

MÉTODOS DE SOLUÇÃO GULOSO, EXATO E HÍBRIDO PARA O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE CONTADORES DE TRÁFEGO EM REDES DE TRANSPORTE

Bruno Salezze Vieira

Thayse Ferrari

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Glaydston Mattos Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE

Ivone Catarina Simões Hoffmann

Nilo Flavio Rosa Campos Junior

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

RESUMO

Diante da intensa utilização do modo rodoviário na matriz de transportes brasileira, os investimentos neste tipo de infraestrutura mostram-se de fundamental importância, especialmente sob a ótica do desenvolvimento econômico do país. No entanto, para que o planejamento de investimento seja realizado, verifica-se a necessidade de conhecer as características do tráfego nas rodovias brasileiras. Nesse contexto, surge o Problema de Localização de Contadores de Tráfego (PLCT), que consiste em indicar locais representativos para obtenção de contagens de tráfego, com a finalidade de estimar matrizes origem/destino. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo propor métodos de solução Guloso, Exato e Híbrido para solucionar o PLCT. Testes computacionais foram realizados utilizando dados da rede rodoviária brasileira. Para as instâncias testadas, o método Híbrido se mostrou superior aos demais, combinando menores tempos de execução e resultados de melhor qualidade.

ABSTRACT

Considering the intense use of road transport mode in the Brazilian transport matrix, investments in this type of infrastructure are important, especially from the point of view of the country's economic development. However, in order to carry out the investment planning, it is necessary to know the characteristics of traffic on Brazilian roadways. In this context, the Traffic Counters Location Problem (TCLP) arises, consisting of indicating representative sites to locate traffic count stations, in order to estimate origin/destination trip tables. Therefore, this paper proposes Greedy, Exact and Hybrid methods to solve the TCLP. Computational tests were performed using data from the Brazilian roadway network. For the tested instances, the Hybrid method proved to be superior to the others, combining lower execution times and better quality results.

1. INTRODUÇÃO

O acentuado crescimento econômico registrado no Brasil nas últimas décadas promoveu um incremento nas demandas por produtos e serviços em todo o território nacional. Diante desse aumento na demanda, verifica-se uma relação direta com a necessidade de escoamento de produtos pelas rodovias nacionais, uma vez que o modo rodoviário é, tradicionalmente, o mais utilizado para o transporte de carga.

Um sistema de transporte rodoviário eficiente é essencial ao desenvolvimento e bom funcionamento de um país, tendo em vista que é necessário assegurar que a circulação de pessoas e bens pelo território se faça de forma segura, econômica e eficaz. Como no Brasil o modo rodoviário é responsável por cerca de 65,4% do transporte de passageiros e 61,1% do transporte de cargas, os investimentos nesse tipo de infraestrutura mostram-se ainda mais relevantes (CNT, 2019).

Segundo Gomes (2015), os investimentos em infraestrutura rodoviária representam um ponto importante para o desenvolvimento econômico do país, já que contribuem com a melhoria das rodovias na condição de trafegabilidade ao usuário, proporcionando assim, maior segurança e redução do tempo de viagem e dos custos operacionais. No entanto, para que este planejamento seja assertivo, é imprescindível que sejam realizados estudos de tráfego nas rodovias, especialmente relacionados aos volumes de tráfego que circulam numa rede viária e a sua variação temporal.

Vários métodos podem ser utilizados para o monitoramento do tráfego nas rodovias. Apesar disso, independentemente do método utilizado, tais pesquisas mostram-se custosas, especialmente em função da necessidade de mão-de-obra específica. Nesse cenário, contadores de tráfego que realizam a medição do número de veículos em determinado ponto por um período de tempo pré-definido tendem a ser opções mais acessíveis, tornando-os frequentemente utilizados no monitoramento do tráfego. Garber e Hoel (2014) destacam que, por meio deste monitoramento, é possível analisar e descrever as características do tráfego (tráfego médio diário, tráfego médio diário anual, volume na hora pico, distância de viagem por veículo, entre outros) em determinada região. Além disso, essas contagens podem ser utilizadas para auxiliar nas estimativas de matrizes origem/destino (O/D), que representam a distribuição espacial das viagens entre as zonas de tráfego em uma rede de transporte.

Nesse contexto, surge o Problema de Localização de Contadores de Tráfego (PLCT) que consiste em indicar locais representativos para obtenção de contagens de tráfego, com a finalidade de estimar matrizes O/D. Uma abordagem proposta para esse problema consiste em enumerar todos os caminhos possíveis para cada par O/D, no entanto, tal procedimento necessita de um tempo computacional inviável para casos de redes de grandes dimensões, tendo em vista que o número de caminhos entre cada par O/D cresce exponencialmente com o tamanho da rede. Por suas características, portanto, o PLCT é apontado como um problema combinatório NP-Difícil, segundo Chen *et al.* (2007).

Diante do exposto, surge o seguinte problema de pesquisa: qual método de solução melhor se adequa às características do PLCT? Ele é capaz de ofertar resultados consistentes, tanto no que tange à qualidade da solução do problema, quanto ao tempo de processamento? Dessa forma, o objetivo desse trabalho consiste em comparar três técnicas de resolução para o PLCT: um algoritmo Guloso, um método Exato e um método Híbrido. Esses métodos buscam otimizar os recursos empregados, reduzir custos de implantação, manutenção e operação de contadores de tráfego.

Para realizar a análise comparativa dos métodos propostos em um contexto realista, foram utilizados dados extraídos da base rodoviária georreferenciada brasileira, disponibilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio de Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT). Os municípios brasileiros foram considerados como origens e destinos das viagens e dos segmentos rodoviários. Diante disso, esse trabalho contribui, especialmente, no âmbito governamental, uma vez que auxilia no planejamento estratégico para localização de contadores de tráfego.

O restante desse artigo está organizado da seguinte forma: o contexto da pesquisa, com uma breve revisão da literatura sobre a importância dos contadores de tráfego no planejamento de transportes, é apresentado na Seção 2; a Seção 3 expõe a metodologia do estudo, que inclui uma visão geral dos métodos de solução adotados; a Seção 4 apresenta os experimentos computacionais, com a definição das instâncias de teste e a análise dos resultados; e, por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os sistemas de transporte têm se mostrado, cada vez mais, como um dos componentes fundamentais ao crescimento e desenvolvimento da economia de um país, uma vez que são responsáveis por atender as necessidades de deslocamentos, tanto de bens quanto de pessoas. No entanto, essa relação direta com o desenvolvimento econômico produz uma série de impactos, que podem provocar uma redução drástica na qualidade de vida das pessoas. O maior exemplo disso está intimamente ligado ao transporte rodoviário, modo mais utilizado tanto para transporte de passageiros como de cargas no Brasil. Por se tratar de um dos sistemas dinâmicos mais complexos da atualidade (González *et al.*, 2019), as interações dos diferentes componentes de tráfego resultam em congestionamentos, deterioração do pavimento e aumento da poluição ambiental e do número de acidentes, entre outros problemas. Faz-se necessário, então, o gerenciamento e controle do tráfego por parte das instituições responsáveis, com o intuito de planejar e implementar ações mitigadoras das externalidades negativas causadas pela excessiva utilização do transporte rodoviário motorizado.

2.1 Os contadores de tráfego no planejamento de transportes

A implantação de sensores de tráfego tem se mostrado uma ferramenta de monitoramento das condições de tráfego que não implica em grandes gastos por parte das agências. Ela pode ser utilizada tanto em condições normais quanto atípicas, e deve ser realizada em pontos estratégicos da rede de transportes (Fei *et al.*, 2013). Segundo Garber e Hoel (2014), um sensor de tráfego é um dispositivo que indica a presença ou passagem de veículos por um determinado ponto, durante um período de tempo especificado, e fornece dados que apoiam as aplicações de gestão de tráfego, tais como controle de sinais, controle de rampa, detecção de incidentes e coleta de dados do volume de veículos e sua classificação (Wang *et al.*, 2012).

Esses sensores podem ser agrupados em quatro categorias, de acordo com Gentili e Mirchandani (2012): sensores de contagem de tráfego, de identificação de rota, de imagem, e de identificação de veículos. O mais utilizado, no entanto, é o de contagem de tráfego, que é um equipamento que mede o volume de veículos em um intervalo de tempo. É importante destacar que: um sensor de contagem localizado em um *link* (segmento ou trecho) da rede, mede volume de veículos desse link; já um sensor localizado em um nó, mede os fluxos de todos os *links* de entrada e saída desse nó. Para melhor ilustrar ambas as situações, considere a rede hipotética da Figura 1, e suponha que exista um sensor situado no *link* a_1 e outro no nó 2. Enquanto o primeiro sensor é capaz de determinar apenas o fluxo do *link* a_1 , o segundo é capaz de determinar o fluxo de entrada no nó 2 (fluxo do *link* a_1) e os fluxos de saída no nó 2 (fluxos dos *links* a_3 e a_4).

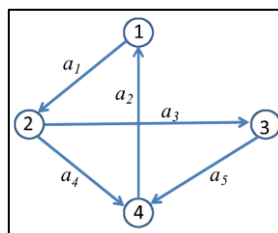


Figura 1: Rede hipotética. Fonte: Gentili e Mirchandani (2012).

Além de determinar o fluxo no *link* ou nó onde está instalado, tais sensores também são capazes de

auxiliar na previsão de volume de tráfego e na estimativa de matrizes O/D, que relacionam os deslocamentos de pessoas e/ou de mercadorias em uma região. Por esse motivo, essas matrizes são importantes fontes de informação para diversos estudos de transporte, como previsão de demanda de viagens futuras e gestão de transporte e controle (Fisk, 1988). No entanto, para garantir a confiabilidade das informações obtidas, devem-se realizar estudos específicos, com modelagem matemática e outros instrumentos de elevado grau de complexidade logística e operacional, para que todo o território sob estudo seja contemplado e tenha suas particularidades respeitadas. Nesse contexto, a definição dos locais de instalação desses contadores de tráfego tem destaque especial, tendo em vista que precisam estar estrategicamente posicionados em locais com volumes de tráfego representativos para a região.

2.2 Problemas de Localização de Contadores de Tráfego (PLCT)

Considere uma rede de transporte não orientada $G = (N, A)$, onde N é o conjunto de nós e A é o conjunto de trechos na rede. Seja W o conjunto de pares O/D e i e j , origem e destino, respectivamente, do par O/D $w \in W$, ou seja $w = (i, j)$. Considere, ainda, que $|W|$ é o número total de pares O/D e $|A|$ é o número total de trechos ou segmentos viários da rede. Uma rede é chamada de conexa se existe pelo menos um caminho simples (que não contém trechos repetidos e nenhum nó repetido) entre cada par O/D $w \in W$ a partir da origem i e terminando no destino j . Agora, seja $x_a \in \{0,1\}$, $a \in A$, uma variável binária associada a cada trecho viário $a \in A$, de tal forma que se $x_a = 1$, então uma estação de contagem de tráfego situa-se no trecho a , e $x_a = 0$, caso contrário. Por fim, x denota o vetor composto pelas variáveis binárias x_a .

Seja $u_w(x)$ o tempo de viagem mais curto entre o par O/D $w \in W$ determinado como uma função do vetor binário x . Se $u_w(x) > 0$, então o caminho mais curto entre o par O/D $w \in W$ obtido, por exemplo, pelo método de Dijkstra (Ahuja *et al.*, 1993; Bertsekas, 1998) inclui pelo menos uma estação de contagem; caso contrário, existe pelo menos um caminho de custo igual a zero entre a origem i e o destino j do par O/D $w \in W$ que não passa por qualquer estação de contagem. Desta maneira, o modelo matemático utilizado neste trabalho para o PLCT é o que foi apresentado por Yang *et al.* (2006), e está descrito a seguir:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{a \in A} x_a \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{a \in A} \delta_{ra}^w x_a \geq 1 \quad \forall r \in R_w, \forall w \in W \quad (2)$$

$$x_a \in \{0,1\} \quad \forall a \in A \quad (3)$$

O conjunto R_w representa os caminhos entre o par O/D $w \in W$, e δ_{ra}^w é um parâmetro que é igual a 1 caso o trecho a esteja no caminho r entre o par O/D $w \in W$, e igual a 0, caso contrário. A Função Objetivo (1) busca minimizar o número de postos de contagem de tráfego requeridos para separar (ou interceptar) todos os caminhos entre os pares O/D na rede G . As Restrições (2) garantem que todo par O/D é separado por no mínimo um posto de contagem. E finalmente, as Restrições (3) definem o domínio das variáveis de decisão.

3. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

O modelo matemático (1)-(3) é baseado em um clássico problema da literatura, o *Set Covering Problem* (Chvátal, 1979), ou Problema de Cobertura de Conjuntos. Diante disso, os métodos de solução propostos neste trabalho consistem na aplicação de algoritmos de cobertura de conjuntos para definir os locais onde serão instaladas as estações de contagem, para identificar o menor número de trechos que, ao serem selecionados para receber contadores de tráfego, interceptem todos os caminhos entre os pares O/D.

Sabendo que a Restrição (2) pode ser computacionalmente inviável, já que seria necessária a enumeração de todos os caminhos $r \in R_w$ para cada par O/D $w \in W$, esse trabalho propõe resolver o PCLT por meio do algoritmo de incremento de caminhos descrito na Figura 2. Esse algoritmo aplica sucessivamente duas etapas importantes na resolução do problema, a saber: a Etapa 1 (*Algoritmo Cobertura Mínima*), que consiste na aplicação de um algoritmo para resolver um problema de Cobertura Mínima; e a Etapa 2 (*Caminhos Livres*), que busca identificar possíveis caminhos entre pares O/D que ainda não possuem um contador de tráfego.

Assim, considere P_1 o conjunto de caminhos identificados no problema que conectam pares O/D e P_2 o conjunto de caminhos entre pares O/D que não foram interceptados por contadores de tráfego. Com esses dois conjuntos, deve-se resolver o problema de Cobertura de Conjuntos associado, conforme explicado na Figura 3, por meio da Etapa 1 que considera três possíveis abordagens: uma gulosa, uma exata e uma híbrida; que são detalhadas a seguir.

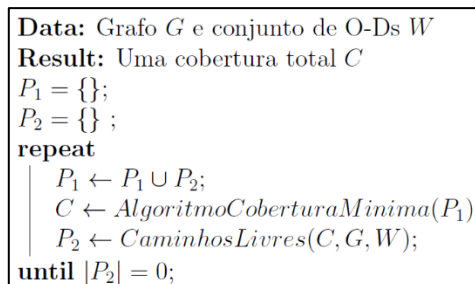


Figura 2: Algoritmo de incremento de caminhos até a cobertura total.

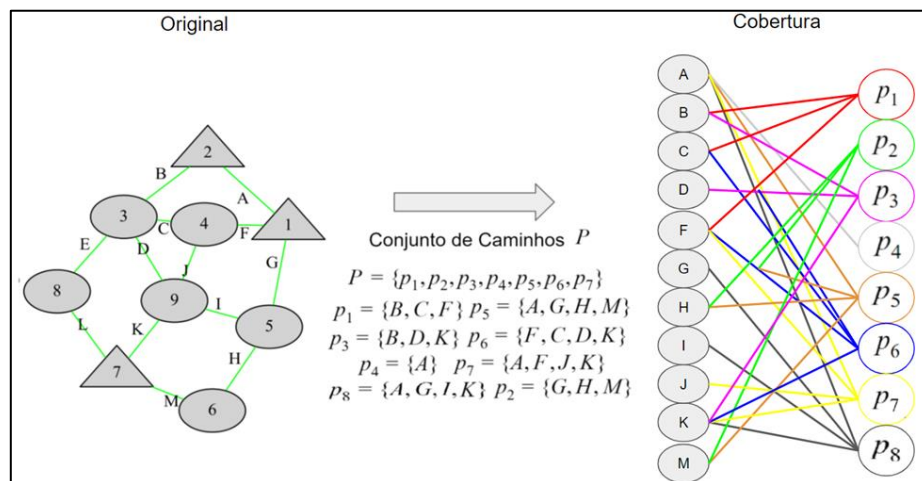


Figura 3: Exemplo de um subproblema de Cobertura de Conjuntos associado.

Em seguida, com os contadores posicionados, ou seja, com as arestas definidas para receber contadores (conjunto C da Figura 2), deve-se buscar caminhos entre pares O/D que não possuem contadores com a aplicação da Etapa 2. Esse processo é repetido até que todos os caminhos sejam interceptados (veja Figura 2). A Etapa 2 recebe o conjunto C e expande uma árvore geradora mínima (com custo 1 para as arestas com contadores e 0 caso contrário) no grafo G para cada ponto de origem em W . Essa árvore geradora é obtida por meio do algoritmo de Kruskal (Kruskal, 1956). Os caminhos entre pares O/D de custo zero são incluídos no conjunto P_2 . Diante disso, P_2 vazio é o indicativo de que não existem caminhos sem contadores de tráfego, logo o algoritmo da Figura 2 deve ser encerrado.

3.1 Método Guloso

O método guloso aplicado aqui consiste em um algoritmo aproximativo de tempo polinomial, que está condicionado a uma única regra: a cada iteração deve-se selecionar o elemento de um conjunto (um trecho da rede) que cobre o maior número possível de elementos de um outro conjunto (caminhos ainda não interceptados por contadores), conforme Slavík (1996), Guha e Khuller (1998) e Ding *et al.* (2015). Na Figura 4 é possível observar quatro iterações do método guloso aplicado a um problema hipotético que considera onze trechos (de A até M) de uma rede e oito caminhos ainda não interceptados (denominados p_1, p_2, \dots, p_8).

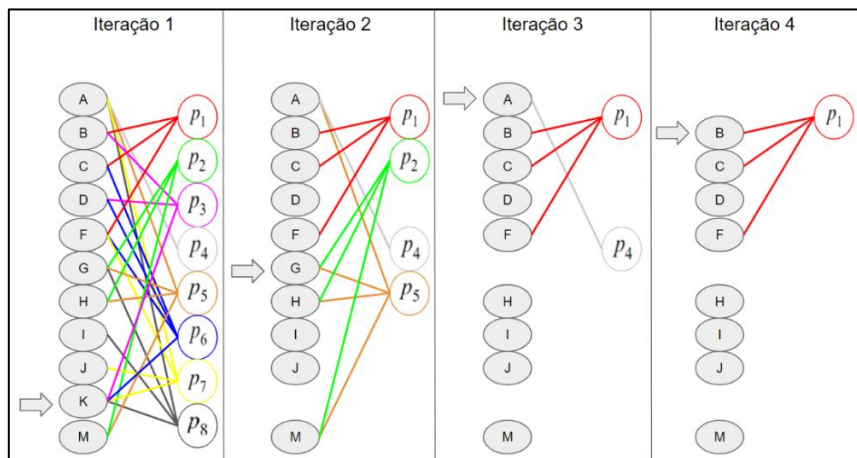


Figura 4: Quatro iterações do método guloso aplicado ao problema de Cobertura de Conjuntos.

Cada iteração representa um problema de Cobertura de Conjuntos a ser resolvido. Para compreender a questão de cobertura, perceba que o caminho ainda não interceptado p_1 , na Figura 4, passa a ser interceptado se um contador for posicionado no trecho B, C ou F, pois o caminho p_1 é formado por esses trechos. Assim, a cada iteração, o algoritmo guloso seleciona o trecho que cobre o maior número possível de caminhos não interceptados e remove esse trecho e os caminhos não interceptados que o constituem (p. ex., na Iteração 1, o trecho selecionado é o K, conforme indicado na Figura 4), selecionando esse trecho para receber um contador de tráfego. Caso ocorra um empate (p. ex., na Iteração 1, ambos os trechos K e A cobrem 4 caminhos), deve-se selecionar de maneira aleatória um dos trechos. Esse processo é repetido até que todos os caminhos não interceptados sejam interceptados. No caso das iterações da Figura 4, os trechos K, G, A e B foram selecionados para receber os contadores, nessa ordem.

3.2 Método Exato

Diferente do algoritmo guloso, o método exato consiste na resolução direta do modelo matemático (1)-(3) que considera o conjunto de caminhos não cobertos identificados pelo algoritmo da Figura 2 (neste caso, o conjunto P_2) e os trechos da rede. Esse modelo matemático pode ser resolvido por um resolvidor de programação inteira (p. ex. Gurobi ou CPLEX), porém com tempo computacional elevado. Por isso, pode-se limitar o tempo de execução e obter a melhor solução encontrada para o posicionamento dos contadores e reanálise dos caminhos livres, conforme mostra a Figura 2. Ao fazer dessa forma, o problema de Cobertura de Conjuntos é resolvido de maneira aproximada, já que, ao limitar o tempo de execução passa-se a não garantir a otimalidade das soluções encontradas. Apesar de se tratar, portanto de um algoritmo aproximativo, toma-se a liberdade de chamá-lo de “Exato” por se basear em *branch-and-bound*. Como o conjunto de caminhos utilizados é um subconjunto de todos os caminhos possíveis do PLCT, o limite inferior determinado por esse método é válido para o PLCT.

Para exemplificar a aplicação desse método exato, as Equações (4)-(13) formam o modelo matemático do problema de Cobertura de Conjuntos resolvido na primeira iteração mostrada na Figura 4. Tal modelo deve ser encaminhado ao *solver* de programação inteira para obtenção da solução ótima.

$$\text{Min } z = x_A + x_B + x_C + x_D + x_F + x_G + x_H + x_I + x_J + x_K + x_M \quad (4)$$

Sujeito a:

$$x_B + x_C + x_F \geq 1 \quad (5)$$

$$x_G + x_H + x_M \geq 1 \quad (6)$$

$$x_B + x_D + x_K \geq 1 \quad (7)$$

$$x_A \geq 1 \quad (8)$$

$$x_A + x_G + x_H + x_M \geq 1 \quad (9)$$

$$x_F + x_C + x_D + x_K \geq 1 \quad (10)$$

$$x_A + x_F + x_J + x_K \geq 1 \quad (11)$$

$$x_A + x_G + x_I + x_K \geq 1 \quad (12)$$

$$x_A, x_B, \dots, x_M \in \{0,1\} \quad (13)$$

3.3 Método Híbrido

O método Híbrido parte da suposição de que o algoritmo Guloso apresenta seus melhores desempenhos durante as primeiras iterações, o que para o PLCT significa que ele seleciona trechos que estão disponíveis na maior quantidade de caminhos ainda não interceptados para o posicionamento de contadores. Tal suposição implica que o Guloso apresenta desempenho ruim nas últimas iterações, onde existem vários trechos que estão associados a apenas um caminho não coberto. Por exemplo, na terceira iteração mostrada na Figura 4, embora existam dois caminhos ainda não cobertos, todos os trechos individualmente estão relacionados a apenas um caminho. Surge assim, a necessidade de utilizar um método exato para cobrir os últimos conjuntos de caminhos ainda não interceptados por contadores.

Como observado na Figura 4, a cada iteração do método Guloso, gera-se um novo problema de Cobertura de Conjuntos com os caminhos ainda não cobertos. Diante disso, esses caminhos restantes passarão a ser analisados pelo método Exato apresentado na Seção 3.2. Com isso, o

método Híbrido necessita de um único parâmetro de entrada, que trata do percentual de caminhos que o método Guloso vai selecionar antes de encaminhar os restantes para o método exato. Neste artigo, optou-se por avaliar os resultados obtidos para 5%, 15% e 30%.

4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos computacionais foram realizados em um computador equipado com processador i7 6700K@4.2Ghz e 16GB de memória RAM DDR4@3200Mhz, utilizando o sistema operacional Linux Ubuntu 17.05 x64. O modelo matemático foi gerado na linguagem de programação C e resolvido utilizando o resolvidor Gurobi 7.51.

4.1 Casos de teste

Os casos de teste (ou instâncias) compõem um grupo de 26 problemas reais, referentes aos estados brasileiros (Goiás e Distrito Federal foram considerados um único estado), cada um com sua respectiva sigla, onde cada ponto de origem ou destino é um município e cada aresta é um segmento de rodovia (federal, estadual ou municipal) presente no estado. Esses dados foram extraídos da base georreferenciada do PNCT, de responsabilidade do DNIT, conforme mencionado na Seção 1. A Tabela 1 apresenta as principais características das instâncias utilizadas, onde $|N|$ é o número de nós, $|A|$ é o número de trechos da rede e $|M|$ é o número de municípios (O/D) de cada estado. Como cada município é considerado origem ou destino para todos os outros municípios da rede, o número de pares O/D ($|W|$), para cada instância, pode ser calculado como $|W| = \frac{|M| \times (|M| - 1)}{2}$.

O conjunto de instâncias apresentadas se mostra bastante representativo, tendo em vista que possui diferentes tamanhos, desde aquelas relativamente pequenas, com menos de 300 arestas (AC, AL, AM, AP, RO e RR), até as maiores com um grande número de arestas como BA, GO e DF, MG, MT, PR, SP. A maior instância considerada é a do estado de Minas Gerais (MG) com 1474 nós, 1917 trechos e 803 municípios, totalizando pouco mais de 322 mil pares O/D a serem cobertos, já a menor delas refere-se ao estado do Amapá (AP), com 52 nós, 77 trechos e 13 municípios (78 pares O/D a serem cobertos).

Tabela 1: Características das instâncias utilizadas.

Instância	$ N $	$ A $	$ M $	Instância	$ N $	$ A $	$ M $
AC	61	84	20	PB	384	480	213
AL	169	219	97	PE	362	472	172
AM	74	77	37	PI	405	550	212
AP	52	77	13	PR	780	1083	381
BA	812	1113	395	RJ	502	721	86
CE	401	612	177	RN	333	433	160
ES	283	394	75	RO	185	258	50
GO e DF	799	1165	241	RR	75	97	13
MA	257	355	163	RS	675	859	391
MG	1474	1917	803	SC	481	604	266
MS	343	497	76	SE	183	248	74
MT	711	1069	140	SP	1280	1683	606
PA	289	370	122	TO	372	524	134

4.2 Resultados

Alterou-se o parâmetro de tempo máximo de processamento do resolvidor Gurobi, que foi limitado, para cada execução, em 500 segundos para o método Híbrido e 5000 segundos para o

método Exato. Como o método Guloso pode apresentar aleatoriedade no processo de seleção de trechos para o posicionamento de contadores, conforme destacado na Seção 3.2, esse método foi replicado 15 vezes em cada instância. Como o método Híbrido utiliza o método Guloso, também foram consideradas 15 execuções para avaliação dos resultados.

A Figura 5 apresenta a melhor solução para cada instância e os tempos médios de processamento obtidos pelo método Guloso. Percebe-se que, de forma geral, os tempos de processamento foram baixos, sendo os que maiores foram obtidos para as instâncias mais complexas (MG e SP). Outra instância que apresentou um tempo maior de execução foi MT que, apesar de ter um número de municípios não tão elevado, apresenta grande número de nós e arestas (trechos) na rede, o que pode indicar que o grau de dificuldade de resolução esteja associado a estas duas características.

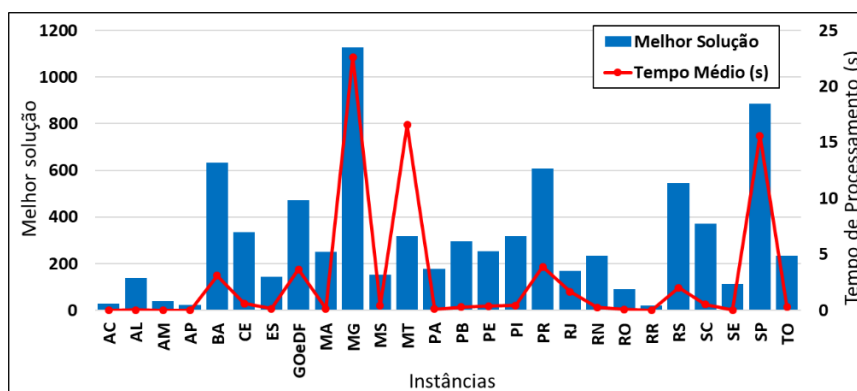


Figura 5: Melhor solução e tempo médio de processamento das soluções - Método Guloso.

As melhores soluções para cada instância, de acordo com as variações aplicadas ao método Híbrido (5, 15 e 30%) podem ser observadas na Figura 6. Percebe-se uma constância nos valores de melhor solução, já que em várias instâncias ele não se altera, e em outras a alteração é pouco significativa. As instâncias que apresentaram maior variação entre os resultados foram GO e DF (que apresentaram solução de 471 para a variação de 5%, 466 para 15% e 465 para 30%) e MT (com melhores soluções de 307 para os 5%, 303 para 15% e 311 para 30%). Vale destacar que tais variações não apresentaram o mesmo comportamento em ambos, uma vez que a instância GO e DF obteve reduções de valor (o que é melhor pois o PLCT é um problema de minimização), enquanto MT obteve queda da primeira para a segunda variação (de 307 para 303) e subida da segunda para a terceira (303 para 311).

Ao analisar estas duas instâncias sob a ótica do tempo de processamento (veja Figura 7), percebe-se que GO e DF tiveram um aumento no tempo associado à melhoria do valor da solução encontrada. Já MT, que piorou o desempenho de sua solução entre as variações de 5% e 30%, registrou o maior aumento de tempo de execução. Há indícios, então, de que a utilização de métodos exatos para tal instância seja inviável ou demande demasiado esforço computacional. Outras instâncias que registraram aumento no tempo de processamento ao longo das variações do método Híbrido foram MG, RJ e SP. Dentre essas, SP registrou o aumento mais representativo, no entanto, sua tendência de melhora da função objetivo pode justificar positivamente esse aumento.

A Figura 8 mostra o *gap* resultante da aplicação do método Exato a cada instância. Pode-se observar

que, na maior parte delas as soluções encontradas atingiram a otimalidade. No entanto, nas instâncias GO e DF, MT, RJ e SP a solução ótima não foi encontrada, destacando-se o *gap* em torno de 13% para instância MT. Pode-se concluir, então, que para instâncias mais complexas, o método Exato não consegue garantir a otimalidade dentro do tempo computacional máximo estipulado em 5000 segundos.

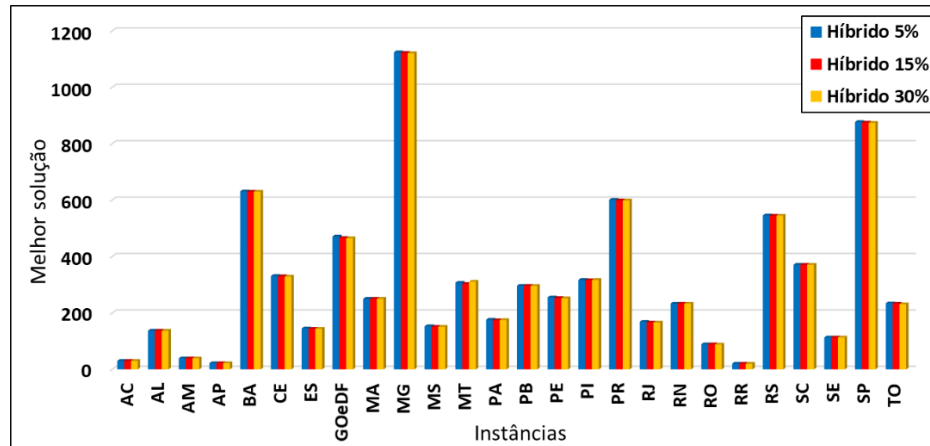


Figura 6: Melhores soluções encontradas pelas variações do método Híbrido.

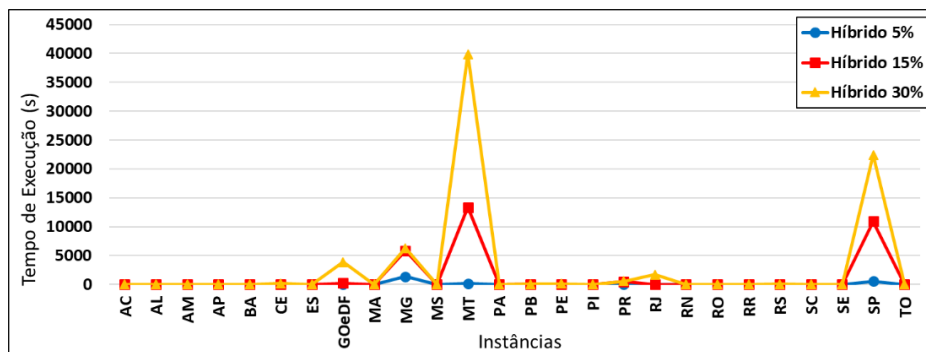


Figura 7: Tempos de execução das variações do método Híbrido.

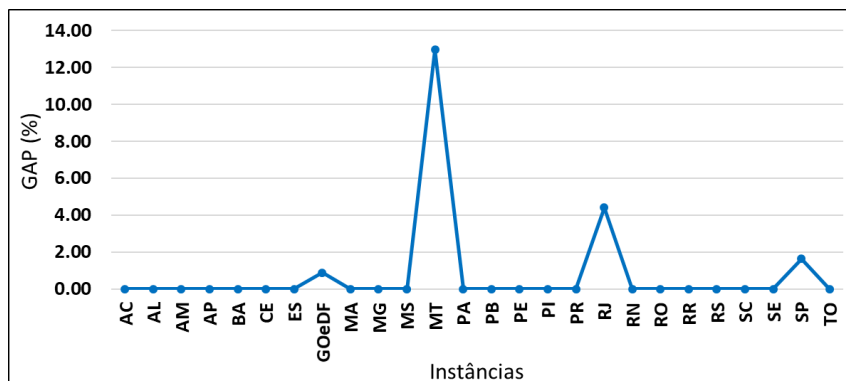


Figura 8: *Gap* percentual das soluções encontradas pelo método Exato.

Por fim, a Figura 9 apresenta, em escalas comparativas, a qualidade dos resultados e o tempo de solução para as 13 instâncias mais difíceis. Na Figura 9 (a) está representada a qualidade das soluções médias

encontradas por cada método em uma escala percentual em relação à melhor solução conhecida (método exato). Já a Figura 9 (b) mostra o tempo médio de solução de cada método em relação ao método Guloso.

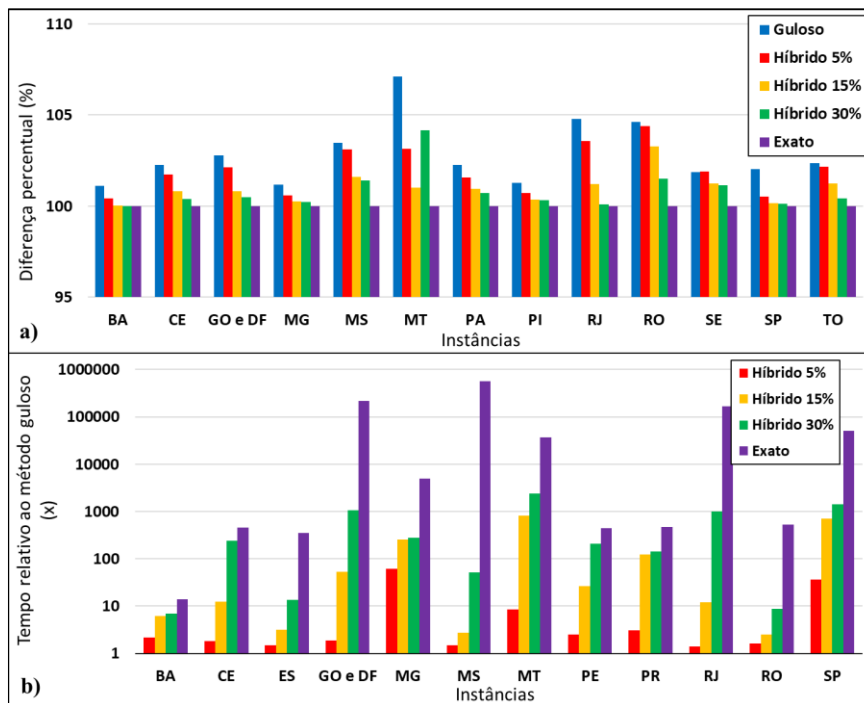


Figura 9: (a) Soluções médias em escala percentual em relação ao método Exato; e (b) Escalada de tempo de solução em relação ao método Guloso.

Diante dos resultados obtidos, é possível verificar a premissa de que o método Guloso toma as melhores decisões nas primeiras iterações, pois a qualidade média das soluções obtidas pelo método Híbrido aumenta à medida que um maior percentual de restrições é resolvido de maneira exata. Uma exceção é a instância MT para o valor de entrada de 30%, mas isso é explicado pelo fato de o tempo limite fornecido ao resolvidor exato não ser suficiente para gerar uma solução primal de boa qualidade. Por outro lado, também se constatou que o tempo de solução requerido para resolver as instâncias de maneira exata aumenta muito à medida que os problemas se tornam mais complicados, o que afeta diretamente os tempos computacionais do método Híbrido.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse artigo propôs métodos Guloso, Exato e Híbrido para resolver o Problema de Localização de Contadores de Tráfego (PLCT). O método Exato considera o clássico problema de Cobertura de Conjuntos e o método Híbrido combina o método Guloso com o Método Exato. Foram montados 26 casos-teste reais, baseados na rede rodoviária brasileira.

Os resultados computacionais comparativos indicaram que os métodos Guloso e Híbrido são capazes de gerar soluções de boa qualidade. No entanto, o tempo de solução requerido para resolver as instâncias de maneira exata aumenta muito à medida que os problemas se tornam mais complicados, o que afeta diretamente os tempos computacionais do método Híbrido.

Diante disso, acredita-se que esse trabalho foi capaz de oferecer um suporte analítico ao processo de planejamento de pesquisas de tráfego. Por meio dele, os órgãos governamentais responsáveis pelo monitoramento do tráfego nas rodovias e por todo o planejamento relacionado a esse tipo de infraestrutura, passa a contar com mais uma ferramenta de otimização de recursos, que possibilita a redução de custos de implantação, manutenção e operação de contadores de tráfego.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que seja realizado um estudo para a implementação de metaheurísticas para a resolução desse problema, já que esses métodos abrangem diversos procedimentos com estratégias para escapar de mínimos locais em espaços de busca de soluções complexos. Além disso, também é possível aplicar uma adaptação desses métodos de resolução para problemas onde a quantidade de contadores de tráfego é limitada, em decorrência de questões orçamentárias, por exemplo, como proposto por Chen *et al.* (2007).

Agradecimentos

O presente artigo foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L.; e Orlin, J. B. (1993) Network flows: theory, algorithms, and applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Bertsekas, D. P. (1998) Network optimization: continuous and discrete models. Athena Scientific, Cambridge, Massachusetts.
- Chvátal, V. (1979) A greedy heuristic for the set-covering problem. *Mathematics of Operations Research*, v. 4, n. 3, p. 233-235.
- Chen, A.; Pravinongvuth, S.; Chootinan, P.; Lee, M.; e Recker, W. (2007) Strategies for selecting additional traffic counts for improving od trip table estimation. *Transportmetrica*, v. 3, n. 3, p. 191-211.
- CNT (2019) Boletim Estatístico - CNT - Fevereiro 2019. Confederação Nacional dos Transportes, Brasília, DF.
- Ding, J. Y.; Song, S.; Gupta, J. N.; Zhang, R.; Chiong, R.; e Wu, C. (2015) An improved iterated greedy algorithm with a Tabu-based reconstruction strategy for the no-wait flowshop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, v. 30, p. 604-613.
- Fei, X.; Mahmassani, H. S.; e Murray-Tuite, P. (2013) Vehicular network sensor placement optimization under uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 29, p. 14-31.
- Fisk, C. (1988) On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 22, n. 1, p. 69-73.
- Garber, N. J.; e Hoel, L. A. (2014) Traffic and highway engineering, Cengage Learning, Stamford, Connecticut.
- Gentili, M.; e Mirchandani, P.B. (2012) Locating sensors on traffic networks: models, challenges and research opportunities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 24, p. 227-255.
- Gomes, G. (2015) Análise comparativa das características de tráfego calculadas pelo HCM- 2010 e pelo microssimulador Aimsun para uma área de estudo em Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 177 p.
- González, P. H., Clímaco, G., Mauri, G. R., Vieira, B. S., Ribeiro, G. M., Orrico Filho, R. D., ... & Hoffmann, I. C. S. (2019) New approaches for the traffic counting location problem. *Expert Systems with Applications*, v. 132, p. 189-198.
- Guha, S.; e Khuller, S. (1998) Approximation algorithms for connected dominating sets. *Algorithmica*, v. 20, n. 4, p. 374-387.
- Kruskal, J. B. (1956) On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical Society*, v. 7, n. 1, p. 48-50.
- Slavík, P. (1996) A tight analysis of the greedy algorithm for set cover. In *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, p. 435-441. ACM.
- Wang, N.; Gentili, M.; e Mirchandani, P. (2012) Model to locate sensors for estimation of static origin-destination volumes given prior flow information. *Transportation Research Record*, v. 2283, n. 1, p. 67-73.
- Yang, H.; Yang, C.; e Gan, L. (2006) Models and algorithms for the screen line-based traffic counting location problems. *Computers & operations research*, v. 33, n. 3, p. 836-858.