

ANÁIRAM LIMA COSTA

**Calibração e validação de parâmetros
comportamentais do microssimulador de tráfego
VISSIM com a aplicação de meta-heurísticas**

Belo Horizonte

2020

ANÁIRAM LIMA COSTA

**Calibração e validação de parâmetros comportamentais
do microssimulador de tráfego VISSIM com a aplicação
de meta-heurísticas**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, submetido ao Departamento de Engenharia de Transportes, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Transportes.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Departamento de Engenharia de Transportes – DET

Curso de Engenharia de Transportes

Orientador: João Fernando Machry Sarubbi

Coorientador: José Elievam Bessa Júnior (UFMG)

Belo Horizonte

2020

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Curso de Engenharia de Transportes

Avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso

Aluna: Anáiram Lima Costa

Título do trabalho: Calibração e validação de parâmetros comportamentais do microssimulador de tráfego VISSIM com a aplicação de meta-heurísticas

Data da defesa: 02/12/2020 - Quarta-feira - Horário: 11:00

Local da defesa: *Online*

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado pela seguinte banca:

João Fernando Machry Sarubbi - Orientador

Departamento de Computação

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

José Elievam Bessa Júnior - Coorientador

Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia

Universidade Federal de Minas Gerais

Felipe Costa Bethonico

BHTrans - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte

André Leite Guerra

Departamento de Engenharia de Transportes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Anna Carolina Corrêa Pereira

Departamento de Engenharia de Transportes

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Aos meus pais, Ademir e Silvana, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

À minha irmã Naiane e minha quase irmã, Ana Paula, pelo apoio e amizade ao longo desta jornada.

Aos meus orientadores João Fernando Machry Sarubbi e José Elievam Bessa Júnior tenho que agradecer pela excelente orientação em cada etapa desta pesquisa, possibilitando melhorar (e muito!) os produtos deste trabalho. Aprendi muito com a experiência, exigência e dedicação de vocês. Muito Obrigada!

Ao MSc. Frederico Amaral e Silva, por gentilmente ter fornecido os dados de tráfego utilizados para a realização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET/MG pela gentileza e atenção. Um agradecimento especial ao professor, Augusto Cesar da Silva Bezerra pelas opções e disponibilidade.

Agradeço também aos amigos que fiz no CEFET que me permitiram perseverar no curso até esse momento: André, Lorena, Aléxia, Gleyci, Lucas, Marcela, Gabriela, entre outros.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.”
(Martin Luther King Jr.)*

Resumo

COSTA, A. L. **Calibração e validação de parâmetros comportamentais do microsimulador de tráfego VISSIM com a aplicação de meta-heurísticas**. 2020. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Transportes. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2020.

O uso de *softwares* de simulação de tráfego possibilita a análise de sistemas de transportes e, também o estudo de propostas de intervenção sem a necessidade de interferir fisicamente no local, obtendo-se vantagens econômicas e de tempo para gestão do tráfego. Assim, este trabalho teve como objetivo principal comparar técnicas de calibração e validação dos modelos comportamentais do simulador VISSIM, com base em um algoritmo genético (AG) e em um algoritmo *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), proposto neste trabalho. Para atingir esta meta, utilizou-se um conjunto de dados em segmentos de rodovias de pista simples na BR-040 com diferentes condições geométricas e de tráfego. Além disso, os dados utilizados neste trabalho foram obtidos pelo método das placas. Dessa forma, possibilita a calibração dos parâmetros do VISSIM com dados de campo. As calibrações foram realizadas somente após estimar outros parâmetros fundamentais do simulador, como aqueles ligados à distribuição de velocidades desejadas e ao desempenho de veículos pesados. Metade dos dados de tráfego coletados em campo foram usados na calibração e a outra metade na validação do simulador calibrado. Com relação aos resultados dos parâmetros calibrados com base em um algoritmo genético e em um algoritmo GRASP, todos os valores foram considerados mais agressivos, apresentando aderência de mais de 40%, do que os valores *default* do VISSIM. Desse modo, verificou-se a pertinência da aplicação dos algoritmos de calibração, visto que a função com objetivo de minimizar a raiz quadrada do erro médio (RMSE) dos valores obtidos para análise da velocidade média de viagem (ATS), apresentaram melhoria em relação aos valores obtidos com os parâmetros fornecidos pelo simulador (*default*). A calibração realizada com o AG obteve resultado 9% menor (melhor) do que com o GRASP, contudo a validação com AG obteve resultado 3% pior do que com o GRASP. O resultado demonstra que o modelo gerado pelo GRASP captura melhor a tendência global que as velocidades irão apresentar, expondo desempenho superior de generalização. Portanto, os resultados apresentados nesta pesquisa podem auxiliar profissionais a obter melhores modelos do tráfego simulado.

Palavras-chave: Simulação de Tráfego. Rodovia de Pista Simples. GRASP. Algoritmo Genético. Meta-heurísticas. VISSIM.

Abstract

COSTA, A. L. **Calibration and validation of behavioral parameters of the VISSIM traffic micro-simulator with the application of meta-heuristics**. 2020. 65f. Course Conclusion Paper (Graduation) - Transport Engineering. Federal Technology Education Center of Minas Gerais, 2020.

Using traffic simulation software allows the analysis of transport systems and also the study of intervention proposals without the need to physically interfere in the location, getting economic and time advantages for traffic management. Thus, this work had the main aim to compare calibration and validation techniques of the behavioral models of the VISSIM simulator, based on a genetic algorithm (AG) and a Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) algorithm, proposed in this work. To achieve this goal, a set of data was used in segments of two-lane rural highways on BR-040 with different geometric and traffic conditions. Besides, the data used in this work were got by the plate method. Thus, it allows the calibration of VISSIM parameters with field data. The calibrations were performed only after estimating other fundamental parameters of the simulator, such as those related to the distribution of desired speeds and the performance of heavy vehicles. Half of the traffic data collected in the field were used for calibration and the other half for validation of the calibrated simulator. About the results of the parameters calibrated based on a genetic algorithm and a GRASP algorithm, all values were considered more aggressive, presenting adherence of over 40%, than the default values of Vissim. Thus, the pertinence of the application of the calibration algorithms was verified, since the function to minimize the square root of the average error (RMSE) of the values got for the analysis of the mean travel speed (ATS), showed improvement to the values got with the parameters provided by the simulator (default). The calibration performed with the AG got a result 9% smaller (better) than with the GRASP, but, the validation with AG got a result 3% worse than with the GRASP. The result shows that the model generated by GRASP better captures the global trend that the speeds will present, exposing superior generalization performance. Therefore, the results presented in this research can help professionals to get better models of simulated traffic.

Keywords: Traffic Simulation. Two-lane rural highways. GRASP. Genetic Algorithm. Vissim.

Lista de Figuras

Figura 1 – Pontos fluxo-velocidade antes 1-(a) e após a calibração 1-(b) em comparação com os dados obtidos em campo. (BESSA Jr, 2015)	24
Figura 2 – Janela de edição dos parâmetros de <i>car following</i> de Wiedemann 99 do VISSIM	30
Figura 3 – Janela de edição dos parâmetros de <i>lane change</i> do VISSIM	32
Figura 4 – Método aplicado	38
Figura 5 – Etapas da modelagem	40
Figura 6 – Fluxograma de aplicação do AG. Fonte: Silva, 2019	43
Figura 7 – Exemplo um indivíduo com agressividade alta	44
Figura 8 – Exemplo de <i>crossover</i> dos indivíduos A e B gerando um indivíduo AB	45
Figura 9 – A figura 10-(a): uma população de 10 indivíduos é representada em círculo com áreas proporcionais à aptidão. Na figura 10-(b), aplica-se na população o processo de seleção pelo método da roleta	46
Figura 10 – Exemplo da aplicação de mutação em um indivíduo	46
Figura 11 – Pontos de coleta de dados pelo método das placas	49
Figura 12 – Diagrama esquemático dos controles e avaliação da simulação (adaptado de (LIDBE; HAINEN; JONES, 2017))	51
Figura 13 – Valores de RMSE obtidos durante o processo de calibração e de validação	53
Figura 14 – Resultado da simulação com parâmetros <i>default</i>	54
Figura 15 – Resultado da simulação com parâmetros calibrados com GRASP	54
Figura 16 – Resultado da simulação com parâmetros calibrados com AG	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Relação da terminologia do AG com a biologia	34
Tabela 2 – Valores <i>default</i> dos parâmetros de calibração	44
Tabela 3 – Síntese dos dados de tráfego coletados durante a Semana Santa de 2018	50
Tabela 4 – Síntese dos dados de tráfego coletados durante o feriado de Independência de 2018	50
Tabela 5 – Melhor conjunto de parâmetros encontrados pelo AG	52
Tabela 6 – Melhor conjunto de parâmetros encontrados pelo GRASP	52

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético
ATS	<i>Average Travel Speed</i>
COM	<i>Component Object Model</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
PF	<i>Percent Followers</i>
PTV	<i>Planung Transport Verkehr</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VISSIM	<i>Verkehr In Städten-SIMulation</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Contextualização	21
1.2	Problemática	21
1.3	Justificativa	24
1.4	Objetivos	25
1.5	Estrutura do texto	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Simulador VISSIM	27
2.1.1	Modelos Comportamentais do VISSIM	27
2.1.1.1	<i>Car Following</i>	27
2.1.1.2	<i>Lane Change</i>	30
2.2	Algoritmos de busca e otimização	32
2.2.1	Algoritmos meta-heurísticos	32
2.2.1.1	Algoritmo genético (AG)	33
2.2.1.2	Procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo (GRASP)	35
3	MÉTODO APLICADO	37
4	PARÂMETROS COMPORTAMENTAIS	39
4.1	Calibração e validação de parâmetros comportamentais	40
5	ALGORITMOS APLICADOS	43
5.1	Aplicação com AG	43
5.2	Aplicação com GRASP	47
6	EXPERIMENTOS	49
6.1	Coleta de Dados	49
6.2	Aplicação computacional	51
6.2.1	Criação da rede no VISSIM	51
6.2.2	Execução da calibração e validação	51
6.3	Resultados obtidos da calibração e validação	52
6.3.1	Aplicação com AG	52
6.3.2	Aplicação com GRASP	52
6.4	Discussão dos Resultados	53
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57

REFERÊNCIAS 59

1 Introdução

1.1 Contextualização

A crescente complexidade dos projetos rodoviários e do tráfego tem influenciado a criação de métodos de análise que sejam mais flexíveis e robustos do que as abordagens tradicionais, como os métodos analíticos (HELLINGA, 1998). Essa conjuntura, combinada com a crescente capacidade de processamento dos computadores pessoais, tem criado um ambiente propício ao desenvolvimento dos simuladores de tráfego, que podem ser utilizados para auxiliar na análise e no projeto de sistemas de transportes (MCLEAN, 1989; HELLINGA, 1998).

Assim, a simulação de tráfego tem sido aperfeiçoada nas últimas décadas, em razão do aumento de processos de modelagem da alocação do tráfego em diferentes níveis de representação do fluxo veicular. Portanto, o uso de *softwares* de simulação é essencial para a análise do desempenho de novas estratégias, políticas de gerência e gestão de soluções, de modo a potencializar a eficiência do sistema de transportes (MAIA, 2007).

Kim e Rilett (2001) declaram que, dentre as vantagens da simulação, observa-se a possibilidade de avaliar um conjunto de alternativas sem a necessidade de intervir diretamente no tráfego, além de possibilitar estudar situações ainda inexistentes. Dessa forma, a simulação de tráfego é uma atividade baseada na materialização visual de possibilidades das variáveis relacionadas ao fluxo viário e padrões de comportamento de motoristas, sem a necessidade da construção desses eventos, resultando em economia de tempo e dinheiro (PARAVISI; MUSSE; BICHO, 2006).

1.2 Problemática

A malha rodoviária federal pavimentada brasileira é constituída, como em grande parte dos países no mundo, (Brilon e Weiser (2006), Luttinen (2006), Polus e Cohen (2009)), majoritariamente, por rodovias de pista simples. A Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2019) releva que, no Brasil, a proporção é de 87,6%. Esse dado expõe a importância desse tipo de estrada para o país, uma vez que elas têm servido, na maior parte dos casos, como elementos que proporcionam acessibilidade para regiões distantes de grandes centros urbanos (BESSA Jr, 2015).

Nesse contexto, Bessa Jr e Setti (2016), Al-Kaisy e Durbin (2007), Polus, Craus e Livneh (1991), Brilon e Weiser (1998), e Abdelwahab, Aboul-Ela e Morrall (1998) concordam que a operação do tráfego em rodovias de pista simples é mais complexa devido à interação

entre os dois sentidos e à manobra de ultrapassagem.

De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro, ultrapassagem é o movimento de passar à frente de outro veículo que se desloca no mesmo sentido, em menor velocidade e na mesma faixa de tráfego, necessitando sair e retornar à faixa de origem (BRASIL, 1997). Para Pellegrini (2006), a operação dessa manobra está relacionada à eficiência da gestão da rodovia, visto que o nível de serviço e a capacidade das rodovias de pista simples são afetados pelo número de vezes que um veículo lento é alcançado por veículos de maior velocidade e pelo tempo em que os motoristas desses veículos são forçados a seguir o veículo lento, enquanto aguardam uma oportunidade para realizar a manobra. Por isso, faz-se necessária a correta modelagem dessa complexa manobra que envolve interação entre fluxos nos dois sentidos.

Nos simuladores microscópicos, como o VISSIM (PTV, 2018), os veículos na corrente de tráfego são tratados individualmente e se movem de acordo com o submodelos comportamentais, tais como *car following* que rege como veículos se mantem um atrás dos outros, e *lane change* que conduz a forma como os veículos mudam de faixa (ASTARITA et al., 2001). Geralmente, um microssimulador de tráfego é composto por vários submodelos, cada qual incluindo vários parâmetros que devem ser calibrados para melhor representar o sistema sendo simulado. No entanto, muitos desses parâmetros são difíceis de mensurar em campo, devido à necessidade de coletar muitos dados, ou porque são complicados de isolar (HOLLANDER; LIU, 2008). Por conveniência, parâmetros *default* são disponibilizados ao usuário, porém devem ter seu uso restrito para modelar locais onde as condições sejam semelhantes àquelas onde foram obtidos. No caso do VISSIM, os valores utilizados são baseados no comportamento observado nas rodovias alemãs.

Assim, para que os resultados sejam confiáveis, é imprescindível que o modelo seja capaz de reproduzir adequadamente o comportamento da corrente de tráfego. Como este trabalho almeja simular rodovias brasileiras de pista simples, os parâmetros comportamentais obtidos a partir de condutores em rodovias alemãs divergem dos alcançados em campo. Portanto, para Egami, Setti e Rillet (2004) o simulador deve ser submetido a um processo de calibração por meio do qual seus parâmetros internos são ajustados de forma que as diferenças entre os resultados da simulação com parâmetros *default* e as observações feitas no sistema real sejam minimizadas.

Hourdakis, Michalopoulos e Kottommannil (2003) afirmam que para calibrar um simulador é necessário alterar o valor dos dados de entrada do programa, executando uma simulação a cada nova configuração, com o objetivo de igualar o valor de uma ou mais medidas de desempenho observadas em campo com os resultados de saída do simulador. O modelo é considerado validado quando a diferença entre o valor simulado e observado se encontra no limite estabelecido como aceitável (COLELLA; LIMA; DEMARCHI, 2004).

Conforme aponta o *Highway Capacity Manual* (HCM) (TRB, 2000), a literatura científica

pode ser considerada vasta e rica quando se refere à modelagem do fluxo de tráfego. Entretanto, os modelos de calibração e validação desenvolvidos e discutidos apresentam dificuldades expressivas em relação à sua aplicação por engenheiros e técnicos, estando, geralmente, restritos ao universo acadêmico.

Maia (2007) argumenta que não é recorrente o uso dos modelos de calibração da simulação do tráfego veicular no Brasil, e possivelmente, isso pode estar relacionado à ausência de procedimentos disponíveis e adaptados à realidade nacional. Como consequência da conjuntura mencionada, há um desestímulo à utilização de *softwares* de simulação como auxílio para a busca por soluções e tomada de decisão. Assim, Ayala (2013) relata que o processo de calibração se apresenta como um grande entrave nos projetos de engenharia de tráfego.

Devido ao grande número de parâmetros desconhecidos envolvidos, o processo de calibração pode ser uma tarefa complexa que demanda tempo. Consequentemente, a calibração tem sido formulada como um problema de otimização em que existe um grande espaço de busca devido a uma ampla gama de parâmetros de cada modelo relevantes (YU; FAN, 2017). Esse problema consiste em um conjunto de parâmetros que deve ser determinado para maximizar, ou minimizar, uma função objetivo, que expressa a diferença entre características do tráfego observados (como velocidade, volume e tempo de viagem) e os resultados da simulação (KIM; RILETT, 2001).

Ayala (2013) ressalta que o processo de seleção e determinação dos parâmetros que devem ser calibrados se apresenta como uma das etapas mais difíceis dos estudos e demais aplicações que utilizam a simulação. Devido à alta complexidade desse processo, é recorrente o uso dos valores *default* definidos nos simuladores. A utilização desse tipo de generalidade acarreta em resultados insatisfatórios por produzir valores incompatíveis com àqueles que seriam observados na realidade. Bessa Jr (2015) apresenta, na Figura 1, a diferença entre os resultados de uma simulação não calibrada e uma calibrada. Na qual, o autor demonstra que sem a calibração, as velocidades foram, em geral, superestimadas; após o ajuste dos parâmetros, as velocidades apresentaram-se bem mais próximas dos dados de campo.

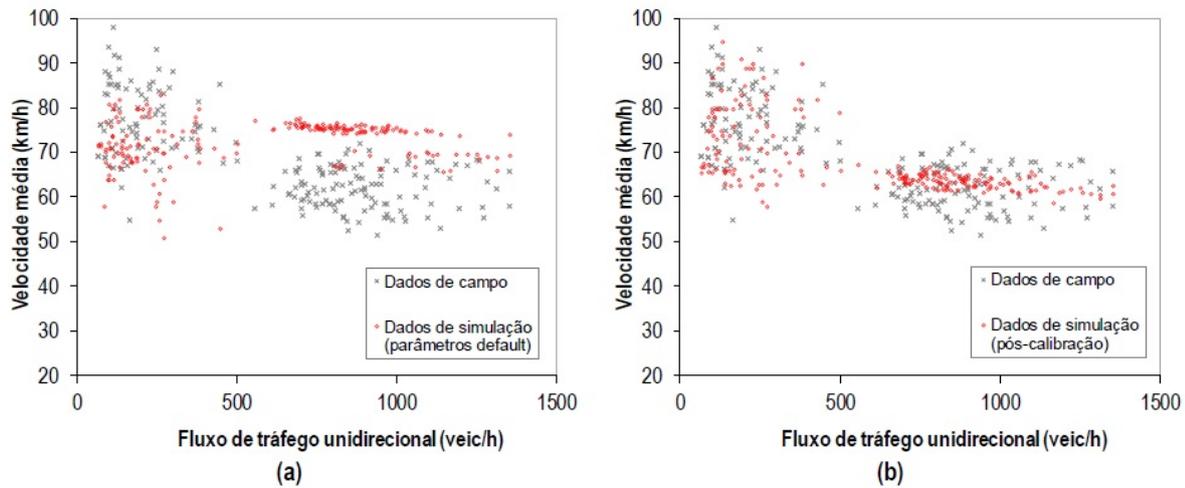


Figura 1 – Pontos fluxo-velocidade antes 1-(a) e após a calibração 1-(b) em comparação com os dados obtidos em campo. (BESSA Jr, 2015)

Portanto, meta-heurísticas, como o algoritmo genético (AG), são utilizadas frequentemente como ferramenta de otimização em calibrações de *softwares* de simulação de tráfego (CARVALHO; SETTI, 2018). Salcedo-Sanz (2016) reconhece que algoritmos meta-heurísticos são métodos de busca que objetivam conciliar tempo de processamento com soluções suficientemente ajustadas para problemas de otimização complexos, cujas propriedades do campo de soluções inviabilizam testar todas as alternativas possíveis para o problema. Apesar disso, existem poucos trabalhos focados na comparação do desempenho entre diferentes tipos desses algoritmos para calibrar simuladores de tráfego (CARVALHO, 2018). Nessa conjuntura, o algoritmo *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), proposto por Feo e Resende (1995), também pode ser usado para procurar os valores ótimos dos parâmetros de calibração desses *softwares*. E, assim, é aplicado nesse trabalho com o intuito de comparar a aplicação com uma solução que utiliza a aplicação de um AG. Dessa forma, esse trabalho se difere dos outros, visto que vamos utilizar um método GRASP que até onde nosso conhecimento vai ninguém ainda utilizou esse método para testar esse problema de calibração de microssimulador de tráfego.

1.3 Justificativa

O presente trabalho foi baseado em três pilares principais, sendo eles:

- a imprescindibilidade do uso da modelagem de tráfego para tomadas de decisão na engenharia de tráfego;
- a importância do processo de calibração e validação dos parâmetros comportamentais utilizados na simulação de tráfego; e

- a necessidade da criação de meta-heurísticas de calibração e validação adequados para estimar parâmetros comportamentais dos simuladores de tráfego.

1.4 Objetivos

A meta deste trabalho é comparar técnicas de calibração dos modelos comportamentais do simulador alemão VISSIM. Para alcançar o alvo proposto, é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Obter um conjunto de dados de tráfego de rodovias de pista simples;
2. Encontrar parâmetros de calibração do VISSIM com dados de campo;
3. Modelar e aplicar as meta-heurísticas com base em um AG e em um algoritmo GRASP para calibrar e validar um conjunto de parâmetros comportamentais que não foram obtidos em campo;
4. Encontrar as diferenças na calibração e na validação do VISSIM, de acordo com o algoritmo utilizado, inclusive em relação aos resultados encontrados com os parâmetros *default* e, se possível, determinar as razões.

1.5 Estrutura do texto

Este documento foi organizado em oito capítulos. Este capítulo contém a contextualização geral da simulação de tráfego, justificativa, objetivos da pesquisa e a estrutura de organização do trabalho. O capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica sobre parâmetros comportamentais, bem como dos métodos para calibração de simuladores.

No capítulo 3, é apresentado o processo aplicado para o desenvolvimento do trabalho. Já, no capítulo 4, são apresentados os parâmetros comportamentais e os processos de calibração e validação. Os algoritmos propostos para serem aplicados nesse trabalho são apresentados no capítulo 5. No capítulo 6, os experimentos realizados são apresentados e os resultados são analisados. Por fim, as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, contidas no capítulo 7.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, abordam-se diversos conceitos importantes para o entendimento do trabalho. Na seção 2.1 apresenta-se o simulador VISSIM e seus modelos comportamentais. Na seção 2.2 comenta-se sobre os algoritmos meta-heurísticos que foram usados até hoje para esse problema e os aplicados nesta pesquisa.

2.1 Simulador VISSIM

O *Verkehr In Städten-SIMulation* “VISSIM”, que significa simulação de trânsito nas cidades, é um *software* desenvolvido para simular microscopicamente o comportamento do tráfego veicular, operações de transporte público e fluxo de pedestres e ciclistas (PTV, 2018). Segundo Ayala (2013), ele começou a ser desenvolvido pela Universidade de Karlsruhe, na Alemanha, em 1970, e teve sua distribuição comercial iniciada em 1993. É um dos principais programas de simulação microscópica para modelar operações de transporte multimodal e pode ser usado para criar diferentes cenários de tráfego em detalhes com uma abordagem dinâmica e estocástica (PTV, 2018).

2.1.1 Modelos Comportamentais do VISSIM

O simulador VISSIM possui diversos parâmetros passíveis de ajuste com objetivo de replicar as condições de tráfego da via de forma a aproximá-las da realidade (BETHONICO, 2016). O autor afirma que esses parâmetros se enquadram em quatro modelos comportamentais abordados pelo *software*: *car following*, *lane change*, *gap acceptance* e *route decision*. Além desses, relata a existência de outro modelo contido no simulador, o de desempenho veicular, que exerce um importante papel na simulação, principalmente em trechos com aclives, ao considerar a influência da potência do motor e da massa no movimento do veículo.

De acordo com Oliveira e Cybis (2008), para simular o comportamento dos motoristas é necessária a combinação de vários modelos, como o de *car following*, que rege os movimentos longitudinais de veículos, e do modelo de *lane change*, que determina os movimentos transversais por um algoritmo baseado em regras.

2.1.1.1 Car Following

Os modelos de *car-following* foram inicialmente desenvolvidos nos anos de 1950, quando o fluxo de tráfego crescia e pesquisas foram desenvolvidas para entender os fatores que afetavam a capacidade das vias. Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos para replicar os *headways* (intervalo entre veículos) e espaçamentos no processo de *following*.

Esses modelos geralmente descrevem a trajetória do veículo seguidor como uma função da trajetória do veículo líder e as brechas de tempo e espaço entre estes (ELEFTERIADOU, 2014; LACERDA, 2016).

No VISSIM, os veículos se movem na rede usando um modelo de fluxo de tráfego. A qualidade deste modelo é essencial para a aproximação da simulação à realidade. Em contraste com modelos mais simples, nos quais a velocidade é constante e uma lógica determinística de carro são fornecidas, o VISSIM usa o modelo de *car-following* de percepção psicofísica desenvolvido por Wiedemann (1974) (W74) e Wiedemann 1999 (W99). Em que o modelo W74 é mais adequado para tráfego urbano, já o W99 é mais adequado para o tráfego rural, assim permite ajustar parâmetros comportamentais relativos a rodovias de pistas simples (PTV, 2018).

O conceito básico do modelo W99 é que o motorista de um veículo mais rápido começa a desacelerar quando percebe um veículo mais lento. Como ele não consegue determinar exatamente a velocidade do veículo mais lento, sua velocidade cairá abaixo da velocidade desse veículo. Então, ele começa a acelerar até alcançar novamente a velocidade do veículo à frente. Assim, gera um processo constante de aceleração e desaceleração. Desse modo, o modelo W99 considera que existem quatro estados para o condutor (PTV, 2018):

1. *Free driving*: o condutor consegue trafegar na velocidade desejada sem ser influenciado por nenhum veículo. A velocidade do veículo só varia devido ao controle de aceleração do próprio motorista;
2. *Following*: o motorista segue um veículo sem que haja processo de aceleração ou desaceleração do veículo, mantendo a velocidade constante;
3. *Approaching*: o motorista precisa reduzir a velocidade, pois há um veículo adiante e, após essa desaceleração, a velocidade permanece constante;
4. *Braking*: o condutor precisa frear, pois a distância do veículo da frente é menor que a distância de segurança.

O modelo W99 contém dez parâmetros passíveis de alteração para ajustar a distância de segurança entre veículos, descritos a seguir (BETHONICO, 2016):

- CC0 - *standstill distance* (m): Distância desejada entre o veículo seguidor e o veículo líder no repouso, considerado para o cálculo da distância de segurança.
- CC1 - *headway time* (s): Tempo desejado entre o veículo seguidor e o veículo líder, considerado para o cálculo da distância de segurança.
- CC2 - *following variation* (m): Funciona como uma restrição da oscilação da distância de segurança.

- CC3 - *threshold for entering following* (s): Limiar de tempo para a entrada no modelo de *car following*. Representa o tempo necessário para o veículo iniciar o processo de desaceleração antes de atingir a distância de segurança em relação ao veículo líder.
- CC4 - *negative following threshold* e CC5 - *positive following threshold*: Limites de *following* positivo e negativo. São parâmetros adimensionais que controlam a diferença de aceleração entre o veículo líder e o veículo seguidor.
- CC6 - *speed dependency of oscilltion*: Representa a influência da distância de segurança na oscilação da velocidade durante o *car following* (parâmetro adimensional).
- CC7 - *oscillation acceleration* (m/s^2): Oscilação da aceleração do veículo seguidor. Trata-se de um aumento da margem de variação da aceleração e desaceleração do veículo, enquanto este se encontra no regime de *car following*.
- CC8 - *standstill acceleration* (m/s^2): Aceleração desejada do veículo, quando este encontra-se em repouso. Esta aceleração é limitada de acordo com o modelo de desempenho do veículo.
- CC9 - *acceleration at 80km/h* (m/s^2): Aceleração desejada do veículo quando trafega em velocidade acima de 80km/h, limitada de acordo com o modelo de desempenho do veículo.

Além disso, [Bethonico \(2016\)](#) destaca que é possível editar os parâmetros *look ahead distance*, *look back distance* relacionados à visibilidade jusante e montante do condutor. Ademais, o simulador se baseia no parâmetro *observed vehicles* simultaneamente para a tomada de decisões. Dessa forma, a Figura 2 mostra a tela de configuração dos parâmetros de *car following*.

The screenshot shows the 'Driving Behavior' dialog box with the following parameters:

- No.: 3
- Name: Freeway (free lane selection)
- Following: [Selected]
- Lane Change: [Unselected]
- Lateral: [Unselected]
- Signal Control: [Unselected]
- Meso: [Unselected]
- Look ahead distance:
 - min.: 0,00 m
 - max.: 250,00 m
 - Observed vehicles: 2
- Look back distance:
 - min.: 0,00 m
 - max.: 150,00 m
- Temporary lack of attention:
 - Duration: 0 s
 - Probability: 0,00 %
- Smooth closeup behavior
- Standstill distance (in front of static obstacles) is fix: 0,50 m
- Car following model: Wiedemann 99
- Model parameters:
 - CC0 (Standstill Distance): 1,50 m
 - CC1 (Headway Time): 2: 0,9 s
 - CC2 ('Following' Variation): 4,00 m
 - CC3 (Threshold for Entering 'Following'): -8,00
 - CC4 (Negative 'Following' Threshold): -0,35
 - CC5 (Positive 'Following' Threshold): 0,35
 - CC6 (Speed dependency of Oscillation): 11,44
 - CC7 (Oscillation Acceleration): 0,25 m/s²
 - CC8 (Standstill Acceleration): 3,50 m/s²
 - CC9 (Acceleration with 80 km/h): 1,50 m/s²

Figura 2 – Janela de edição dos parâmetros de *car following* de Wiedemann 99 do VISSIM

2.1.1.2 Lane Change

De acordo com Gao (2008), o modelo de *lane change* do VISSIM foi elaborado por Sparmann (1978). No modelo de Sparmann, para tomar a decisão de mudar de faixa, deve-se avaliar:

- se há um desejo de mudar a faixa;
- se a situação de condução na faixa vizinha é favorável; e
- se o movimento para a faixa vizinha é possível.

O autor também afirma que existem duas situações em que se deseja mudar de faixa:

- mudança de faixa necessária, aplicada quando o veículo precisa alcançar o conector seguinte da rota; e
- mudança de faixa livre, ocorre quando o veículo está buscando mais espaço ou maior velocidade.

Os demais parâmetros passíveis de calibração são (BETHONICO, 2016):

- *Necessary lane change (route)*: Parâmetros de desaceleração relacionados à mudança de faixa devido à rota. Não se aplica ao caso estudado devido à ausência de acessos na rede.
- *Waiting time before diffusion*: Tempo máximo de espera parado atrás de um veículo até ser retirado da rede.
- *Minimum headway (front/rear)*: menor distância para mudança de faixa quando o veículo está parado atrás de outro.
- *Safety distance reduction factor*: O fator de redução da distância de segurança reduz a distância de segurança durante a mudança de faixa.
- *Maximum deceleration for cooperative braking*: Define a desaceleração máxima de um veículo para permitir que outro veículo entre em sua faixa.
- *Cooperative lane change*: Modelo de troca de faixas entre veículos, em que um veículo desacelera e cede espaço a outro em sua faixa, mudando-se para a faixa em que este se encontra.

Assim, a Figura 3 exibe a tela de edição dos parâmetros do submodelo de *lane change*.

Driving Behavior

No.: 3 Name: Freeway (free lane selection)

Following Lane Change Lateral Signal Control Meso

General behavior: Free lane selection

Necessary lane change (route)

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	-4,00 m/s ²	-3,00 m/s ²
- 1 m/s ² per distance:	200,00 m	200,00 m
Accepted deceleration:	-1,00 m/s ²	-0,50 m/s ²

Waiting time before diffusion: 60,00 s Overtake reduced speed areas

Min. headway (front/rear): 0,50 m Advanced merging

To slower lane if collision time is above: 11,00 s Vehicle routing decisions look ahead

Safety distance reduction factor: 0,60

Maximum deceleration for cooperative braking: -3,00 m/s²

Cooperative lane change

Maximum speed difference: 10,80 km/h

Maximum collision time: 10,00 s

Rear correction of lateral position

Maximum speed: 3,00 km/h

Active during time period from 1,00 s until 10,00 s after lane change start

OK Cancel

Figura 3 – Janela de edição dos parâmetros de *lane change* do VISSIM

2.2 Algoritmos de busca e otimização

Para alcançar a solução em vários problemas de otimização, utilizam-se buscas exaustivas (ou de força bruta), de modo a testar todas as soluções possíveis para o problema, escolher a configuração que apresenta melhor desempenho e que, apesar disso, não são soluções práticas devido ao espaço de busca ser muito grande (BURKE et al., 2003). Assim, Carvalho (2018) afirma a necessidade de utilizar métodos de busca mais sofisticados.

2.2.1 Algoritmos meta-heurísticos

Meta-heurísticas, em sua definição original, são métodos de solução que orquestram uma interação entre procedimentos de melhoria local e estratégias de nível superior para criar um processo capaz de escapar dos ótimos locais e realizar uma pesquisa robusta de um espaço de solução na tentativa de se alcançar um ótimo global (GLOVER; KOCHENBERGER, 2006). Esses métodos de busca utilizam conceitos de diferentes áreas de conhecimento como evolução biológica e sistemas neurais, para executar um processo de busca iterativo que usa estratégias de aprendizado para estruturar informações e encontrar soluções quase-ótimas (OSMAN; KELLY, 1996).

Assim, as meta-heurísticas são abordagens algorítmicas poderosas e são aplicadas com grande sucesso a muitos problemas difíceis de otimização combinatória. Uma característica interessante das meta-heurísticas é que elas podem, facilmente, lidar com restrições complicadas encontradas nas aplicações da vida real (GENDREAU; POTVIN, 2005). Portanto, métodos meta-heurísticos como o Algoritmo Genético (AG), *Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation* (SPSA), *Tabu Search* (TS) e *Simulated Annealing* (SA) são usados para procurar os valores ótimos dos parâmetros de calibração de simuladores de tráfego (YU; FAN, 2017; LIDBE; HAINEN; JONES, 2017).

2.2.1.1 Algoritmo genético (AG)

Para Gen e Cheng (1997), os AGs vêm sendo utilizados com sucesso para encontrar boas soluções para uma ampla variedade de problemas de otimização, desde sua introdução por Holland na década de 1970 (HOLLAND, 1975). Conforme Asllani e Lari (2007), embora os algoritmos genéticos se apresentem mais abrangentes e abstratos do que outros métodos de otimização, e nem sempre fornecem a solução ideal, eles são considerados flexíveis e aplicáveis a uma grande variedade de problemas. Assim, dentre os algoritmos mais utilizados, o algoritmo genético é frequentemente escolhido em função da facilidade de sua implementação e bom desempenho em calibração e otimização (MA; DONG; ZHANG, 2007; KIM; KIM; RILETT, 2005; MA; ABDULHAI, 2002; PARK; QI, 2005; CHIAPPONE et al., 2016; MENNENI; SUN; VORTISCH, 2008; ABDALHAQ; BAKER, 2014; PAZ et al., 2015; FAN; GURMU, 2014; FAN; MACHEMEHL, 2006; YU; FAN, 2017).

Esse método de automatização da calibração é uma técnica muito utilizada em âmbito nacional (CUNHA; BESSA; SETTI, 2009; LACERDA, 2016; BETHONICO; PIVA; SETTI, 2016; CARVALHO; SETTI, 2018; BESSA Jr; SETTI, 2018) e internacionalmente (KIM; RILETT, 2001; HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003; MA; ABDULHAI, 2002; TETTAMANTI et al., 2015; MORENO et al., 2016; CHIAPPONE et al., 2016). Assim, pode-se dizer que há vasta literatura utilizando essa técnica na calibração de simuladores de tráfego.

Para Aytug, Khouja e Vergara (2003), geralmente, os algoritmos genéticos possuem oito componentes básicos, que são: sua representação genética, a população inicial, a função avaliação, o método de seleção de reprodução, os operadores genéticos, o método de seleção de gerações, os critérios de parada e os parâmetros de configuração dos AGs.

Desse modo, segundo Barboza (2005), o AG adota uma terminologia original usada na teoria da evolução natural e da genética, na qual um indivíduo de uma população pode ser formado por um ou mais cromossomos. A autora ainda relata que os cromossomos, em geral, são implementados como vetores, onde cada elemento do vetor é conhecido como gene. Os valores que cada gene pode assumir é denominado de alelo, possuindo um local fixo no cromossomo denominado de locus. Genes e alelos em conjunto formam então o

genótipo, com suas características tratadas de fenótipo. A relação entre a terminologia dos algoritmos genéticos e a biologia aparece resumida na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação da terminologia do AG com a biologia

Biologia	Algoritmo genético
Cromossomos	Indivíduo
Gene	<i>Bit</i>
Alelo	Valor do <i>bit</i>
Lócus	Posição de um <i>bit</i> específico no indivíduo
Genótipo	Indivíduo candidato à solução - x
Fenótipo	Valor da função para um dado indivíduo - $f(x)$

Fonte: Barboza (2005)

Assim, trabalha-se com um conjunto de indivíduos (população) no qual cada elemento é candidato à solução desejada. A função a ser otimizada representa o ambiente no qual a população inicial se insere. Então, espera-se que, através dos mecanismos de evolução das espécies e da genética natural, os indivíduos mais aptos tenham maior probabilidade de se reproduzirem e que a cada nova geração estejam mais aptos ao ambiente (BARBOZA, 2005).

Em seguida, a próxima geração é uma evolução da anterior e, para que isso ocorra, os mais aptos deverão possuir maior probabilidade de serem selecionados para dar origem à nova geração. Após a seleção, o próximo passo é a aplicação dos operadores genéticos que atuam sobre os genótipos produzindo novos indivíduos, também denominados de mecanismos de busca (HOLLAND, 1975). Dentre estes mecanismos, Barboza (2005) declara que os mais comumente empregados são o cruzamento (*crossover*) e a mutação. Se as operações de seleção e a aplicação dos operadores genéticos forem bem conduzidas, espera-se que a nova geração seja, em média, melhor do que a que lhe deu origem. Além desses, a predação é o operador genético que elimina os indivíduos menos adaptados, substituindo-os por novos indivíduos com parâmetros aleatórios (CUNHA; SETTI, 2006).

Dentre os operadores genéticos citados, o operador de mutação introduz mudanças aleatórias em determinadas características dos indivíduos. Assim, reintroduz a diversidade genética de volta à população e auxilia o algoritmo a fugir de máximos ou mínimos locais (KONAK; COIT; SMITH, 2006). Além disso, conforme os autores, o *crossover* é o mais importante dos operadores genéticos. Porquanto que, nesta operação dois indivíduos são combinados para formar novos indivíduos. Dessa forma, ao aplicar iterativamente este operador, espera-se que os genes dos indivíduos bons apareçam com maior frequência na população e eventualmente convirjam para uma boa solução.

Portanto, o AG é um método iterativo baseado na teoria da evolução que se inicia com a produção de uma população aleatória, gerada a partir de um espaço de busca. Essa

população é composta por indivíduos (ou cromossomos) que são formados a partir dos parâmetros comportamentais a serem calibrados. À medida que a população evolui, através da aplicação de operadores genéticos (seleção, *crossover*, mutação e predação), melhores soluções (os indivíduos da população) são encontradas, na tentativa de melhorar a função de adaptação (*fitness*), resultado da comparação entre medidas de desempenho encontradas em campo e obtidas por simulação. Dessa forma, os indivíduos mais bem adaptados (com melhores valores de *fitness*) tendem a permanecer na população e, assim, transferem as suas características às próximas gerações; enquanto isso, os menos adaptados tendem a desaparecer (GOLDBERG, 1989; BESSA Jr; SETTI, 2011).

2.2.1.2 Procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo (GRASP)

Um procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo (GRASP, do inglês *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é uma meta-heurística proposta por Feo e Resende (1989). É aplicado a uma ampla gama de problemas de otimização combinatória, desde agendamento, roteamento, localização, teoria dos grafos, atribuição, transporte, telecomunicações, biologia e até desenho e balanceamento de turbina (FESTA; RESENDE, 2002; FESTA; RESENDE, 2009b). Contudo, ainda não foi abordada na literatura atual de calibração dos modelos de simulação de tráfego microscópico que analisamos.

De acordo com Festa e Resende (2002), Festa e Resende (2009b), o GRASP é um processo iterativo de multipartida (com várias inicializações), constituído de duas fases: uma fase de construção e uma fase de busca local. Afirmam, ainda, que ambas as fases são repetidas para cada iteração e a melhor solução geral é mantida como resultado.

Um algoritmo guloso consiste em uma técnica que, em cada iteração, faz uma escolha localmente ótima. Ou seja, escolhe o elemento mais “apetitoso”. Além disso, um algoritmo guloso é míope, visto que sua escolha localmente ótima é baseada nos dados disponíveis naquela iteração (CORMEN et al., 2009; CORMEN et al., 2001).

Sarubbi (2008) afirma que, na fase de construção, uma função gulosa e aleatória é usada para construir uma solução inicial viável. Essa solução é então utilizada como solução inicial para a fase de busca local. Nessa fase, uma solução viável é construída iterativamente, ou seja, um elemento da solução de cada vez. Os candidatos que compõem a solução são ordenados em uma lista (onde são sempre armazenados os melhores) (RANGEL et al., 1999).

Para Gendreau e Potvin (2005), a cada etapa da heurística da construção, avaliam-se os elementos ainda não incorporados na solução parcial com um algoritmo guloso e os melhores elementos são mantidos na chamada lista de candidatos restritos (*Restricted Candidate List* - RCL). Assim, um elemento é escolhido aleatoriamente nessa lista e incorporado à solução. Por meio da componente probabilística (α), o melhor candidato atual não é necessariamente escolhido, levando a uma diversidade de soluções. Portanto, a

técnica de escolha possibilita a obtenção de diferentes soluções a cada iteração GRASP, mas não compromete necessariamente o poder do componente guloso adaptável do método. Como é o caso de muitos métodos determinísticos, não é garantido que as soluções geradas por uma construção GRASP sejam localmente ótimas em relação a definições simples de vizinhança (FESTA; RESENDE, 2009a). Portanto, de acordo com os autores, é quase sempre benéfico aplicar uma busca local para tentar melhorar cada solução construída.

Para Mathew e Radhakrishnan (2010), a busca local parte de uma solução inicial, a procura de uma solução melhor na vizinhança da solução corrente. Eles também afirmam que, se essa solução existir, automaticamente se tornará a nova solução corrente e a busca local, recursivamente, será aplicada sobre esta solução. O procedimento termina quando nenhuma solução melhor do que a corrente existir na vizinhança desta última. Portanto, recomenda-se que o tamanho da vizinhança seja tal que sua exploração possa ser feita eficientemente. Assim, Festa e Resende (2009a) declaram que a chave para o sucesso de um algoritmo de busca local consiste na escolha adequada de uma estrutura de vizinhança, técnicas eficazes de pesquisa de vizinhança e a solução inicial.

Assim, o diferencial do GRASP para outros métodos está na geração de solução inicial, baseada nas três primeiras iniciais de sua sigla em inglês: gulosa (*Greedy*), aleatória (*Randomized*) e adaptativa (*Adaptive*) (FEO; RESENDE, 1995; PITSOULIS; RESENDE, 2002; RESENDE; RIBEIRO, 2003; FESTA; RESENDE, 2002). Ademais, a vantagem do GRASP em comparação com outras heurísticas é que existem apenas dois parâmetros para ajustar (o parâmetro α e o número de iterações). Comparado com o AG, o GRASP parece ser competitivo em relação à qualidade das soluções produzidas e à eficiência, além de ser mais fácil de implementar e ajustar (KONTOGHIORGHES, 2005).

Por fim, Glover e Kochenberger (2006) ressaltam que uma possível falha do algoritmo GRASP padrão é a independência de suas iterações, ou seja, o fato de ele não aprender com o histórico de soluções encontradas nas iterações anteriores. Isso ocorre, porque descarta informações sobre qualquer solução encontrada que não melhore o operador histórico.

Embora não tenha sido encontrados, na literatura, trabalhos que tenham aplicado o GRASP para calibrar simuladores de tráfego, um AG e um GRASP são aplicados nesta pesquisa para calibração de parâmetros comportamentais do microssimulador de tráfego VISSIM, para modelagem de rodovias de pista simples.

3 Método Aplicado

Neste capítulo, apresenta-se o método utilizado na realização deste trabalho. Este consiste em uma investigação empírica com objetivo de comparar duas formas de calibração do microssimulador de tráfego VISSIM.

Dessa modo, é um estudo com abordagem quantitativa do problema. Visto que a pesquisa quantitativa é baseada na medida, normalmente numérica, de poucas variáveis objetivas, com ênfase em comparação de resultados e no uso intensivo de técnicas estatísticas (WAINER et al., 2007).

Portanto, para alcançar a meta desse trabalho, aplicou-se as seguintes etapas:

1. Estudar o simulador escolhido;
2. Realizar ampla revisão bibliográfica sobre a calibração e validação de simuladores de tráfego (aplicações, determinação de parâmetros para calibração, algoritmos meta-heurísticos e valores dos parâmetros obtidos);
3. Obter um conjunto de dados de tráfego de rodovias de pista simples;
4. Criar a rede no simulador que represente os trechos em que os dados foram coletados;
5. Estudar comandos de interface entre *Visual Basic for Applications* (VBA) e VISSIM, para possibilitar a criação de rotinas que acessem e manipulem o simulador para aplicar as metas-heurísticas;
6. Realizar a calibração e validação utilizando a meta-heurística de um AG;
7. Realizar a calibração e validação utilizando a meta-heurística de um GRASP;
8. Comparar os resultados obtidos com a aplicação dos diferentes métodos de calibração.

A representação esquemática do fluxo de trabalho é mostrado na Figura 4.

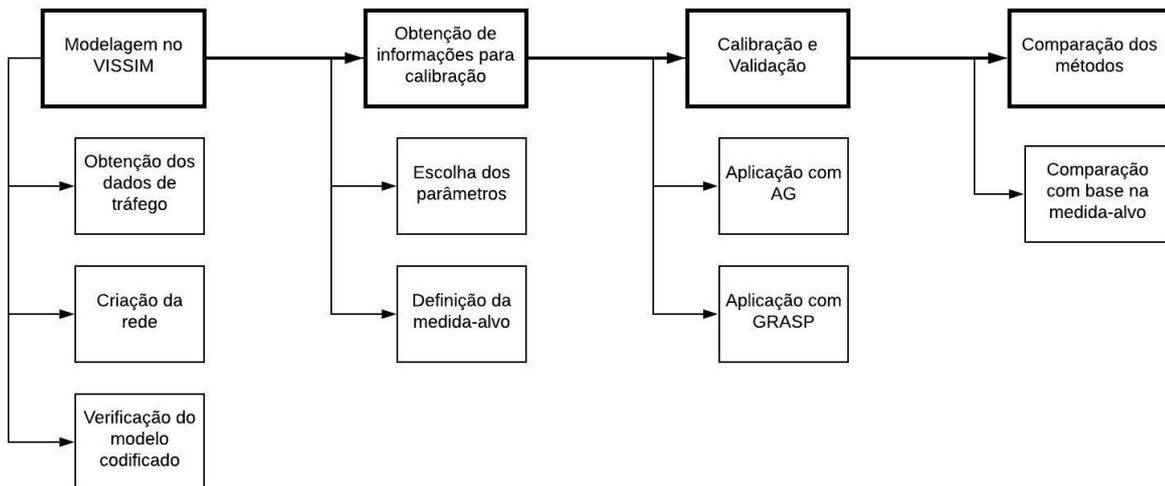


Figura 4 – Método aplicado

4 Parâmetros Comportamentais

No VISSIM 10, utilizado neste trabalho, há cerca de 80 parâmetros comportamentais de condução que são editáveis visando proporcionar maior aderência da simulação à realidade (PTV, 2018). Dentro desse conjunto de parâmetros, há submodelos comportamentais, tais como os de *car following*, *lane change*, *gap acceptance* e do desempenho veicular. Silva et al. (2019) afirmam que cada grupo de parâmetros comportamentais de motoristas inclui inúmeras possibilidades de calibração.

Nesse contexto, ressalta-se a importância da definição dos parâmetros mais significativos para a calibração do cenário que se pretende simular. Hollander e Liu (2008) propõem organizar os parâmetros em grupos, a fim de determinar quais são os parâmetros efetivamente relevantes para calibração. Esses grupos são:

1. Parâmetros facilmente obtidos em campo;
2. Parâmetros disponíveis em estudos anteriores e que podem ser replicados para a situação de análise;
3. Parâmetros que não influenciam os dados de saída e, portanto, não precisam ser selecionados para calibração;
4. Parâmetros que não são necessários na modelagem, por exemplo, é o caso de simulações para analisarem o comportamento de rodovias sem interseção em nível, e que, portanto, não é necessário ajustar os parâmetros de semaforização;
5. Todos os demais parâmetros que não puderem ser classificados conforme descrito acima devem ser considerados para calibração.

Aplicando essa metodologia, Silva et al. (2019) reduziram o grupo de parâmetros a serem calibrados do VISSIM, permanecendo 38 parâmetros relacionados com os submodelos comportamentais para análise de relevância para calibração. Em seguida, os autores realizaram um teste de sensibilidade aplicando a metodologia de Lacerda (2016) para verificar quais desses parâmetros comportamentais são relevantes. Tal metodologia se resume em alterar os parâmetros dos modelos do VISSIM para verificar o impacto nos resultados da simulação. E, para isso, os autores escolheram, como medidas de desempenho, a velocidade média de viagem (ATS – *Average Travel Speed*) e a a porcentagem de veículos em pelotões (PF - *Percent Followers*), por sentido de tráfego. Então, calcularam os intervalos de confiança das diferenças dos resultados quando cada parâmetro foi alterado, em relação aos resultados obtidos com os parâmetros *default*. Desse modo, quando os

intervalos contêm o número zero ou são pequenos, a influência do parâmetro na medida de desempenho é considerada pequena.

Assim, eles identificaram seis parâmetros como relevantes para calibração nos segmentos escolhidos para análise:

- *CC1 (headway time)*;
- *CC3 (threshold for entering following)*;
- *Lateral minimum distance at 50 km/h (LatDistDrivDef)*;
- *Look ahead maximum distance (LookAheadDistMax)*;
- *Observed vehicles (ObsrvdVehs)*;
- *Safety distance reduction factor - lane change (SafDistFactLnCg)*.

Nesse contexto, decidiu-se pela aplicação das meta-heurísticas AG e GRASP para obter os valores dos parâmetros comportamentais supracitados.

4.1 Calibração e validação de parâmetros comportamentais

Para a construção de um modelo em um simulador de tráfego, parâmetros que podem ser obtidos diretamente do campo devem ser coletados para caracterizar o ambiente de simulação. Por isso, insere-se informações tais como, rampas verticais, características dos veículos pesados e a distribuição de velocidades desejadas. Posteriormente, iniciam-se as etapas de calibração e validação dos parâmetros comportamentais que não foram possíveis de conseguir. Desse modo, a figura a seguir apresenta um diagrama com as etapas de elaboração de um modelo.



Figura 5 – Etapas da modelagem

Dowling, Skabardonis e Alexiadis (2004) definem a calibração como o processo em que são selecionados os parâmetros do modelo que têm maior impacto para reproduzir melhor as condições das operações de tráfego local medidas em campo. Desse modo, os autores afirmam que são necessários ajustes dos parâmetros porque nenhum modelo de microssimulação consegue incluir todos os fatores possíveis (*onstreet* e *offstreet*, ou seja, da via, do

veículo e do condutor) que podem afetar as operações de capacidade e tráfego. Assim, eles declaram que o processo de calibração é responsável pelo impacto desses fatores específicos do local “não modelados” por meio do ajuste dos parâmetros de calibração incluídos no *software* para esse fim específico.

Para Lidbe, Hainen e Jones (2017), a calibração manual envolve uma operação iterativa do processo de tentativa e erro de uso dos valores discretos intuitivos de cada parâmetro e combinações viáveis de vários parâmetros a iteração até que os resultados desejados sejam obtidos. Assim, os autores dizem que, com essa abordagem, é possível ficar facilmente preso em um processo circular interminável de corrigir um problema apenas para gerar outro. Dessa forma, isso pode tornar a calibração manual um processo demorado, então é sugerido apenas quando o número de parâmetros é pequeno ou de baixa complexidade.

A calibração de um conjunto de muitos parâmetros aumenta a confiabilidade do simulador, e deve ser feita por meio de um procedimento automático para que a probabilidade de atingir uma boa resposta seja maior (MA; DONG; ZHANG, 2007; BESSA Jr, 2009). A vantagem de se utilizar uma calibração automática está associada à capacidade de calibrar vários parâmetros simultaneamente gastando menos tempo. Além disso, a verificação dos resultados ao longo do processo também é realizada automaticamente pelo *software* (EGAMI, 2006).

Carvalho e Setti (2018) afirmam que, na calibração de simuladores, o problema de se ter um extenso campo de soluções possíveis se agrava pelo alto tempo de processamento. Visto que avaliar cada solução compreende executar uma simulação utilizando a configuração em avaliação, extrair os dados simulados e calcular o valor da medida de ajuste.

Após a execução desse fluxo de trabalho na etapa de calibração, é necessário realizar, conforme Brito et al. (2003), o processo de avaliação que estima a eficiência que costuma ser denominado de validação. Os autores também declaram que várias definições estão descritas na literatura para validação, tratando-se portanto de termo não-específico. Além disso, afirmam que determinado método é considerado validado se suas características estiverem de acordo com os pré-requisitos estabelecidos. Depois, eles alegam ser imprescindível definir se os métodos desenvolvidos são adequados aos objetivos a que se destinam, a fim de se obter resultados confiáveis que possam ser satisfatoriamente interpretados. Portanto, o trabalho anuncia que essa etapa possibilita o conhecimento das limitações e da confiabilidade nas medidas realizadas nas análises.

De acordo com Dowling, Skabardonis e Alexiadis (2004), validação é o processo em que se verifica o desempenho geral do tráfego previsto pelo modelo para um sistema de ruas e/ou estradas em relação às medições em campo do desempenho do tráfego, como volumes de tráfego, tempos de viagem, velocidades médias e atrasos médios. Assim, a validação do modelo é realizada com base em dados de campo não utilizados no processo de calibração. Nesse contexto, metade das correntes de tráfego de 15 minutos obtidas por filmagens, que

não foram utilizadas na etapa de calibração, foram empregadas para validação. Portanto, de toda a amostra dos dados, utilizou-se metade na calibração e metade na validação.

Desse modo, a etapa de validação visa confirmar o poder preditivo do modelo calibrado, usando um conjunto de dados independente (HOLLANDER; LIU, 2008). Eles ainda ressaltam que a validação deve ser tão rigorosa quanto a calibração, e todos os testes utilizados no processo de calibração também podem ser usados para validação (ou vice-versa).

5 Algoritmos aplicados

5.1 Aplicação com AG

O algoritmo genético de [Silva et al. \(2020\)](#) foi aplicado nesta pesquisa. Este é baseado em outros aplicados em estudos anteriores ([BESSA Jr; SETTI; WASHBURN, 2017](#); [BESSA Jr; SETTI, 2018](#); [SILVA et al., 2019](#)) e seu funcionamento pode ser verificado no fluxograma da Figura 6. O processo é iniciado com a criação da população de 10 indivíduos, baseado no intervalo de busca dos parâmetros de calibração que os compõe, com cada um deles associado a um determinado nível de agressividade: baixo, médio e alto. Essa associação se dá em razão de que alguns trabalhos [Kim e Mahmassani \(2011\)](#), [Lacerda et al. \(2019\)](#) têm apontado que, se um processo de calibração não for bem delineado, parâmetros comportamentais dos simuladores de tráfego podem ter valores de calibração inadequados (agressivos, por exemplo). Sendo assim, outros parâmetros calibrados também podem ser inadequados, mas em outro sentido (conservadores, por exemplo), na tentativa de compensar os erros atribuídos dos primeiros parâmetros. A aplicação tradicional dos AGs para calibrar simuladores de tráfego na obtenção dos parâmetros comportamentais são susceptíveis a esse tipo de erro. Assim, a Tabela 2 mostra os valores *default* dos parâmetros de calibração e seus intervalos de busca com base na agressividade. A Figura 7 representa um exemplo de um indivíduo com os 6 parâmetros comportamentais escolhidos para calibração.

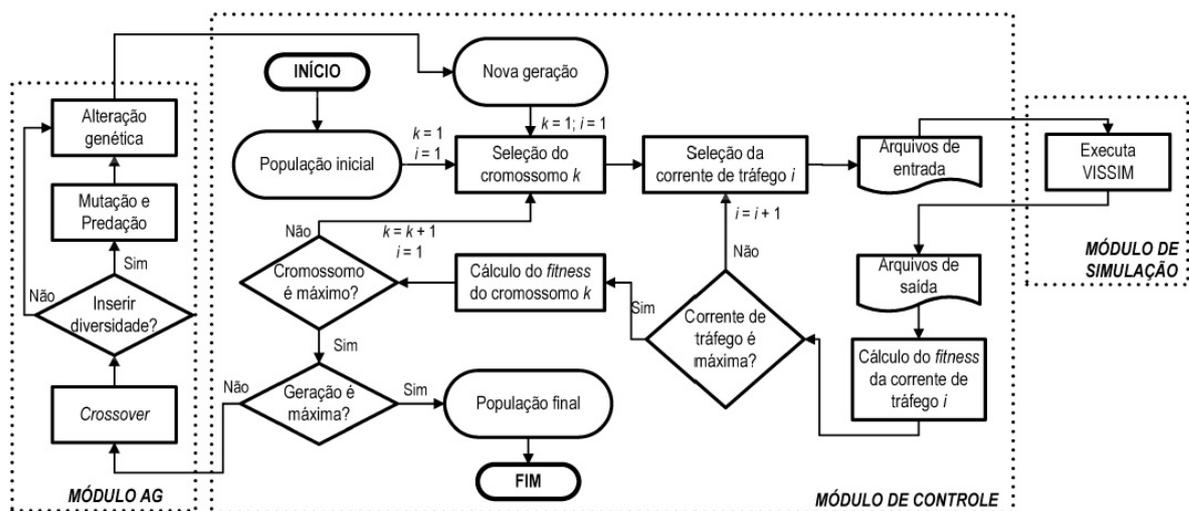


Figura 6 – Fluxograma de aplicação do AG. Fonte: Silva, 2019

Tabela 2 – Valores *default* dos parâmetros de calibração

Parâmetro	Valor default	Espaço de busca em função do nível de agressividade					
		Baixo		Médio		Alto	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
LatDistDrivDef	1 m	1,4	2	0,8	1,4	0,2	0,8
LookAheadDistMax	250 m	0	167	167	333	333	500
ObsrVdVehs	2 veíc	0	3	3	7	7	10
SafDistFactLnCg	0,6 s	0,67	1	0,34	0,67	0,01	0,34
CC1	2	20	30	2	20	1	2
CC3	-8,0 s	-16	-10,7	-10,7	-5,3	-5,3	0

LatDistDrivDef	LookAheadDistMax	ObsrVdVehs	SafDistFactLnCg	CC1	CC3
0,72	338	8	0,22	distribuição1	-1

Figura 7 – Exemplo um indivíduo com agressividade alta

Desse modo, [Silva \(2019\)](#) diz que cada cromossomo representa um conjunto de parâmetros de calibração que são inseridos nos arquivos de entrada de metade das correntes de tráfego de 15 minutos obtidas por filmagens. Visto que se utilizou a outra metade na etapa de validação do AG. Em seguida, o grau de adaptação (qualidade) de cada indivíduo da população é determinado por meio de uma função objetivo (*fitness*).

[Knoop \(2017\)](#) afirma que uma medida frequentemente usada para indicar a qualidade da simulação é a raiz quadrada do erro médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE). Por exemplo, o RMSE das velocidades a cada intervalo de tempo e espaço indica a que distância as velocidades estão “em média”. Isso indica como as velocidades são diferentes dos valores base. Por isso, os autores também declaram que minimizar o RMSE pode ser uma boa opção.

Assim, a função *fitness* RMSE, escolhida para este trabalho, apresenta como principal característica, a penalidade àquelas soluções que produzem grandes erros ([HOLLANDER; LIU, 2008](#)). Os autores declaram que no contexto da modelagem de tráfego estocástica, penalizar pequenos erros é errado visto que, pode levar a um modelo muito específico, porque naturalmente existem pequenas flutuações em torno da média de tráfego. Portanto, uso de RMSE é mais apropriado e este tem sua formulação dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^2 \sum_{w=1}^2 (y_{ikw} - x_{ikw})^2}, \quad (5.1)$$

em que y_{ikw} é a velocidade média de viagem obtida na simulação, para a corrente de tráfego i , sentido de tráfego k (norte ou sul) e tipo de veículo w (automóvel ou veículo pesado); x_{ikw} é a velocidade média de viagem obtida em campo, para a corrente de tráfego i , sentido de tráfego k e tipo de veículo w ; a variável n representa a metade das correntes de

tráfego de 15 minutos da amostra; e N representa o total de velocidades médias avaliadas na amostra (que é igual a $4n$).

À vista disso, se a máxima geração (50) não tiver sido atingida, os operadores genéticos são acionados para produzir uma nova geração da população. O tipo de seleção de dois indivíduos (pais) para realização de *crossover* é do tipo “média”, com seleção a partir da técnica da roleta (GOLDBERG, 1989), em que a probabilidade de serem selecionados é função do seu grau de adaptação ao meio (*fitness*). Portanto, quanto menor for o RMSE do indivíduo, mais chance ele tem de ser selecionado para realização de cruzamento. O novo cromossomo de um indivíduo da geração seguinte possui genes (parâmetros de calibração) que são resultados da média aritmética dos genes dos seus pais (SILVA et al., 2020).

A Figura 8 mostra um exemplo de um cruzamento entre indivíduos A e B gerando um novo indivíduo AB, formado com os três primeiros parâmetros de A e os outros de B. Em seguida, a Figura 9, representa um exemplo do processo de seleção pelo método da roleta. Na subfigura 10-(a) uma população de 10 indivíduos é representada em círculo onde a área de cada região é proporcional à aptidão do indivíduo e na subfigura 10-(b) o método da roleta com divisórias igualmente espaçadas é aplicado sobre o círculo para seleção dos indivíduos.

A	LatDistDrivDef	LookAheadDistMax	ObservdVehs	SafDistFactLnCg	CC1	CC3
	0,72	338	8	0,22	distribuição1	-1
B	LatDistDrivDef	LookAheadDistMax	ObservdVehs	SafDistFactLnCg	CC1	CC3
	0,67	441	9	0,13	distribuição1	-2
AB	LatDistDrivDef	LookAheadDistMax	ObservdVehs	SafDistFactLnCg	CC1	CC3
	0,72	338	8	0,13	distribuição1	-2

Figura 8 – Exemplo de *crossover* dos indivíduos A e B gerando um indivíduo AB

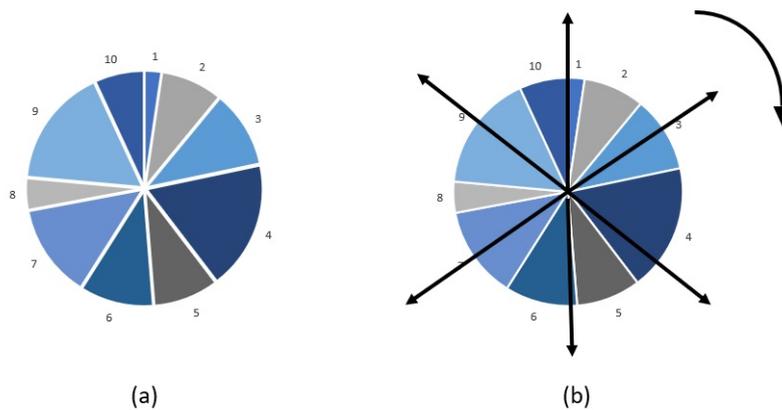


Figura 9 – A figura 10-(a): uma população de 10 indivíduos é representada em círculo com áreas proporcionais à aptidão. Na figura 10-(b), aplica-se na população o processo de seleção pelo método da roleta

Sendo assim, a mutação e a predação ajudam a inserir diversidade na população, e para esse trabalho, opta-se por utilizar o método e os valores empregados por [Silva \(2019\)](#)%, e são aplicadas a cada duas gerações. Com a aplicação do *crossover*, é possível que alguns genes dos indivíduos de uma nova geração da população tenham agressividades diferentes daquelas definidas no início do processo de calibração (baixo, médio ou alto). Nesses casos, cada gene deve ser substituído por um outro produzido aleatoriamente com base no seu respectivo espaço de busca, de acordo com seu nível de agressividade. Os autores denominaram esse processo de “alteração genética”.

Assim, a Figura 10 mostra um exemplo da aplicação do operador genético de mutação, em que há na população a probabilidade de 30% de cada indivíduo ser mutado. Dado que é escolhido um número aleatório de 1 a 6 de parâmetros que terão seus valores também alterados aleatoriamente. Na figura, os valores dos parâmetros *LatDistDrivDef* e *SafDistFactLnCg* foram alterados no processo e em seguida é apresentado o indivíduo após a mutação.

C	LatDistDrivDef	LookAheadDistMax	ObservedVehs	SafDistFactLnCg	CC1	CC3
	0,72	429	7	0,13	distribuição1	-2

Mutação ↓

C	LatDistDrivDef	LookAheadDistMax	ObservedVehs	SafDistFactLnCg	CC1	CC3
	0,43	429	7	0,30	distribuição1	-2

Figura 10 – Exemplo da aplicação de mutação em um indivíduo

5.2 Aplicação com GRASP

O GRASP aplicado neste trabalho foi elaborado baseado em outro desenvolvido por [Sarubbi \(2008\)](#), constituído de duas fases, com uma fase de construção e outra de busca local. Desse modo, a seguir é apresentado no Algoritmo 1, o GRASP utilizado nesta pesquisa.

Algoritmo 1: GRASP

```

Dados: Max_Iterações
1 for  $i \leftarrow 1$  to Max_Iterações do
2   Fase_Construção();
3   Busca_Local();
4   while Solução_Encontrada_for_Melhor() do
5     Atualize_Melhor_Solução();
6     Busca_Local();
7   end
8 end

```

Em [Sarubbi et al. \(2017\)](#) afirmam que, na fase de construção, uma técnica gulosa e aleatória gera soluções viáveis. Além disso, a busca é dita gulosa e aleatorizada devido ao parâmetro α , o qual determina o nível de gulosidade ou aleatoriedade da RCL. Em um problema de minimização, para $\alpha = 0$ a busca é aleatória, e, para $\alpha = 1$, tem-se um algoritmo guloso. Valores intermediários para o parâmetro α propiciam um *trade-off* entre eles, visto que, nessa situação, há conflito de escolha. A fase de construção aplicada é descrita a seguir.

Algoritmo 2: Fase de Construção

```

Dados: Número_De_Parâmetros_Para_Trocar
1 Solução_Inicial = {};
2 Parâmetro = Escolher_Aleatoriamente_Próximo_Parâmetro();
3 for  $i \leftarrow 1$  to Número_De_Parâmetros_Para_Trocar do
4   Construa_RCL(Parâmetro,  $\alpha$ );
5   Parâmetro = Escolher_Aleatoriamente_Próximo_Parâmetro();
6   Valor_Do_Parâmetro = Escolher_Aleatoriamente_Valor();
7   Solução_Inicial = Solução_Inicial  $\cup$  Valor_Do_Parâmetro ;
8 end

```

Dessa forma, a heurística é adaptativa porque os benefícios associados a cada elemento são atualizados a cada iteração da fase de construção para refletir as mudanças provocadas pela seleção do elemento anterior ([FEO; RESENDE, 1995](#)). Pode-se observar que a linha 4 do Algoritmo 2 mede o efeito da seleção do parâmetro sobre a solução que está sendo construída, caracterizando a componente adaptativa do algoritmo GRASP ([RANGEL et al., 1999](#)).

Depois da fase de construção, a de busca local é aplicada recursivamente visando melhorar, dentro de uma vizinhança determinada, a solução encontrada. Esta fase é apresentada no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: Busca Local

<p>Dados: Número_De_Parametros, β</p> <pre> 1 for $i \leftarrow 1$ to Número_De_Parametros do 2 Escolher_Aleatoriamente_Se_Parâmetro_Será_Alterado(β); 3 if Parâmetro_Será_Alterado then 4 Trocar_Aleatoriamente_Valor_Considerando_Agressividade(); 5 end 6 end </pre>
--

Dado que não foram encontrados, na literatura, trabalhos aplicando este método para calibrar simuladores de tráfego, para o desenvolvimento de um algoritmo GRASP para esse trabalho considerou-se os conhecimentos obtidos por [Silva et al. \(2020\)](#) e [Bessa Jr e Setti \(2018\)](#) para a calibração com AG, bem como dos trabalhos supracitados nesta seção e no capítulo 2.

À vista disso, a fase de construção é iniciada com a escolha aleatória de um parâmetro. Em seguida, são escolhidos também de forma aleatória o nível de agressividade (baixo, médio ou alto) e um valor dentro dos limites desse nível para 10 candidatos. Dessa forma, a primeira etapa da construção da lista é feita com apenas um parâmetro sendo alterado e os outros permanecem *default*. O critério para saber os candidatos que irão para a RCL com $\alpha = 20\%$ é o mesmo adotado no AG, ou seja, a minimização do RMSE. Sendo assim, quanto menor for o RMSE do candidato, maior a chance de ser selecionado para continuar na construção do próximo parâmetro. Depois, esse processo é repetido até o máximo de parâmetros (6). Assim, obtém-se uma solução viável que será o início da próxima fase.

Em seguida, com o objetivo de construir soluções próximas ou vizinhas a ótimos locais razoáveis e eventualmente ao ótimo global, é iniciada a fase de busca local. Em que são escolhidos 30% (β) dos parâmetros para serem substituídos por um valor aleatório do mesmo nível de agressividade. Então, novamente, é observado o valor obtido para o RMSE com a mudança. Dessa forma, se for encontrada uma solução melhor (menor) que a atual solução, então a solução é atualizada e é executada mais uma vez a busca local. Portanto, o algoritmo repete essas duas fases para cada iteração, o número máximo de 50 iterações e, por fim, a melhor solução geral é mantida como resultado.

6 Experimentos

Neste capítulo, abordam-se os experimentos realizados e os resultados obtidos na calibração dos parâmetros comportamentais com AG e GRASP. Inicialmente, é retrada a coleta de dados, em seguida, apresenta-se o funcionamento da aplicação computacional e depois, os valores obtidos com a aplicação de cada abordagem são discutidos separadamente. Efetua-se também a comparação entre as diferentes abordagens aplicadas, e por fim, comentam-se as análises estatísticas dos resultados.

6.1 Coleta de Dados

Os dados de tráfego utilizados como base para este trabalho foram os mesmos nos processos de calibração e validação dos modelos desenvolvidos por [Silva \(2019\)](#) e foram coletados em segmentos de aproximadamente 10 km da BR-040, com variadas características geométricas. Com o intuito de fazer a análise nos períodos com maior fluxo veicular, estudou-se os dados de volume de tráfego das praças de pedágio da rodovia relativos a 2017. Dessa forma, definiu-se que as melhores datas para realizar as vistorias seriam durante de Semana Santa de 2018, para os pontos próximos a Cristalina-GO, e durante o feriado de Independência de 2018, para os pontos próximos a Curvelo-MG. A figura 11 exibe as seções em que se aplicou o método.

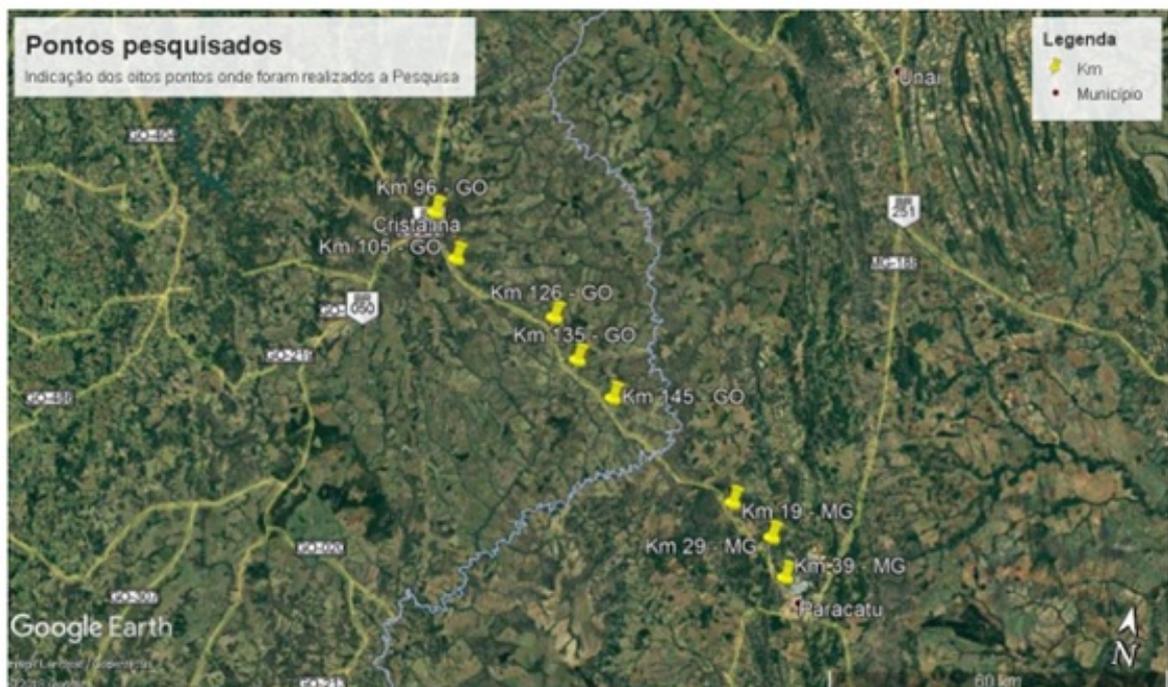


Figura 11 – Pontos de coleta de dados pelo método das placas

Obteve-se grande parte dos dados pelo método das placas que consiste em determinar o número de veículos passantes por um determinado trecho viário em um dado período de tempo, classificando-os por categoria, sentido, pelo registro do instante da passagem dos veículos e das placas na entrada e saída dos trechos os quais apresentam pesquisadores posicionados na lateral da via. Além disso, adquiriram dados por meio do emprego de câmeras de vídeo nas extremidades e em pontos intermediários das seções observadas, visando buscar informações como as velocidades médias de viagem, a composição veicular e os *headways* dos veículos. Cada trecho contou com a presença de dois pesquisadores, um por sentido da rodovia, e, ao final, as informações colhidas foram agregadas em períodos de 15 minutos. Detalhes mais específicos sobre o método de coleta dos dados de tráfego utilizados neste trabalho podem ser encontrados em [Silva \(2019\)](#).

Nas Tabelas 3 e 4, apresentam-se os dados de fluxo e velocidade obtidos, respectivamente, durante a Semana Santa de 2018 e o feriado de Independência de 2018, tanto para o sentido Minas Gerais quanto para o sentido Goiás. Assim, os dados apresentados abaixo foram utilizados neste trabalho.

Tabela 3 – Síntese dos dados de tráfego coletados durante a Semana Santa de 2018

km inicial	km final	Fluxo sentido		Fluxo sentido		Velocidade média	
		GO-MG (veic/h)	MG-GO (veic/h)	GO-MG (veic/h)	MG-GO (veic/h)	(km/h)	(km/h)
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
95	105	172	440	156	608	80	112
125	135	54	280	16	768	46	94
135	145	52	192	16	92	76	95
130	140	48	368	336	1200	71	103
140	150	16	352	336	1024	77	124

Tabela 4 – Síntese dos dados de tráfego coletados durante o feriado de Independência de 2018

km inicial	km final	Fluxo sentido		Fluxo sentido		Velocidade média	
		GO-MG (veic/h)	MG-GO (veic/h)	GO-MG (veic/h)	MG-GO (veic/h)	(km/h)	(km/h)
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
288	298	140	208	128	319	77,5	107
359	369	380	728	100	268	73	112
369	379	352	584	64	204	72	110
379	389	300	892	72	196	76	106
389	399	412	644	76	180	62	95

6.2 Aplicação computacional

6.2.1 Criação da rede no VISSIM

Conforme exposto na seção 4.1, ao construir uma rede de tráfego em um microsimulador, deve-se inserir dados referentes a geometria viária dos trechos analisados. Para isso, obteve-se os perfis verticais e horizontais, além das informações relativas à sinalização horizontal de permissão de ultrapassagem e a localização das faixas adicionais, com o auxílio de um GPS (*Global Positioning System*). Também foram postas características dos veículos pesados e a distribuição de velocidades desejadas. Detalhes mais específicos sobre o método de coleta e tratamento dos dados utilizados neste trabalho podem ser encontrados em [Silva et al. \(2020\)](#). A entrada dos dados de tráfego, no simulador ocorreu por meio da interface descrita na seção a seguir.

6.2.2 Execução da calibração e validação

As duas meta-heurísticas, AG e GRASP, foram codificados com VBA. O *script* do VBA acessa os parâmetros do VISSIM através de interface COM (*Component Object Model*). De acordo com [Lidbe, Hainen e Jones \(2017\)](#), tal interface permite o uso de ambientes de programação genéricos para exportar objetos, métodos e propriedades e, assim, automatiza a tarefa de executar várias simulações enquanto altera os diferentes parâmetros necessários durante cada iteração. Deste modo, a seguir, apresenta-se um diagrama que representa o fluxo de trabalho.

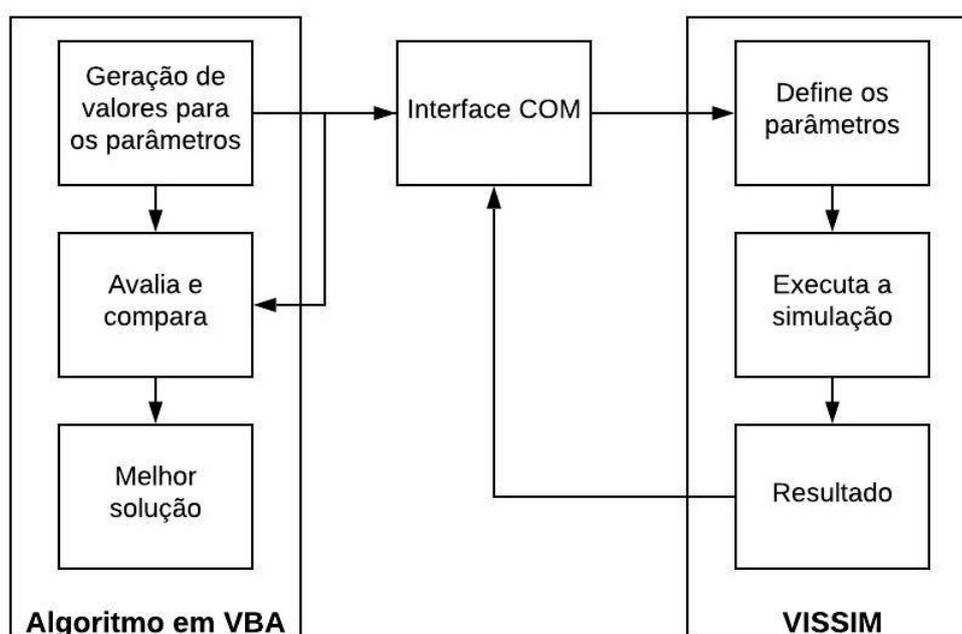


Figura 12 – Diagrama esquemático dos controles e avaliação da simulação (adaptado de [LIDBE; HAINEN; JONES, 2017](#))

6.3 Resultados obtidos da calibração e validação

Para produzir o modelo calibrado pelo AG, simulou-se 130 correntes de tráfego, com 10 indivíduos e 50 iterações, que resultou em 65000 simulações ($130 \times 10 \times 50 = 65000$). Para o GRASP, o cálculo é análogo e multiplicado pelo número de parâmetros (6), além disso, soma-se as simulações realizadas na etapa de busca local, que sucedeu em 393380 simulações para calibrar o método guloso. Dessa forma, o GRASP realizou cerca de 6 vezes mais.

6.3.1 Aplicação com AG

Tabela 5 – Melhor conjunto de parâmetros encontrados pelo AG

Parâmetro	Valor obtido pelo AG	Nível de agressividade
LatDistDrivDef	0,76 m	Alto
LookAheadDistMax	398 m	Alto
ObservdVehs	9 veículos	Alto
SafDistFactLnCg	0,11 m	Alto
CC1	distribuição 1	Alto
CC3	-0,60 s	Alto

Desta maneira, usando-se os valores *default* dos parâmetros, alcançou-se um valor de RMSE igual a 31,11. Com a aplicação da melhor solução encontrada com o AG, apresentada na tabela anterior, obteve-se um valor de RMSE de 16,51, que é 47% menor do que quando usados os valores *default* dos parâmetros. Em seguida, realizou-se um processo de validação ao testar a melhor solução encontrada na etapa de calibração. Nesse caso, o valor de RMSE encontrado foi de 22,63, que é 36% menor do que o obtido com os parâmetros *default*, igual a 35,22.

6.3.2 Aplicação com GRASP

Tabela 6 – Melhor conjunto de parâmetros encontrados pelo GRASP

Parâmetro	Valor obtido pelo GRASP	Nível de agressividade
LatDistDrivDef	0,72 m	Alto
ObservdVehs	9 veículos	Alto
SafDistFactLnCg	0,33 m	Alto
CC3	-0,05 s	Alto
LookAheadDistMax	488 m	Alto
CC1	distribuição 1	Alto

Assim, com a aplicação dessa melhor solução encontrada com o GRASP, obteve-se um valor de RMSE de 18,22, que é 41% menor do que quando usados os valores *default* dos

parâmetros. Em seguida, no processo de validação, obteve-se o valor de RMSE de 21,93, que é 38% menor do que o obtido com os parâmetros *default*.

6.4 Discussão dos Resultados

Ambas as aplicações apresentaram melhora em relação à utilização dos parâmetros fornecidos pelo simulador. Com relação aos resultados dos parâmetros calibrados pelos dois algoritmos, todos os valores foram considerados mais agressivos do que os valores *default* do VISSIM.

Pelos valores de RMSE obtidos durante os processos de calibração e de validação do VISSIM, para análise da ATS, uma comparação dos dados de campo, o modelo não calibrado (*default*) e os modelos calibrados indicam a importância da calibração e validação para simulação de modelos microscópicos. Conforme indicado na Figura 13, os modelos calibrados apresentam melhor aderência aos dados de campo do que o modelo não calibrado.

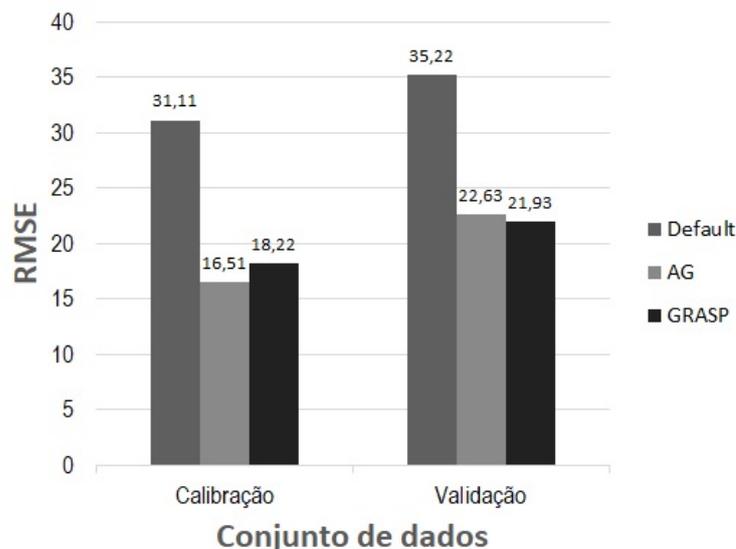


Figura 13 – Valores de RMSE obtidos durante o processo de calibração e de validação

Observa-se também na Figura 13 que a calibração com AG obteve resultado 9% menor do que com o GRASP, contudo, a validação com AG obteve resultado 3% maior do que com o GRASP. Dado que, o principal motivo de se obter um modelo calibrado é estimar quão bem o modelo treinado consegue generalizar para novos dados não visto anteriormente. Assim, o resultado demonstra que o modelo gerado pelo GRASP captura melhor a tendência global que as velocidades irão apresentar, expondo desempenho superior de generalização.

Dessa forma, ao comparar os dados de campo e os modelos calibrados, verifica-se a importância da calibração e validação para simulação de modelos microscópicos. Conforme indicado nas Figuras 14, 15, 16, os modelos calibrados se ajustam melhor aos dados de

campo do que o modelo não calibrado, neste, velocidades muito menores são simuladas do que as observados em campo.

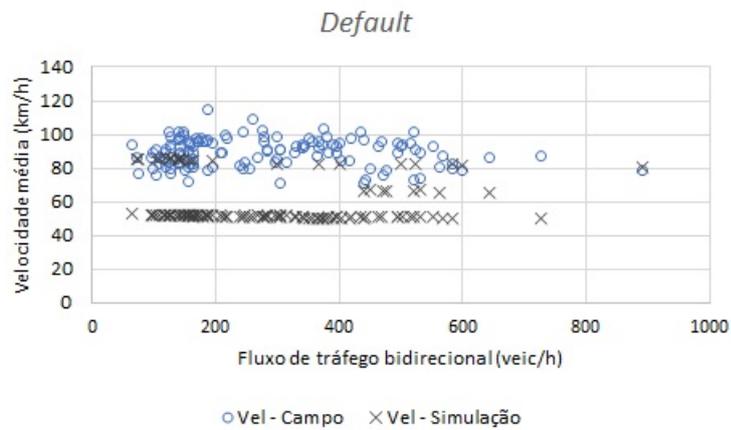


Figura 14 – Resultado da simulação com parâmetros *default*

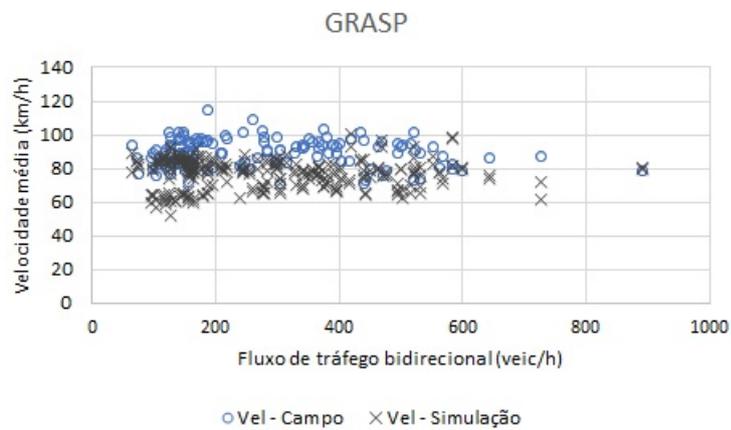


Figura 15 – Resultado da simulação com parâmetros calibrados com GRASP

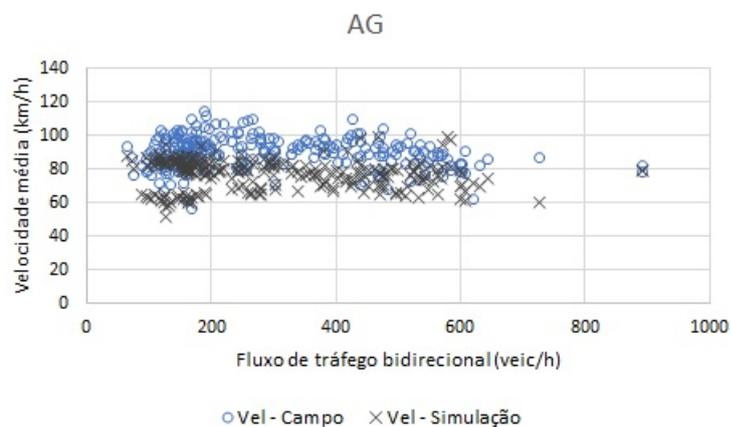


Figura 16 – Resultado da simulação com parâmetros calibrados com AG

Em [Wolpert, Macready et al. \(1995\)](#), existe uma afirmação fundamental, chamada de teorema da inexistência do almoço grátis (*No-Free-Lunch Theorem*, ou NFL), que declara que todos os algoritmos de busca têm exatamente o mesmo desempenho, quando se faz a média através de todos os infinitos problemas existentes. Grosseiramente, isso equivale a afirmar que se o algoritmo A é melhor que o algoritmo B em uma série de k problemas, então deve haver uma outra série de k problemas em que ao algoritmo B tem um desempenho superior ao algoritmo A.

Contudo, [Linden \(2006\)](#) afirma que uma consequência do NFL é que nenhum algoritmo genérico pode ser melhor do que um algoritmo desenhado especificamente para a resolução de um problema, em que as características especiais deste problema, incluindo suas restrições, mapeamentos especiais e quaisquer outras que possamos imaginar, sejam cuidadosamente projetadas e utilizadas para benefício da solução. Para [Ciuffo e Punzo \(2014\)](#) existe uma clara dependência entre o desempenho de um procedimento de calibração e o estudo de caso em análise. Portanto, a escolha do algoritmo mais adequado depende do problema específico sob investigação, e o algoritmo mais apropriado, além de oferecer bom desempenho (ambos em termos de qualidade da solução e velocidade de convergência) em problemas, pode se revelar fraco em alguns outros ([LIDBE; HAINEN; JONES, 2017](#)).

Portando, como o AG e o GRASP aplicados neste trabalho foram delineados para a resolução do problema de calibração de um microssimulador de tráfego, apesar das diferenças observadas, ambos os algoritmos representaram melhor a realidade estudada.

7 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo principal comparar meta-heurísticas aplicadas para o problema de calibração e validação dos modelos comportamentais do simulador VISSIM. Para atingir esta meta, utilizou-se um conjunto de dados em segmentos de rodovias de pista simples na BR-040 com diferentes condições geométricas e de tráfego. Além disso, os dados empregados neste trabalho foram obtidos pelo método das placas. Dessa forma, possibilita a calibração dos parâmetros do VISSIM com dados de campo.

Dos cerca de 80 parâmetros comportamentais de condução editáveis visando proporcionar maior aderência da simulação à realidade, após aplicadas as metodologias apresentadas no capítulo 4, identificou-se seis parâmetros como relevantes para calibração nos segmentos escolhidos para análise. Em seguida, realizou-se a calibração com base em um algoritmo genético e em um procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo, mas somente após estimar outros parâmetros fundamentais do simulador, como aqueles ligados à distribuição de velocidades desejadas e ao desempenho de veículos pesados.

Assim, modelou-se as meta-heurísticas para calibrar o simulador para a realidade simulada. Por fim, obteve-se as diferenças na calibração e na validação do VISSIM, de acordo com o algoritmo utilizado (AG ou GRASP), inclusive em relação aos resultados encontrados com os parâmetros *default*. Com relação aos resultados dos parâmetros calibrados pelos dois algoritmos, todos os valores foram considerados mais agressivos do que os valores *default* do VISSIM. Desse modo, verificou-se a pertinência da aplicação dos algoritmos de calibração, visto que a função com objetivo de minimizar a RMSE dos valores obtidos para análise da ATS, apresentaram melhoria em relação aos valores obtidos com os parâmetros fornecidos pelo simulador (*default*). Sendo que a calibração com AG obteve resultado 9% menor (melhor) do que com o GRASP, contudo a validação com AG com resultado 3% pior do que com o GRASP. Expondo melhor desempenho de generalização do modelo calibrado pelo GRASP.

Contudo, uma consequência do NFL é que nenhum algoritmo genérico pode ser melhor do que um algoritmo desenhado especificamente para a resolução de um problema. Como o AG e o GRASP empregados neste trabalho foram delineados para a resolução de um problema de calibração de um microssimulador de tráfego, embora diferenças tenham sido observadas, ambas as calibrações melhoraram a aderência da simulação à realidade estudada.

Portanto, os resultados desta pesquisa podem ser usados para ajudar profissionais da área a obter modelos de simulação em maior concordância com os dados de campo, visto que a calibração dos modelos de microssimulação de tráfego tende a se tornar cada vez

mais complexa no futuro. Na medida em que a crescente capacidade de processamento dos computadores fomenta a criação de modelos mais robustos e flexíveis, apoiado no acesso a diferentes bases de dados para calibração de modelos de microssimulação. Além disso, conforme o número de parâmetros para a calibração aumenta, a complexidade do problema de otimização também aumenta.

Esta pesquisa propiciou algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros, por isso, sugere-se: (i) acrescentar ao algoritmo GRASP uma terceira fase chamada de *Path Relinking* (reconexão por caminhos) visando melhorar a solução dada pela busca local; (ii) usar o GRASP e o AG juntos, em virtude de o GRASP ser utilizado em conjunto com algoritmos genéticos como mecanismo para gerar soluções iniciais, bem como em *crossover*; (iii) aplicar validação cruzada para estimar a capacidade do modelo treinado em generalizar para novos dados não visto anteriormente; e (iv) aplicar os procedimentos com uso de outros programas de simulação de tráfego e em outros cenários, pretendendo aumentar a abrangência e a confiabilidade das calibrações, além de obter conclusões mais globais sobre os parâmetros comportamentais do condutor brasileiro.

Referências

- ABDALHAQ, B. K.; BAKER, M. I. A. Using meta heuristic algorithms to improve traffic simulation. *Journal of Algorithms and Optimization*, v. 2, n. 4, p. 110–128, 2014.
- ABDELWAHAB, W.; ABOUL-ELA, M.; MORRALL, J. Geometric design consistency based on speed change on horizontal curves. *Road and Transport Research*, v. 7, n. 1, 1998.
- AL-KAISY, A. F.; DURBIN, C. *Estimating percent time spent following on two-lane highways: field evaluation of new methodologies*. [S.l.], 2007.
- ASLLANI, A.; LARI, A. Using genetic algorithm for dynamic and multiple criteria web-site optimizations. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 176, n. 3, p. 1767–1777, 2007.
- ASTARITA, V. et al. Comparison of three methods for dynamic network loading. *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 1771, n. 1, p. 179–190, 2001.
- AYALA, R. J. L. *Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores a serem considerados no processo de calibração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2013.
- AYTUG, H.; KHOUJA, M.; VERGARA, F. Use of genetic algorithms to solve production and operations management problems: a review. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 41, n. 17, p. 3955–4009, 2003.
- BARBOZA, A. O. *Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista*. Tese (Doutorado) — Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2005.
- BESSA Jr, J. E. *Caracterização do fluxo de tráfego em rodovias de pista simples do Estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- BESSA Jr, J. E. *Medidas de desempenho para avaliação da qualidade de serviço em rodovias de pista simples no Brasil*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.
- BESSA Jr, J. E.; SETTI, J. R. Derivation of ats and ptsf functions for two-lane, rural highways in brazil. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Elsevier, v. 16, p. 282–292, 2011.
- BESSA Jr, J. E.; SETTI, J. R. Avaliação de medidas de desempenho para rodovias de pista simples obtidas a partir de relações fluxo-velocidade. *Transportes*, v. 24, n. 3, p. 72–80, 2016.
- BESSA Jr, J. E.; SETTI, J. R. Evaluating measures of effectiveness for quality of service estimation on two-lane rural highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, American Society of Civil Engineers, v. 144, n. 9, p. 04018056, 2018.

- BESSA Jr, J. E.; SETTI, J. R.; WASHBURN, S. S. Evaluation of models to estimate percent time spent following on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, American Society of Civil Engineers, v. 143, n. 5, p. 04017010, 2017.
- BETHONICO, F. C. *Calibração de simuladores microscópicos de tráfego através de medidas macroscópicas*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.
- BETHONICO, F. C.; PIVA, F. J.; SETTI, J. R. Calibração de microssimuladores de tráfego através de medidas macroscópicas. In: *ANPET. Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.
- BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o código de trânsito brasileiro. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 1997. ISSN 1677-7042. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503Compilado.htm>.
- BRILON, W.; WEISER, F. Capacity and speed-flow relationships on rural two-lane highways in germany. In: *Third International Symposium on Highway Capacity Transportation Research Board Highway Capacity and Quality of Service Committee, Danish Road Directorate*. [S.l.: s.n.], 1998.
- BRILON, W.; WEISER, F. Two-lane rural highways: the german experience. *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 1988, n. 1, p. 38–47, 2006.
- BRITO, N. M. et al. Validação de métodos analíticos: estratégia e discussão. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 13, 2003.
- BURKE, E. et al. Hyper-heuristics: An emerging direction in modern search technology. In: *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2003. p. 457–474.
- CARVALHO, L. G. S. *Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.
- CARVALHO, L. G. S.; SETTI, J. R. Calibração do modelo de desempenho de caminhões do Vissim usando dados de GPS embarcado. In: *ANPET. Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ. [S.l.: s.n.], 2018. p. 3601–3612.
- CHIAPPONE, S. et al. Traffic simulation models calibration using speed–density relationship: an automated procedure based on genetic algorithm. *Expert systems with applications*, Elsevier, v. 44, p. 147–155, 2016.
- CIUFFO, B.; PUNZO, V. “No free lunch” theorems applied to the calibration of traffic simulation models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 553–562, 2014.
- CNT, C. N. d. T. *Pesquisa CNT de Rodovias 2019: Relatório Gerencial*. [S.l.]: Brasília, 2019.

- COLELLA, D. A. T.; LIMA, E. P.; DEMARCHI, S. H. Calibração e validação do modelo fluxo-velocidade do integration para vias urbanas semaforizadas. In: *Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 453–464.
- CORMEN, T. H. et al. Section 22.4: topological sort. *Introduction to Algorithms (2nd ed.)*, MIT Press and McGraw-Hill, p. 549–552, 2001.
- CORMEN, T. H. et al. *Introduction to algorithms*. [S.l.]: MIT press, 2009.
- CUNHA, A. L.; BESSA, J. E.; SETTI, J. R. Genetic algorithm for the calibration of vehicle performance models of microscopic traffic simulators. In: SPRINGER. *Portuguese Conference on Artificial Intelligence*. [S.l.], 2009. p. 3–14.
- CUNHA, A. L. B. N. da; SETTI, J. R. Calibração do modelo de desempenho de caminhões do corsim através de um algoritmo genético. 2006.
- DOWLING, R.; SKABARDONIS, A.; ALEXIADIS, V. *Traffic analysis toolbox volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software*. [S.l.], 2004.
- EGAMI, C. Y. *Adaptação do HCM-2000 para determinação do nível de serviço em rodovias de pista simples sem faixas adicionais no Brasil*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- EGAMI, C. Y.; SETTI, J. R.; RILLET, L. R. Algoritmo genético para calibração automática de um simulador de tráfego em rodovias de pista simples. *TRANSPORTES*, v. 12, n. 2, 2004.
- ELEFTERIADOU, L. Mathematical and empirical models. In: *An Introduction to Traffic Flow Theory*. [S.l.]: Springer, 2014. p. 129–135.
- FAN, W.; GURMU, Z. Combined decision making of congestion pricing and capacity expansion: genetic algorithm approach. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 140, n. 8, p. 04014031, 2014.
- FAN, W.; MACHEMEHL, R. B. Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach. *Journal of transportation engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 1, p. 40–51, 2006.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters*, Elsevier, v. 8, n. 2, p. 67–71, 1989.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, Springer, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.
- FESTA, P.; RESENDE, M. G. Grasp: An annotated bibliography. In: *Essays and surveys in metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2002. p. 325–367.
- FESTA, P.; RESENDE, M. G. An annotated bibliography of grasp—part i: Algorithms. *International Transactions in Operational Research*, Wiley Online Library, v. 16, n. 1, p. 1–24, 2009.
- FESTA, P.; RESENDE, M. G. An annotated bibliography of grasp—part ii: Applications. *International Transactions in Operational Research*, Wiley Online Library, v. 16, n. 2, p. 131–172, 2009.

- GAO, Y. *Calibration and comparison of the VISSIM and INTEGRATION microscopic traffic simulation models*. Tese (Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- GEN, M.; CHENG, R. Genetic algorithms and engineering design. *John Wiley and Sons, New York*, 1997.
- GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. Metaheuristics in combinatorial optimization. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 140, n. 1, p. 189–213, 2005.
- GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of metaheuristics*. Springer US, 2006. v. 57. (International Series in Operations Research & Management Science, v. 57). ISBN 9780306480560. Disponível em: <<https://books.google.pt/books?id=P-HpBwAAQBAJ>>.
- GOLDBERG, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. *Addison-Wesley Longman Publishing Co. In In Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation CEC00*, 1989.
- HELLINGA, B. R. Requirements for the calibration of traffic simulation models. *Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering*, v. 4, p. 211–222, 1998.
- HOLLAND, J. Adaptation in natural and artificial systems. *Ann Arbor: The University of Michigan Press*, 1975.
- HOLLANDER, Y.; LIU, R. The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, Springer, v. 35, n. 3, p. 347–362, 2008.
- HOURLAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P.; KOTTOMMANNIL, J. Practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, n. 1852, p. 130–139, 2003.
- KIM, J.; MAHMASSANI, H. S. Correlated parameters in driving behavior models: Car-following example and implications for traffic microsimulation. *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2249, n. 1, p. 62–77, 2011.
- KIM, K.-O.; RILETT, L. R. Genetic-algorithm based approach for calibrating microscopic simulation models. In: IEEE. *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585)*. [S.l.], 2001. p. 698–704.
- KIM, S.-J.; KIM, W.; RILETT, L. R. Calibration of microsimulation models using nonparametric statistical techniques. *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 1935, n. 1, p. 111–119, 2005.
- KNOOP, V. Introduction to traffic flow theory: An introduction with exercises. 2017.
- KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, v. 91, n. 9, p. 992–1007, 2006.
- KONTOGHIORGHES, E. J. *Handbook of parallel computing and statistics*. [S.l.]: CRC Press, 2005.

- LACERDA, V. M. *Estimação da Velocidade Média em Vias Urbanas com Uso do Microssimulador VISSIM*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2016.
- LACERDA, V. M. et al. Estimação da velocidade média em vias arteriais urbanas com uso do microssimulador vissim. *TRANSPORTES*, v. 27, n. 4, p. 63–75, 2019.
- LIDBE, A. D.; HAINEN, A. M.; JONES, S. L. Comparative study of simulated annealing, tabu search, and the genetic algorithm for calibration of the microsimulation model. *Simulation*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 93, n. 1, p. 21–33, 2017.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional*. [S.l.]: Brasport Livros e Multimídia, 2006.
- LUTTINEN, R. T. Capacity and level-of-service estimation in finland. In: *5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service Transportation Research Board*. [S.l.: s.n.], 2006.
- MA, J.; DONG, H.; ZHANG, H. Calibration of microsimulation with heuristic optimization methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, n. 1999, p. 208–217, 2007.
- MA, T.; ABDULHAI, B. Genetic algorithm-based optimization approach and generic tool for calibrating traffic microscopic simulation parameters. *Transportation research record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 1800, n. 1, p. 6–15, 2002.
- MAIA, F. V. B. *Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microssimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2007.
- MATHEW, T. V.; RADHAKRISHNAN, P. Calibration of microsimulation models for nonlane-based heterogeneous traffic at signalized intersections. *Journal of Urban Planning and Development*, American Society of Civil Engineers, v. 136, n. 1, p. 59–66, 2010.
- MCLEAN, J. R. *Two-lane highway traffic operations: Theory and practice*. [S.l.]: Taylor & Francis, 1989. v. 11.
- MENNENI, S.; SUN, C.; VORTISCH, P. Microsimulation calibration using speed-flow relationships. *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2088, n. 1, p. 1–9, 2008.
- MORENO, A. T. et al. Modification of the highway capacity manual two-lane highway analysis procedure for spanish conditions. *Journal of Advanced Transportation*, Wiley Online Library, v. 50, n. 8, p. 1650–1665, 2016.
- OLIVEIRA, M. d.; CYBIS, H. Revisão da experiência de calibração do software vissim aplicado a um estudo de caso de autoestrada brasileira. *VIII SEPROSUL—Bento Gonçalves, Brasil*, 2008.
- OSMAN, I. H.; KELLY, J. P. Meta-heuristics: an overview. In: *Meta-heuristics*. [S.l.]: Springer, 1996. p. 1–21.

- PARAVISI, M.; MUSSE, S. R.; BICHO, A. de L. Modelagem e simulação do tráfego de veículos e controle semafórico em um ambiente virtual. *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, v. 16, n. 2, p. 16–37, 2006.
- PARK, B.; QI, H. Development and evaluation of a procedure for the calibration of simulation models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, n. 1934, p. 208–217, 2005.
- PAZ, A. et al. Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, v. 55, p. 432–443, 2015.
- PELLEGRINI, P. T. *Contribuição para o estudo das distâncias de visibilidade de ultrapassagem para rodovias bidirecionais com duas faixas de tráfego*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.
- PITSOULIS, L. S.; RESENDE, M. G. Greedy randomized adaptive search procedures. *Handbook of applied optimization*, p. 168–183, 2002.
- POLUS, A.; COHEN, M. Theoretical and empirical relationships for the quality of flow and for a new level of service on two-lane highways. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 135, n. 6, p. 380–385, 2009.
- POLUS, A.; CRAUS, J.; LIVNEH, M. Flow and capacity characteristics on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, n. 1320, 1991.
- PTV, P. T. V. A. Ptv vissim 10 user manual. *Karlsruhe, Germany*, 2018.
- RANGEL, M. C. et al. Algoritmo guloso adaptativo e aleatório para o problema quadrático de alocação. *Production*, SciELO Brasil, v. 9, n. 2, p. 37–48, 1999.
- RESENDE, M. G.; RIBEIRO, C. C. Greedy randomized adaptive search procedures. In: *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2003. p. 219–249.
- SALCEDO-SANZ, S. Modern meta-heuristics based on nonlinear physics processes: A review of models and design procedures. *Physics Reports*, Elsevier, v. 655, p. 1–70, 2016.
- SARUBBI, J. F. et al. A grasp based heuristic for deployment roadside units in vanets. In: IEEE. *2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM)*. [S.l.], 2017. p. 369–376.
- SARUBBI, J. F. M. *Problemas de roteamento com custos de carga*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- SILVA, F. A. *Determinação do impacto de zonas de ultrapassagens proibidas e de faixas adicionais de subida em segmentos de rodovias de pista simples*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- SILVA, F. A. et al. Avaliação do efeito das faixas adicionais de subida em segmentos de rodovias de pista simples. In: ANPET. *Anais do XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Rio de Janeiro, RJ. [S.l.: s.n.], 2019.
- SILVA, F. A. et al. Avaliação do efeito das faixas adicionais de subida em segmentos de rodovias de pista simples. *Transportes*, v. 28, n. 4 (no prelo), 2020.

- SPARMANN, U. Spurwechselforgänge auf zweispurigen bab-richtungsfahrbahnen. *FORSCH STRASSENBAU U STRASSENVERKEHRSTECH* 263, n. 263, 1978.
- TETTAMANTI, T. et al. Iterative calibration of vissim simulator based on genetic algorithm. *Acta Technica Jaurinensis*, v. 8, n. 2, p. 145–152, 2015.
- TRB, H. C. M. Highway capacity manual. *Washington, DC*, v. 11, 2000.
- WAINER, J. et al. Métodos de pesquisa quantitativa e qualitativa para a ciência da computação. *Atualização em informática*, Sociedade Brasileira de Computação/Editora PUC Rio Rio de Janeiro, v. 1, p. 221–262, 2007.
- WIEDEMANN, R. *Simulation des Strassenverkehrsflusses*. 1974.
- WOLPERT, D. H.; MACREADY, W. G. et al. *No free lunch theorems for search*. [S.l.], 1995.
- YU, M.; FAN, W. D. Calibration of microscopic traffic simulation models using metaheuristic algorithms. *International Journal of Transportation Science and Technology*, Elsevier, v. 6, n. 1, p. 63–77, 2017.