

**Método Computacional para a
Otimização do Projeto da Malha Viária de
Florianópolis-SC**

Rafael de Santiago

Relatório Técnico INE 003/2020

Método Computacional para a Otimização do Projeto da Malha Viária de Florianópolis-SC

Rafael de Santiago

28 de agosto de 2020

Resumo

A frota de veículos terrestres cresceu mais de 70% no Brasil. Em contraste, investimentos públicos no setor de infraestrutura de transporte rodoviário não cresceram na mesma proporção. Como resultado, há uma demanda urgente na melhoria de fluxo na malha viária dos grandes centros brasileiros. A região da grande Florianópolis é uma das regiões que sofrem com o alto fluxo de veículos, por ser um centro importante da administração pública catarinense, ter uma alta densidade de empresas e por suas características geográficas. Para auxiliar na tomada de decisão do planejamento rodoviário, diversos trabalhos na área de algoritmos e otimização vem reportando e avaliando métodos computacionais. Nesse contexto, a pesquisa desenvolveu um método computacional para auxiliar o planejamento da malha viária do município de Florianópolis - SC inspirado no modelo/método de Salman-Alaswad. Para isso: *(i)* estudou-se a malha viária de Florianópolis e suas demandas; *(ii)* levantou-se métodos computacionais para resolver problemas de planejamento de malhas viárias terrestres na literatura; *(iii)* foi desenvolvido o método computacional com base no método de Salman-Alaswad. O projeto contou com apoio de um bolsista do edital PIBIC 2019-2020. O método computacional desenvolvido está publicado no GITHUB (em modo público) e apresentou melhoria na malha viária experimentada. Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar os experimentos para compreender a escalabilidade dos parâmetros do método e potencial publicação em veículos de comunicação científica. Uma

continuação natural do projeto já foi aprovada pelo departamento e pretende-se reforçar as contribuições estabelecidas para melhorar a visibilidade dos resultados.

Palavras-chave

Algoritmos e Otimização. Otimização da Malha Viária. Problema de Projeto em Redes.

1 Introdução

| | |
|----------------------------|---|
| Nome do orientador: | Rafael de Santiago |
| Bolsista de IC: | Marcos Tomaszewski |
| Grupo de pesquisa: | Grupo de Inteligência Artificial e Teoria Computacional (IATE) |
| Departamento: | Departamento de Informática e Estatística (INE) |
| Centro/Unidade: | Centro Tecnológico (CTC) |
| Título: | Método Computacional para a Otimização do Projeto da Malha Viária de Florianópolis-SC |
| Fonte financiadora: | Contou com uma bolsa do “Programa Institucional de Iniciação Científica e Tecnológica – PIICT, Bolsas PIBIC/CNPq” 2019/2020 |

A frota de veículos terrestres no Brasil cresceu quase 70% nos últimos dez anos passando de pouco mais de 59 milhões em dezembro de 2009 para mais de 100 milhões de veículos em dezembro de 2018 (DENATRAN, 2019). Esse crescimento na frota demanda melhoria na infraestrutura de transporte rodoviário para melhorar o escoamento da produção nacional e o tráfego em geral nas estradas do país. Em contraste a essa demanda, a Confederação Nacional do Transporte reporta que os investimentos públicos federais em infraestrutura de transporte rodoviário recebeu a mesma proporção atualmente que em 2009 (CNT, 2017). Esse crescimento na frota de veículos aliado a tendência estável de investimentos federais são indícios importantes das consequências nos trânsitos das grandes cidades do país.

Muitas cidades possuem sérios problemas de congestionamento relacionados a suas redes de tráfego. O relatório TomTom Traffic Congestion Ranking 2018 (TOMTOM, 2018) relata que mais de 45% das 403 cidades estudadas apresentaram 25% de nível de congestionamento.

A medida de nível de congestionamento é obtida pela comparação entre condições com livre tráfego e o comportamento médio anual para cada segmento de pista.

Altos níveis de congestionamento afetam a população diretamente. Em INRIX 2018 Global Traffic Scorecard foi apresentado que o custo por motorista pode variar entre 304,00 e 2.291,00 dólares em cidades norte americanas (INRIX, 2018). Nesse país, a velocidade de tráfego no centro das cidades pode chegar a menos de 14 km/h. No Brasil, em 2018, os níveis de congestionamento atingiram 35% em cidades como Recife, São Paulo e Rio de Janeiro (TOMTOM, 2018). Em Belo Horizonte e São Paulo, motoristas passam 202 e 154 horas em congestionamentos respectivamente (INRIX, 2018).

Florianópolis não foge desse contexto. A capital do Estado de Santa Catarina possui uma demanda alta de tráfego veículos terrestres, pois abriga diversos órgãos estaduais e federais, além de ter vocação turística e ser pólo para empresas de diversos setores. Para suportar esses argumentos, realizou-se estimativas de tempo de viagens no Google Maps em itinerários na cidade de Florianópolis. Fazer o percurso da saída da BR-101 para a BR-282 (São José) até Canasvieiras (Norte da Ilha) tem uma estimativa de tempo de viagem que pode demandar quase três vezes o melhor tempo de viagem. Da saída da BR-101 para a BR-282 (São José) até o Ribeirão da Ilha (Sul da Ilha) o caminho pode demandar até 2,4 vezes o tempo de viagem. Da BR-101 para a BR-282 (São José) até a Praia Mole (Leste da Ilha) poderia demandar até três vezes o tempo mínimo.

Neste contexto, alguns pesquisadores da área de otimização discreta lidam com várias famílias de problemas de otimização de tráfego em estradas. Seus trabalhos suportam o desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar o trânsito nas cidades. A aplicação desses trabalhos pode criar planejadores e simuladores que auxiliam os tomadores de decisão na alocação de recursos de maneira mais eficiente. Novas formulações matemáticas e métodos podem ser vistos em Bhaskar, Ligett e Schulman (2014), Akhand et al. (2015), Labidi et al. (2016), Owais, Osman e Moussa (2016), Rodríguez-Martín, Salazar-González e Yaman (2016), Bagloee, Sarvi e Patriksson (2017), Nayeem, Islam e Yao (2018), Yıldız, Karaşan e Yaman (2018), Islam et al. (2019). Kian e Kargar (2016), Paraskevopoulos, Gürel e Bektaş (2016), Salman e Alaswad (2018) lidam com problemas de congestionamento. Lin et al. (2017), Fontaine e Minner (2018), Kaya e Ozkok (2018), Kolak, Feyzioğlu e Noyan (2018) incluíram sustentabilidade em seus modelos e métodos. Metadados para adicionar ou editar estradas são tratados em Chen et al. (2015),

Wang, Liu e Szeto (2015), Fontaine e Minner (2017), Fukunaga (2017). Associação de tráfego em Jafari, Pandey e Boyles (2017), Wang, Peeta e He (2019).

Network Design Problems (NDP) são problemas de otimização discreta para apoiar a tomada de decisão no projeto de redes de tráfego considerando vários fatores. Formaliza-se um problema NDP usando os modelos de Leblanc (1975) e Poorzahedy e Turnquist (1982). Considere uma rede/grafos $G = (V, A)$ que deve ter seu projeto alterado. V é o conjunto de nodos e $A = A_1 \cup A_2$ é o conjunto de arcos. A_1 é o conjunto de arcos existentes que não serão modificados. A_2 é o conjunto de arcos a serem considerados.

Frequentemente, o NDP é resolvido em dois submodelos. O primeiro representa é concebido para definir os melhores planos de mudança na rede, chamado aqui de NDPm. O segundo é sobre o equilíbrio do usuário que mapeia o fluxo na rede, chamado aqui de NEPm.

O modelo NEPm é apresentado na Equação (1) usando a versão de Leblanc (1975) no lugar de Poorzahedy e Turnquist (1982) por simplicidade. Assuma que x_a é o fluxo total que passa pelo arco, e x_{av} é o fluxo que passa pelo arco a para o nodo $v \in V$. $d_{u,v}$ denota a demanda do par origem-destino (u, v) , considerando o par de nodos $u, v \in V$. Os valores $y_a = 1$ se o projeto a é selecionado, $y_a = 0$ caso contrário. O valor $h_a(x_a, y_a)$ denota o custo médio de viagem sobre o arco a . Ele depende do fluxo, x_a e y_a .

O modelo NDPm é apresentado na Equação (2). Considere que c_a é o custo de implementar o projeto (arco) a , e B é o orçamento total disponível para o planejamento. x_a^* é a solução dos valores obtidos no modelo NEPm, ou seja, o fluxo que passa pelo arco a , previamente estabelecido pela solução obtida para um modelo NEPm.

Problemas NDP aplicados ao trânsito de veículos terrestres são problemas de otimização discreta que determinam o trânsito de uma cidade (NAYEEM; ISLAM; YAO, 2018). Eles podem representar muitos aspectos da realidade complexa de uma cidade, incluindo tráfego multimodal, transporte público e poluição. Esses problemas são conhecidos pela alta demanda de recursos computacionais (principalmente tempo computacional) (ISRAELI; CEDER, 1995), então há diversos esforços na literatura científica que reportam modelos não exatos para problemas NDP.

Alguns métodos apresentados na literatura consideram NDP como de programação em dois níveis (bilevel programming) (GAO; WU; SUN, 2005; ZHANG; GAO, 2009; FARVARESH; SEPEHRI, 2011; FONTAINE; MINNER, 2014; YU et al., 2015; SUN, 2016; KOLAK; FEY-ZIOĞLU; NOYAN, 2018). Yang e Bell (1998) propuseram um modelo de dois níveis para o

NDP considerando os seguintes componentes: atividade econômica, capacidade do sistema de transporte, fluxo de tráfego e sistema gerenciamento. Um modelo de programação em dois níveis para o NDP pode usar o modelo de jogo líder-seguidor, no qual o sistema de gerenciamento é o líder e os usuários da rede são os seguidores. O nível-superior representa as tomadas de decisão de investimento do transporte para maximizar os benefícios sociais. Nesse nível, é assumido que há um equilíbrio único de padrão de fluxo obtido pelo nível-inferior para qualquer variável do nível-superior.

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{a \in A_2} x_a h_a(x_a, y_a) & \min \sum_{a \in A_2} x_a^* h_a(x_a^*, y_a) \\
& \text{s.t.} & \text{s.t.} \\
& \sum_{a \in \alpha(u)} x_{av} - \sum_{a \in \beta(u)} x_{av} = d_{u,v} & \sum_{a \in A_2} c_a y_a \leq B \\
& \forall u, v \in V, u \neq v & y_a \in \{0, 1\} \forall a \in A_2. \\
& \sum_{u \in V} x_a u - x_a = 0 \forall a \in A & \\
& x_{av} \geq 0 \forall v \in V, \forall a \in A & \\
& x_a \geq 0 \forall a \in A & \\
& y_a \in \{0, 1\} \forall a \in A_2. &
\end{aligned} \tag{1} \tag{2}$$

O equilíbrio do usuário caracteriza o comportamento de escolha de rota na rede. É importante definir os padrões de fluxo, e quais partes da rede necessitam de maior atenção (LUATHEP et al., 2011). Geralmente, uma matriz de origem-destino é usada para mapear a demanda de uma origem até um local. O princípio de Wardrop (WARDROP, 1952) é um modelo de equilíbrio comumente utilizado. No Wardrop, o tempo de viagem de todos os caminhos usados conectando origens e destinos é igual ou inferior a qualquer caminho não usado (WANG; LO, 2010). Salman e Alaswad (2018) propuseram uma cadeia de Markov no lugar do tempo total de viagem para o equilíbrio do usuário devido ao tempo de viagem esperado entre dois pontos da rede não depende dos pontos iniciais ou finais. Então eles sugeriram o uso da densidade de veículos nas estradas (veículos por quilômetros por número de pistas)

O projeto teve como objetivo geral desenvolver novo método computacional para a otimização do projeto da malha viária do município de Florianópolis - SC. Para atingí-lo, os seguintes objetivos específicos foram concluídos:

1. Identificar as características e gargalos principais da malha viária de Florianópolis;
2. Enumerar os principais métodos computacionais para o problema de planejamento da malha viária;
3. Listar ranqueamento dos métodos computacionais mais adequados ao município de Florianópolis;
4. Propor novo método computacional inspirado nos métodos ranqueados e aderente à realidade do município de Florianópolis;
5. Desenvolver o método proposto;
6. Avaliar o método proposto.

2 Material e Métodos

Iniciou-se a pesquisa buscando mapas rodoviários que pudessem ser importadas, para posterior análise do algoritmo, bem como ferramentas para de cartografia para pontuais edições. Por vantagens como ferramentas e documentação amplas, junto a sua licença aberta, o projeto OpenStreetMap (openstreetmap.org) foi escolhido.

Posteriormente foram analisadas as alternativa de fontes para dados de tráfego de Florianópolis. Nenhuma opção viável foi encontrada, pois serviços mais conhecidos apresentavam problemas como excesso de generalização nas informações (caso do Google Maps) ou somente as disponibilizavam para parceiros/mediante pagamento (Waze Mobile) e fontes locais não se dispuseram a colaborar com o projeto via recusa formal ou burocratizando em excesso a acessibilidade dos dados.

Com fontes de dados já definidas iniciou-se um estudo de características, métodos de otimização e métricas de desempenho para redes de tráfego.

Para o desenvolvimento do método, buscando uma disrupção mínima na rede de tráfego já estabelecida, optou-se por melhorar o desempenho das redes por alterações de sentido das pistas ao invés dos mais tradicionais métodos como aumento no número de pistas ou mesmo construção de novas vias, já que os custos para alteração são consideravelmente reduzidos juntamente ao tempo para esta se realizar, permitindo inclusive, otimizações temporárias, para permitir maior fluxo em situações adversas, como por exemplo, eventos de grande porte e

reparos/reformas em vias. A mutação, recombinação e hereditariedade providas por técnicas de algoritmos genéticos elevaram significativamente o número possível de soluções permitindo que mesmo soluções mais inusitadas pudessem ser consideradas, sem que o desempenho do algoritmo fosse demasiadamente afetado.

Uma abordagem comum para otimização de redes é o User Equilibrium (UE) que parte de uma matriz origem-destino, originada de entrevista com os usuários do sistema, processo caro, lento e impreciso, como alternativa utilizou-se a atribuição de tráfego por Cadeias de Markov (MTCA), eliminou-se a necessidade de tal pesquisa e tornou-se possível o estudo de um sistema de vias independentemente de definição de rotas, o que aumenta substancialmente sua escalabilidade, uma vez que se definem as rotas a partir de estados (cruzamentos), os quais podem ser monitorados de forma automatizada e muito menos custosa.

Ao analisar o desempenho de uma rede, o UE aborda a redução do tempo médio de deslocamento como maneira de reduzir os congestionamentos. O MTCA no entanto considera o fato de que segundo a constante de Kemeny, o tempo de transição de um estado A para um outro estado aleatório B de uma cadeia de Markov, não depende do estado B escolhido e sim somente de da própria cadeia (SALMAN; ALASWAD, 2018). Resultando disso, tem-se que o tempo de deslocamento depende somente da rede de tráfego, e não da origem/destino, porém usar somente a constante de Kemeny para avaliar o desempenho de um design sem considerar as características dos estados, pode levar a sérios problemas de sobrecarga, contrariando o propósito inicial. Uma das alternativas, sugerida por Salman e Alaswad (2018) é o uso de densidade de uma via (veículos/kilômetro/pista) como indicativo de desempenho, pois permite uma análise de desempenho ao nível de via, sem a possibilidade dos problemas apresentados pela avaliação via constante de Kemeny.

Após definidas as técnicas a serem usadas pelo método, iniciou-se o desenvolvimento do mesmo, a linguagem de programação python foi escolhida devido a ampla disponibilidade de bibliotecas, alta produtividade e versatilidade.

Com o objetivo de aumentar a familiaridade com python e algoritmos genéticos, iniciou-se o desenvolvimento codificando um algoritmo genético com populações compostas por conjuntos de caracteres alfanuméricos, tendo como objetivo chegar a uma frase pré-determinada.

Com uma maior afinidade com algoritmos genéticos levantou-se os parâmetros que seriam usados. As soluções iniciais se dariam como cópias da solução original, sendo que um número

selecionável de soluções sofreria uma mutação. Esta se daria escolhendo um par de ruas ao acaso e revertendo uma das faixas. A seleção de pais da próxima geração seria feita de acordo com o método da roleta e o crossover efetuado a partir de o sorteio de um ponto e troca entre dois cromossomos. O *fitness* seria definido pela densidade da pior via no sistema. Para a seleção das soluções que permanecem para a próxima geração, a população seria ordenada por *fitness* e separada entre melhores, médios e piores, uma proporção selecionável de cada classe seria mantida para a próxima geração. O critério de parada escolhido foi o número de gerações pré-definido.

3 Resultados Obtidos

O projeto teve como objetivo geral desenvolver novo método computacional para a otimização do projeto da malha viária do município de Florianópolis - SC. Para atingí-lo, os seguintes objetivos específicos foram concluídos de forma parcial ou total:

1. Identificar as características e gargalos principais da malha viária de Florianópolis (parcial);
2. Enumerar os principais métodos computacionais para o problema de planejamento da malha viária (total);
3. Listar ranqueamento dos métodos computacionais mais adequados ao município de Florianópolis (total);
4. Propor novo método computacional inspirado nos métodos ranqueados e aderente à realidade do município de Florianópolis (total);
5. Desenvolver o método proposto (total);
6. Avaliar o método proposto (total).

A seguir, há a descrição dos resultados obtidos acerca dos objetivos do projeto.

Características e Gargalos da Malha Viária de Florianópolis (objetivo 1)

Os pesquisadores envolvidos no projeto entraram em contato com DNIT/Detran e Lab-Trans. No entanto, nenhuma das alternativas de contato forneceu dados sobre o mapeamento do trânsito de Florianópolis. Então, decidiu-se solicitar o compartilhamento de dados provenientes

dos aplicativos Waze e Google Maps. Também não se obteve dados necessários para mapear os gargalos. Então, decidiu-se proceder a pesquisa com dados sintéticos com o intuito de avaliar a efetividade do método proposto pelo presente projeto de pesquisa.

No entanto, uma instância foi preparada para representar a cidade de Florianópolis. O mapa foi obtido através do OpenStreetMap¹ que é uma iniciativa para o compartilhamento de mapas contendo informações de malhas viárias e localidades. As informações da ocupação das vias em diferentes horários ainda não foram inseridas nessa instância, mas a mesma está sendo compartilhada para que futuros projetos possam dar mais legitimidade à instância e resultados específicos com a cidade possam ser relatados.

Modelos e Métodos Presentes na Literatura (objetivos 2 e 3)

Um levantamento da literatura fora realizado. Percebeu-se que a literatura divide os problemas NDP em diversos outros aplicados a contextos/problemáticas específicos. Os seguintes modelos/problemas computacionais foram identificados.

- Discrete Network Design Problem (DNDP): o problema DNDP foi introduzido em Leblanc (1975). Ele representa uma decisão ótima sobre uma nova conexão/estrada/arco assumindo uma capacidade pré-definida. O modelo considera um orçamento limitado e um comportamento de motoristas pré-estabelecido. Ele é semelhante aos modelos apresentados nas Equações (1) e (2).
- Ferry Network Design Problem (FNDP): esse problema encontra a utilidade máxima de uma árvore geradora mínima conectando todas as estações de *ferry-boats* (BELL et al., 2018).
- Logistics Network Design Problem (LNDP): esse problema considera o número de fornecedores e depósitos, suas localizações e capacidades, e o fluxo de produtos em uma rede logística (CHENG et al., 2018).
- Road Network Design Problem (RNDP): é a classificação usada por alguns autores para denominar os modelos que são aplicações de NDPs a estradas (FARAHANI et al., 2013).
- Public Transit Network Design Problem (PTNDP): é um NDP que considera características do transporte público (FARAHANI et al., 2013).

¹ O OpenStreetMap pode ser acessado pelo endereço <<https://www.openstreetmap.org/>>.

- Urban Transportation Network Design Problem (UTNDP): problema que une as características de RNDP e PTNDP (FARAHANI et al., 2013).
- Urban Network Design Problem (UNDP): problema que busca otimizar as características de tráfego urbano em uma rede de estradas urbanas, sem considerar modificações estruturais (GALLO; D'ACIERNO; MONTELLA, 2010).
- Rapid Transit Network (RTN): problema com o objetivo de projetar uma rede, decidindo quais nodos devem ser estações e como conectá-las. Ele tenta cobrir o máximo de itinerários de passageiros possível, minimizando os custos (CADARSO; ESCUDERO; MARÍN, 2018).

Dos problemas NDP estudados, o que acredita-se de melhor adequação à realidade da malha viária de Florianópolis é o UNDP, pois dá condições de buscar melhores projetos de tráfego sem considerar modificações estruturais, ou seja, por usar a estrutura previamente existente na cidade. Nesse contexto, entendeu-se que o trabalho de Salman e Alaswad (2018) apresentava maior viabilidade por: (i) se tratar de descrever um método computacional para um UNDP; e (ii) usar cadeia de Markov que emprega densidade de veículos nas estradas no lugar do tempo total de viagem para o equilíbrio do usuário. Essa última característica permite que experimentos sejam realizados sem a necessidade de captar dados do comportamento dos motoristas e suas trajetórias em Florianópolis.

Método Proposto (objetivos 4 e 5)

Considere que $G = (V, A)$ é um multigrafo dirigido, no qual V é o conjunto de vértices, A é a lista de arcos. Considere também as funções p e d . A função $p : A \times A \rightarrow [0, 1]$ mapeia um par ordenado (a, b) , no qual a é o arco de origem e b é o arco de destino, para um número entre 0 e 1 que corresponde à probabilidade de passar de a para b . A função $d : A \rightarrow [0, 1]$ corresponde a densidade de cada arco em A .

O método proposto foi inspirado no trabalho de Salman e Alaswad (2018). Foi implementado um algoritmo genético que utiliza cadeia de Markov. A entrada do algoritmo genético é dada pela tripla (G, p, d) . Cada indivíduo I é representado por $\{0, 1\}^m$, no qual $m = |A|$. I_j corresponde ao j -ésimo gene do indivíduo I , que corresponde ao j -ésimo arco da lista A . Se $I_j = 0$, então a direção do arco $j = (u, v)$ não é alterada. Se $I_j = 1$, então a direção do arco

$j = (u, v)$ é alterada, ou seja, considera-se que $j = (v, u)$. O *fitness* é definido pela densidade da pior via no sistema.

Os principais operadores de um algoritmo genético são os de mutação, crossover e seleção. Na mutação, presente no Algoritmo 1, aleatoriamente seleciona-se uma via e torna a via de mão única caso a mesma seja de mão dupla. O operador de crossover (Algoritmo 2) recebe dois indivíduos pais e considera as vias ordenadas. Depois, seleciona aleatoriamente as um ponto p e utiliza-o para gerar dois indivíduos descendentes, cada qual com as configurações das vias antes e depois do ponto p de cada indivíduo pai. Os pais são selecionados aleatoriamente. Há a probabilidade de 75% dos 20% melhores indivíduos serem mantidos para a próxima geração; os 20% piores são mantidos com 25% de chance; e os demais tem chance de 50% de chance de serem mantidos.

Algoritmo 1: Operador de Mutação.

Input : a instância do problema (G, p, d) , um indivíduo X
// Selecionando ponto aleatório
1 $p \leftarrow$ selecionar um inteiro aleatório no intervalo $[0; |X|]$
2 Se p corresponder a uma via de mão dupla em X , torná-la via de mão única, ou seja, com todas as pistas numa mesma direção. A direção é selecionada aleatoriamente.
3 **return** X

O código-fonte do projeto encontra-se publicado no repositório GITHUB e conta com acesso público. A URL do repositório é <<https://github.com/Seis/NDP2020-Tomaszewski-Santiago>>.

Avaliação do Método Proposto (objetivo 6)

Para avaliar o método replicado, criou-se uma instância artificial com 16 vias. Nesse experimento, foram realizadas cinco execuções em 50 gerações com 10 e 25 indivíduos.

As Figuras 1 e 2 exibem o *fitness* médio dos melhores e piores indivíduos presentes em cada geração para experimentos com 10 e 25 indivíduos respectivamente. Pode-se notar que depois da nona geração, há uma estabilidade nos melhores indivíduos para os experimentos com população 10 indivíduos. Uma convergência semelhante parece ocorrer nos experimentos com população de 25 indivíduos, mas a estabilidade ocorre a partir da sexta geração. Essa convergência evidencia a influência que a quantidade de indivíduos possui para a convergência das soluções.

A Figura 3 exibe um comparativo do *fitness* médio dos melhores indivíduos para expe-

Algoritmo 2: Operador de Crossover.

Input : a instância do problema (G, p, d) , dois indivíduos X e Y

```
// Selecionando ponto aleatório
1  $p \leftarrow$  selecionar um inteiro aleatório no intervalo  $[0; |X|]$ 
// Criando estruturas de dados para os dois filhos
2  $F' \leftarrow$  LIST()
3  $F'' \leftarrow$  LIST()
// Definindo primeiro filho
4 foreach  $x \in (X_1, X_2, \dots, X_p)$  do
5    $F'.APPEND(x)$ 
6 foreach  $y \in (Y_{p+1}, Y_{p+2}, \dots, Y_{|Y|})$  do
7    $F'.APPEND(y)$ 
// Definindo segundo filho
8 foreach  $y \in (Y_1, Y_2, \dots, Y_p)$  do
9    $F''.APPEND(y)$ 
10 foreach  $x \in (X_{p+1}, X_{p+2}, \dots, X_{|X|})$  do
11    $F''.APPEND(x)$ 
// Executando a mutação (Algoritmo 1) em cada filho
12  $F' \leftarrow$  MUTATE( $F'$ )
13  $F'' \leftarrow$  MUTATE( $F''$ )
// Retornando a prole com resultado
14 return ( $F', F''$ )
```



Figura 1 – *Fitness* médio dos melhores e piores indivíduos em cinco execuções com população de 10 indivíduos.

rimentos com 10 e 25 indivíduos por geração. Esse resultado traz indícios de que com uma quantidade maior de indivíduos, é possível obter resultados melhores. É esperado que haja uma quantidade limitante (limite inferior) para o número de indivíduos na população no qual não se obtém mais melhoria. Em testes futuros, pretende-se avaliar se essa população limitante é um número influenciado pelo tamanho da instância de entrada.

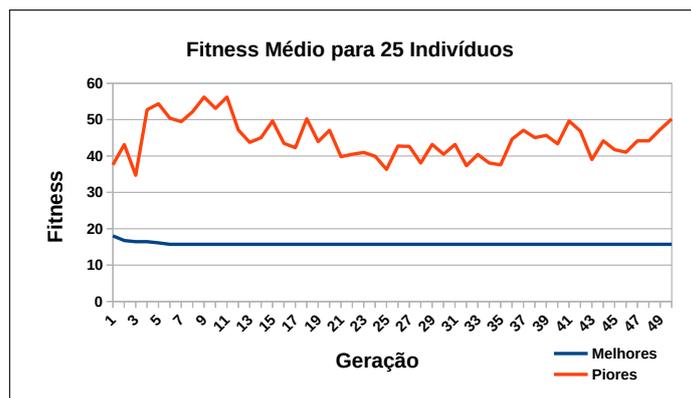


Figura 2 – *Fitness* médio dos melhores e piores indivíduos em cinco execuções com população de 25 indivíduos.

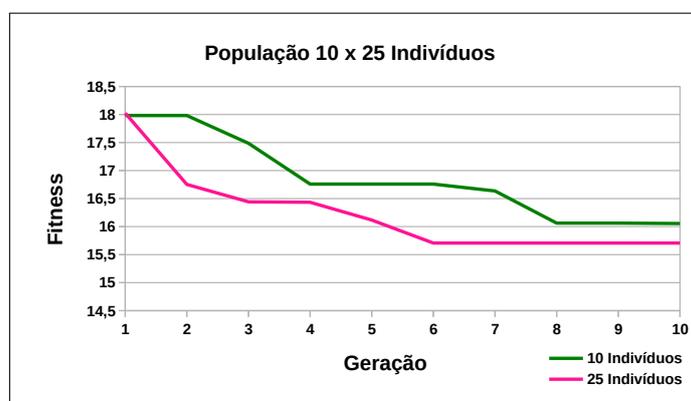


Figura 3 – Comparação do *fitness* médio dos melhores indivíduos médio obtido em cinco execuções com populações de 10 e 25 indivíduos.

4 Conclusões

O presente projeto de pesquisa desenvolveu um método computacional para a otimização de malha viária para que o mesmo seja usado em futura ferramenta para o município de Florianópolis - SC. Para atingir esse objetivo, fez-se um estudo na literatura e selecionou-se o modelo e método proposto por Salman e Alaswad (2018) como de potencial aplicação para realidade do planejamento viário de Florianópolis - SC.

O método foi replicado e encontra-se publicado em repositório público no GITHUB². Com os experimentos realizados, a evidência mais importante encontrada foi a de que para obter soluções melhores, a quantidade de indivíduos na população parece ter maior influência do que a quantidade de gerações.

Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar os experimentos para que os parâmetros do

² URL do projeto no GITHUB: <<https://github.com/Seis/NDP2020-Tomaszewski-Santiago>>.

algoritmo genético possam ser investigados em relação a escalabilidade. Ainda, os resultados permitiram que uma nova proposta fosse formulada para que o método computacional implementado e avaliado no projeto de pesquisa pudesse ser continuado. A proposta foi intitulada “Metaheurística para Alteração, Adição e Remoção de Estradas em Projetos de Malha Viária Terrestre” e foi aprovada no departamento com o código “202004500”. Com o fortalecimento dessa pesquisa, pretende-se submeter artigo científico para um dos seguintes eventos sobre otimização e computação evolucionária: IEEE Congress on Evolutionary Computation 2021³ ou The Genetic and Evolutionary Computation Conference 2021⁴.

³ IEEE CEC 2021: <<https://cec2021.mini.pw.edu.pl/>>.

⁴ GECCO 2021: <<https://cec2021.mini.pw.edu.pl/>>.

Referências

- AKHAND, M. A. et al. A PSO based transportation network design optimization of the mega city Dhaka. *2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEiCT 2015*, IEEE, n. May, p. 1–7, 2015. Citado na página 4.
- BAGLOEE, S. A.; SARVI, M.; PATRIKSSON, M. A Hybrid Branch-and-Bound and Benders Decomposition Algorithm for the Network Design Problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 32, n. 4, p. 319–343, 2017. ISSN 14678667. Citado na página 4.
- BELL, M. G. et al. An entropy maximizing approach to the ferry network design problem. *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., v. 38, p. 20–36, 2018. ISSN 23521465. Citado na página 10.
- BHASKAR, U.; LIGETT, K.; SCHULMAN, L. J. Network improvement for equilibrium routing. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 8494 LNCS, n. 2, p. 138–149, 2014. ISSN 16113349. Citado na página 4.
- CADARSO, L.; ESCUDERO, L. F.; MARÍN, A. On strategic multistage operational two-stage stochastic 0–1 optimization for the Rapid Transit Network Design problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., v. 271, n. 2, p. 577–593, 2018. ISSN 03772217. Citado na página 11.
- CHEN, X. M. et al. Surrogate-based optimization for solving a mixed integer network design problem. *Transportation Research Record*, v. 2497, p. 124–134, 2015. ISSN 21694052. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- CHENG, C. et al. A two-stage robust approach for the reliable logistics network design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 111, p. 185–202, 2018. ISSN 01912615. Citado na página 10.
- CNT. *Transporte Rodoviário - Desempenho do Setor, Infraestrutura e Investimentos*. 2017. <<https://www.cnt.org.br/pesquisas>>. Accessed: 2019-04-05. Citado na página 3.
- DENATRAN. *Frota de Veículos*. 2019. <<https://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos>>. Accessed: 2019-04-05. Citado na página 3.
- FARAHANI, R. Z. et al. A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, v. 229, n. 2, p. 281–302, 2013. ISSN 03772217. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- FARVARESH, H.; SEPEHRI, M. M. A single-level mixed integer linear formulation for a bi-level discrete network design problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier Ltd, v. 47, n. 5, p. 623–640, 2011. ISSN 13665545. Citado na página 5.
- FONTAINE, P.; MINNER, S. Benders decomposition for discrete-continuous linear bilevel problems with application to traffic network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 70, p. 163–172, 2014. ISSN 01912615. Citado na página 5.

- FONTAINE, P.; MINNER, S. A dynamic discrete network design problem for maintenance planning in traffic networks. *Annals of Operations Research*, Springer US, v. 253, n. 2, p. 757–772, 2017. ISSN 1572-9338. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- FONTAINE, P.; MINNER, S. Benders decomposition for the Hazmat Transport Network Design Problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., v. 267, n. 3, p. 996–1002, 2018. ISSN 03772217. Citado na página 4.
- FUKUNAGA, T. Spider covers for prize-collecting network activation problem. *ACM Transactions on Algorithms*, v. 13, n. 4, 2017. ISSN 15496333. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- GALLO, M.; D’ACIERNO, L.; MONTELLA, B. A meta-heuristic approach for solving the Urban Network Design Problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., v. 201, n. 1, p. 144–157, 2010. ISSN 03772217. Citado na página 11.
- GAO, Z.; WU, J.; SUN, H. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 39, n. 6, p. 479–495, 2005. ISSN 01912615. Citado na página 5.
- INRIX. *INRIX 2018 Global Traffic Scorecard*. 2018. Citado na página 4.
- ISLAM, K. A. et al. A heuristic aided Stochastic Beam Search algorithm for solving the transit network design problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, Elsevier B.V., v. 46, n. February, p. 154–170, 2019. ISSN 22106502. Citado na página 4.
- ISRAELI, Y.; CEDER, A. Transit route design using scheduling and multiobjective programming techniques. In: DADUNA, J. R.; BRANCO, I.; PAIXÃO, J. M. P. (Ed.). *Computer-Aided Transit Scheduling*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995. p. 56–75. ISBN 978-3-642-57762-8. Citado na página 5.
- JAFARI, E.; PANDEY, V.; BOYLES, S. D. A decomposition approach to the static traffic assignment problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 105, p. 270–296, 2017. ISSN 01912615. Citado na página 5.
- KAYA, O.; OZKOK, D. A network design problem with location, inventory and routing decisions. *GECCO 2018 Companion - Proceedings of the 2018 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, p. 139–140, 2018. Citado na página 4.
- KIAN, R.; KARGAR, K. Comparison of the formulations for a hub-and-spoke network design problem under congestion. *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, v. 101, p. 504–512, 2016. ISSN 03608352. Citado na página 4.
- KOLAK, O. I.; FEYZIOĞLU, O.; NOYAN, N. Bi-level multi-objective traffic network optimisation with sustainability perspective. *Expert Systems with Applications*, v. 104, p. 294–306, 2018. ISSN 09574174. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- LABIDI, M. K. et al. A parallel hybrid genetic algorithm for the K-edge-connected hop-constrained network design problem. *GECCO 2016 - Proceedings of the 2016 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, p. 685–692, 2016. Citado na página 4.
- LEBLANC, L. J. An algorithm for the discrete network design problem. *Transportation Science*, INFORMS, v. 9, n. 3, p. 183–199, 1975. ISSN 00411655, 15265447. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 10.

- LIN, B. et al. Modeling the railway network design problem: A novel approach to considering carbon emissions reduction. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier Ltd, v. 56, p. 95–109, 2017. ISSN 13619209. Citado na página 4.
- LUATHEP, P. et al. Global optimization method for mixed transportation network design problem: A mixed-integer linear programming approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 45, n. 5, p. 808–827, 2011. ISSN 01912615. Citado na página 6.
- NAYEEM, M. A.; ISLAM, M. M.; YAO, X. Solving Transit Network Design Problem Using Many-Objective Evolutionary Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, p. 1–12, 2018. ISSN 15249050. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- OWAIS, M.; OSMAN, M. K.; MOUSSA, G. Multi-objective transit route network design as set covering problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 670–679, 2016. ISSN 15249050. Citado na página 4.
- PARASKEVOPOULOS, D. C.; GÜREL, S.; BEKTAŞ, T. The congested multicommodity network design problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 85, p. 166–187, 2016. ISSN 13665545. Citado na página 4.
- POORZAHEDY, H.; TURNQUIST, M. A. Approximate algorithms for the discrete network design problem. *Transportation Research Part B*, v. 16, n. 1, p. 45–55, 1982. ISSN 01912615. Citado na página 5.
- RODRÍGUEZ-MARTÍN, I.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J. J.; YAMAN, H. A branch-and-cut algorithm for two-level survivable network design problems. *Computers and Operations Research*, Elsevier, v. 67, p. 102–112, 2016. ISSN 03050548. Citado na página 4.
- SALMAN, S.; ALASWAD, S. Alleviating road network congestion: Traffic pattern optimization using Markov chain traffic assignment. *Computers and Operations Research*, Elsevier Ltd, v. 99, p. 191–205, 2018. ISSN 03050548. Citado 5 vezes nas páginas 4, 6, 8, 11 e 14.
- SUN, Z. Continuous Transportation Network Design Problem Based on Bi-level Programming Model. *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., v. 137, p. 277–282, 2016. ISSN 18777058. Citado na página 5.
- TOMTOM. *Traffic Congestion Ranking*. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- WANG, D. Z.; LO, H. K. Global optimum of the linearized network design problem with equilibrium flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 44, n. 4, p. 482–492, 2010. ISSN 01912615. Citado na página 6.
- WANG, D. Z. W.; LIU, H.; SZETO, W. Y. A novel discrete network design problem formulation and its global optimization solution algorithm. *Transportation Research Part E*, Elsevier Ltd, v. 79, p. 213–230, 2015. ISSN 1366-5545. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- WANG, J.; PEETA, S.; HE, X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 126, p. 139–168, 2019. ISSN 01912615. Citado na página 5.
- WARDROP, J. G. SOME THEORETICAL ASPECTS OF ROAD TRAFFIC RESEARCH. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 1, n. 3, p. 325–362, may 1952. ISSN 1753-7789. Citado na página 6.

YANG, H.; BELL, M. G. Models and algorithms for road network design: A review and some new developments. *Transport Reviews*, v. 18, n. 3, p. 257–278, 1998. ISSN 14645327. Citado na página 5.

YU, B. et al. A bi-level programming for bus lane network design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier Ltd, v. 55, p. 310–327, 2015. ISSN 0968090X. Citado na página 5.

YILDIZ, B.; KARASAN, O. E.; YAMAN, H. Branch-and-price approaches for the network design problem with relays. *Computers and Operations Research*, v. 92, p. 155–169, 2018. ISSN 03050548. Citado na página 4.

ZHANG, H.; GAO, Z. Bilevel programming model and solution method for mixed transportation network design problem. *Journal of Systems Science and Complexity*, v. 22, n. 3, p. 446–459, 2009. ISSN 10096124. Citado na página 5.