

Aplicação de Sistema Multiagente no controle de semáforos do sistema BRT Belém

Italo Campos¹ Alan Veloso¹

¹Instituto de Ciências Exatas e Naturais – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Caixa Postal 479 – 66.075-110 – Belém – PA – Brazil

{italo.campos, alan.veloso}@icen.ufpa.br

Abstract. *This paper presents an application of Multi-agent System (MAS) in the traffic lights control of the transport public system by BRT of the city of Belém, in the State of Pará. This article describes the modeling and the operation of the SMA, detailing the main aspects related to the MAS architecture. This work also uses computational simulation to achieve the results and compare them in two categories: a group that uses the MAS management and another that don't uses that. The results are tabbed and discussed at the end of this paper.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma aplicação de Sistema Multiagente (SMA) no controle de semáforos do sistema de transporte público por BRT da cidade de Belém do Pará. O artigo descreve a modelagem e o funcionamento do SMA, detalhando e formalizando os principais aspectos relativos à arquitetura do SMA. O trabalho ainda utiliza simulação computacional para gerar os resultados, além de compará-los em duas categorias: uma com o gerenciamento dos semáforos feito pelo SMA e outra sem. Os resultados são tabulados e discutidos ao final deste artigo.*

1. Introdução

Como é possível ver no sítio¹ destinado a divulgar informações sobre o Ônibus de Trânsito Rápido (*Bus Rapid Transit* - BRT) [ITDP 2021] da cidade de Belém do Pará (simplesmente BRT Belém), a prefeitura da cidade necessitou de mais de um década para implantar o modelo, uma obra que tinha previsão de entrega em 18 meses, segundo o próprio sítio. O objetivo desse projeto era proporcionar um meio de transporte público mais veloz para a população da cidade [BRT Belém 2021]. Entretanto, melhorias que não necessitam alterar a infraestrutura física das redes rodoviárias podem contribuir com esse objetivo, e uma delas é referente ao controle de tráfego [Passos and Rossetti 2010].

A funcionalidade de controle inteligente de tráfego era prevista pelo projeto original [EGL Engenharia 2015], mas, apesar do tempo para concluir as obras, atualmente o BRT Belém não apresenta essa funcionalidade. O sistema de controle de tráfego proposto pelo plano original, seguindo as diretrizes do manual do BRT [Wright and Hook 2008], previa a sinalização semafórica que detectasse a chegada de um veículo BRT e ajustasse o semáforo, de modo que os ônibus não parassem ou passassem o menor tempo possível parados nos semáforos.

¹<http://brt.belem.pa.gov.br/>

O controle de tráfego é um sistema cuja a sua característica mais evidente é ser distribuído, e esse fato abre espaço para se fazer uso da tecnologia de Sistema Multiagente (SMA) neste cenário. Entretanto, o uso de SMA para solucionar esse problema não é inovadora e existe um espectro de alternativas que vão desde o uso de aprendizagem não supervisionada – que é adaptativa [Wiering 2000] – ao uso de controle por meio de regras, como o presente estudo, que é uma abordagem vantajosa em termos de simplicidade de implementação [Passos and Rossetti 2010].

Diante disso, o presente estudo tem por objetivo investigar se o uso de SMA no controle semafórico pode se colocar como uma ferramenta tecnológica para diminuir o tempo de viagem dos ônibus do sistema BRT Belém. Para isso, este estudo se utilizou de simulações desenvolvidas principalmente com o uso do PADE [Melo et al. 2019], um *framework* escrito em Python² para o desenvolvimento, execução e gerenciamento de SMA. Este trabalho também utiliza parâmetros e dados baseados na ferramenta de geolocalização do Google Maps³.

O artigo está estruturado da seguinte maneira: a presente seção apresentou um breve contexto, o objetivo e a justificativa da proposta do trabalho; a Seção 2 descreve o problema abordado e fornece detalhes da metodologia utilizada para mapear e gerar os dados; posteriormente, a Seção 3 define as estratégias utilizadas para modelar o ambiente e o SMA proposto, bem como suas propriedades; por sua vez, a Seção 4 mostra e discute os resultados obtidos; por fim, a Seção 5 finaliza e conclui o trabalho.

2. Delimitação do problema e metodologia

O problema abordado neste artigo, de modo geral, consiste em prover algum meio de gerenciamento dos semáforos da pista do BRT, de forma que os ônibus desse sistema parem nos semáforos pelo menor tempo possível, reduzindo assim os seus tempos de viagem.

Lidar com problemas de gerenciamento de tráfego, semelhantes a este, culmina considerar um ambiente amplo, diverso, dinâmico e imprevisível [Zhuoxi et al. 2013]. Por essa razão, é necessário definir claramente as variáveis e dinâmicas do ambiente que serão, ou não, consideradas para esta abordagem.

Por vias de simplificação, o escopo deste trabalho é delimitado pelos itens a seguir.

- *Semáforos*: somente os semáforos que influenciam diretamente o fluxo de ônibus na pista expressa do BRT são levados em conta, isto é, os semáforos que regulam diretamente o fluxo desses ônibus;
- *Lotação dos ônibus*: não são consideradas a capacidade e a lotação do ônibus;
- *Plataformas de embarque*: não é levada em conta a quantidade de plataformas de embarque/desembarque das estações;
- *Paradas*: os ônibus, necessariamente, param em todas as estações;
- *Viagens*: a velocidade dos ônibus durante a viagem é constante, definidas diretamente pela velocidade média de cada um.
- *Ultrapassagem*: Os ônibus podem ultrapassar uns aos outros em qualquer ponto da pista;

²<https://www.python.org/>

³<http://google.com.br/maps/>

Do ponto de vista da metodologia utilizada neste trabalho, depois de definido o escopo do problema em questão, foi necessário escolher um método de colhimento dos dados. Devido ao cenário adverso de saúde pública atual e à escassez de documentação a respeito do projeto original do BRT Belém, foram utilizadas as seguintes fontes para os dados utilizados nesse trabalho: a) as localizações das estações foram obtidas por visualização virtual, utilizando a ferramenta Google Maps; b) as localizações dos semáforos foram aferidas por aproximação, com base na experiência de viagens realizadas utilizando o sistema BRT Belém; c) o modelo de dados usado na geração de valores de fluxo de passageiros foi baseado nos gráficos de fluxo de pessoas nas principais estações do sistema BRT, conforme disponível na ferramenta Google Maps.

Passando à etapa de modelagem, foi elaborado um plano de gerenciamento dos semáforos, o qual produziu modelos do ambiente, dos agentes e das interações que ocorrem entre os diferentes atores do cenário em questão. Os resultados dessa etapa serão devidamente apresentados na Seção 3.

Com os modelos em mãos, foi possível implementar o SMA. Para a etapa de implementação, este trabalho utilizou a linguagem Python e as seguintes ferramentas:

- *PADE* [Melo et al. 2019]: um framework para implementação de SMA. Foi utilizada para implementar os agentes e o ambiente do problema.
- *Scipy* [Virtanen et al. 2020]: uma biblioteca muito utilizada pela comunidade científica para a geração, análise, visualização de dados, entre outros. Neste trabalho, ela foi utilizada para simular a dinâmica do fluxo de passageiros entre as estações e ônibus.

Após a modelagem do SMA e seu respectivo ambiente, foram selecionados quatro cenários, sobre os quais foram realizadas as simulações computacionais e os resultados foram colhidos.

3. Modelagem do Sistema Multiagente

Para lidar com o problema em questão utilizando a metodologia selecionada, foi necessário modelar de forma computacional o ambiente do problema e os agentes componentes do SMA.

3.1. Ambiente

Ao se descrever o ambiente do problema, depara-se fundamentalmente com a descrição da pista, local onde os ônibus transitam e abriga as estações e os semáforos. Para modelá-la, foi utilizado um vetor correspondente ao seu tamanho, mapeando cada 100 metros da pista com uma posição do vetor. No cenário abordado, a pista possui um tamanho total de 20.5 km, o que significa que o vetor correspondente na modelagem computacional possui 205 posições.

Cada posição do vetor pode abrigar uma estação, um semáforo, um sensor, ou ainda uma combinação entre esses elementos. Isso significa que esses elementos podem compartilhar uma mesma localização na pista, correspondendo àquele trecho de 100 m.

Com relação aos dados de fluxo de passageiros, foi definido que cada estação gera um fluxo de pessoas de acordo com a movimentação em suas dependências. Isso

porque cada estação pode ser considerada mais ou menos movimentada de acordo com a localidade onde está situada. Por exemplo, uma estação num bairro comercial costuma ter um fluxo de passageiros maior que estações em bairros residenciais.

Pensando nisso, foram estabelecidos três grupos para as estações no BRT, de acordo com seus respectivos fluxos de passageiros, identificados por um inteiro, variando de 0 a 2, conforme mostra a Tabela 1.

ID	Fluxo de passageiros
0	Alto
1	Médio
2	Baixo

Tabela 1. Grupos de estações conforme fluxo de passageiros.

Além desses, também foram definidos três grupos para os semáforos, já que eles também compartilham o mesmo princípio de serem mais ou menos movimentados, de acordo com a sua localização. Para os semáforos, isso implica que eles podem passar mais ou menos tempo abertos para os ônibus do BRT dependendo do seu grupo. Na Tabela 2 estão descritos esses parâmetros adotados de acordo com cada grupo de semáforos. As colunas TMA e TMF descrevem, respectivamente, o tempo máximo de abertura e o tempo mínimo de fechamento dos semáforos.

ID	Tráfego	TMA (s)	TMF (s)
0	Alto	30	90
1	Médio	50	50
2	Baixo	90	90

Tabela 2. Grupos de semáforos de acordo com fluxo de trânsito nas proximidades.

O fluxo de passageiros nas estações se torna importante para esta abordagem porque é ele que vai determinar a quantidade de passageiros que transita entre as estações e os ônibus, toda vez que estes param nas estações. Para determinar esse número, este trabalho utiliza uma implementação de Funções de Distribuição de Probabilidade (FDP) [Wackerly et al. 2014] na biblioteca Scipy.

Para definir que tipos de FDP utilizar, foi realizada uma análise visual nos gráficos disponibilizados pelo Google Maps para a movimentação de pessoas nas estações com maior fluxo de passageiros do sistema BRT. A Figura 1 mostra um desses gráficos para o dia de sexta-feira na estação do bairro de São Brás. O eixo x representa o horário.

Observando o gráfico da Figura 1, nota-se que nos horários de pico (início da manhã e fim da tarde), há uma concentração maior de pessoas na forma de uma Distribuição Normal (ou Gaussiana). Já nos horários próximos do meio-dia, há uma pequena estabilização no fluxo de pessoas. Essas observações levaram este trabalho a se utilizar de dois tipos de cenários diferentes: a) um cenário com base no horário de fluxo mais baixo, considerado normal; b) um segundo cenário baseado no horário de pico.

Para cada um desses cenários foi utilizada uma FDP diferente, de acordo com a



Figura 1. Gráfico do fluxo de pessoas na estação do BRT em São Brás.Fonte: Google Maps 2021

análise visual do gráfico. Além disso, utilizou-se dois valores numéricos relacionados ao fluxo de pessoas nas estações em cada um desses cenários: um *valor-base* e uma *variação*.

O *valor-base* representa o número base de passageiros que transita entre uma determinada estação e um ônibus que parou nela. Já o valor de *variação* descreve o quanto esse valor-base pode variar. Isso foi adotado para mimetizar a natural variação que ocorre no fluxo de passageiros nas diferentes estações do BRT.

Ambos os valores de *valor-base* e *variação* são utilizados como parâmetros para uma função de geração de números aleatórios inteiros, de acordo com a FDP adotada no cenário, para, assim, se determinar um número para o fluxo de passageiros entre as estações e os ônibus. Esses parâmetros foram tomados arbitrariamente, já que os gráficos analisados por este trabalho (como o da Figura 1) não proveem valores numéricos para o eixo *y*. Um resumo dos parâmetros utilizados nos cenários descritos pode ser encontrado na Tabela 3.

Tipo de cenário	Fluxo de passageiros	FDP utilizada	Valor-base	Variação
Normal	Normal	Uniforme	9	3
Pico	Alto	Normal	27	3

Tabela 3. Parâmetros dos cenários adotados no trabalho.

Observando a Tabela 3, podemos saber que, por exemplo, num cenário normal, a função geradora de inteiros aleatórios gerará um valor próximo de 9, variando, no máximo, em 3 unidades, com base numa FDP do tipo Uniforme. Esse número representará o número de passageiros que farão embarque ou desembarque num determinado ônibus. Essa dinâmica ocorre cada vez que um ônibus se aproxima de uma determinada estação, significando que esse valor tem chances consideráveis de ser diferente para cada ônibus que pare naquela estação ao longo do tempo.

3.2. Agentes

Por sua vez, para o SMA utilizado neste trabalho, foram concebidos três tipos de agentes para lidar com as tarefas de gerenciamento de semáforos: os agentes *Bus*, *Station* e *Traffic Light*. Diretamente relacionadas com o gerenciamento dos semáforos, as principais atribuições dos agentes *Bus* e *Traffic Light* são descritas a seguir.

a. Agente *Bus*:

- Transitar pela pista, parando nas estações e semáforos, quando necessário;
- Comunicar às estações sobre sua aproximação;

- Solicitar passagem aos semáforos;
 - Computar o tempo de viagem e de paradas nos semáforos.
- b. *Agente Traffic Light*:
- Receber solicitações de passagem dos ônibus;
 - Controlar os painéis luminosos dos semáforos;
 - Verificar a viabilidade dos pedidos de passagem dos ônibus;
 - Manter o controle sobre os tempos mínimos e máximos de abertura e fechamento dos semáforos.

Por sua vez, relacionadas ao tempo de viagem e ao tipo de cenário aos quais os ônibus são submetidos, as principais atribuições dos agentes *Station* são detalhadas a seguir.

- c. *Agente Station*:
- Receber aviso de aproximação dos ônibus;
 - Calcular o fluxo de passageiros e tempo de espera para cada ônibus;
 - Verificar se o ônibus se aproximando é compatível com o sentido de serviço da estação.

No modelo utilizado, procurando refletir a realidade, cada estação possui um sentido de serviço, que nada mais é do que o sentido da pista que aquela estação pode atender. Por exemplo, em certos trechos do sistema BRT Belém, há estações que só atendem os ônibus no sentido de ida para o centro, ao passo que também existem estações que só atendem ônibus no sentido oposto. Assim, cada estação só pode atender ônibus que estão no mesmo sentido que seu sentido de serviço.

3.2.1. Sensores e atuadores

Para realizar suas atividades, cada agente possui sensores e atuadores que estão listados a seguir, conforme os tipos de agente do SMA proposto nesta modelagem.

Para os agentes *Bus*:

- Sensores:
 - Sensor de proximidade (para estações e semáforos);
 - Leitor de cores dos semáforos;
- Atuadores:
 - Console de movimento (acelerar, parar, virar, etc...);

Para os agentes *Traffic Light*:

- Sensores:
 - Cronômetro;
- Atuadores:
 - Controle do *board* de cores;
 - Emissor de ondas de rede *ad-hoc*;

Finalmente, para os agentes *Station*:

- Sensores:
 - Não utiliza;
- Atuadores:
 - Controle das operações de embarque e desembarque dos passageiros (abrir portas, fechar portas, etc.);
 - Emissor de ondas de rede *ad-hoc*;

3.2.2. Comunicação e ontologia

A comunicação entre os agentes ocorre de maneira livre, por assim dizer, sem restringir qualquer comunicação entre quaisquer tipos de agentes. Apesar disso, não ocorre uma comunicação direta entre os agentes *Station* e *Traffic Light*, uma vez que, para este nível da abordagem, essa comunicação não é necessária.

No modelo apresentado, os ônibus saem do ponto inicial sem o conhecimento das localizações dos semáforos e estações, se utilizando dos sensores de aproximação para descobri-las durante o curso da viagem. Essa habilidade é muito útil para tornar o sistema adaptável a múltiplas rotas dos ônibus sem precisar remodelar os dados nos agentes.

Esta modelagem também desenvolveu uma ontologia com cinco elementos para formalizar a comunicação entre os agentes em certos cenários. Ressalta-se que esses elementos aplicam-se apenas à comunicação entre os agentes *Bus* e os demais agentes.

- **0 - HOW MANY TIME** [*Bus* → *Station*]: solicitação de cálculo de prévia do tempo que um ônibus vai ficar parado numa estação;
- **1 - WAIT FOR X SECONDS** [*Station* → *Bus*]: previsão do tempo de espera na próxima estação, em segundos.;
- **2 - INCOMPATIBLE SIDE** [*Station* → *Bus*]: negação de solicitação por incompatibilidade de sentido de serviço;
- **3 - OPEN** [*Bus* → *Traffic Light*]: solicitação de abertura de semáforo;
- **4 - CONFIRMATION** [*Bus* → *Traffic Light*]: confirmação de que o semáforo foi cruzado;

3.2.3. Encadeamento das ações

A dinâmica do funcionamento do SMA pode ser dividida em dois momentos principais, em função da aproximação dos ônibus: a) das estações; b) dos semáforos.

Para a aproximação entre *Bus* e *Station*, na Figura 2a temos um diagrama de sequência UML especificando a comunicação entre os agentes envolvidos. Por sua vez, na Figura 2b, encontramos um segundo diagrama de sequência UML descrevendo a aproximação dos agentes *Bus* e *Traffic Light*.

No caso ilustrado na Figura 2a, a estação responde com WAIT FOR X SECONDS, isso porque o ônibus está no mesmo sentido de serviço da estação. Se isso não for verdade, a estação responde com INCOMPATIBLE SIDE e o ônibus não para.

Em relação ao cálculo do tempo de espera, por parte das estações, como dito na Subseção 3.1, é usada uma função geradora de aleatórios inteiros com base nos parâmetros da Tabela 3. O inteiro gerado por essa função é utilizado numa relação matemática para, finalmente, determinar o tempo de espera de um ônibus. Isso é feito para que a movimentação de passageiros nas estações influencie no tempo de espera que os ônibus passam nelas, simulando um comportamento natural do problema.

Seja x o inteiro aleatório gerado e g_e o ID do grupo da estação e (Tabela 3), o tempo de espera t é determinado pela Equação 1.

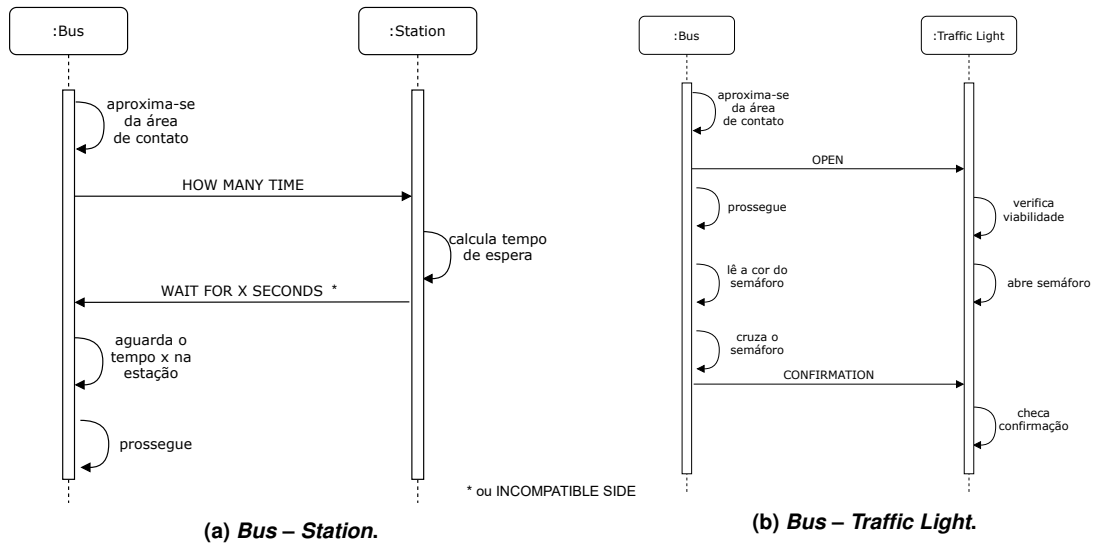


Figura 2. Encadeamento de ações dos agentes.

$$t = \left\lceil \alpha x \left(\frac{1}{1 + g_e} \right) \right\rceil \quad (1)$$

α é um parâmetro que descreve o tempo médio (em segundos) que uma única pessoa leva para embarcar num ônibus, desconsiderando o tempo de acoplagem na estação. Neste trabalho, utilizou-se $\alpha = 3$.

3.2.4. Tomada de decisão

Analisando os gráficos da Figura 2, é notável que há um só ponto relevante de tomada de decisão no SMA, o qual ocorre no agente *Traffic Light*.

Para este agente determinar a cor do semáforo, ele precisa analisar como está configurado o ambiente naquele momento e, em seguida, tomar a decisão de trocar o estado do semáforo ou aguardar. A forma como essa tomada de decisão ocorre é descrita no diagrama de máquina de estados da Figura 3.

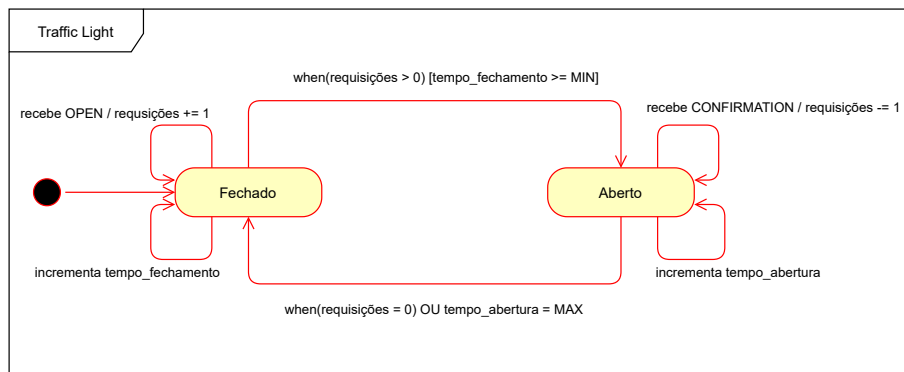


Figura 3. Tomada de decisão em relação à abertura e fechamento de semáforos pelo agente *Traffic Light*.

Para esclarecimento, as variáveis relacionadas no diagrama da Figura 3 são:

- *requisições*: número de requisições de abertura não atendidas no último ciclo do semáforo – um ciclo é um conjunto de uma abertura e um fechamento do semáforo;
- *tempo_fechamento*: uma variável que conta o tempo de fechamento do semáforo no ciclo atual;
- *tempo_abertura*: uma variável que conta o tempo de abertura no ciclo atual;
- *MAX*: o tempo de abertura máximo que o semáforo pode atingir;
- *MIN*: o tempo de fechamento mínimo que o semáforo deve aguardar;

Observando esses itens juntamente com o diagrama da Figura 3, nota-se que a estratégia de coordenação dos semáforos pode ser resumida na seguinte premissa: manter os semáforos fechados e só abri-los quando for necessário. Essa estratégia visa manter os semáforos o mais disponíveis possível quando os ônibus solicitam passagem, já que os semáforos, necessariamente, precisam passar um tempo mínimo fechados devido ao fluxo nos arredores.

3.2.5. Organização

Observando a dinâmica dos agentes descrita até aqui, pode-se dizer que estes se organizam em forma de time [Horling and Lesser 2004]. Um argumento que sustenta essa afirmação é que os agentes *Bus* necessitam se comunicar de forma estratégica com os agentes *Station* e *Traffic Light* para que eles consigam concluir sua trajetória ao longo da simulação.

Todo agente desempenha um papel único e necessário para que o objetivo de todo o sistema seja atingido: garantir que os agentes *Bus* trafeguem pela pista seguindo a dinâmica do ambiente. Essas são característica da organização em time [Horling and Lesser 2004].

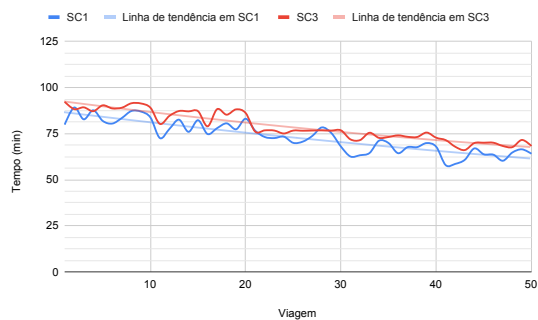
4. Resultados

Para gerar os resultados, este trabalho considerou quatro cenários de simulação, levando em conta principalmente o tipo de gerenciamento de semáforo. Para tanto, foram criados cenários onde os agentes atuam fazendo o gerenciamento inteligente dos semáforos, e outros cenários fazendo o gerenciamento tradicional dos semáforos. Os cenários de simulação, então, são:

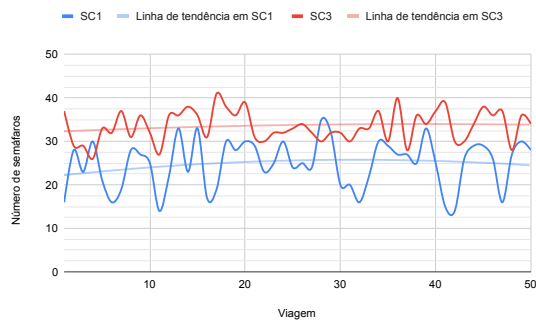
- **SC1 - Cenário 1**: horário normal com gerenciamento inteligente de semáforos;
- **SC2 - Cenário 2**: horário de pico com gerenciamento inteligente de semáforos;
- **SC3 - Cenário 3**: horário normal com gerenciamento tradicional de semáforos;
- **SC4 - Cenário 4**: horário de pico com gerenciamento tradicional de semáforos;

Em cada simulação utilizou-se 10 ônibus, cada um fazendo 5 viagens e com um intervalo de 10 minutos entre elas. Cada ônibus possui uma velocidade média diferente que varia entre 40, 45, 50, 55 e 60 km/h. Utilizando uma ordenação prévia e misturando ônibus com diferentes velocidades, cada ônibus, inicialmente, parte com 5 minutos de intervalo uns entre os outros. Isso favorece que os ônibus se encontrem muitas vezes durante as simulações, gerando uma carga considerável para os semáforos.

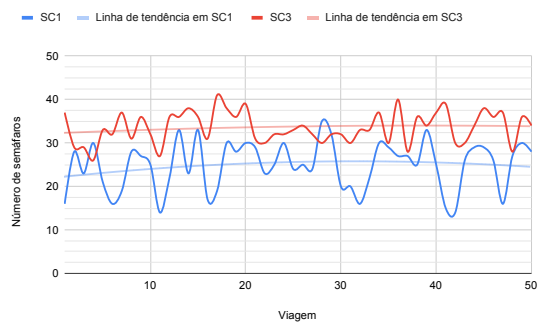
Para o cenário do problema abordado, ao fim chega-se a um ambiente com 28 estações (3 do grupo 0, 10 do grupo 1 e 15 do grupo 2), 37 semáforos (9 do grupo 0, 14 do grupo 1 e 14 do grupo 2) e 10 ônibus rodando simultaneamente nos dois sentidos da pista. Isso totaliza um número de 75 agentes.



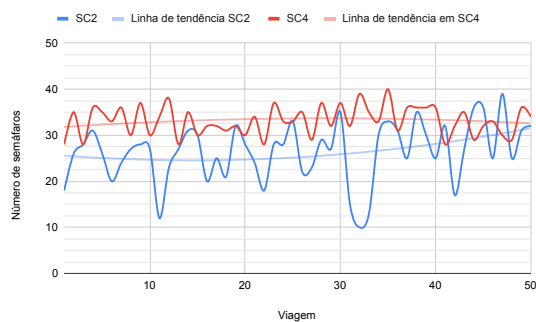
(a) Tempo de viagem em SC1 versus SC3.



(b) Tempo de viagem em SC2 versus SC4.



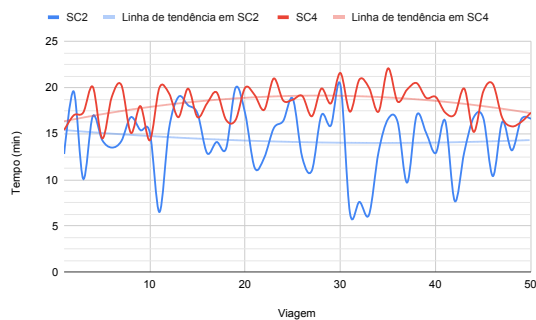
(c) Número de semáforos fechados em SC1 versus SC3.



(d) Número de semáforos fechados em SC2 versus SC4.



(e) Tempo gasto em semáforos em SC1 versus SC3.



(f) Tempo gasto em semáforos em SC2 versus SC4.

Figura 4. Gráficos dos resultados obtidos nas simulações.

As simulações foram conduzidas por meio de computação em nuvem, utilizando o serviço do Google Colab⁴.

Os resultados foram colhidos por meio de *logs* escrito pelos agentes *Bus*, os quais traziam dados tabulados de tempo total de viagem, número de semáforos nos quais parou, tempo de espera em semáforos, entre outros.

Os gráficos na Figura 4 resumizam os dados obtidos nas simulações, colocando em comparação os resultados do cenário 1 versus cenário 3 (Figuras 4a, 4c e 4e), e os

⁴<https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb>

do cenário 2 versus cenário 4 (Figuras 4b, 4d e 4f). O eixo x representa o número das viagens realizadas pelos ônibus, variando entre 1 e 50 com os seguintes intervalos:

- De 1 a 10: ônibus viajando a 40 km/h médios;
- De 11 a 20: ônibus viajando a 45 km/h médios;
- De 21 a 30: ônibus viajando a 50 km/h médios;
- De 31 a 40: ônibus viajando a 55 km/h médios;
- De 41 a 50: ônibus viajando a 60 km/h médios.

4.1. Tempo de viagem

O primeiro resultado, observado na Figura 4, mostra o tempo total de viagem no cenário normal (Figura 4a), onde o fluxo de pessoas não é intenso, e no cenário de pico (Figura 4b), onde o fluxo de pessoas que utilizam o sistema BRT é mais intenso.

No caso do tempo de viagem do cenário normal, além da inclinação natural da linha de tendência decorrente do aumento da velocidade média dos ônibus à medida que se avança no eixo x , também é possível notar uma diferença consistente de algo em torno de 5 minutos entre as linhas de tendência no cenário SC1 e no cenário SC2. Isso significa que, num cenário de normalidade, os ônibus demoraram um pouco menos quando se utilizaram do SMA para gerenciar os semáforos.

Por sua vez, quando se analisa os cenários de pico SC2 e SC4 na Figura 4f, nota-se que essa diferença entre os tempos de viagens dos ônibus aumenta consideravelmente em relação ao cenário anterior. Essa diferença se mostra mais consistente pelo fato de as linhas desse gráfico não se tocarem em nenhum momento, o que significa que todas as viagens que se utilizaram da gerência dos semáforos pelo SMA proposto foram feitas em um tempo menor. A diferença média entre as viagens passa a ser algo em torno de 12 minutos.

Essa diferença pode ser justificada pelo *stress* no sistema BRT por causa do cenário de pico. Nesse cenário os ônibus passam mais tempo nas estações e, por isso, o tempo de semáforo que cada ônibus acumula ao longo das viagens passa a ter maior peso nos tempos finais de viagem.

4.2. Quantidade de semáforos

Passando agora a analisar outro aspecto dos resultados, vemos a quantidade de semáforos que os ônibus tiveram que parar ao longo das viagens, tanto no cenário normal SC2 (Figura 4c), quanto no cenário de pico SC4 (Figura 4d).

O gráfico aponta para uma redução no número de semáforos que os ônibus param quando utilizam o gerenciamento semaforico pelo SMA proposto. Observa-se no gráfico da Figura 4c que a linha para o cenário SC2 fica a maior parte das viagens abaixo da linha do SC4.

É possível observar também que no cenário normal, as linhas de tendência se mantiveram relativamente estáveis, dando indícios de que essa diferença no número de semáforos que os ônibus param tendem a se manter estáveis, independente da sua velocidade. A diferença de valor entre essas linhas ficou em, aproximadamente, entre 8 e 10 semáforos.

Já para os cenários de pico (Figura 4d), apesar da linha do cenário SC2 ainda se manter na maior parte do tempo abaixo da linha do cenário SC4, nota-se uma variação muito maior nessa métrica. Verifica-se, inclusive, que quando o sistema BRT se utiliza do SMA proposto, a variação no número de semáforos que os ônibus param é muito maior. Nota-se também, por meio da linha de tendência, que quanto mais rápido foram os ônibus, mais as duas linhas se aproximaram.

Isso pode ser justificado pelo fenômeno da aglomeração nas proximidades dos semáforos pelos ônibus. Pelo fato de terem velocidades diferentes e estarem em um ambiente dinâmico, esses agentes tendem a se aglomerar em alguns pontos da pista, causando uma super demanda para os agentes *Traffic Light* nos semáforos. Nota-se que esse fenômeno é acentuado pelo cenário de pico.

4.3. Tempo de semáforos

Por fim, analisa-se agora o tempo que cada ônibus acumulou, quando ficou parado nos semáforos. Com relação à essa métrica, observa-se os resultados expressos na Figura 4e para o cenário SC1 *versus* o cenário SC3, e a Figura 4b para o cenário SC2 *versus* o cenário SC4. Essa métrica é importante, pois permite analisar o número de paradas nos semáforos, dissertado na Subseção 4.2, sob um aspecto diferente.

Mais uma vez, vê-se que as linhas dos cenários com o uso do MAS proposto ficaram a maior parte do tempo abaixo do cenário tradicional de gerenciamento semafórico. Em específico, para os cenários de fluxo normal SC1 e SC3, vemos que os ônibus passaram muito menos tempo parados em semáforos quanto utilizaram o gerenciamento semafórico com o SMA. As linhas desses cenários (Figura 4e) ficaram bem afastadas e, à medida que a velocidade dos ônibus aumenta, observa-se que elas se afastam ainda mais, configurando um afastamento de aproximadamente 6 minutos em suas linhas de tendência.

Entretanto, para os cenário de pico SC2 e SC4 (Figura 4f), nota-se que as linhas passam a se comportar de maneira menos estabilizada. Apesar de alguns valores bem fora das curvas, nos cenários de pico a diferença entre o tempo que os ônibus passam parados no semáforo cai bastante. Apesar disso, olhar para a linha de tendência permite observar uma certa diferença nos valores médios dessa métrica, colocando as viagens com a utilização do SMA proposto ainda como mais econômicas em relação ao tempo total de semáforo.

5. Conclusões

Este estudo teve por objetivo avaliar o impacto de um sistema semafórico inteligente, controlado por um SMA, no tempo de viagem dos ônibus do sistema BRT Belém. A tecnologia de SMA utilizada nesta abordagem se mostrou vantajosa em termos de simplicidade de implementação, uma vez que se utiliza do benefício da comunicação de agentes para fazer emergir comportamentos inteligentes no sistema.

Foi possível observar nos resultados que, para os parâmetros utilizados nos cenários, o sistema inteligente para controle semafórico possibilitou a redução no tempo geral das viagens nas situações observadas (normal e pico). Além disso, foi possível observar uma série de outros dados que permite comparar o desempenho da abordagem sob

diferentes ópticas. Conclui-se, portanto, que a abordagem atingiu o objetivo esperado nas situações investigadas.

Entende-se que o modelado apresentado neste trabalho ainda é limitado, se comparado às situações reais do ambiente do problema, necessitando fazer-se mais alguns estudos sobre como o SMA se comportaria em relação a outros dos diversos cenários possíveis. Entretanto, os resultados mostram que, para as mesmas condições de ambiente nas situações simuladas, a utilização de SMA obteve resultados melhores que a maneira de gerenciamento tradicional.

Como trabalho futuro, é interessante levar em conta mais variáveis do ambiente, de modo a torná-lo menos restritivo e verificar a validação do uso de SMA para este problema.

Referências

- BRT Belém (2021). *Tecnologia BRT*. Prefeitura de Belém. <http://www.agenciabelem.com.br/brtbelem/tecnologia.html>.
- EGL Engenharia (2015). *Diagnóstico dos estudos e aperfeiçoamento do Projeto de Referência do BRT Belém*. <http://www.agenciabelem.com.br/brtbelem/arquivos/ANEXO%206.rar>.
- Horling, B. and Lesser, V. (2004). A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, 19.
- ITDP (2021). *What is BRT*. Institute for Transportation and Development Policy. <https://www.itdp.org/library/standards-and-guides/the-bus-rapid-transit-standard/what-is-brt/>.
- Melo, L. S., Sampaio, R. F., Leão, R. P. S., Barroso, G. C., and Bezerra, J. R. (2019). Python-based multi-agent platform for application on power grids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29.
- Passos, L. S. and Rossetti, R. (2010). Traffic light control using reactive agents. *Proceedings of the 5th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI 2010*.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., and SciPy 1.0 Contributors (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17:261–272.
- Wackerly, D., Mendenhall, W., and Scheaffer, R. (2014). *Mathematical Statistics with Applications*. International student edition / Brooks-Cole. Cengage Learning.
- Wiering, M. A. (2000). Multi-agent reinforcement learning for traffic light control. In *Machine Learning: Proceedings of the Seventeenth International Conference (ICML'2000)*, pages 1151–1158.

- Wright, L. and Hook, W. (2008). Manual de brt: guia de planejamento. *Brasília: Ministério das Cidades*.
- Zhuoxi, S., Yangzhou, C., Zhenlong, L., Defu, Z., and Hong, B. (2013). A review for workload measurement of air traffic controller based on air traffic complexity. In *2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 2107–2112.