



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

DANIEL BEZERRA GALVÃO MITRE

**UMA ALTERNATIVA PARA GERAR PLANOS SEMAFÓRICOS
EQUILIBRADOS E FLUIDOS UTILIZANDO
ALGORITMOS GENÉRICOS**

CAMPINA GRANDE - PB

2020

DANIEL BEZERRA GALVÃO MITRE

**UMA ALTERNATIVA PARA GERAR PLANOS SEMAFÓRICOS
EQUILIBRADOS E FLUIDOS UTILIZANDO
ALGORITMOS GENÉRICOS**

**Trabalho de Conclusão Curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Ciência da Computação do Centro de
Engenharia Elétrica e Informática da
Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Ciência
da Computação.**

Orientadora: Professora Dra. Joseana Macêdo Fachine Régis de Araújo.

CAMPINA GRANDE - PB

2020



M684a Mitre, Daniel Bezerra Galvão.
Uma alternativa para gerar planos semaforicos equilibrados e fluidos utilizando algoritmos genericos. / Daniel Bezerra Galvão Mitre. - 2020.

9 f.

Orientadora: Profa. Dra. Joseana Macêdo Fechine Régis de Araújo.

Trabalho de Conclusão de Curso - Artigo (Curso de Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

1. Controle semaforico. 2. Programação semaforica. 3. Atraso médio veicular. 4. Balanceamento de atrasos de rotas. 5. Algoritmo Genérico. 6. Simulador de trânsito. I. Araújo, Joseana Macêdo Fechine Régis de. II. Título.

CDU:004(045)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

DANIEL BEZERRA GALVÃO MITRE

**UMA ALTERNATIVA PARA GERAR PLANOS SEMAFÓRICOS
EQUILIBRADOS E FLUIDOS UTILIZANDO
ALGORITMOS GENÉRICOS**

**Trabalho de Conclusão Curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Ciência da Computação do Centro de
Engenharia Elétrica e Informática da
Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Ciência
da Computação.**

BANCA EXAMINADORA:

**Professora Dra. Joseana Macêdo Fachine Régis de Araújo
Orientadora – UASC/CEEI/UFCG**

**Professora Dra. Melina Mongiovi
Examinador – UASC/CEEI/UFCG**

**Professor Dr. Tiago Lima Massoni
Professor da Disciplina TCC – UASC/CEEI/UFCG**

Trabalho aprovado em: 2020.

CAMPINA GRANDE - PB

Uma Alternativa para Gerar Planos Semafóricos Equilibrados e Fluidos utilizando Algoritmos Genéticos

Daniel Bezerra Galvão Mitre
daniel.mitre@ccc.ufcg.edu.br
Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande, Paraíba, Brasil

Joseana Macêdo Fachine Régis de Araújo*
joseana@computacao.ufcg.edu.br
Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande, Paraíba, Brasil

RESUMO

Vários critérios são considerados na otimização de planos semafóricos das malhas de trânsito de cidades com semáforos inteligentes. Enquanto a ideia de equilibrar o atraso de rotas não é tão abordada na literatura, sugerimos minimizar o atraso padronizado médio da malha como critério de otimização para gerar planos balanceados e fluidos. Com auxílio de um microssimulador de trânsito, desenvolvemos um algoritmo genético para validar o potencial dessa abordagem, que gerou planos 41% mais fluidos e 31% mais balanceados, em média, do que as alternativas consideradas. Enquanto observamos resultados promissores, trabalhos futuros devem avaliar a estratégia em diferentes malhas sob diferentes níveis de saturação.

PALAVRAS-CHAVE

Controle semafórico, programação semafórica, atraso médio veicular, balanceamento dos atrasos de rota, algoritmo genético, simulador de trânsito.

1 INTRODUÇÃO

A falta de fluidez do trânsito é um problema comum nos grandes centros urbanos há bastante tempo, e diversas são as abordagens para minimizar esse problema otimizando a configuração dos semáforos. A partir de 1970, surgem, com algoritmos responsivos ao tráfego, sistemas de otimização em tempo real e em larga escala [2, 9]. Desde então, o desenvolvimento dessa área e a complexidade de seus problemas acompanham a tecnologia e poder computacional disponível. Apesar de existirem diferentes algoritmos para situações específicas de interseções ou pequenas malhas, essas soluções parciais podem ter resultados inesperados em níveis macroscópicos. Estratégias que buscam maximizar o fluxo em um conjunto de interseções tendem a causar longos atrasos em rotas mais curtas, enquanto estratégias justas podem provocar congestionamentos em situações de alta demanda. Para abordar esse problema, desenvolvemos um algoritmo genético com o objetivo de atender satisfatoriamente às necessidades de vazão e balanceamento da malha.¹

*Orientadora do trabalho.

¹Os autores retêm os direitos, ao abrigo de uma licença Creative Commons Atribuição CC BY, sobre todo o conteúdo deste artigo (incluindo todos os elementos que possam conter, tais como figuras, desenhos, tabelas), bem como sobre todos os materiais produzidos pelos autores que estejam relacionados ao trabalho relatado e que estejam referenciados no artigo (tais como códigos fonte e bases de dados). Essa licença permite que outros distribuam, adaptem e evoluam seu trabalho, mesmo comercialmente, desde que os autores sejam creditados pela criação original.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Programação Semafórica

A programação de um semáforo é a configuração que esse recebe para atuar. O plano semafórico de uma interseção é o conjunto de configurações dos semáforos que controlam o acesso à interseção, o que chamaremos de plano da interseção ao longo deste artigo. De forma análoga, o plano da malha é constituído por um plano para cada interseção da malha. O plano de uma interseção é composto em alto nível por quatro configurações:

- Entende-se por **estágio** o conjunto de movimentos permitidos simultaneamente pelos semáforos durante um determinado momento e o período de entreverdes (amarelo) que o segue. Quanto mais vias e movimentos permitidos existem em um cruzamento, maiores são as combinações e permutações de estágios possíveis;
- Também é preciso configurar o **tempo dos estágios**, que consiste no tempo em que cada estágio permite seus movimentos e um período reservado para o entreverdes que os segue.
- Um **ciclo** é a execução da sequência completa dos estágios de uma interseção. Logo, **tempo de ciclo** é o tempo necessário para essa execução;
- **Offset** (ou defasagem) é o deslocamento de um plano de interseção no eixo do tempo. Esse deslocamento é utilizado para coordenar diferentes interseções. Útil na geração de ondas verdes, por exemplo, que ocorre quando veículos conseguem passar por semáforos consecutivos sem sofrer nenhum atraso.

Por simplicidade, assumimos como atraso o tempo em que um veículo teve sua velocidade abaixo de 0,1 m/s.

2.2 Algoritmos Genéticos (AG)

Algoritmos genéticos são uma classe especial de algoritmos evolutivos (ou computação evolutiva) que se inspiram em estratégias da biologia evolutiva. É uma heurística de busca muito poderosa e genérica que, também devido à sua simplicidade, é amplamente empregada nos mais diversos domínios. São componentes essenciais a um algoritmo genético:

- Os **indivíduos** são soluções potenciais para o problema. Um indivíduo é representado pelo seu material genético (cromossomo), que é a representação lógica dos parâmetros da busca. Na prática, o cromossomo é uma forma de codificar o espaço de busca em uma cadeia de *bits*. Um conjunto de indivíduos é chamado de **população**;
- A **função de aptidão** é responsável por avaliar o quão bem o indivíduo atinge ou se distancia do objetivo. A evolução

será encarregada de procurar os parâmetros que maximizam ou minimizam essa métrica, a depender da aplicação, portanto é essencial utilizar uma função que capture bem as características desejadas na solução;

- A **seleção** é a forma a partir da qual os indivíduos são escolhidos para gerar novos indivíduos. A seleção deve privilegiar indivíduos mais aptos, mas não deve ignorar os menos aptos, pois a variabilidade da população é essencial para expandir o espaço de busca dos parâmetros;
- A **reprodução** define a estratégia que será utilizada para compor uma nova geração levando em conta os resultados da geração anterior. Geralmente, faz uso do processo de seleção para escolher indivíduos e gerar novos indivíduos a partir de sua combinação;
- **Mutação** é a forma a partir da qual o material genético dos indivíduos pode ser alterado. Um exemplo de mutação consiste em adicionar uma probabilidade de inverter cada *bit* do material genético de um indivíduo recém-gerado. Mutações induzem uma variabilidade genética, permitindo que o algoritmo expanda seu espaço de busca.

2.3 AG na Otimização de Semáforos

Dentre as inúmeras classes de algoritmos já utilizados neste problema, algoritmos baseados em inteligência computacional apresentam um bom custo-benefício ao lidar com a complexidade e dinamismo do trânsito moderno. Algoritmos genéticos e estratégias evolutivas similares apresentam excelentes resultados na otimização do tráfego urbano [8].

A otimização do controle em interseções já foi objeto de estudo de diversas pesquisas, que verificaram o efeito de diferentes técnicas e configurações de AG [4]. Encontramos também várias funções de aptidão para o problema na literatura, e muitas delas aparecem como uma combinação de outras funções, exigindo maior custo computacional e aumentando a quantidade de parâmetros a serem calibrados. Sugerimos um critério de objetivo único e estimação simples. As próximas seções apresentam critérios que usamos para avaliar a eficiência do critério desenvolvido.

2.3.1 Atraso Médio. O atraso médio dos veículos na rede é o critério mais utilizado para otimizar planos de semáforos [4] por ser uma forma simples e eficiente de representar a fluidez da malha e, por isso, foi também denominado de clássico ao longo deste trabalho. O atraso médio é a soma dos atrasos sofridos por cada veículo na malha durante um certo período dividido pela quantidade de veículos que passaram pela malha no mesmo período. Utilizamos o critério clássico como medida da fluidez de uma malha: quanto menor o atraso médio, maior a fluidez.

2.3.2 Desbalanceamento dos Atrasos de Rota. Entretanto, a abordagem clássica tende a aumentar o tempo de atraso em rotas curtas e reduzir o atraso nas mais longas, pois não considera que veículos percorrendo rotas mais longas, naturalmente, sofrem mais atrasos. Esse efeito é conhecido como desbalanceamentos dos atrasos de rota.

O atraso de rota padronizado (ARP) proposto por Kesur [5] é a razão entre o atraso médio sofrido em uma dada rota e seu comprimento. Assim como Kesur, usamos o maior ARP de uma malha (MARP) como medida de seu desbalanceamento.

É esperado que minimizar o desbalanceamento possa causar uma piora significativa na fluidez da malha. Por este motivo, esta estratégia deve ser combinada e calibrada com funções multi-objetivas para atingir um equilíbrio satisfatório dos objetivos de otimização. O MARP será utilizado isoladamente para os fins do trabalho.

3 DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

Entendemos que é importante levar em conta o volume de veículos em uma rota, quando otimizando a fluidez na malha; mas que também não é desejável que essa otimização imponha longos atrasos às rotas curtas. Apresentamos, nesta seção, a métrica que criamos para capturar essas características desejáveis, e detalhamos a forma de representação do problema de otimização a partir do uso de um algoritmo genético.

3.1 Atraso Padronizado Médio (APM)

Embora o ARP permita comparar a experiência entre rotas de diferentes tamanhos e velocidades, esse não captura diferenças de demanda entre as rotas. Neste trabalho, é utilizado o atraso padronizado médio como critério de otimização. É esperado que a minimização do APM gere planos mais balanceados que a abordagem clássica, sem degradar sua fluidez tanto quanto a estratégia de minimizar o desbalanceamento das rotas.

O APM é a média ponderada do ARP de todas as rotas de uma malha em função da quantidade de veículos que passou por cada rota. O APM também pode ser calculado com o seguinte algoritmo:

- (1) Para cada veículo que passou pela malha:
 - (a) Divida seu atraso total (em segundos) pela distância percorrida (em metros), a razão obtida é o atraso de veículo padronizado (segundos por metro).
- (2) Calcule a média entre todos os atrasos de veículo padronizado (segundos por metro por veículo).

3.2 Cromossomo

Fixamos uma sequência de 4 estágios, que será utilizada por todas as interseções (Figura 4), e codificamos nos cromossomos o tempo de cada estágio e o *offset* de cada plano de interseção.

Um plano de interseção é representado em um cromossomo pela sequência de 5 valores reais: o tempo de verde de cada um de seus quatro estágios e o *offset*. O valor do *offset* representa o quanto atrasaremos o início do estágio 1 naquela interseção em relação ao início da simulação. Quando negativo, esse valor representa um adiantamento do estágio. O cromossomo contém um plano para cada cruzamento da malha, como ilustrado na Figura 1 para uma malha com 4 interseções.

3.3 Cruzamento

Cada geração (com exceção da primeira, que é gerada aleatoriamente) é composta pelos 50% melhores indivíduos da geração anterior, estratégia conhecida como elitismo, e a outra metade é gerada a partir do operador de recombinação BLX- α , ou *blend crossover*. O operador BLX- α (Figura 2) aplicado a dois valores reais x_i e y_i ,

sendo $x_i < y_i$, escolhe um valor aleatório no intervalo de exploração $[x_i - \alpha(y_i - x_i); y_i + \alpha(y_i - x_i)]$. Com um α fixo em 0,5, aplicamos essa operação duas vezes em cada variável dos cromossomos, entre os indivíduos de cada par, gerando dois novos indivíduos. Durante o processo de recombinação, descartamos indivíduos cujos valores representados não estejam no intervalo válido definido para cada variável. Os valores desses intervalos são descritos na Seção 4.2. A seguir, descrevemos como selecionamos os pares de indivíduos.

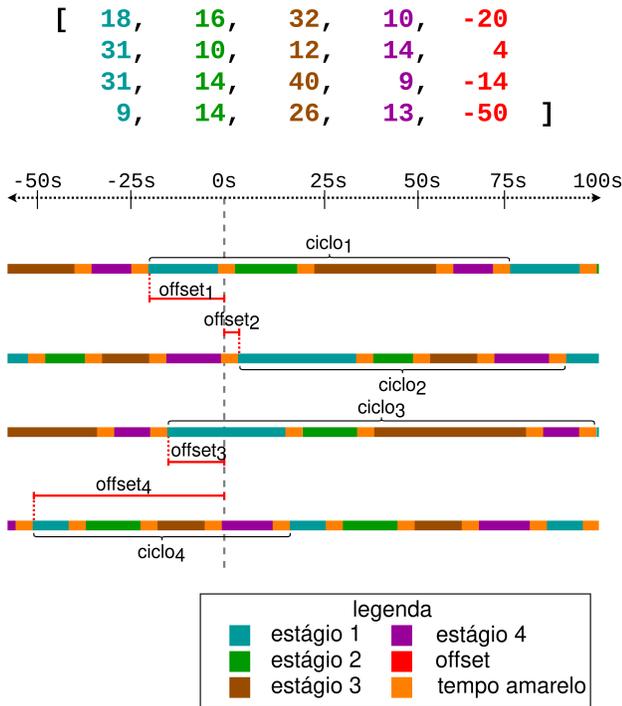


Figura 1: Cromossomo de uma malha com 4 interseções (acima) e a configuração que esse cromossomo representa para cada interseção (abaixo). O instante 0 representa o início da simulação.

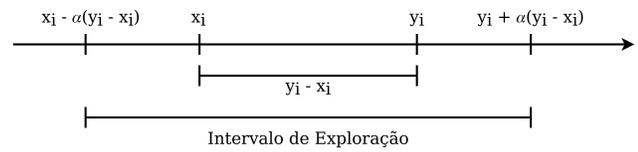


Figura 2: Ilustração do processo de recombinação BLX- α .

3.4 Seleção

Utilizamos torneios de tamanho 3 como estratégia de seleção do algoritmo genético: sorteamos aleatoriamente 3 indivíduos da última geração (tamanho do torneio) e escolhemos o indivíduo com a melhor pontuação conforme critério de aptidão. Garantimos que os indivíduos escolhidos para um par nessa estratégia sejam diferentes, dificultando a existência de indivíduos com o mesmo material genético.

3.5 Mutação

Escolhemos a técnica de mutação real, a partir da qual o gene que sofre a mutação é substituído por um valor aleatório no intervalo válido para sua variável correspondente. Cada gene do indivíduo tem 1% de chance de sofrer uma mutação após sua criação, no processo de cruzamento.

4 METODOLOGIA

Com esse trabalho, pretendemos explorar os resultados do APM como critério de otimização de planos de malhas. Estamos especialmente interessados em verificar se essa estratégia resulta em planos mais fluidos e balanceados, em comparação à minimizando o desbalanceamento ou maximizando a fluidez, respectivamente. Avaliamos essas características com as métricas atraso médio e MARP. Para gerar dados comparativos, treinamos um algoritmo genético cujos indivíduos são avaliados em uma malha arterial em um microssimulador de tráfego. Descrevemos detalhes da simulação e do experimentos nas seções a seguir.

4.1 Simulação

Apesar de simuladores mesoscópicos e macroscópicos serem mais utilizados por sua eficiência computacional, microssimulações de trânsito representam o comportamento das malhas com maior fidelidade [7]. Por esse motivo, decidimos usar o microssimulador de trânsito SUMO [6] para avaliar os planos do algoritmo.

Introduzimos no simulador uma malha arterial de *New Orleans* [1] (Figura 3) com uma carga observada em *Iowa* [10], combinação feita anteriormente por Kesur [3]. A velocidade das vias foi a padrão do simulador: 50 km/h nas partes livres de semáforos e nas interseções valores menores proporcionais ao ângulo do movimento.

Assumimos quatro faixas para cada via. A conversão à esquerda só pode ser executada por veículos na faixa mais à esquerda da via. O movimento à direita só pode ser executado na faixa mais à direita da via. Os veículos que desejam seguir em frente devem usar as faixas do meio. Assumindo essas restrições, definimos quatro estágios para as interseções (Figura 4):

- No **primeiro estágio**, os veículos das direções norte e sul podem seguir em frente no cruzamento ou fazer conversão à esquerda, se a via estiver livre para tal;
- O **estágio 2** permite que os veículos das direções norte e sul possam realizar o movimento à esquerda sem disputarem pela via;
- Os **estágios 3 e 4** são simétricos aos 1 e 2, trocando norte e sul por leste e oeste.

Todos os estágios permitem o movimento à direita no cruzamento para veículos de qualquer direção. Os estágios 2 e 3 são importantes para garantir que tais movimentos aconteçam mesmo em situações de super-saturação.

4.2 Experimento

Fixando em 4 segundos o tempo de amarelo entre estágios, limitamos nossa busca para planos com estágios de duração entre 6 e 60 segundos, e o *offset* foi limitado para o intervalo de -256 a 256 segundos, o que é suficiente para representar qualquer deslocamento no tempo em qualquer plano de interseção do nosso espaço de

busca. Cada execução do algoritmo genético evolui por 50 gerações com populações de 100 indivíduos. Executamos o treinamento 120 vezes, 40 delas utilizando cada critério como função de aptidão: fluidez, desbalanceamento da malha, e APM.

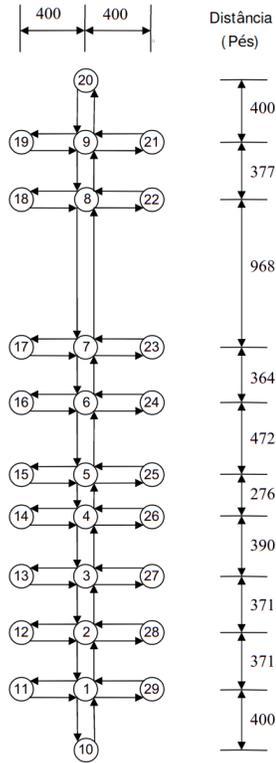


Figura 3: Representação simplificada da malha arterial de New Orleans [3].

Observando as Figuras 5 e 6, confirmamos que nosso critério, em média, gera planos mais balanceados do que a abordagem clássica e, ao mesmo tempo, mais fluidos do que a estratégia de minimizar o desbalanceamento. Nas últimas gerações, a nossa abordagem apresentou, em média, planos com o balanceamento similar aos obtidos minimizando o MARP.

Considerando a experiência de todos os veículos nos planos resultantes de cada treinamento (Figura 7), vemos que a curva dos atrasos obtidos com nosso critério aparenta dominar a curva dos atrasos da busca pelo desbalanceamento mínimo, o que representa superioridade na redução do atraso em todos os percentis. O mesmo pode ser dito sobre a abordagem clássica em relação às demais, embora sua dominância sobre a nossa só fique evidente em torno dos 10% finais da distribuição. Em relação ao atraso padronizado, as comparações não são tão binárias: maximizar a fluidez foi a estratégia com menor atraso padronizado até sua mediana, já nos percentis acima, os veículos enfrentam um atraso padronizado cada vez pior, sendo a pior estratégia no centésimo percentil; otimizar o desbalanceamento foi a estratégia mais injusta com a maioria dos veículos, exceto nos últimos percentis, onde os veículos sofrem um

atraso padronizado intermediário entre as outras abordagens; Por fim, a nossa abordagem apresentou um atraso padronizado bem similar à estratégia clássica, perdendo para esta em alguns percentis intermediários, e ganhando em torno dos 10% finais.

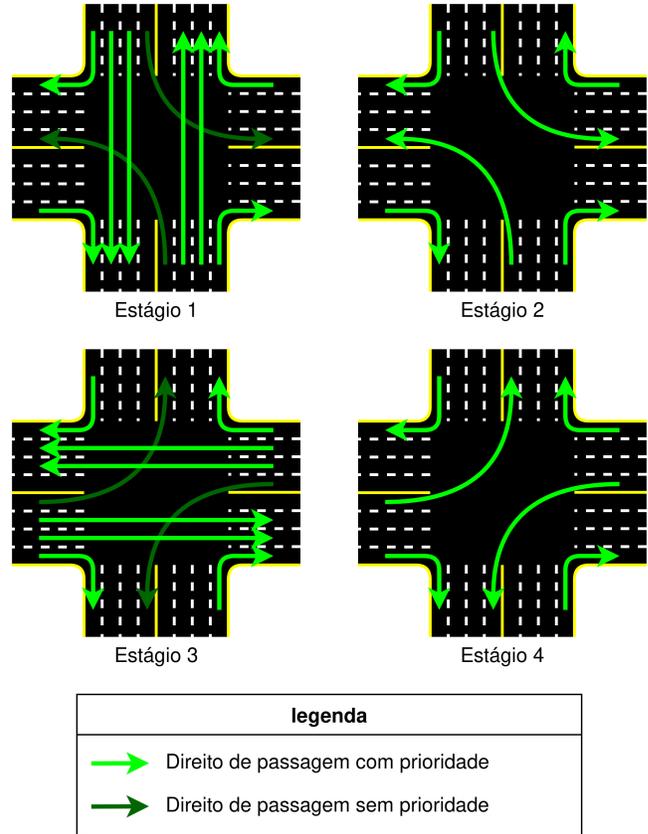


Figura 4: Estágios utilizados para as interseções.

5 RESULTADOS

Como evidenciado na Figura 8, mesmo os planos da minimização do MARP com melhor fluidez não parecem próximos dos planos com pior fluidez otimizados com nosso critério, que foram em média 41% mais fluidos, além de 31% mais balanceados do que a abordagem clássica (Tabela 1). Ainda, o APM gerou vários dos planos mais balanceados, o que indica o critério como um possível rival ao MARP na geração de rotas balanceadas.

Tabela 1: Comparação dos resultados médios utilizando como *baseline* o atraso médio da minimização do desbalanceamento e o MARP da maximização da fluidez.

Função objetivo	Atraso médio	MARP
Fluidez	20,721 (-46%)	0,115 (<i>baseline</i>)
Desbalanceamento	38,182 (<i>baseline</i>)	0,081 (-30%)
APM	22,740 (-41%)	0,079 (-31%)

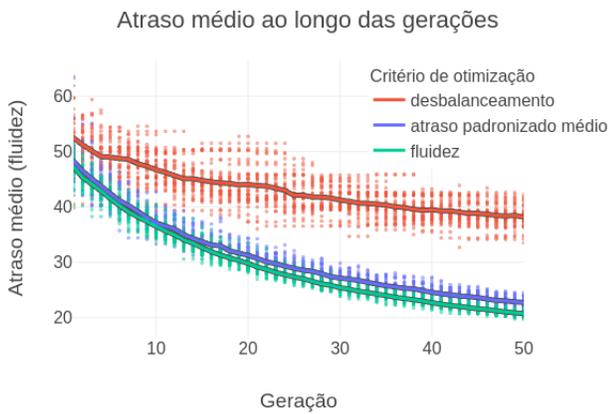


Figura 5: Evolução do atraso médio ao longo das gerações nas diferentes funções objetivo.

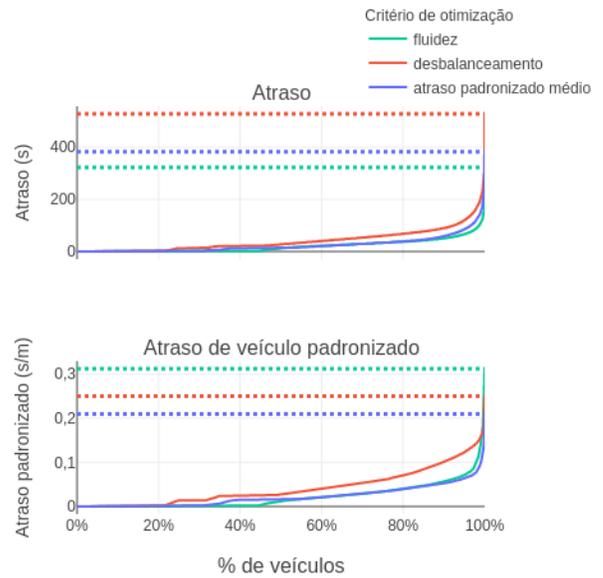


Figura 7: Distribuição dos atrasos de veículo padronizado e dos atrasos na execução dos melhores indivíduos de cada treinamento.

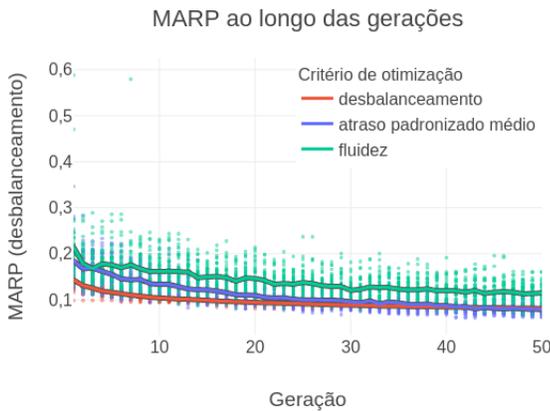


Figura 6: Evolução do pior atraso de rota padronizado ao longo das gerações nas diferentes funções objetivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

A principal contribuição desse trabalho, para a área de otimização de controle semafórico, foi introduzir o Atraso Padronizado Médio na otimização da fluidez e desbalanceamento das malhas rodoviárias.

Embora a intenção de planos mais balanceados seja prover uma experiência mais homogênea para os veículos da malha, esse objetivo pode agravar problemas de saturação nas rodovias. Esperamos que trabalhos futuros demonstrem que minimizar o APM é uma estratégia viável para malhas de diferentes topologias em qualquer nível de saturação.

Enquanto modelos multi-objetivos permitem um maior controle do *tradeoff* entre atraso médio e MARP, essa estratégia pode não se beneficiar ao incluir o APM como critério, pois este inclui características de ambas as métricas, o que deve atrapalhar esse controle.

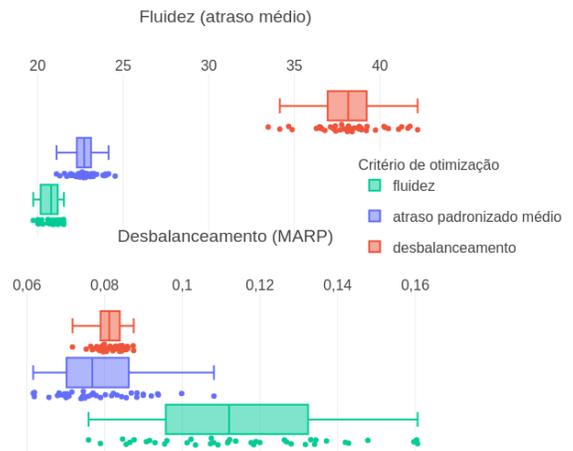


Figura 8: Distribuição do desbalanceamento e do atraso médio dos melhores indivíduos de cada treinamento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande, especialmente à Unidade Acadêmica de Sistemas e Computação e seus docentes, responsáveis pela minha afinidade com tantas áreas da computação. Agradeço aos laboratórios que participei durante a graduação, pelas experiências que tive na fronteira do conhecimento, principalmente ao Laboratório de Sistemas Distribuídos, onde, inclusive, executei a maior parte dos experimentos.

Agradeço também à minha orientadora, Joseana Fachine, por não desistir de me orientar após tantas mudanças de tema, mesmo com o prazo apertado. Deve-se à ela a presença de qualquer relevância estatística neste trabalho.

Não posso deixar de agradecer ao professor Thiago Medeiros, que, desde o ensino técnico, tenta me afastar da programação de baixo nível, e ao professor Thiago Emmanuel, que me arrastou para a programação de baixo nível. Ambos, de forma independente, mantiveram minha paixão pela computação através dos desafios que me impuseram.

Sou grato aos meus colegas pelas conversas e companhia enquanto supríamos a crescente necessidade de café ao longo do curso. Agradeço a Júlio Barreto e a José Ignácio, que introduziram quase todas as vírgulas desse trabalho em suas revisões.

Dedico este trabalho à minha mãe, Meiriane, que sempre incentivou meus sonhos e investiu na minha educação, às minhas irmãs, Ana Luiza e Ana Beatriz, pelas quais quero sempre ser um bom exemplo, e à minha namorada, Maria Eduarda, por quem tento sempre me superar e há cinco anos tolera minha memória excessivamente seletiva. Devo a elas minha saúde mental durante a pandemia, ainda mais durante a escrita deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Nathan H Gartner, Susan F Assmann, Fernando Lasaga, and Dennis L Hous. 1990. MULTIBAND—a variable-bandwidth arterial progression scheme. *Transportation Research Record* 1287 (01 1990), 212–222.
- [2] PB Hunt, DI Robertson, RD Bretherton, and RI Winton. 1981. *SCOOT—a traffic responsive method of coordinating signals*. Technical Report. Transport and Road Research Laboratory (TRRL).
- [3] Khewal Bhupendra Kesur. 2007. *Advances in genetic algorithm optimization of traffic*. Ph.D. Dissertation. University of the Witwatersrand.
- [4] Khewal Bhupendra Kesur. 2009. Advances in genetic algorithm optimization of traffic signals. *Journal of Transportation Engineering* 135, 4 (2009), 160–173.
- [5] Khewal Bhupendra Kesur. 2010. Generating more equitable traffic signal timing plans. *Transportation research record* 2192, 1 (2010), 108–115.
- [6] Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wießner. 2018. Microscopic Traffic Simulation using SUMO, In The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2575–2582. <https://elib.dlr.de/124092/>
- [7] Bruno Sarno Mugnola. 2012. *GENPOLIS: Prototipagem e aplicação de um simulador de trânsito voltado para otimização de sinalização semaforica por meio de algoritmos genéticos*. Ph.D. Dissertation. Universidade de São Paulo.
- [8] Kok Mun Ng, Mamun Bin Ibne Reaz, Mohd Alauddin Mohd Ali, and Tae Guy Chang. 2013. A brief survey on advances of control and intelligent systems methods for traffic-responsive control of urban networks. *Tehnički vjesnik* 20, 3 (2013), 555–562.
- [9] Arthur G Sims and Kenneth W Dobinson. 1980. The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *IEEE Transactions on vehicular technology* 29, 2 (1980), 130–137.
- [10] Xiao Kuan Yang. 2001. Comparison among computer packages in providing timing plans for Iowa arterial in Lawrence, Kansas. *Journal of Transportation Engineering* 127, 4 (2001), 311–318.