannis, G., Altintas, O., Ekici, E., Heijenk, G., Jarupan, B., Lin, K., and Weil, T. (2011). Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 13(4):584–616.
- Larose, D. T. (2005). *k-Nearest Neighbor Algorithm*, pages 90–106. John Wiley and Sons, Inc.
- Maia, G., Rezende, C., Villas, L. A., Boukerche, A., Viana, A. C., Aquino, A. L., and Loureiro, A. A. (2013). Traffic aware video dissemination over vehicular ad hoc networks. In *Proceedings of the 16th ACM International Conference on Modeling, Analysis, Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '13*, pages 419–426, New York, NY, USA. ACM.
- Naphade, M., Banavar, G., Harrison, C., Paraszczak, J., and Morris, R. (2011). Smarter cities and their innovation challenges. *Computer*, 44(6):32–39.
- Pan, J., Khan, M., Sandu Popa, I., Zeitouni, K., and Borcea, C. (2012). Proactive vehicle re-routing strategies for congestion avoidance. In *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2012 IEEE 8th International Conference on*, pages 265–272.
- Souza, A. M. d., Boukerche, A., Maia, G., Meneguetto, R. I., Loureiro, A. A., and Villas, L. A. (2014). Decreasing greenhouse emissions through an intelligent traffic information system based on inter-vehicle communication. In *Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, MobiWac '14*, pages 91–98, New York, NY, USA. ACM.
- Wang, M., Shan, H., Lu, R., Zhang, R., Shen, X., and Bai, F. (2015). Real-time path planning based on hybrid-vanet-enhanced transportation system. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 64(5):1664–1678.
- WAZE. Waze app bugs and issues. https://wiki.waze.com/wiki/Waze_App_Bugs_and_Issues.
- Wegener, A., Piórkowski, M., Raya, M., Hellbrück, H., Fischer, S., and Hubaux, J.-P. (2008). Traci: an interface for coupling road traffic and network simulators. In *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium*, pages 155–163. ACM.
- Zhong, T., Xu, B., and Wolfson, O. (2008). Disseminating real-time traffic information in vehicular ad-hoc networks. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pages 1056–1061.