LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

MODELAGEM E SIMULAÇÃO AXIOMÁTICA DESCRITIVA BASEADA EM AGENTES DA LINHA 1 DO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS DE PASSOS/MG

José da Silva Ferreira Junior
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
joseferjunior@yahoo.com.br

Josiane Palma Lima
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
jplima@unifei.edu.br

Alexandre Ferreira Pinho
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
pinho@unifei.edu.br

RESUMO

Sistemas de transporte público coletivos são de vital importância para a mobilidade urbana e desenvolvimento econômico, contudo, carecem de maiores estudos. A simulação baseada em agentes pode vir a ser uma alternativa para isto, emulando rotas, pessoas, recursos, infraestruturas e outros elementos característicos deste objeto. Diante disto, o artigo desenvolve uma modelagem e simulação baseada em agentes, utilizando o software AnyLogic, para apresentar de forma axiomática descritiva, o itinerário de uma única linha de ônibus na cidade de Passos/MG. Seguiu-se o protocolo ODD na pesquisa, primeiramente enfatizando os três agentes da simulação (ponto de ônibus, ônibus e passageiros) com seus respectivos parâmetros. No segundo passo, fez-se o design com o fluxo de processo e diagrama de estados, explanando cada elemento. Por fim, no terceiro passo, descreveram-se os detalhes de formulações utilizadas. Como contribuição científica, o modelo foi detalhado e a interação entre os agentes e o ambiente foi explicitada.
PALAVRAS CHAVE. AnyLogic, Mobilidade urbana, Protocolo ODD.
Simulação, L&T – Logística e transportes, OA– Outras aplicações em PO.

ABSTRACT

Collective public transportation systems are of vital importance for urban mobility and the economic development, however, they require further study. Agent-based simulation may serve as an alternative for this, emulating routes, people, resources, infrastructures, and other characteristic elements of this subject. In light of this, the article aims to develop agent-based modeling and simulation using AnyLogic software to axiomatically and descriptively present the itinerary of a single bus line in the city of Passos, MG. The ODD protocol was followed in the research, initially emphasizing the three agents of the simulation (bus stop, bus, and passengers) with their respective parameters. In the second step of the protocol, the design was created with the process flow and state diagram, explaining each of their elements. Finally, in the third step, the details of the formulations used were described. As a scientific contribution, the model itself was presented, and the interaction between the agents and the environment was explained throughout the research.
KEYWORDS. Anylogic. Urban mobility. ODD Protocol.
SIM – Simulation, L&T – Logistic and transport, OA – others applications in PO.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

1. Introdução

Um dos temas de crescente relevância no estudo e planejamento urbano é a mobilidade, tanto em sistemas grandes e complexos quanto em microssistemas, influenciando a qualidade de vida e o desempenho econômico urbano [Oliveira et al. 2021], [Pereira et al. 2018] e [Sousa 2019]. O transporte desempenha um forte papel neste quesito, proporcionando acesso a serviços, instalações, emprego, saúde, educação, compras e convívio social. Um sistema de transporte é caracterizado por disponibilizar serviço e infraestrutura para movimentação de bens e pessoas, sendo que seu mal planejamento acarreta na desorganização e crescimento desordenado das cidades [Santos e Lima 2023] e [Silva e Silva 2018].

Dentro desta infraestrutura dos sistemas de transporte, um dos equipamentos públicos urbanos mais utilizados no mundo é o ônibus, o qual desloca pessoas de um ponto preestabelecido para outro em rotas normalmente não flexíveis e com horários determinados [Sousa 2019]. Exemplificando, [Kejriwal e Temrikar 2019] afirmam que em Mumbai, na Índia, quase três milhões de pessoas utilizam este tipo de transporte. Já [Salau 2015] informa que em Lagos, na Nigéria, 91% dos domicílios tem algum usuário deste tipo de transporte. [Toro-Gonzalez et al. 2020] também corrobora com a importância ao dissertar que Bogotá, na Colômbia, possui mais de 6.000 veículos de transporte público para a população, sendo a maioria de ônibus.

O crescimento urbano exige que os sistemas de transporte coletivo evoluam, se adaptando à demanda e a novos trajetos e pontos de parada [Sousa 2019]. Contudo, planejar este sistema para que se tenha um equilíbrio entre a racionalização das vias em conjunto com atender as necessidades do público, tem sido um desafio para vários entes e pesquisadores [Carvalho Neto 2019]. Diversas variáveis são relevantes para estes estudos, sendo que, para um sistema de transporte de ônibus, faz-se necessário saber, por exemplo, sobre a circulação dos veículos ao longo do percurso, a entrada deles nos pontos de parada e a quantidade de passageiros no aguardando em cada local, além de outras informações que se julgarem necessárias [Zhukov e Moroz 2021].

Para tal planejamento e evolução dos sistemas de transporte público urbanos por ônibus, diversos autores utilizaram a modelagem e simulação baseada em agentes (MSBA) em seus estudos. Ela tende a auxiliar pois permite desenvolver comportamentos individuais e interações entre passageiros, veículos e infraestrutura, proporcionando uma visão mais realista de como todo o sistema funciona. Também permite analisar cenários, prover otimizações, adaptar modelos a diversos ambientes e integrar diversos tipos de transportes em uma mesma simulação [Kagho et al. 2021] e [Simoni et al. 2019].

Diante do apresentado, este artigo tem por objetivo desenvolver uma modelagem e simulação baseada em agentes para um dos itinerários de transporte coletivo por ônibus da cidade de Passos/MG. Para tanto, o trabalho traz consigo as seguintes especificidades: coletar e traduzir os pontos de ônibus da linha 1 em coordenadas de latitude e longitude; utilizar o protocolo ODD para desenvolvimento da MSBA; descrever o modelo conceitual determinando os agentes envolvidos; construir o modelo computacional e elaborar descritivos dos comandos utilizado. Insere-se a estes objetivos a questão do artigo ser fruto das pesquisas iniciais do doutorado, fomentando e dando base para a continuidade do estudo da MSBA em transporte público coletivo via ônibus.

Como limitações, a MSBA em questão se utiliza de algumas simplificações: somente uma rota de ônibus foi construída, denominada linha 1, a qual faz o circuito completo de ida e volta; os passageiros foram criados por porcentagem da população geral e programados de forma aleatória na área urbana; os pontos de descida dos passageiros também foram programados de forma aleatória, sem matriz origem-destino; decisão de embarcar foi considerada obrigatória a todos os passageiros, apenas com a recusa por distância do ponto de ônibus; velocidade de ônibus e de passageiros trabalhadas de forma constante.

Estruturando o texto do artigo, o mesmo foi dividido em 5 seções. Este primeiro apresenta o objetivo, justificativa e limitações do trabalho. Na seção 2 conceitua os termos de MSBA e de transporte coletivo por ônibus. Já o terceiro tópico apresenta o método de pesquisa utilizado, sendo que na quarta seção, é cumprido o desenvolvimento e apresentados os resultados do trabalho. Por fim, apresentam-se as considerações finais no último item do texto.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

2. Revisão Teórica

2.1. Simulação baseada em agentes

A simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e fazer experiência com este modelo, comparando um comportamento e avaliando estratégias. Permite resolver os problemas com segurança e eficiência, sendo aplicada em diversos setores e disciplinas [Bounadi et al. 2023] e [Miedviedieva e Baharii 2023].

Dentre os tipos de simulação, há a MSBA, a qual se notabilizou por emular situações complexas de relações e interações, utilizando os agentes situados em algum ambiente e providos de ações autônomas. [Macal e North 2009] a definem como um modelo no qual os processos dinâmicos de interação de agentes são simulados repetidamente ao longo do tempo, como dinâmica de sistemas, escalonado no tempo, com eventos discretos ou outros tipos de simulação, sendo mais comum sua abordagem para modelar o comportamento social e organizacional humano para tomada de decisões.

Uma de suas vantagens é a praticidade de se definir o comportamento destes componentes 'agentes' com alto nível de detalhe, por meio dos gráficos de estado. Suas regras e características podem variar em sofisticação, nas informações consideradas na decisão e nas reações com o ambiente e com outros agentes [Scheltes e Correia, 2017] e [Macal 2016].

Diversos softwares podem ser utilizados para esta finalidade, entre eles: NetLogo, Repast, MASON e AnyLogic [Maca 2016]. O AnyLogic, utilizado neste artigo, é baseado em modelagens multimétodos com linguagem de programação baseada em Java. É um software poderoso e versátil, possui grande flexibilidade e permite aos modeladores adaptarem e programarem a complexidade de diversos tipos de sistemas, sendo que, na área de transportes, pode incluir ainda sistemas de informações geográficas (GIS) e regras diversas de trânsito [Bounadi et al. 2023], [Miedviedieva e Baharii 2023] e [Sousa 2019].

Alguns exemplos de sua utilização nesta área de transportes, foco deste trabalho, podem ser listados: planejamento de rota de centros de distribuição para consumidor final [Nava 2023] e [Miedviedieva e Baharii, 2023]; visualização de transferência de mercadorias em cadeias de suprimentos [Bounadi et al. 2023]; frotas de veículos autônomos para transporte de passageiros na última milha [Scheltes e Correia, 2017] e [Simoni et al. 2019]; transporte coletivo público em vários tipos de modais, como metrô e ônibus [Ali et al. 2016], [Cats et al. 2016], [Sousa 2019], [Pereira et al. 2018] e [Zhukov e Moroz 2021].

2.2. Transporte coletivo urbano por ônibus

Um indivíduo move-se para qualquer local com a finalidade de satisfaz alguma necessidade própria, contendo algum custo envolvido neste deslocamento. A agregação destes movimentos emerge para um comportamento coletivo chamado mobilidade ou tráfego. Os cenários dados pelas distribuições de urbanização e o uso dos recursos geram os padrões de mobilidade de uma região, sendo que, estudos sobre eles podem prever fluxos futuros e compreender como o trânsito se desenvolve em determinado local [Hong e Jung 2016].

O trânsito é uma disputa pelo espaço físico entre o tempo e o acesso aos equipamentos urbanos. É caracterizado e importante para que as pessoas tenham acesso às suas atividades diárias, além de movimentar materiais, equipamentos, e outros em vias diversas. Já o transporte urbano é designado para os deslocamentos destes elementos dentro das cidades, com uma finalidade, podendo ser público e/ou coletivo [Kagho et al. 2021] e [Simoni et al. 2019].

O transporte público refere-se ao meio pelo qual maiores proporções de moradores urbanos obtêm acesso físico aos bens, serviços e atividades que necessitam para sua subsistência e bem-estar. Mesmo existindo diversos meios de locomoção urbana público, o principal tipo na América Latina é o ônibus, seja por sua fácil implantação, por seus custos reduzidos quando comparados a outros modais ou a sua certa flexibilidade em contraposição a um volume razoável de passageiros [Salau 2015] [Toro-Gonzalez et al. 2020].

Diversos motivos fazem com que os indivíduos utilizem os ônibus, como por exemplo: deslocamento para educação em todos os níveis de escolaridade; ida e volta ao trabalho; compras;

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

lazer; entre outros. Compreender as características dos passageiros, das rotas, dos ônibus em si e do ambiente urbano pode ser útil para calibrar o desempenho da rede de transportes, prever níveis de demanda, melhorar o desempenho, entre outras questões [Salau 2015] e [Simoni et al. 2019].

Diversos indicadores podem trazer informações sobre a qualidade deste modal, entre eles: limpeza, idade da frota veicular; conforto; acessibilidade; tempo de viagem; frequência de tempo entre ônibus; pontualidade; tarifação; entre outros [Oliveira et al. 2021] e [Silva e Silva 2018]. Mensurar e entender a importância de cada um destes itens pode auxiliar em investimentos nos serviços e melhorar a qualidade aos usuários [Carvalho Neto 2019].

3. Método de Pesquisa

A pesquisa é caracterizada de natureza prática, na qual que ocorrem a resolução de um problema concreto, com finalidade prática, e não apenas no nível da especulação intelectual originada pela curiosidade do pesquisador. O objetivo metodológico dela é descritiva com abordagem quali-quantitativa, o qual permite uma melhor descrição do conjunto de ações de forma qualitativa e utiliza de dados para prover a conclusão e conquista dos objetivos na forma quantitativa. Ambos combinados fortalecem as pesquisas aplicadas descritivas [Miguel et al. 2012].

Utilizou-se o modelo de [Bertrand e Fransoo 2002] de modelagem e simulação como método de pesquisa, definindo-o como axiomático descritivo. Nele, a pesquisa é conceitualizada com seus objetivos, caracterização do objeto de estudo e determinação das variáveis de estudo e, após isto, o modelo conceitual é desenvolvido e transporto para o formato computacional, buscando representar como se fez esta construção virtual [Bertrand e Fransoo 2002] e [Oliveira et al. 2016]. Para a classificação da MSBA, o estudo é caracterizado como interativo, pois, conforme [Macal 2016], os agentes autônomos interagem entre si e com o ambiente.

Quanto as etapas do estudo, seguiu-se o protocolo ODD, o apresenta um padrão de atividades a serem executadas para se explanar e tornar mais simples a absorção de modelos baseados em agentes [Grim et al. 2006]. Foram obedecidas as três etapas do protocolo proposta pelos mesmos autores para a construção do artigo, sendo elas: Visão Geral (determinar o objetivo do modelo; determinar as variáveis de estado e a escala dos agentes; avaliar o processo e o planejamento de como os agentes irão ser incorporados no modelo); Conceitos de Design (como os agentes evoluem, se adaptam e interagem entre si no modelo); e Detalhamento (como o modelo se inicia, quais suas entradas e qual o esqueleto de equações e funções utilizados).

4. Desenvolvimento e resultados

4.1. Visão Geral

Esta MSBA tem por objetivo emular o processo de um único itinerário de transporte coletivo por ônibus de Passos/MG por meio do software Anylogic. Iniciou-se o desenvolvimento coletando os dados georreferenciados dos pontos de ônibus referida linha 1, atribuindo as coordenadas geográficas, conforme Tabela 1, totalizando 104 pontos de parada dos ônibus. Para confecção da tabela, foram utilizados os arquivos disponíveis em [Passos online] e [Moovit online] para definir o itinerário da linha 1 em conjunto com o software Google Earth, para determinar o logradouro completo. Após isto, utilizou-se a API elaborada por [Will Geary online] em formato de script para o Planilhas Google, para traduzir o endereço em pontos de latitude e longitude.

Tabela 1 – Exemplo planilha de georreferenciamento dos pontos de ônibus

Linha1	Endereço	Lat	Long
1	Rua Opala, 391, Passos/MG	-20,7554	-46,6006
2	Praça Coral, Passos/MG	-20,7534	-46,6007
3	Rua Águas Marinhas, 1710, Passos/MG	-20,7534	-46,5988
...	...	...	...
102	Av. Juca Stockler, 3050, Passos/MG	-20,7519	-46,5984
103	Rua Turquesa, 1700, Passos/MG	-20,7555	-46,6022
104	Rua Opala, 391, Passos/MG	-20,7554	-46,6006

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

A partir do software AnyLogic, inicia-se o planejamento do modelo em questão. Nele foi vinculado ao ambiente GIS a área urbana da cidade objeto de estudo, deixando aparente as ruas da região. Tal mapa é traduzido diretamente pelo software por meio de sua conexão com a ferramenta OpenStreetMap. Inclui-se neste mapa, três agentes, caracterizados abaixo:

a) Ponto de ônibus: agente no qual se atribuem as coordenadas de latitude e longitude da tabela, com quantidade de 104 conforme também tabulação exemplificada na Tabela 1. A sequência da primeira coluna já é a ordenação das paradas, desde seu início no primeiro ponto até seu término no centésimo quarto ponto;
b) Ônibus: agente do tipo população, inicialmente unitário, o qual irá se deslocar no ambiente GIS, saindo de sua garagem, movendo-se de um ponto de ônibus para o outro buscando e entregando passageiros e retornando à sua garagem ao final do ciclo;
c) Passageiro: agente do tipo população, inicialmente contando com 10% da população da cidade (incluídos 1.200 passageiros no modelo). Os passageiros estão de forma aleatória distribuídos na cidade e, caso o ponto esteja próximo, se deslocam até ele e descem em um ponto de ônibus também aleatório.

O fluxo do processo tem grande interação entre os três agentes descritos, sendo descrito a seguir. O ônibus sai de sua garagem e se direciona ao primeiro ponto de ônibus. Ao estar nele, aguarda, se houver passageiros no ponto, sua entrada e, se houver passageiros com destino neste ponto, sua saída. Após isto, o ônibus se desloca para o próximo ponto de ônibus, executando o mesmo procedimento novamente até o último ponto. Ao chegar no último ponto, ele retorna à garagem e reinicia seu processo. Já os passageiros são inseridos no modelo aleatoriamente na área urbana, se direcionando para os pontos próximos a eles para embarcarem. Após isto, desembarcam em um ponto também aleatório.

Como características do modelo, foram incluídas as informações disponíveis no Quadro 1, justificando-as por autores da área ou por necessidades do modelo para sua construção e conquista do objetivo.

Quadro 1 - Informações para modelo

Características	Valor	Descrição
Velocidade do ônibus	14,6km/h	Conforme trabalho de [Toro-Gonzalez et al. 2020].
Capacidade do ônibus	40 passageiros	Conforme [Moovit online].
Número de passageiros na cidade	1.200	10% da população total para amostragem.
Posição dos passageiros na cidade	Aleatória	Dos autores para amostragem e funcionamento da MSBA.
Distância máxima a pé do passageiro até o ponto de ônibus	300m	Conforme trabalho de [Schmitt et al. 2021].
Número de viagens de ônibus por dia	1 a 4	Conforme trabalho de [Salau 2015].
Tempo de embarque e desembarque	Triangular (0,5; 1,0; 1,5) min	Dos autores para amostragem e funcionamento da MSBA.
Fila de ônibus e de passageiros nos pontos	Tamanho infinito	Conforme trabalho de [Schmitt et al 2021].
Ponto de destino dos passageiros	Aleatório	Dos autores para amostragem e funcionamento da MSBA.
Quantidade de ônibus na linha 1	1	Dos autores para amostragem e funcionamento da MSBA.
Região	Área urbana de Passos/MG	Conforme itinerário do ônibus [Moovit online].

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

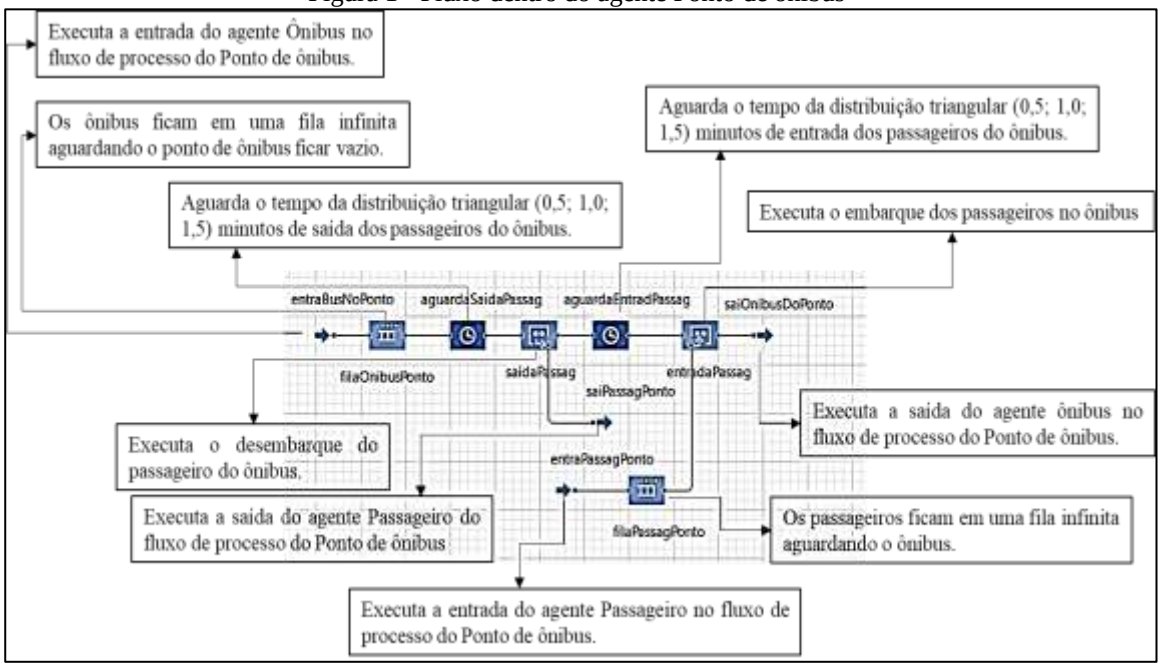
4.2. Conceitos de design

Na segunda etapa do protocolo ODD, parte-se para a construção do modelo computacional, no caso, pelo software AnyLogic. A partir da descrição dada na subseção 4.1 foram desdobrados os passos para a criação de agentes, fluxo de processos e diagrama de estados, além da inserção dos comandos e códigos. Iniciando pela construção do agente Ponto de ônibus, o Quadro 2 informa sobre os blocos de processo utilizados em sua construção e a Figura 1 ilustra a forma e as principais características do fluxo, baseando-se nos autores [Zhukov e Moroz 2021] e em exemplos do próprio software em questão.

Quadro 2 - Nome e descrição dos blocos de fluxo utilizados

Símbolo	Nome	Descrição
Enter	entraBusNoPonto	Faz os ônibus entrarem no ponto de ônibus
Queue	filaOnibusPonto	Ônibus aguardam sua vez para entrarem no ponto
Delay	aguardaSaidaPassag	Tempo médio de saída dos passageiros por parada
Dropoff	saidaPassag	Executa a saída dos passageiros do ônibus
Exit	saiPassagPonto	Saída do Passageiro do Ponto de ônibus
Delay	aguardaEntradPassag	Tempo Médio de entrada dos passageiros por parada
Enter	entradaPassag	Executa a entrada dos passageiros no ônibus
Pickup	entraPassagPonto	Entrada do Passageiro no Ponto de ônibus
Queue	filaPassgPonto	Passageiros aguardam sua entrada no ônibus
Exit	saiOnibusDoPonto	O ônibus sai do ponto em questão

Figura 1 - Fluxo dentro do agente Ponto de ônibus

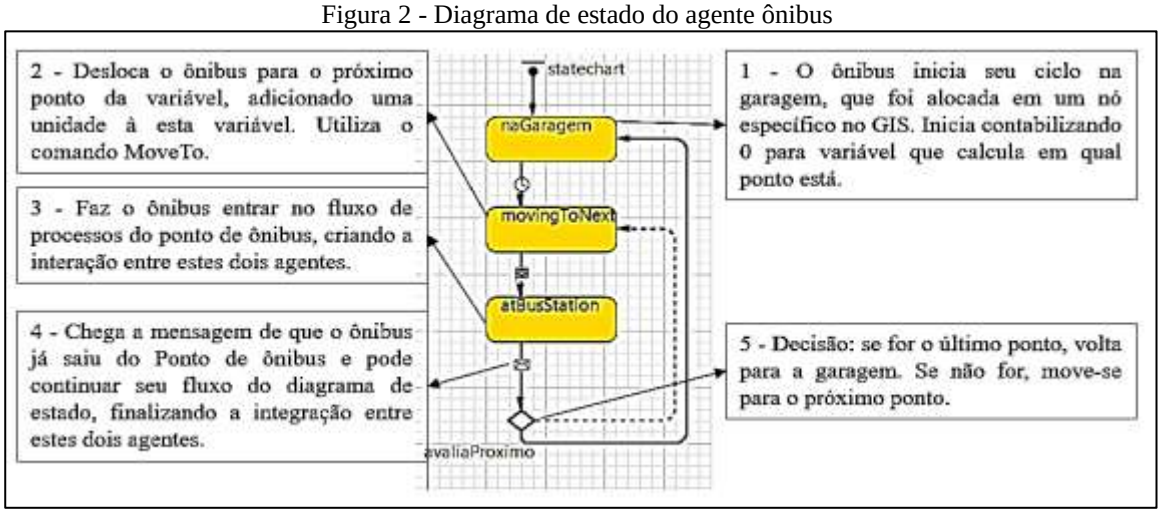


Com o fluxo de processo do agente Ponto de ônibus concluído, executou-se o diagrama de estados do agente Ônibus, o qual possui três estados: na garagem, no qual o ônibus inicia e finaliza seu itinerário; em movimento, movimentando-se pelo caminho mais curto do GIS de um ponto até o outro, gerando a interação entre o agente e o ambiente; e no ponto de ônibus, quando embarca e desembarca passageiros. O diagrama de estado é uma representação gráfica de comportamento dos agentes, tendo seu estado em si indicado por um retângulo e suas transações

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

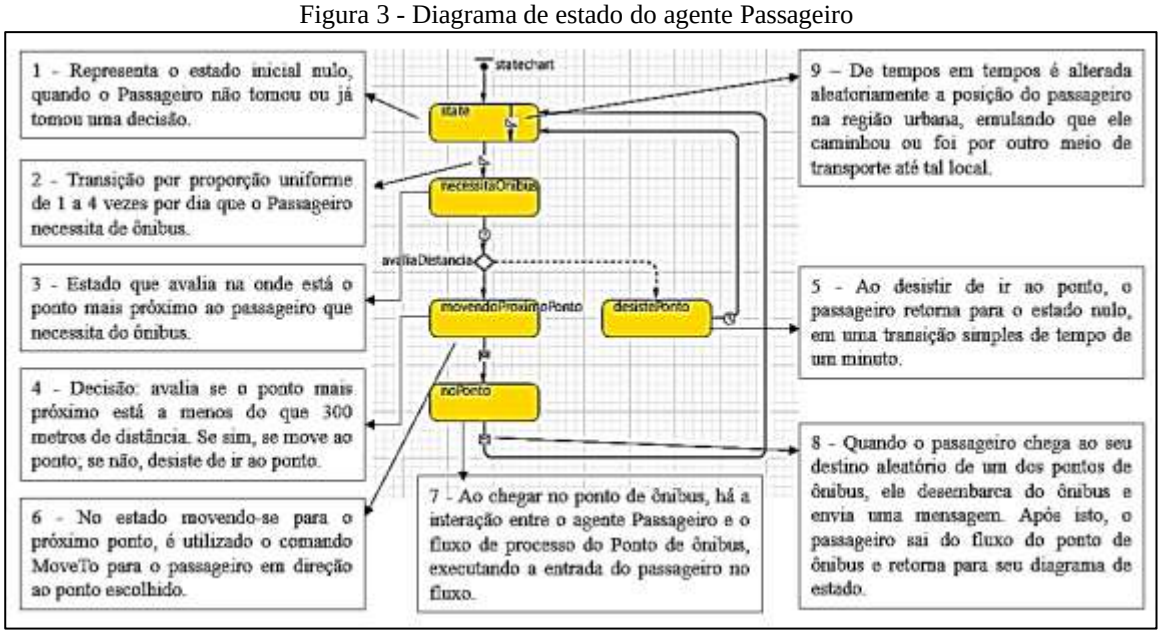
indicadas por arcos dirigidos [Campos 2021], [Harel 1987]. A transição de ele sair da garagem para se movimentar foi realizada por um simples comando temporal de um minuto, com a finalidade apenas de contabilizar esta alteração de estado. Já a transição de movimentação para o ponto foi feita pela chegada do agente. E, por fim, há a decisão se o ônibus volta a mover ou se volta para a garagem após o ponto, sendo que só quando for o último ponto que ele retorna. A Figura 2 ilustra estes comportamentos e explana os estados, tendo por base os trabalhos de [Pereira et al. 2018] e [Scheltes e Correia 2017].

Figura 2 - Diagrama de estado do agente ônibus



Por fim, modelou-se o agente Passageiro. Inicialmente, os passageiros foram criados e alocados em uma região GIS que delimita a área urbana da cidade de Passos, e os insere em sua quantidade de 1.200, aleatoriamente nesta região. Após isto, desenvolveram-se cinco estados possíveis: estado nulo, no qual o passageiro inicia e volta após decisões; necessita ônibus, no qual o passageiro decidirá se irá para um ponto de ônibus ou não; estado desiste do ponto, no qual o passageiro decide não ir para o ponto de ônibus esperar e volta para o estado nulo; estado movendo para o ponto, no qual o passageiro vai até o ponto de ônibus mais próximo; e o estado no ponto, no qual o passageiro irá embarcar e desembarcar. A Figura 3 ilustra este diagrama, sendo baseada nos trabalhos de [Cats et al. 2016] e [Zhukov e Moroz 2021].

Figura 3 - Diagrama de estado do agente Passageiro



DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

Conforme explicitado na seção 3, a MSBA proposta é do tipo interativa, pois os três agentes interagem entre si e com o ambiente, conforme ditado por [Macal 2016]. Tanto o passageiro quanto o ônibus têm seus comportamentos próprios ilustrados nas Figuras 2 e 3, mas entram e saem do fluxo de processo do agente Ponto de ônibus, conforme Figura 1. Também se nota que os mesmos dois agentes (passageiro e ônibus) interagem com o ambiente representado pelo mapa GIS, caminhando pela rota mais curta até cada um dos pontos. A construção de tais conexões se mostrou complexa, principalmente por se trabalhar com alguns dados aleatórios neste modelo, além do fato de todas as localizações terem seu código vinculado a posição latitude e longitude do GIS.

4.3. Detalhamento

Como última fase do protocolo ODD, tem-se algumas características e inserções executadas no modelo proposto. Primeiramente, o início da MSBA contou apenas com o mapa GIS da região de Passos/MG com os pontos de ônibus vinculados a ela por meio de latitude e longitude de cada um. Já o agente Passageiro foi inserido no modelo de forma aleatória na região delimitada no próprio software, fornecendo uma percepção de quem tomou ou não a decisão de ir até um dos pontos pelo motivo de distância. Não houve definição de tempo de simulação, por não ser o objetivo do artigo. Já sobre os submodelos, destacam-se aqui alguns dos comandos utilizados durante a construção do fluxo de processo, conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Funções utilizadas no modelo

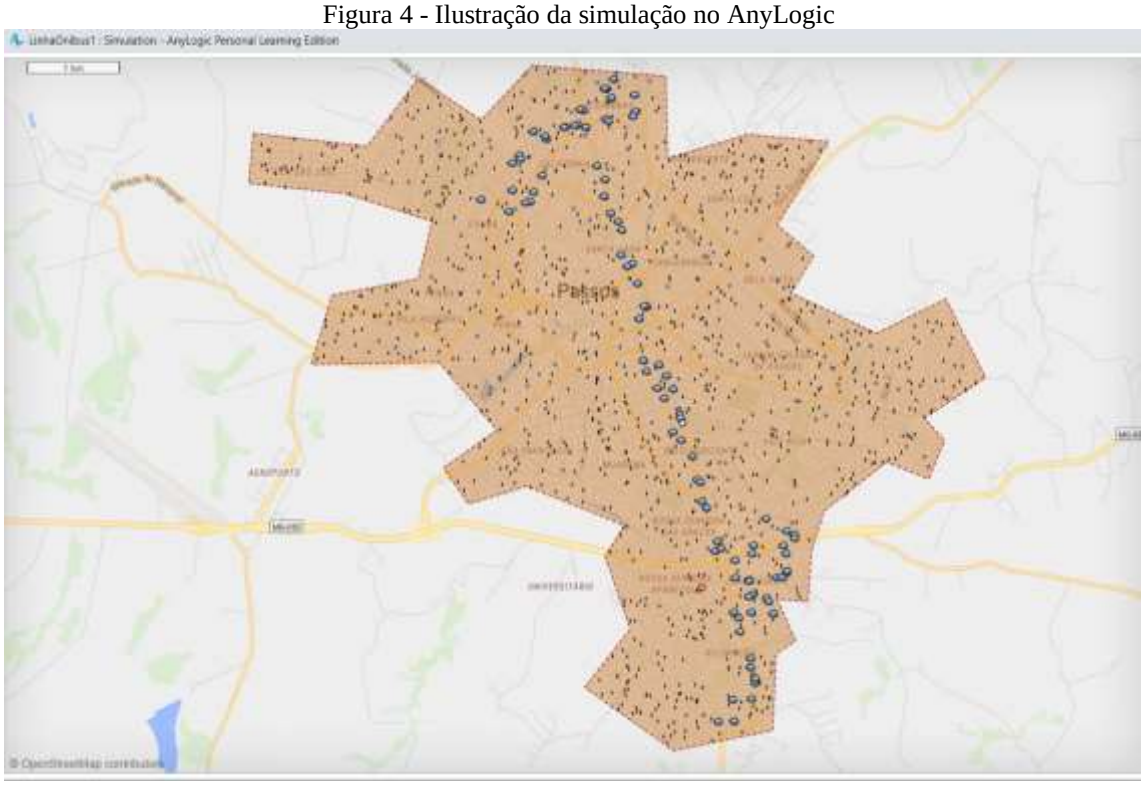
Fluxo	Comando	Observação
PontoOnibus – saidaPassag - Condition	agent.pontoDestino == this	pontoDestino é uma variável que recebe aleatoriamente um número no qual o Passageiro irá desembarcar.
PontoOnibus – saiPassagPonto – on exit	agent.receive("Chegou");	Envia a mensagem que o passageiro chegou ao destino, liberando ele a seguir o diagrama de estado.
PontoOnibus – saiOnibusDoPonto	agent.receive("Go");	Envia a mensagem que o ônibus saiu do ponto, liberando ele a seguir o diagrama de estado.
PontoOnibus – entradaPassag – on Pickup	container.lotacaoAtual++;	Aumenta a variável lotaçãoAtual em uma unidade.
PontoOnibus – saidaPassag – on Dropoff	container.lotacaoAtual--;	Reduz a variável lotaçãoAtual em uma unidade.
PontoOnibus – entradaPassag – Condition	container.lotacaoAtual <= container.capacidade	Verifica se a variável lotaçãoAtual é inferior a capacidade do ônibus de 40 unidades.
Passageiro – função avaliaPontoPróximo	Return findFirst(main.pontoOnibuses, po -> getDistanceGIS(getLatitude(), getLongitude(), po.getLatitude(), po.getLongitude(), METER) <= 300);	Função para avaliar se o passageiro tem um ponto de ônibus próximo a menos de 300 metros de distância dele.
Passageiro – transição entre Decisão e movendoProximoPonto	pontoProximo != null	Se houver um ponto próximo a menos de 300 metros (diferente de nulo), o passageiro alterna o estado para movendoProximoPonto.
Passageiro – noPonto – Entry Action	pontoProximo.entraPassagPonto.take(this);	Faz o passeiro ir para o fluxo de processos do Ponto de ônibus.
Onibus – naGaragem – Entry Action	pontoOnibusIndex = 0;	Variável pontoOnibusIndex recebe o valor 0.
Onibus – movingToNext – Entry Action	moveTo(main.pontoOnibuses(pontoOnibusIndex));	Ônibus se move para o próximo ponto inserido na variável pontoOnibusIndex.
Onibus – atBusStation – Entry Action	main.pontoOnibuses(pontoOnibusIndex).entraBusNoPonto.take(this);	Faz o ônibus ir para o fluxo de processos do Ponto de ônibus
Onibus – atBusStation – Entry Action	pontoOnibusIndex++;	Adiciona uma unidade a variável pontoOnibusIndex
Onibus – transição entre decisão e naGaragem	pontoOnibusIndex == main.pontoOnibuses.size()	Se for o último ponto de ônibus, o ônibus vai para a garagem.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

4.4. Resultados

Após todos os passos discutidos nesta seção 4, o modelo axiomático descritivo se faz pronto, representando, com as limitações já explicitadas, o itinerário da linha 1 de ônibus da cidade de Passos/MG. A Figura 4 ilustra a animação da simulação pelo software Anylogic, onde os elementos em preto são os passageiros criados de forma aleatória e os elementos azuis são os pontos de ônibus. A área em laranja demarcada é a área urbana da cidade, sendo que dentro dela se encontram todas as ruas e avenidas baseadas no OpenStreetMap embarcado em GIS no software.

Figura 4 - Ilustração da simulação no AnyLogic



5. Considerações Finais

O artigo desenvolveu uma MSBA do itinerário de uma única rota de ônibus do transporte coletivo da cidade de Passos/MG, chamada de linha 1, por meio do software AnyLogic. Iniciou-se o modelo formatando a posição dos pontos de ônibus em dados georreferenciados de latitude e longitude em uma planilha. Posteriormente, criou-se o modelo incorporando o mapa GIS como ambiente dele. Os agentes Ponto de ônibus, ônibus e passageiro foram criados e configurados com o fluxo de processos e seus respectivos diagramas de estados. Por fim, foram inseridos os códigos de programação para conectar todos os elementos do modelo.

Verificando as especificidades do trabalho apresentadas na seção 1, nota-se que todas foram cumpridas ao longo do desenvolvimento. A transposição dos pontos de ônibus em coordenadas geográficas foi executada utilizando um API incluso no Google Planilhas, conforme tópico 4.1. O protocolo ODD apresentado no método de pesquisa foi utilizado em suas três grandes etapas ao longo do processo de construção do modelo conceitual e computacional, seguindo os passos de Visão Geral, Conceitos de Design e Detalhamento; o MSBA foi descrito também no tópico 4.1 e desenvolvido no software AnyLogic ao longo dos demais tópicos do desenvolvimento, apresentando todo o conjunto de lógicas de programação ao longo do texto. A partir disto, considera-se alcançado o objetivo geral de desenvolver o modelo proposto de forma axiomática descritiva, ou seja, apenas descrevendo o caminho para se construir a simulação.

Como dificuldades do modelo, conforme visualizado no texto, a correta programação de localizações dentro do mapa GIS foi um desafio, com programações exclusivas para ela. Também

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

a interação entre os diagramas de estado com o fluxo de processos foi complexa de se executar. Já como facilidades, as simplificações já embarcadas no software utilizado foram de grande auxílio, como a busca pelo menor caminho entre dois pontos e a aleatoriedade dos passageiros no início da simulação.

Enfatizando a contribuição científica, este artigo trouxe um passo a passo para a construção de uma MSBA para uma linha de ônibus municipal que pode ser replicada ou adaptada para diversas cidades ou ambientes. Soma-se a isto a contribuição de se executar uma MSBA interativa, a qual os agentes interagem entre si e com o ambiente, ou seja, três agentes distintos, com comportamentos individuais, atuaram e se conectaram uns aos outros por meio da simulação, além de percorrerem o ambiente determinado por mapa GIS. Também se salienta o trabalho como fruto da pesquisa do doutorado, contribuindo como ponto de partida para estudos mais aprofundados de MSBA em transportes públicos coletivos via ônibus.

Como limitações, explicitadas na seção 1 do artigo, os passageiros se comportaram de forma aleatória, tanto em localização física quanto em destino final, propiciando a ideia de novos trabalhos a respeito incorporando a eles a matriz de origem-destino para tornar mais realista o modelo. Também como limitação, utilizou-se apenas um tipo de agente passageiro, com porcentagem amostral para o modelo, gerando proposta de trabalho futuro de desdobrar este passageiro em tipos distintos com comportamentos e desejos de locomoção também distintas entre si. Por fim, como outra limitação do modelo, o mesmo contou apenas com um ônibus nesta linha, a fim de criação da MSBA, sendo que, para futuras pesquisas, sugere-se a incorporação do cronograma dos ônibus bem como a otimização do número de ônibus por linha.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e a CAPES pelo apoio financeiro concedido aos projetos que subsidiaram o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Ali, A., Kim, J. e Lee, S. (2016). Travel behavior analysis using smart card data. *Journal of civil engineering*, 20:1532-1539.

Bertrand, J. W. M. e Fransoo, J. C. (2002) Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, 22:241-264.

Bounadi, N., Boussalia, S. R. e Bellaouar, A. (2023). Optimizing Algerian company's fleet with agent-based model in Anylogic. *Transport and Telecommunication*, 24:434-442.

Campos, A. C. (2021). Partição de diagramas de estado. Dissertação de mestrado em engenharia eletrotécnica e de computadores. Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Carvalho Neto, E. (2019). Qualidade de serviço e satisfação dos usuários: estudo do sistema de transporte por ônibus em Porto Alegre. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

Cats, O., West, J. e Eliasson, J. (2016). A dynamic stochastic model for evaluating congestion and crowding effects in transit systems. *Transportation Research Part B*, 89:43-57.

Grimm, V. et al. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based model. *Ecological Modelling*, 198:115-126.

Harel, S. (1987). Statecharts: a visual formalism for complex systems. Science of computer programming, 8:231-274.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

Hong, J., Jung, W. S. (2016). Application of gravity model on the Korean urban bus network. *Physica A*, 462:48-55.

Kagho, G. O., Hensle, D., Balac, M., Freedman, J., Twumasi-Boakye, R., Broaddus, A., Fishelson, J. e Axhausen, K. W. (2021). Demand Responsive transit simulation of Wayne Country, Michigan. *Journal of transportation Research board, 2675:702-716.*

Kejriwal, A. e Temrikar, A. (2019). Graph theory and Dijkstras's algorithm: a solution for Mumbais's best buses. *The international Journal of engineering and Science*, 8:40-47.

Macal, C. M. (2016). Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. Journal of Simulation, 10:144-156.

Macal, C. M. e North, M. J. (2009). Agent-Based Modeling and Simulation. In Anais do Winter Simulation Conference, USA.

Miedviedieva, N. e Baharii, M. (2023). Optimization of the simulation process of product supply from the manufacturer. *Science-based Tecnologies*, 57:1.

Miguel, P. A. C. et al. (2012). Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier.

Moovit. (online). Web page. https://moovitapp.com/index/pt-br/transporte_p%C3%BAblico-lines-Passos-4162-907841. Acessado em 2024-05-16.

Nava, M. M. A. (2023). Optimal route planning using computer simulation in the context of distributor-to-consumer supply network. Dissertação em engenharia industrial. University of Texas at El Paso USA.

Oliveira, J. O., LIMA, R. S. e MONTEVECHI, J. A. B. (2016). Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 62:166-191.

Oliveira, M. L., Mairinque, L. A. e Lima, J. P. (2021). Aplicação de técnicas multivariadas para análise da influência das variáveis socioeconômicas no nível de satisfação dos usuários de transporte público urbano. *Eng Urb em debate*, 2:1.

Passos. (online). Web page. https://www.passos.mg.gov.br/portal/noticias/0/3/2470/cartilha-de-transporte-coletivo/. Acessado em 2024-05-16.

Pereira, A., Ribas, J., Medina, A. e Rodrigues, R. (2018). Modelo de simulação para melhoria do transporte público no campus CUASO. In *Anais do XXXVIII ENEGEP*, Maceió. ABEPRO.

Salau, T. (2015). Public transportation in metropolitam Lagos, Nigeria: analysis of public transport user's socioeconomic characteristics. *Urban, Planning and trsanport Research*, 3:132-139.

Santos, J. B. e Lima, J. P. (2023). Health determinants, applications, and methods: A systematic literatura review on the relationships between the urban trasnport of people and health. *Transportation Research Record*, 1-27.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br

Scheltes, A e Correia, G. H. (2017). Explaining the use of automated vehicles as last mile connection of train trips through an agent-based simulation model: An application to Delft, Netherlands. *International Journal of transportation Science and technology*, 6:28-41.

Schmitt, A., Caldeira, V. M., Cavallazi, J. E., e Valente, A. M. (2021). Localização De Pontos De Parada No Sistema De Transporte Coletivo Por Ônibus–O Caso De Chapecó/Sc. Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina.

Silva, J. A. B. e Silva, S. (2018). Critérios de qualidade em serviços de transporte público urbano: uma contribuição teórica. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 4:83-98.

Simoni, M. D., Kockelman, R. M., Gurumurthy, K. M. e Bischoff, J. (2019). Congestion pricing in a world of self-driving vehicles: na analysis of different strategies in alternative future scenarios. *Transportation Research Part C*, 98:167-185.

Sousa, R. P. (2019). Uso de um software de simulação computacional baseado em agentes na modelagem de uma rota de transporte público na cidade de Mossoró-RN. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Produção. Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

Toro-Gonzalez, D., Cantillo, V. e Cantillo-Garcia, V. (2020). Factor influencing demand for public transport in Colombia. *Research in Transportation & Management*, 36.

Will Geary. (online). Web page. https://willgeary.github.io/data/2016/11/04/Geocoding-with-Google-Sheets.html. Acessado em 2024-03-28.

Zhukov, A. I. e Moroz, D. F. (2021). Simulation modeling of a bus route. In: *Anais do Intelligent Technologies and Eletronic devices in vehicle and road transport complex*. IEEE.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193853
https://proceedings.science/p/193853?lang=pt-br