

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE SIMULAÇÃO HÍBRIDA PARA
IMPLANTAÇÃO DE BICICLETA COMPARTILHADA
COMO ALTERNATIVA AO TRANSPORTE PÚBLICO**

Daniel de Oliveira Pessoa

Itajubá
Março de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Daniel de Oliveira Pessoa

**MODELO DE SIMULAÇÃO HÍBRIDA PARA
IMPLANTAÇÃO DE BICICLETA COMPARTILHADA
COMO ALTERNATIVA AO TRANSPORTE PÚBLICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**

Área de concentração: Engenharia de Produção (Sistemas de Produção e Logística)

Orientador: Prof. Dr. Renato da Silva Lima

Itajubá

Março de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Daniel de Oliveira Pessoa

**MODELO DE SIMULAÇÃO HÍBRIDA PARA
IMPLANTAÇÃO DE BICICLETA COMPARTILHADA
COMO ALTERNATIVA AO TRANSPORTE PÚBLICO**

Dissertação aprovada por banca em 27 de março de 2024, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca examinadora:

Profª Drª. Janaina Antonino Pinto
(UNICAMP)

Prof. Dr. Alexandre Ferreira de Pinho
(UNIFEI)

Prof. Dr. Renato da Silva Lima (UNIFEI),
orientador

Itajubá

Março de 2024

DEDICATÓRIA

*Dedico à minha família e a todos que estão
envolvidos diretamente e indiretamente em minha
formação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado saúde para concluir essa etapa e chegar até aqui.

Gostaria de agradecer aos meus pais Silvia Olinda e Joevaldo Bispo, por todo o apoio que me foi dado durante todos esses anos e sempre me incentivaram e apoiaram ao estudo e nas minhas decisões.

Agradeço ao meu irmão Matheus Pessoa, que sempre esteve do meu lado nessa etapa me apoiando e me ajudando a manter o foco quando, às vezes, me perdia.

Agradeço ao meu orientador, Professor Renato Lima, pela confiança, paciência e pronta disponibilidade sempre que precisei. Agradeço também por todos os ensinamentos ao longo do caminho.

Agradeço à B2ML, em especial ao Bernardo, pelo suporte, auxílio e pela oportunidade de parceria em realizar esta pesquisa.

Agradeço aos amigos do LogTranS, especialmente ao Rodrigo de Paula, por dividir as dificuldades da caminhada e tornar o ambiente de pesquisa mais leve.

Agradeço à CNPq, à B2ML e à Universidade Federal de Itajubá por todos os recursos disponibilizados, sejam financeiros ou estruturais, que possibilitaram a conclusão desta pesquisa.

Agradeço à esta instituição, UNIFEI, que me acolheu e proporcionou novos horizontes em minha carreira. Sou muito grato a todos os professores, pelo conhecimento fornecido, aos funcionários e servidores, sempre muito prestativos.

RESUMO

As capitais brasileiras estão classificadas entre as cidades com os piores índices de tempo gasto no trânsito. Este cenário é amplamente influenciado pelo uso predominante de automóveis individuais no país, o que contribui para um sistema de transporte público menos eficiente, especialmente em trajetos curtos. Embora o transporte público seja uma alternativa viável para aliviar o excesso de veículos em circulação, o tempo de deslocamento torna essa opção pouco atrativa. Assim, para deslocamentos de curta distância, conhecidos como “última milha”, as bicicletas compartilhadas surgem como uma alternativa promissora para a redução do tempo de viagem dos usuários, podendo ser integradas ao sistema de transporte público para deslocamentos maiores nos grandes centros urbanos. De modo a compreender esse potencial, a simulação mostra-se como uma metodologia capaz de trazer uma representação virtual do ambiente, possibilitando a realização de alterações sem que seja necessária a intervenção física no sistema. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi desenvolver e aplicar um modelo de simulação híbrida para a análise de sistemas de transporte urbano com bicicletas compartilhadas. Com o modelo, foi possível não apenas mensurar os benefícios proporcionados por esses sistemas, mas também assessorar o processo de tomada de decisão para a implantação de novas estações e melhorias na infraestrutura urbana. O modelo proposto adota uma abordagem híbrida, isto é, aplicando em conjunto a Simulação Baseada em Agentes (SBA) e a Simulação de Eventos Discretos (SED), como objeto de estudo a Região central da cidade de Belo Horizonte, MG (Região do Contorno). Para a etapa de construção do modelo computacional, foi utilizado o *software* AnyLogic, com o qual, foi possível a simulação de nove cenários distintos, considerando variações nas velocidades dos ônibus e bicicletas, bem como a presença ou ausência de ciclofaixas, condições climáticas e níveis de tráfego. A validação do modelo envolveu a coleta de dados em campo via GPS, relativos à velocidade, localização, tempo e elevação dos deslocamentos de bicicleta na região de estudo. Testes de significância indicaram que as médias dos dados simulados e reais são estatisticamente equivalentes, validando assim o modelo computacional desenvolvido. Ao final da simulação, foi possível obter os tempos de deslocamento em cada tipo de transporte. A análise comparativa entre as modalidades revelou uma significativa vantagem na implantação de bicicletas compartilhadas: em curtas distâncias, a redução no tempo de percurso com o uso da bicicleta foi de até 61% em comparação ao ônibus. No entanto, é necessário destacar que a opção por esse modo de transporte ativo demanda esforço físico, o que pode ser um fator limitante para alguns usuários.

Palavras-chave: Transporte público; bicicletas compartilhadas; mobilidade urbana sustentável; modelagem e simulação.

ABSTRACT

Brazilian capitals are ranked among cities with the worst traffic time indices. This scenario is largely influenced by the predominant use of private vehicles in the country, leading to a less efficient public transportation system, especially for short routes. Although public transport is a viable option to relieve the excess of circulating vehicles, the travel time makes this alternative less attractive. Thus, for short-distance commutes, known as the "last mile," shared bicycles emerge as a promising alternative to reduce the travel time for users, which can be integrated into the public transport system for longer distances in major urban centers. To understand this potential, simulation proves to be a methodology capable of providing a virtual representation of the environment, allowing for modifications without the need for physical intervention in the system. In this context, the aim of the work is to develop and apply a hybrid simulation model for analyzing urban transport systems with shared bicycles. With the model, it is possible not only to measure the benefits provided by these systems but also to assist the decision-making process for the implementation of new stations and improvements in urban infrastructure. The proposed model adopts a hybrid approach, that is, combining Agent-Based Simulation (ABS) and Discrete Event Simulation (DES), focusing on the central region of Belo Horizonte, MG (Contorno Region) as the study object. For the construction phase of the computational model, the AnyLogic software was used, which made it possible to simulate nine different scenarios, considering variations in the speeds of buses and bicycles, as well as the presence or absence of bike lanes, weather conditions, and traffic levels. The model validation involved collecting field data via GPS, related to speed, location, time, and elevation of bicycle displacements in the study region. Significance tests indicated that the averages of the simulated and real data are statistically equivalent, thus validating the developed computational model. At the end of the simulation, it was possible to obtain the travel times for each type of transport. The comparative analysis between the modes revealed a significant advantage in the deployment of shared bicycles: for short distances, the reduction in travel time with the use of bicycles was up to 61% compared to buses. However, it is necessary to highlight that choosing this active mode of transportation requires physical effort, which may be a limiting factor for some users.

Keywords: Public transportation; shared bicycles; sustainable urban mobility; modeling and simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade de publicações por país na base Scopus	19
Figura 2 – Quantidade de publicações por ano na base Scopus	20
Figura 3 – Quantidade de publicações por área na Web of Science.....	21
Figura 4 - Nuvem de palavras.....	22
Figura 5 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	26
Figura 6 - Etapas do processo de modelagem e simulação	31
Figura 7 - Características de um agente.....	34
Figura 8 - Classificação da pesquisa	39
Figura 9 – Identificação dos limites da região de estudo (em vermelho).....	40
Figura 10 – População usuária do transporte público por faixa etária	41
Figura 11 – Identificação da Vila Paquetá (em amarelo)	42
Figura 12 – Identificação do Centro de Belo Horizonte (em amarelo)	42
Figura 13 - Mapa com as rotas de bicicleta e ônibus	43
Figura 14 - Mapa com locais de origem (em verde) e de destinos (em vermelho)	47
Figura 15 - Código de tomada de decisão	48
Figura 16 - Fluxograma dos usuários	49
Figura 17 - Fluxograma dos ônibus.....	50
Figura 18 - Fluxograma das bicicletas.....	51
Figura 19 - Fluxograma com a visão geral dos processos do modelo.....	51
Figura 20 - Ambiente de desenvolvimento do modelo de simulação.....	54
Figura 21 - Trajetos das linhas de ônibus	56
Figura 22 - Fluxo de interações no modelo	57
Figura 23 - Estações de bicicletas compartilhadas	58
Figura 24 – Percurso da primeira coleta de dados.....	59
Figura 25 - Distância e elevação Lagoinha/Parque Municipal.....	60
Figura 26 - Distância e elevação Lagoinha/Praça Raul Soares	60
Figura 27 – Percurso da segunda coleta de dados	61
Figura 28 - Distância e elevação Lagoinha/Praça da Liberdade	61
Figura 29 - Distância e elevação Carlos Prates/Praça da Liberdade	62
Figura 30 - Percurso da terceira coleta de dados	63
Figura 31 - Distância e elevação Carlos Prates/Praça da Assembleia.....	63
Figura 32 - Estação Afonso Arinos	64

Figura 33 - Av. Olegário Maciel	64
Figura 34 - Av. Afonso Pena	65
Figura 35 - Praça Rio Branco	65
Figura 36 - Ciclofaixa do Parque Municipal	65
Figura 37 - Av. Barbacema.....	66
Figura 38 - Probabilidade de tempo real	67
Figura 39 - Probabilidade do valor simulado	67
Figura 40 - Teste F	68
Figura 41 - Teste T	69
Figura 42 – Média de tempo - segunda a sexta - para C1 (em minutos e segundos).....	73
Figura 43 - Média de tempo - segunda a sexta - para C2 (em minutos e segundos).....	75
Figura 44 - Média de tempo - segunda a sexta - para C3 (em minutos e segundos).....	76
Figura 45 - Média de tempo - segunda a sexta - para C4 (em minutos e segundos).....	78
Figura 46 - Média de tempo - segunda a sexta - para C5 (em minutos e segundos).....	79
Figura 47 - Média de tempo - segunda a sexta - para C6 (em minutos e segundos).....	80
Figura 48 - Média de tempo - segunda a sexta - para C7 (em minutos e segundos).....	80
Figura 49 - Média de tempo - segunda a sexta - para C8 (em minutos e segundos).....	81
Figura 50 - Média de tempo - segunda a sexta - para C9 (em minutos e segundos).....	82
Figura 51 – Tempos para diferentes cenários na Rota 1 (em minutos e segundos)	83
Figura 52 - Tempos para diferentes cenários na Rota 2 (em minutos e segundos).....	84
Figura 53 - Tempos para diferentes cenários na Rota 3 (em minutos e segundos).....	85
Figura 54 - Tempos para diferentes cenários na Rota 4 (em minutos e segundos).....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações dos modelos	30
Quadro 2 - Protocolo ODD.....	34
Quadro 3 - Valores iniciais do modelo.....	52
Quadro 4 - Funções e descrição dos componentes	54
Quadro 5 - Parâmetros de entradas do modelo (<i>Inputs</i>)	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de transporte urbano da RMBH	41
Tabela 2 - Valores de entrada dos cenários principais	70
Tabela 3 - Valores de entrada cenários alternativos	71
Tabela 4 - Média de tempos para C1 (em minutos)	72
Tabela 5 - Média de tempos para C2 (em minutos)	74
Tabela 6 - Média de tempos para C3 (em minutos)	75
Tabela 7 - Média de tempos para C4 (em minutos)	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABM	<i>Agent-Based Modeling</i> , Modelagem Baseada em Agentes
Av	Avenida
BH	Belo Horizonte
BSS	<i>Bicycle-sharing systems</i> , sistemas de compartilhamento de bicicletas
GIS	<i>Geographic Information System</i> , Sistema de Informação Geográfica
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamento Global
IA	Inteligência artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ODD	<i>Overview, Design Concepts and Details</i> , Visão geral, conceitos de projeto e detalhes
ODS	Objetivo do Desenvolvimento Sustentável
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SBA	Simulação Baseada em Agentes
SED	Simulação a Eventos Discretos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral e específicos	14
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Estrutura da dissertação.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Análise bibliométrica	18
2.2	Sustentabilidade em transportes	23
2.3	Sistema de bicicletas compartilhadas	26
2.4	Barreiras e motivação para uso das bicicletas	28
2.5	Modelagem e simulação computacional	30
2.6	Simulação híbrida.....	32
2.7	Utilização da simulação em transporte.....	35
2.8	Considerações finais.....	38
3	METODOLOGIA	39
3.1	Classificação de pesquisa	39
3.2	Localização da simulação.....	40
3.3	Etapas de modelagem e simulação	43
3.3.1	Concepção.....	43
3.3.2	Implementação	44
3.3.3	Análise	45
4	MODELAGEM.....	46
4.1	Fase de concepção	46
4.1.1	Propósito e padrões	46
4.1.2	Entidades, variáveis de estado e escala.....	46
4.1.3	Usuários	46

4.1.4	Ônibus	49
4.1.5	Bicicletas.....	50
4.1.6	Visão geral do processo e programação.....	51
4.1.7	Conceitos do projeto	51
4.1.8	Inicialização e dados de entrada	52
4.2	Fase de implementação	53
4.2.1	Construção do modelo computacional.....	53
4.2.2	Coleta de dados em campo	57
4.2.3	Verificação e validação.....	66
4.3	Fase de análise.....	69
4.3.1	Cenários de simulação	69
5	SIMULAÇÃO	72
5.1	Cenários principais	72
5.2	Cenários alternativos	78
5.3	Análise dos tempos das rotas.....	83
6	DISCUSSÕES.....	86
7	CONCLUSÕES.....	89
7.1	Limitações e trabalhos futuros	91
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

Durante o século XX, os automóveis se tornaram o meio de transporte predominante em todo o mundo, devido à sua capacidade de atender às crescentes demandas individuais, oferecendo independência e flexibilidade. O enfoque predominante do planejamento urbano tem sido direcionado para o automóvel, sendo amplamente influenciado pela natureza do zoneamento urbano (MATTIOLI *et al.*, 2020).

Esse contexto tem ocasionado consequências negativas para a sociedade, tais como congestionamentos, insegurança no trânsito, devido ao grande volume de veículos, velocidades das vias e poluição do ar resultante da emissão de dióxido de carbono (CO₂) (ZHAO *et al.*, 2020).

No estado de Minas Gerais, a frota de veículos teve um aumento percentual de 82,71% nos últimos 11 anos (IBGE, 2022). Isso tem dificultado a locomoção nas cidades, devido à precariedade das vias e falta de estrutura dos serviços de transporte público (RUBIM; LEITÃO, 2013).

O transporte público por ônibus desempenha um papel fundamental na mitigação dos problemas causados pelo excesso de automóveis. Ele oferece uma alternativa mais sustentável e eficiente em termos de espaço urbano e recursos naturais. Além disso, promove a inclusão social, permitindo que pessoas de diferentes estratos sociais tenham acesso a serviços e oportunidades.

De acordo com o levantamento feito pela MOOVIT (empresa israelense de mobilidade como serviço, com foco em informações de transporte público e de navegação), em Belo Horizonte, atualmente, o tempo de espera dos usuários de ônibus é, em média, de 24 minutos, sendo o segundo maior tempo de espera do país, perdendo somente para Recife, no qual a média é de 27 minutos (BORGES, 2022).

Devido aos consideráveis tempos de espera para a utilização do transporte público, é necessário compreender a relação dos usuários com esses períodos de espera. Assim, por meio de uma pesquisa utilizando a aplicação de *best-worst*, demonstrou-se que os usuários estão dispostos a se locomover para outros pontos de embarque, localizados em até 520 metros dos pontos de partida, para reduzir o tempo de espera dos ônibus em até 10 minutos (LARRANAGA *et al.*, 2021).

A mobilidade ativa é uma das alternativas para reduzir os problemas causados pelos deslocamentos com automóveis, sendo a bicicleta e a caminhada os meios mais comuns (SCHUIJBROEK *et al.*, 2013; BANDEIRA *et al.*, 2017). Nesse sentido, o

compartilhamento de bicicletas emerge como uma solução para esses problemas e se torna cada vez mais popular nas cidades brasileiras (MIÑANO; SANTOS, 2015).

O conceito de bicicletas compartilhadas diz respeito a viabilizar aos usuários a possibilidade de retirar uma bicicleta em um determinado local (estações de bicicletas) e devolvê-la em outro, facilitando a utilização do transporte. Trata-se de um sistema de aluguel de bicicletas, o que significa que qualquer usuário pode utilizar as bicicletas, desde que estejam disponíveis no local (ITDP, 2018).

O modelo de compartilhamento de bicicletas apresenta-se como uma boa alternativa, visto que tem como característica ser um meio de transporte rápido, oferecendo uma solução eficiente e barata para deslocamentos de última milha (GUZMAN *et al.*, 2020). Uma vez que as bicicletas são mais eficientes, flexíveis e velozes em comparação aos pedestres, a sua integração com o transporte público pode oferecer uma locomoção mais ágil (BOARETO, 2010).

De acordo com Ferreira (2018), foram identificadas diversas razões para o uso de bicicletas compartilhadas, abrangendo motivações econômicas, como a redução de gastos em transporte ou combustíveis; motivações socioambientais, como a redução de poluição e o congestionamento urbano; e motivações relacionadas ao bem-estar, como conveniência e a prática de atividades físicas ao ar livre, além da substituição de carros e ônibus.

Nesse sentido, esta dissertação se propõe a criar um modelo de simulação que auxilie na implantação de estações de bicicletas compartilhadas, acrescentando ao sistema de transporte público mais uma alternativa para pequenas distâncias. Assim, por meio de simulações, é possível visualizar diversos cenários nos quais o transporte possa ser realizado utilizando as bicicletas, obtendo valores de tempo a partir do modelo. Isso, por sua vez, auxilia na tomada de decisão tanto para a implantação de estações quanto para possíveis melhorias na criação de infraestruturas nos locais de análise e estudo.

1.1 Objetivo geral e específicos

O objetivo do trabalho é desenvolver e aplicar um modelo de simulação híbrida para a análise de sistemas de transporte urbano com bicicletas compartilhadas, integrando duas metodologias: a Simulação Baseada em Agentes (SBA) e a Simulação de Eventos Discretos (SED). Com o modelo, será possível comparar os tempos de deslocamento entre dois modos de transporte distintos, ônibus e bicicleta, e assim analisar os dados temporais para determinar se há vantagens no uso da bicicleta para trajetos curtos. Os objetivos específicos deste trabalho incluem:

- Coletar dados reais em campo para que o modelo possa ser aplicado em um grande centro urbano brasileiro;
- Validar o modelo de bicicleta compartilhada da cidade de estudo;
- Comparar os tempos de deslocamentos entre os modos de transportes.

1.2 Justificativa

Em locais onde o transporte público se mostra ineficiente, observa-se a dependência por transportes individuais (DUPUY, 2016). O que gera uma quantidade excessiva de automóveis, apontada como uma das principais fontes de poluição e congestionamento nos centros urbanos (BRITO, 2013).

O uso de bicicletas como alternativa de transporte apresenta potencial para atender às necessidades socioeconômicas da população de países em desenvolvimento, principalmente em países da América Latina. Nesse contexto, observa-se que nem todos têm acesso ao transporte público e, assim, o uso de bicicletas pode ser mais uma opção de locomoção para essa parte da população (MARICATO, 2014).

A locomoção por meio de bicicletas possui características que atendem à sustentabilidade ambiental, social e econômica (GÖSSLING, 2016). Além disso, a prática do ciclismo está relacionada a um menor risco de doenças cardíacas, mortalidade e câncer (CELIS-MORALES *et al.*, 2017).

Segundo Aziz *et al.* (2018), a importância das bicicletas e dos modos de transporte ativos é destacada na promoção de infraestruturas abrangentes e na mitigação das emissões de carbono.

No que diz respeito a infraestrutura, a cidade de Belo Horizonte, local de estudo, tem implementado, desde 2010, rotas cicloviárias na cidade, incentivando a locomoção com o uso de bicicletas, compartilhadas ou não. Nos últimos 12 anos foram implementados 105,9 km de rotas cicloviárias na cidade, de acordo com dados da prefeitura de Belo Horizonte (BHTRANS, 2023). Ao mesmo tempo, observa-se também o aumento no número de bicicletas na última década, cerca de 400%, em toda a América Latina. Uma pesquisa realizada entre 2019 e 2021, em 13 países, aponta mais de 75 sistemas de bicicletas compartilhadas, sendo o Brasil, o país que mais oferece esse tipo de serviço - cerca de 33% do total (MOBILIDADE, 2023).

Em todo o mundo, observa-se a tendência dos governos em aumentar a variedade de modos de transporte sustentáveis, incentivando a caminhada e o ciclismo (FRANÇA, 2014). Integrações entre ciclovias possibilitam a expansão de sua área de atuação, atraindo

mais usuários em comparação com as áreas de caminhada (KAGER, 2016; RIJSMAN, 2019).

A integração das redes cicloviárias com o sistema de transporte público favorece diversas camadas sociais, estimulando o deslocamento por essas vias para fins profissionais, escolares, culturais ou de lazer, proporcionando igualdade de acesso e reduzindo gastos públicos (FERNÁNDEZ-HEREDIA; MONZÓN; JARA-DÍAZ, 2014).

A crescente expansão das áreas urbanas em todo o mundo traz consigo desafios significativos de mobilidade, exigindo soluções inovadoras. Nesse contexto, os sistemas de bicicletas compartilhadas emergem como uma resposta eficaz para a melhoria da mobilidade urbana. No entanto, a implantação bem-sucedida desse modelo requer uma análise criteriosa e estratégica. Nesse contexto, os modelos de simulação desempenham um papel crucial ao oferecer às autoridades de planejamento urbano a capacidade de explorar diversos cenários e antecipar desafios na tomada de decisão.

Segundo Aziz *et al.* (2018), a Modelagem Baseada em Agentes, em inglês, *Agent-Based Modeling* (ABM) pode ser usada para examinar os efeitos das estruturas voltadas a esse tipo de transporte, visando aprimorar o planejamento e a alocação eficiente de recursos. Os modelos criam e incorporaram agentes com características sociodemográficas, estabelecendo conexões entre deslocamentos utilizando bicicletas.

Alves *et al.* (2019) aplicaram a metodologia de simulação para representar um modelo de entrega de comércio eletrônico na cidade de Belo Horizonte, demonstrando que a ferramenta foi eficiente nas interações em situações diversas entre os agentes. Outro método, chamado de simulação híbrida, foi utilizado para análise de capacidade de um sistema ferroviário. A combinação de mais de uma técnica de simulação, demonstrou-se bastante promissora ao apresentar resultados mais realistas (CAMARGO; CUNHA, 2012).

Diante dos benefícios destacados das bicicletas compartilhadas e da simulação como uma valiosa ferramenta de análise, esta pesquisa visa desenvolver um modelo de simulação que sirva como suporte decisório para a implementação de infraestrutura de bicicletas compartilhadas em grandes centros urbanos. Além disso, pretende-se criar um modelo replicável que possa ser aplicado em diferentes contextos urbanos, ampliando assim o alcance e a utilidade dessa abordagem.

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho está estruturado em sete capítulos. O primeiro, com a introdução, objetivos gerais e justificativa, contextualiza o tema da pesquisa. O segundo capítulo dedica-se à fundamentação teórica da pesquisa, que traz inicialmente uma análise bibliométrica para a compreensão do estado da arte em compartilhamento de bicicletas. Posteriormente, são explicados os conceitos de sustentabilidade em transportes, simulação híbrida e simulação computacional.

O Capítulo 3 traz a metodologia de pesquisa e as principais etapas de modelagem e simulação. O Capítulo 4 descreve a modelagem necessária para a simulação, transitando pelas três fases para seu desenvolvimento. Estas etapas abarcam integralmente todas os passos necessários para a concepção e implementação de um sistema abrangente de modelagem e simulação. O capítulo 5 detalha os resultados obtidos por meio da execução das simulações. O capítulo 6 traz as discussões do trabalho, seguido das conclusões, no capítulo 7.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo fornece a base teórica essencial para facilitar a compreensão da parte conceitual do trabalho, incluindo seus temas e conceitos-chave. Para construir essa base teórica, foram consultados diversos recursos, tais como artigos, livros, revistas, *sites*, notícias, dissertações e teses.

2.1 Análise bibliométrica

Uma análise bibliométrica foi realizada para melhor compreensão do tema e seus principais estudos, além de obter um entendimento mais aprofundado sobre o assunto. Para isso, foram pesquisados trabalhos nas bases *Scopus* e *Web of Science*, ambas escolhidas por apresentarem forte relevância nos estudos em Ciências Exatas e Engenharia.

Para a análise bibliométrica, inicialmente utilizou-se a base *Scopus*, na qual foram pesquisados os principais termos utilizados na literatura. O comando de pesquisa envolveu os seguintes termos: *TITLE-ABS-KEY ("public" OR "transportation") AND ("bike" AND "sharing") AND ("simulation" OR "simulation Agent-based")*. Como resultado de busca, foi encontrado um total de 1.257 documentos.

Posteriormente, foram aplicados os filtros temporais, restringindo-se ao período de 2018 a 2022, e os seguintes termos-chave foram empregados: *"bicycles"*, *"public transportation"*, *"urban transportation"* e *"public transport"*, limitando a área de pesquisa à Engenharia e o idioma ao inglês. Após a aplicação desses filtros, foram identificados um total de 125 artigos relevantes sobre o tema em questão.

Conforme Figura 1, dos países citados, a China teve mais publicações, 32 publicações no total, seguida pelos Estados Unidos, com 18 publicações, e Polônia, com 13 publicações. Em sua maioria, as publicações são das áreas de Engenharia, Ciência da Computação e Ciências Sociais.

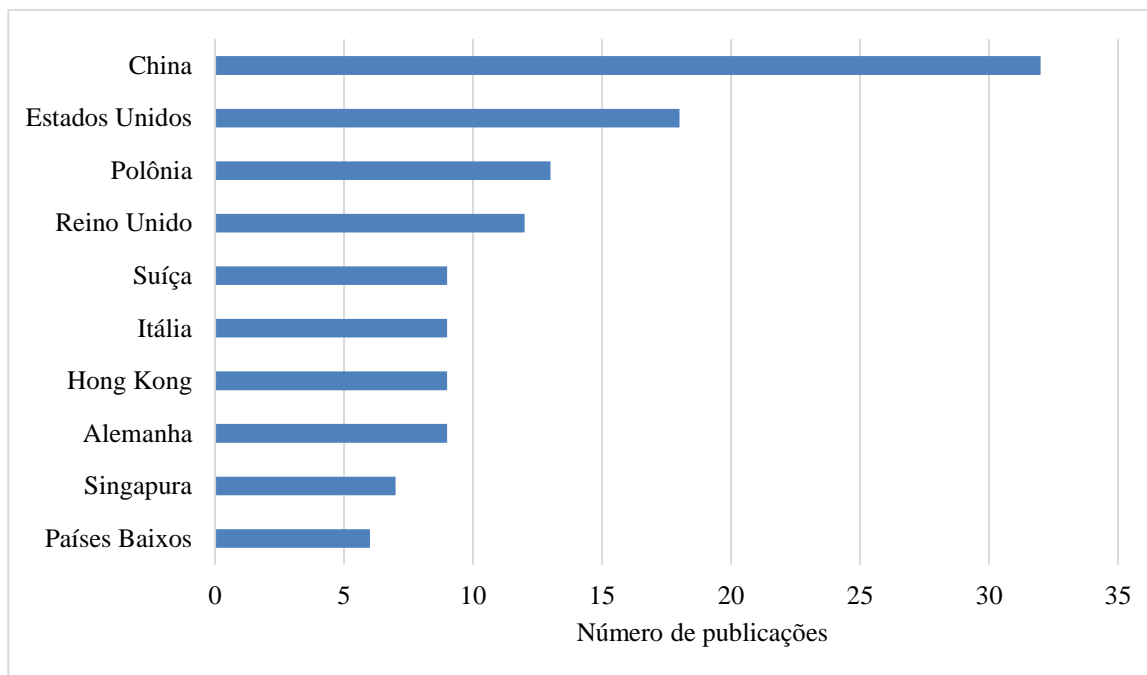


Figura 1 - Quantidade de publicações por país na base Scopus
Fonte: Adaptado de Elsevier (2022)

A maioria dos estudos descreve otimizações de modelos para locais de implantação de bicicletas e patinetes, de forma a acrescentar ao transporte público da cidade ou país de estudo. Existem trabalhos de modelagem matemática para resolver problemas de implantação desse tipo de transporte, porém, nenhum que envolva agentes que possam ser alterados nos modelos.

Pode-se notar um interesse crescente em publicações sobre os temas a partir do ano de 2018, período em que a tecnologia para implantação desse tipo de sistema já estava bastante avançada, demonstrando a preocupação e influência dos meios acadêmicos em relação ao assunto de estudo. O interesse crescente pelo tema gerou, no ano de 2022, a publicação de 22 artigos no período, conforme a Figura 2.

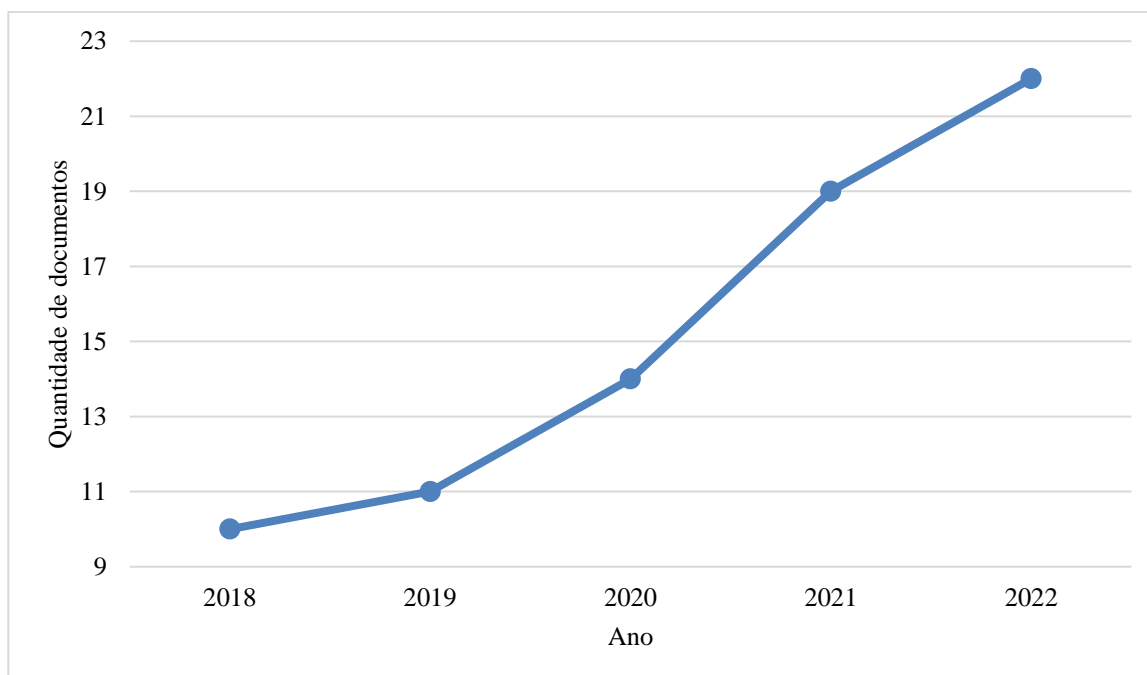


Figura 2 – Quantidade de publicações por ano na base Scopus

Fonte: Adaptado de Elsevier (2022)

Conforme destacado por Yan *et al.* (2019), os sistemas de bicicletas públicas devem ser apresentados de maneira mais clara, visando facilitar a experiência dos usuários em seus deslocamentos, possibilitando que alcancem seus destinos com maior rapidez e eficiência. Além disso, é essencial implementar uma estratégia tarifária inteligente para tornar essa transferência entre modos de transporte mais atraente, o que, por sua vez, contribuirá para atrair um número maior de usuários para o sistema de transporte público.

Existem trabalhos em diversas áreas, inclusive em Ciência da Computação, nos quais, é possível criar análises por meio de Inteligência Artificial (IA) a partir de dados coletados, tanto do perfil do usuário quanto de dados socioeconômicos do usuário, que permitem avaliar aspectos tanto espaciais quanto de interesse em cada localização. No estudo de Guo *et al.* (2018), foram coletados dados de 330 estações de sistemas de compartilhamento de bicicletas, do inglês, *bicycle-sharing systems* (BSS). Os métodos utilizados com a aplicação de IA demonstraram benefício prático para análise e replicação das distribuições de estações ao longo do histórico.

Hu *et al.* (2019) apresentam uma análise e otimização dos BSS no Colorado, destacado sua integração ao sistema de transporte público, com o objetivo de promover um transporte sustentável e reduzir os impactos nas áreas urbanas. Portanto, é de suma importância examinar e analisar os padrões de comportamento dos ciclistas com base no

histórico de dados de viagens, a fim de compreender esses comportamentos e, posteriormente, otimizar os BSS.

Utilizou-se também a base *Web of Science*, aplicando os mesmos termos de pesquisa e filtros inseridos inicialmente na base *Scopus*. Desta forma, foram encontrados 30.491 resultados. Em seguida, com a aplicação dos filtros, obteve-se um total de 311 artigos para serem analisados.

Conforme apresentado na Figura 3, as áreas com maior número de publicações são: Tecnologia em Ciência de Transportes, com 160 artigos, seguida por Transportes, com 87 artigos, e Engenharia Civil, com 64 artigos.

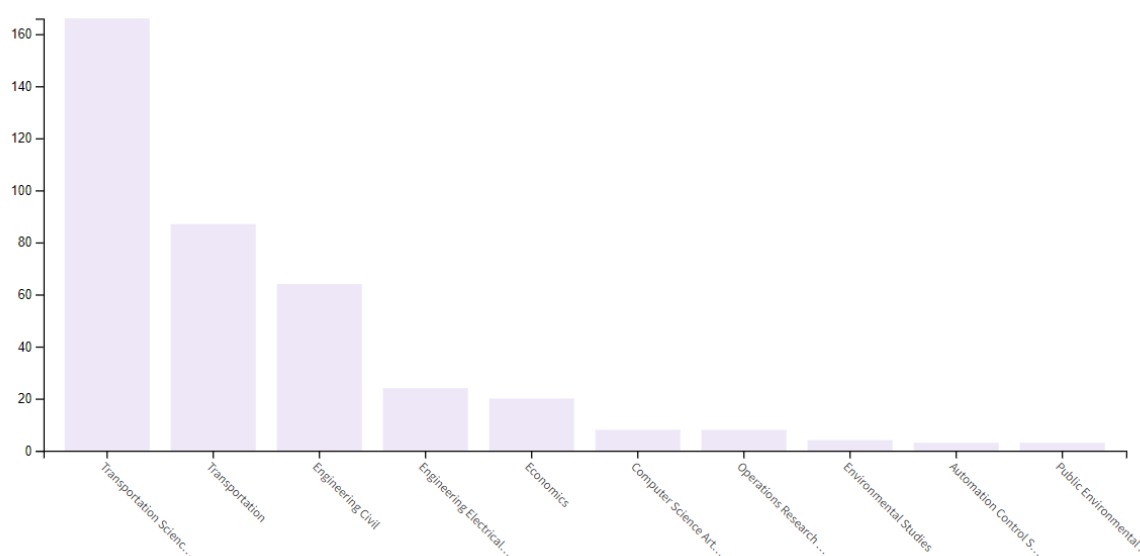


Figura 3 – Quantidade de publicações por área na *Web of Science*

Fonte: Adaptado de Clarivate (2022)

Posteriormente, após a coleta das palavras-chave da pesquisa, uma nuvem de palavras (Figura 4) foi gerada para visualizar a frequência dos termos utilizados. Os termos mais recorrentes na pesquisa incluem: *transportation*, *simulator*, *public*, *agent-based*, *mobility* e *bike-sharing* que significam, em português, transporte, simulador, público, baseado em agentes, mobilidade e compartilhamento de bicicletas, respectivamente, a nuvem de palavras foi feita com ambas as bases utilizadas para este trabalho.

crescimento significativo no número de publicações sobre o tema nos últimos anos, refletindo a atual relevância dessa questão. Com as informações obtidas, foi possível compreender melhor o tema e visualizar o cenário das pesquisas atuais sobre o assunto, bem como oportunidades de contribuição.

2.2 Sustentabilidade em transportes

Segundo Alpkokin *et al.* (2016), alcançar a sustentabilidade social, ambiental e econômica é um dos grandes desafios contemporâneos. No âmbito dos transportes, os fatores que contribuem para que a sustentabilidade seja alcançada incluem o uso de transportes coletivos com baixa emissão de CO₂ (transporte verde), veículos não motorizados, como as bicicletas, e a caminhada.

O transporte sustentável possui as seguintes características: redução dos níveis de ruído, redução de congestionamento, proteção da fauna, promoção do crescimento econômico, redução de acidentes e mortes, aumento do turismo, melhoria de ruas, melhoria no acesso a bairros habitados e minimização da criminalidade relacionada ao transporte público (HOLDEN *et al.*, 2013).

Existem estratégias governamentais para um sistema de transporte sustentável, nas quais os usuários são incentivados e persuadidos a utilizar mais o transporte "verde" no sistema público, caminhar e utilizar bicicletas (NAKANISHI; BLACK, 2015). Essas estratégias estão alinhadas para a redução das emissões de CO₂ e estão relacionadas ao melhor uso da infraestrutura no sistema de transporte, sendo um desafio implementá-las (HICKMAN *et al.*, 2013).

Os sistemas de transporte desempenham um papel importante na construção de um sistema sustentável, promovendo acessos econômicos e sociais (RICHARDSON, 2005). As cidades ao redor do mundo enfrentam diariamente engarrafamentos causados por um número excessivo de automóveis, que são responsáveis por emissões de gases que prejudicam o ambiente, além de gerar custos sociais; desta forma, o desenvolvimento sustentável e o transporte estão relacionados (MILLER *et al.*, 2016).

Com o baixo impacto ambiental, as bicicletas se mostram eficientes quando há a necessidade de deslocamentos com distâncias inferiores a 5 km. Assim, tornam-se uma alternativa para competir com os veículos motorizados, dispensando o uso de combustíveis fósseis e ocupando menos espaço urbano (LITMAN, 2014).

A utilização de bicicletas como meio de transporte aumentou em várias regiões do mundo e os governos em alguns lugares buscam promover esse tipo de transporte com o

objetivo de focar nos benefícios relacionados à saúde proporcionados pelo deslocamento ativo (BOARETO, 2010).

Machi, Alonso e Ruchti (2015) conduziram uma pesquisa centrada na sustentabilidade do transporte público, com foco no uso das bicicletas como um modo sustentável na cidade de São Paulo. O estudo inclui uma análise de caso da trilha norte-sul na cidade. Os resultados do estudo revelaram que, em São Paulo, o transporte predominante ainda é realizado por veículos motorizados. No entanto, foi destacado um aumento significativo de 200% no número de bicicletas ao longo de um período de 10 anos. Este aumento levanta questões sobre a viabilidade de integrar a bicicleta ao sistema de mobilidade urbana.

Os mesmos autores também exploraram a possibilidade de implementar uma infraestrutura verde como meio de atender aos critérios ambientais relacionados ao transporte. Isso envolve mudanças na infraestrutura urbana, incluindo a criação de parques, sistemas de infiltração de água e aumento da arborização. Essas medidas reforçam a importância de buscar novas abordagens para alcançar um transporte sustentável em cidades densamente povoadas. Além disso, destacam a necessidade de desenvolver soluções que possam ser implementadas de forma prática e integradas ao ambiente urbano, tornando-as não apenas uma opção, mas também uma realidade, com implementação de uma infraestrutura nas cidades. Isso implica em modificar a infraestrutura urbana para incluir parques, sistemas de infiltração de água e aumento da arborização. Essas medidas não só atendem aos critérios ambientais relacionados ao transporte, mas também contribuem para a sustentabilidade urbana.

O tema da sustentabilidade tem sido uma grande preocupação para a sociedade moderna, se tornando um aspecto importante para as atuais comunidades, pois suas atividades implicam diretamente na qualidade de vida dos indivíduos e na conscientização dos principais problemas que causam danos ambientais (HIPOGROSSO; NESMACHNOW, 2020).

Segundo a Comissão Mundial em Desenvolvimento e Meio Ambiente, *World Commission on Environment and Development* (1987), existe a necessidade de investir em um transporte eficiente e com um bom planejamento, com a intenção de melhorar a qualidade de vida das populações que o utilizam, além de preservar o ambiente. O desenvolvimento sustentável deve ser analisado em três dimensões, que são:

- **Ambiental:** Envolve a redução do impacto ambiental do transporte, incluindo a diminuição da poluição do ar, a redução das emissões de gases de efeito estufa

e a preservação de recursos naturais. Isso é alcançado por meio de veículos com baixas emissões e infraestrutura amigável ao meio ambiente.

- **Econômica:** Concentra-se na viabilidade financeira do sistema de transporte, buscando otimizar custos, estimular a economia local e tornar o transporte acessível e eficiente em termos de custos para os usuários. Isso envolve estratégias de financiamento sustentável e geração de empregos na área de transporte.
- **Social:** Trata da acessibilidade e equidade no transporte, garantindo que todas as comunidades tenham acesso igualitário a serviços de transporte. Além disso, promove a segurança dos usuários, a qualidade do transporte público e modos de transporte que melhorem a qualidade de vida das pessoas, como caminhar e pedalar.

A mudança para meios de transporte mais inovadores e sustentáveis possui uma participação importante para a realização dos objetivos da União Europeia em relação aos temas energia e clima. Com o aumento da capacidade de locomoção das pessoas, o setor de transporte da União Europeia vem tentando encontrar respostas para algumas questões, como a sustentabilidade. Uma questão crítica levantada é se a dependência contínua do petróleo para atender às necessidades energéticas dos transportes é uma abordagem econômica e ambientalmente sustentável (UNIÃO EUROPEIA, 2022).

De acordo com as Nações Unidas, o desenvolvimento sustentável é realmente atingido quando se alcança uma equidade econômica, social e ambiental de forma organizada. Nesse sentido, em uma conferência realizada no Rio de Janeiro, foram abordados 17 tópicos (Figura 5) enfrentados no Brasil e no mundo para alcançar uma sociedade mais sustentável, chamados de Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (NAÇÕES UNIDAS, 2015).



Figura 5 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
Fonte: Nações Unidas (2015)

No contexto de um dos tópicos sobre "Cidades e Comunidades Sustentáveis", um de seus objetivos é estabelecer um sistema de transporte público que seja acessível, seguro e sustentável para todos, independentemente de sua classe social. Isso inclui aprimorar as infraestruturas viárias, tornando-as mais seguras, bem como garantir maior acessibilidade para pessoas em situações vulneráveis (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

A mobilidade urbana possui influência e efeito sobre o ambiente e a qualidade de vida no aspecto local e global. Um mal planejamento das formas de locomoção pode influenciar grupos ao utilizarem transporte individualmente, corroborando para aumento das emissões de gases (BOARETO, 2010).

2.3 Sistema de bicicletas compartilhadas

Em primeiro lugar, é essencial compreender o conceito de sistema de bicicletas compartilhadas ou sistema de compartilhamento de bicicletas (BSS), que envolve a disponibilidade de bicicletas por um período determinado, podendo ou não haver a cobrança de uma tarifa pelo tempo de utilização.

Dentre os modelos mais utilizados há a cobrança de uma tarifa por hora utilizada ou tarifas mensais. O BSS viabiliza aos usuários a possibilidade de retirar as bicicletas de

um certo local e devolvê-las em outro, facilitando sua utilização, já que se trata de um aluguel de bicicletas (ITDP, 2018).

O BSS surgiu como uma alternativa ao transporte público, promovendo o uso de bicicletas como meio de transporte ativo. Ao longo do tempo, esse tipo de sistema passou por diversas gerações, cada uma com suas definições e características específicas.

A primeira geração surgiu por volta de 1965, idealizada pelo engenheiro holandês Luud Schimmelpennink. O sistema consistia na disponibilização de bicicletas pintadas de branco para uso comum, permitindo que qualquer cidadão as utilizasse e as deixasse onde desejasse, sem limite de tempo. No entanto, devido a furtos, a ideia foi descontinuada (ITDP, 2018; ITAÚ, 2022). As características dessa geração são:

- Ausência de registro do usuário;
- Inexistência de tarifa ou qualquer tipo de cobrança;
- Ausência de limite de tempo para a utilização;
- Falta de estações fixas para as bicicletas;
- Bicicletas simples e comuns.

A segunda geração surgiu em 1995, na Dinamarca, e apresentava características mais robustas. As bicicletas permaneciam presas aos paraciclos e só eram liberadas após a inserção de uma moeda. Não havia limite de tempo para a utilização e, ao devolver a bicicleta em uma estação, o usuário recebia de volta a quantia depositada como garantia. Experiências similares foram realizadas em outros países, como Alemanha, Noruega, Austrália e Portugal (RABELLO, 2019). As características dessa geração são:

- Ausência de registro do usuário;
- Ausência de controle de tempo determinado;
- Bicicletas presas em estações;
- Empréstimo com garantia utilizando moedas;
- Bicicletas mais resistentes e específicas.

Com o avanço da tecnologia, tornou-se possível identificar o usuário e a bicicleta utilizada. Em 1996, o sistema foi implementado na Universidade de Portsmouth, na Inglaterra, utilizando um cartão magnético para alugar a bicicleta por um certo período. O que reduziu a possibilidade do monopólio no uso da bicicleta pelo usuário, além de diminuir os furtos. Com os avanços, surgiram também as docas e as travas eletrônicas, marcando a terceira geração de bicicletas compartilhadas (RABELLO, 2019; ITDP, 2018). As características dessa geração são:

- Grande influência da Tecnologia da Informação;
- Identificação dos usuários;
- Controle de tempo e cobrança baseada no tempo de utilização;
- Bicicletas com características que as tornam mais duráveis.

Quanto à quarta geração, ainda há dúvidas em relação a seu modelo e definições, porém existem algumas predefinições a respeito dessa geração. Sua concepção pode se basear na modularidade das estações, sustentabilidade e autonomia de energia nas bases, eliminando a necessidade de fundações para implantação (RABELLO, 2019).

No Brasil, desde 2008, esse tipo de sistema de transporte se tornou realidade na capital do Rio de Janeiro, com o sistema chamado Samba, encerrado entre 2010 e 2011. Em seguida, surgiu a parceria com o Itaú, resultando no *Bike Rio*, popularmente conhecido como "laranjinha". O *Bike Rio*, até 2015, já contava com 260 estações espalhadas pela cidade (LOBO, 2018).

2.4 Barreiras e motivação para uso das bicicletas

Segundo Battiston *et al.* (2017), as principais barreiras apontadas pelos estudos estão diretamente relacionadas à infraestrutura, como a ausência de ciclovias e bicicletários, cobertura irregular do solo e falta de sinalização. Além disso, as questões climáticas, como chuva e neblina, também são mencionadas como obstáculos. Por outro lado, os aspectos de saúde e economia são apontados como os principais incentivos para o uso da bicicleta.

Pezzuto e Sanches (2004) realizaram um estudo para descobrir quais aspectos influenciam na escolha da bicicleta como meio de transporte. A pesquisa foi conduzida com adolescentes divididos em três grupos: ciclistas (que a utilizam para viagens utilitárias), ciclistas casuais (apenas para lazer e exercícios) e não usuários de bicicletas. Os fatores identificados foram conforto e segurança, sendo que o primeiro teve maior importância em comparação ao segundo. O conforto está relacionado à própria bicicleta, que não é muito confortável, e a segurança envolve fatores como colisões com veículos motorizados e assaltos.

De acordo com Largura (2012), as barreiras que impedem o uso das bicicletas são: a falta de ciclofaixas e a falta de segurança no trânsito. Com a presença desses dois fatores, facilitaria o uso desse tipo de transporte. Esse resultado vai ao encontro do trabalho encontrado em Wahlgren e Schans (2011). Steil *et al.* (2017) adicionam ao tema descrevendo que a segurança é um aspecto importante a ser considerado ao optar por

utilizar a bicicleta como meio de locomoção. Além disso, um melhor desenvolvimento das estruturas das ciclovias, quando bem projetadas, aumenta a qualidade de vida das pessoas.

De acordo com Battiston *et al.* (2017), em relação à infraestrutura, os aspectos que podem facilitar o uso da bicicleta incluem faixas exclusivas, locais para estacionamento de bicicletas e acesso simplificado aos locais, possibilitando deslocamentos rápidos com baixo impacto ambiental. A presença de árvores ao longo das rotas de deslocamento também pode incentivar o uso da bicicleta. Além dos benefícios econômicos, a utilização da bicicleta também traz benefícios para a saúde, gerando bem-estar psicológico ao pedalar, especialmente quando acompanhado por outras pessoas. Além dos fatores relacionados à infraestrutura, também existem aspectos culturais e sociais que são barreiras ao uso da bicicleta. Assim, são mencionados o suor ou a sujeira nas roupas ao usar a bicicleta e a percepção negativa que as pessoas têm em relação aos ciclistas (FRANCO, 2011; OLIVEIRA, 2012).

Apesar de apresentar alguns aspectos negativos em relação ao uso desse tipo de transporte, é importante ressaltar que os deslocamentos feitos por bicicleta trazem benefícios tanto para os indivíduos quanto para a sociedade. Esses benefícios incluem a ausência de ruídos e poluição, ocupação reduzida de espaço nas áreas urbanas, preservação do solo das infraestruturas viárias, diminuição de congestionamentos e perdas econômicas, economia de tempo e dinheiro consideráveis, e garantia de deslocamentos rápidos em curtas distâncias (COMISSÃO EUROPEIA, 2000).

Em suma, apesar das barreiras relacionadas à infraestrutura, clima, conforto e segurança, o uso da bicicleta como meio de transporte apresenta inúmeros benefícios em termos de saúde, economia, preservação ambiental e qualidade de vida. Para promover seu uso, é necessário investir em infraestrutura adequada, como a criação de ciclovias e bicicletários, melhorias na segurança viária e conscientização da população sobre os benefícios desse meio de transporte.

Essas informações reforçam a importância de realizar estudos e implementar medidas para superar as barreiras existentes e incentivar o uso da bicicleta como parte de um sistema de transporte sustentável em diferentes contextos urbanos. Com esforços conjuntos dos governos, planejadores urbanos e comunidades, é possível criar ambientes propícios ao uso da bicicleta, promovendo benefícios individuais e coletivos, além de contribuir para a construção de cidades mais sustentáveis e saudáveis.

2.5 Modelagem e simulação computacional

A simulação tem como objetivo reproduzir um sistema de maneira análoga a realidade por meio da utilização de um modelo. Um sistema é definido por um agrupamento de elementos reais que interagem entre si, com a intenção de atingir um objetivo em comum (CHWIF; MEDINA, 2015). Um modelo é uma reprodução simplificada da realidade, idealizado para um objetivo específico (ROBINSON, 2011).

Através da simulação, é possível solucionar vários problemas sem intervir de forma direta no objeto de estudo. A criação de um modelo conceitual pode colaborar na etapa de coleta de dados, agilizando a elaboração do modelo computacional (MONTEVECHI *et al.*, 2010). A simulação é uma ferramenta essencial na resolução de problemas reais, possibilitando a realização de modificações do sistema, antes que sejam inseridas ou implantadas, antecipando assim, as tomadas de decisão e reduzindo possíveis impactos negativos (BANKS *et al.*, 2010).

De acordo com Burse *et al.* (2015), a simulação é uma ferramenta eficaz que pode ser empregada nos contextos empresariais, auxiliando e apoiando no gerenciamento e nas operações de produção. Pidd (2004) acrescenta que ferramentas tradicionais não conseguem reproduzir de forma tão fiel as mudanças dinâmicas de um sistema real e, normalmente, trabalham com valores médios dos elementos, o que engessa o número de possibilidades de cenários.

Os modelos de simulação podem ser classificados em seis tipos distintos: dinâmicos, estáticos, determinísticos, estocásticos, contínuos e discretos (LAW; KELTON, 1991). O Quadro 1 apresenta as características e modelos de simulação.

Quadro 1 - Especificações dos modelos

Característica	Modelos de simulação	
Tempo	Estáticos: Nos modelos estáticos considera-se um determinado momento, assim, o tempo não possui papel relevante.	Dinâmicos: O sistema progride de acordo com o tempo, sendo essa uma característica presente também nos modelos de simulação dinâmica.
Entrada dos dados	Determinísticos: Definido por não ter elementos de probabilidade, no modelo determinístico, os valores de entrada e as relações determinadas no modelo vão gerar dados de saída previsíveis.	Estocásticos: Sua característica está em dados de entrada aleatórios, resultando em dados de saída também aleatórios. Sendo comum nesse tipo de modelo componentes com valores probabilísticos.
Variáveis dependentes	Contínua: O modelo ocorre continuamente ao longo do tempo, não havendo alterações discretas entre os eventos. Neste tipo de simulação, os intervalos são divididos em pequenas etapas e o sistema avalia o estado em cada um dos intervalos.	Discreta: Os eventos ocorrem em momentos específicos. Como a mudança é discreta, pode-se considerar que não houve mudança entre os eventos.

Fonte: Kelton e Law (2000)

Os modelos de simulação possuem atributos próprios que são expressos por meio de características fundamentais, as quais variam de acordo com o tipo de simulação utilizada.

Para a correta aplicação de uma pesquisa de simulação, é recomendável a utilização de uma metodologia. Chwif e Medina (2015) sugerem o desenvolvimento da metodologia em três etapas principais: Concepção, Implementação e Análise. A Figura 6 apresenta a metodologia.

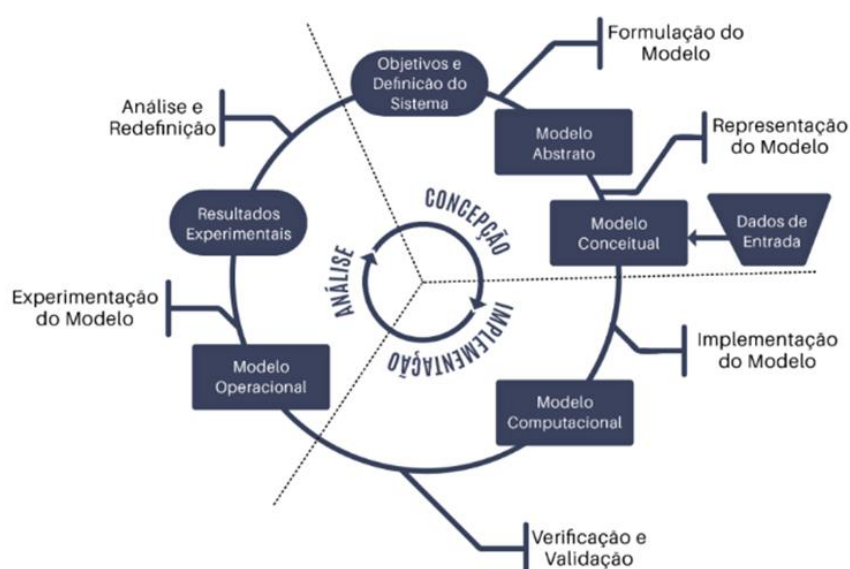


Figura 6 - Etapas do processo de modelagem e simulação

Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2019) e Chwif e Medina (2015)

Concepção (Etapa 1): tem por objetivo entender o sistema e suas variáveis para a construção do modelo conceitual, dessa forma, é necessário compreender o funcionamento do processo real, além de identificar as possíveis interações que possam ocorrer entre o modelo abstrato e conceitual, determinando o quão detalhado o modelo deve ser e as variáveis de saídas esperadas.

Implementação (Etapa 2): Nessa etapa, deve-se iniciar a elaboração do modelo computacional descrito na etapa de concepção, além de realizar os testes necessários para validação e verificação do modelo.

Análise (Etapa 3): Etapa na qual o modelo está apto a simular os cenários idealizados nas etapas anteriores, realizando os experimentos que deverão ser documentados e analisados posteriormente.

2.6 Simulação híbrida

A simulação híbrida é uma abordagem que combina diferentes técnicas de simulação para modelar e analisar sistemas complexos. Essa abordagem permite a integração de diferentes tipos de modelos, como modelos de agentes, modelos baseados em equações, modelos estocásticos, entre outros, em um único ambiente de simulação.

A principal vantagem da simulação híbrida é a capacidade de capturar a complexidade e as interações dinâmicas entre diferentes componentes de um sistema. Ela permite a modelagem de sistemas que possuem características que não podem ser adequadamente representadas por um único tipo de modelo de simulação. Por exemplo, um sistema pode ter componentes que se comportam de maneira determinística, enquanto outros são estocásticos ou baseados em regras de agentes.

Ao combinar diferentes técnicas de simulação, a simulação híbrida oferece uma visão mais abrangente e precisa do comportamento do sistema em estudo. Ela pode ser usada para explorar diferentes cenários, testar políticas e tomar decisões informadas com base nos resultados da simulação.

A simulação híbrida pode ser aplicada em várias áreas, como transporte, logística, engenharia, economia, ciências sociais e muitas outras. Ela tem sido amplamente utilizada para modelar sistemas complexos do mundo real, como redes de transporte, cadeias de suprimentos, sistemas de saúde, sistemas de energia e ambientes urbanos.

O modelo desenvolvido nesta dissertação utilizará de dois tipos de simulação: Simulação em Eventos Discretos (SED) e Simulação Baseada em Agentes (SBA), portanto, pode ser classificada como simulação híbrida.

As técnicas de simulação tornaram-se populares na modelagem de processos de produção e na representação de sistemas reais em um ambiente virtual. Nesse contexto, os modelos possuem como características fundamentais: entidades; atividades e eventos; recursos; variáveis globais; calendário; variáveis de estado do sistema; gerador de números aleatórios e coletores estatísticos (INGALLS, 2008). Assim, torna-se possível analisar vários cenários, mantendo o custo e o tempo, e eliminando a necessidade de alterações no sistema físico (AHMED; SCOBLE; DUNBAR, 2016).

Nas últimas décadas, a SED tem sido utilizada como uma das principais bases para o desenvolvimento de trabalhos da área científica (INGALLS, 2008; SIEBERS *et al.*, 2010). O seu uso teve um grande aumento devido à evolução das capacidades computacionais e um maior espaço de memória nos sistemas (NEGAHBAN; SMITH,

2014). Por meio de *softwares* de simulação, é possível, de maneira interativa, visualizar e gerar análises dos dados através da interface de saída do modelo (FAKHIMI *et al.*, 2014).

Outro tipo de simulação amplamente utilizada é a SBA, na qual é possível construir sistemas complexos, detalhados e dinâmicos. A SBA busca representar indivíduos ou grupos utilizando ferramentas digitais. Assim, um modelo de SBA pode cobrir todos os elementos lógicos, que comumente fazem parte de um modelo discreto (MACAL, 2016).

Além disso, a SBA é formada por um conjunto de elementos autônomos na tomada de decisões, que são definidos como agentes (BONABEAU, 2002). Os modelos tradicionais de simulação não consideram as “vontades” individuais de cada agente, modificando os objetivos para um interesse em comum (TANIGUCHI *et al.*, 2012).

Segundo Macal (2016), existem quatro categorias alternativas para SBA, em ordem crescente de complexidade. A primeira é a SBA individual, onde os agentes do modelo são representados individualmente e possuem características distintas. Em seguida, temos a SBA autônoma, na qual os agentes são individuais e exibem comportamentos autônomos, respondendo às condições do sistema. A terceira categoria é a SBA interativa, na qual os agentes são autônomos e interagem tanto com o ambiente quanto com outros agentes. Por fim, temos a SBA adaptativa, na qual os agentes autônomos ajustam seus comportamentos durante a simulação, podendo assim "aprender" por meio das interações.

A partir das definições das categorias estabelecidas, torna-se menos abstrato o processo de desenvolvimento de um modelo de SBA. Macal e North (2006), estabelecem que as etapas para a construção do modelo possuem algumas características específicas por se basear no ponto de vista do agente, ao invés da óptica do processo, sendo:

- **Agentes:** definir os tipos de agentes e seus atributos;
- **Ambiente:** definir o ambiente de inserção e interação dos agentes;
- **Método de agentes:** categorizar as etapas nas quais os atributos dos agentes serão alterados através das interações com o ambiente ou com os outros agentes;
- **Interações de agentes:** Inserir etapas para controlar quais agentes interagem, e como vão interagir durante a simulação;
- **Interpretação:** Analisar o modelo de agentes em um sistema digital.

Na Figura 7 é apresentado uma das possíveis interações de um agente com outros agentes e seu ambiente.



Figura 7 - Características de um agente
 Fonte: Macal *et al.* (2013)

O protocolo ODD (um acrônimo para *Overview, Design Concepts and Details*), proposto por Grimm *et al.*, (2020), consiste em uma padronização para ser aplicada na etapa de concepção dos modelos de SBA. O estudo tem como objetivo padronizar e categorizar certas etapas a serem seguidas. O protocolo proposto em 2006 por Grimm, foi modificado ao longo dos anos, sendo sua última versão apresentada no ano de 2020. A Quadro 2 ilustra essas etapas.

Quadro 2 - Protocolo ODD

Visão Geral	1. Propósito e padrões
	2. Entidades, variáveis de estado e escala
	3. Visão geral do processo e programação
Conceitos do projeto	<i>Submodelo A</i>
	<i>Submodelo B</i>
Detalhes	4. Conceitos do projeto
	5. Inicialização
	6. Dados de entrada
	7. Submodelos
	<i>Submodelo A (detalhes)</i>
<i>Submodelo B (detalhes)</i>	

Fonte: Adaptado de Grimm *et al.* (2020)

Como visto, o protocolo possui grupos de elementos divididos em três blocos, sendo eles: visão geral, conceitos de projeto e detalhes. A visão geral, possui três sub etapas que devem ser seguidas, sendo elas:

Proposito e padrões: consiste em determinar os padrões dos modelos, além de um propósito determinado no início da modelagem;

Entidades, variáveis e escala: define-se classes, estados, variáveis, escala e fluxo de processos existentes no modelo;

Visão geral do processo e programação: nessa última etapa, considera-se todas as interações, além de descrever os processos das entidades e o que cada uma faz tornando-se possível visualizar de forma mais ampla todo o processo do modelo conceitual, (GRIMM *et al.*, 2020).

O segundo elemento do grupo é chamado de conceito do projeto, e tem como objetivo descrever os conceitos mais gerais do modelo. O conceito do projeto possui onze sub etapas. Os itens que compõem esse bloco são: princípios básicos, emersão, adaptação, objetivos, aprendizado, predição, senso de detecção, interação, estocasticidade, coletivo e observação (GRIMM *et al.*, 2020). Apesar de possuir onze subitens, não é necessário desenvolver todos na construção do modelo.

No terceiro grupo, chamado de detalhes, deve-se obter informações suficientes para que o modelo possa ser replicado por outras pessoas. A fase é dividida pelas etapas de inicialização, dados de entrada e submodelo.

Para a inicialização, devem ser descritos os parâmetros ou condições nas quais o modelo se inicia. Dados de entrada: conhecidos como *inputs*, são os dados a serem trabalhados no modelo. Por fim, é necessário gerar um submodelo, com uma visão detalhada, como descrito na fase de visão geral do processo e programação (GRIMM *et al.*, 2020).

2.7 Utilização da simulação em transporte

O estudo feito por Loaiza-Monsalve e Riascos (2019) explora a atividade de usuários em BSS nas cidades de Chicago e Nova York. Os autores analisam as características temporais e espaciais da mobilidade dos ciclistas, incluindo comportamentos semanais de atividade, duração das viagens e padrões de atividade do sistema. Além disso, eles aplicam um modelo de mobilidade, classificando os deslocamentos entre estações locais e não locais. Os resultados revelam que o modelo implementado captura características espaciais dos sistemas analisados. As simulações de

Monte Carlo reproduzem as dinâmicas espaciais observadas nos dados reais, destacando a utilidade do modelo na compreensão das dinâmicas espaciais nos sistemas de compartilhamento de bicicletas. Este estudo contribui para a compreensão dos padrões de mobilidade em BSS e suas implicações para o planejamento urbano, a otimização dos sistemas de transporte e a compreensão das relações entre a mobilidade e a infraestrutura das áreas urbanas. Além disso, o artigo contribui para pesquisas futuras sobre mobilidade urbana em BSS, destacando a importância de considerar tanto as dinâmicas locais quanto as não locais para a compreensão dos padrões de deslocamento dos usuários.

Caggiani e Camporeale (2021) abordou a importância e os desafios relacionados aos BSS para promover a mobilidade urbana sustentável, destacando a necessidade de equilibrar a oferta de bicicletas com a demanda dos usuários, o que requer operações de realocação de bicicletas para compensar desequilíbrios na rede. Diversos estudos e modelos são apresentados para abordar esse problema, incluindo um modelo de programação proposto por Jia *et al.* (2021) para minimizar o custo total de realocação das frotas. Além disso, o artigo destaca a importância da infraestrutura, como a criação de uma rede de ciclovias conectadas, para incentivar o uso da bicicleta e melhorar a segurança dos ciclistas. Outro ponto abordado é a compreensão das motivações e barreiras ao uso de bicicletas compartilhadas, com estudos que exploram os fatores psicológicos de escolha dos usuários. Além disso, o artigo destaca a importância de avaliar a eficiência dos BSS e propõe métodos de avaliação dos sistemas. Por fim, os autores destacam a importância de preencher lacunas de pesquisa, como a análise de correlação interna das estações, a classificação e comparação de diferentes sistemas, e o desenvolvimento de políticas e negócios para desenvolvimento de BSS.

Fan *et al.* (2019) abordaram os desafios do equilíbrio de bicicletas em BSS, visando garantir eficiência e disponibilidade adequada. Destaca-se a importância ambientalmente amigável dos BSS na redução da poluição e congestionamento urbano. A conveniência oferecida aos usuários, que podem alugar e devolver bicicletas de forma autônoma, é destacada como um dos principais atrativos desses sistemas, impulsionada pelo avanço da tecnologia da informação. O artigo discute desafios, como prever demandas em cada estação e redesenhar rotas eficientes. Propõe um modelo que incorpora demandas não atendidas, utilizando aprendizado de máquina para prever demandas futuras. Também, é proposto um algoritmo baseado em otimização por colônia de formigas (*ant colony optimization algorithm*), adaptado para aumentar eficiência. A métrica de avaliação é a porcentagem de economia de custos média por bicicleta. Os resultados computacionais e o

estudo de caso em Hangzhou, China, fornecem *insights* esclarecedores sobre a aplicação prática das soluções e demonstram a vantagem da abordagem proposta.

Zhou (2021) abordou a análise das escolhas de modalidade de viagem entre BSS e táxis em Chicago, com foco nos fatores espaciais e temporais que influenciam tais escolhas. O estudo destaca a importância dessas opções de transporte sob demanda e flexibilidade de roteamento, bem como a relevância de compreender os padrões de mobilidade urbana para o planejamento de transporte. Além disso, a pesquisa destaca a importância de dados mais precisos, como trajetos de GPS, para aprimorar a precisão dos modelos. Para o desenvolvimento do estudo foram utilizadas as distâncias de viagem, horário do dia, direção de viagem e clima. Por fim, o artigo destacou a importância de compreender os determinantes-chave das modalidades de viagem e seu potencial impacto nas políticas de transporte urbano. Além disso, foram apontadas direções para pesquisas futuras, enfatizando a necessidade de considerar outros modos de transporte e aprimorar a precisão dos modelos por meio de dados mais detalhados.

Li *et al.* (2019) apresentaram uma análise abrangente sobre a escolha de modos de transporte, com foco no compartilhamento de bicicletas na cidade de Taiyuan, na China. O artigo destacou a importância de compreender os fatores que influenciam na escolha de modos de transporte, especialmente em cidades em desenvolvimento com altos níveis de poluição do ar. Ficou evidente a necessidade de considerar a heterogeneidade de preferências e a influência de condições ambientais, atributos de viagem e características socioeconômicas na escolha de modos de transporte. Os autores destacaram a escassez de estudos que abordam esse aspecto e a necessidade de compreender como a poluição do ar afeta a disposição das pessoas para utilizar o compartilhamento de bicicletas em contextos urbanos, além de demonstrar a preferência por viagens de curta distância neste contexto.

Soriguera e Jiménez (2020) apresentaram um modelo de simulação para BSS públicos, com o objetivo de avaliar e comparar diferentes alternativas de estrutura antes da implementação. A necessidade de serviços de mobilidade eficientes e sustentáveis nas áreas urbanas é destacada, e os BSS públicos foram apontados como uma alternativa promissora. O artigo descreveu o desenvolvimento de um modelo de simulação baseado em agentes para emular um BSS. Além disso, foram estabelecidas regras comportamentais para os agentes ativos, como usuários e equipes de reposicionamento, visando replicar o comportamento real do BSS. Em conclusão, o artigo destacou a importância do simulador como uma ferramenta para avaliar e comparar diferentes alternativas de *design* de sistemas

de compartilhamento de bicicletas antes da implementação, apoiando o processo de tomada de decisão em todas as etapas de implementação.

2.8 Considerações finais

Esse capítulo apresentou o referencial teórico contribuindo para o desenvolvimento deste trabalho além de ajudar a compreender os cenários sobre o tema abordado. Alguns dos trabalhos abordam diferentes técnicas para estudar a implantação de pontos de bicicletas compartilhadas utilizando diversas técnicas de simulação e também aplicações de algoritmos para determinar os pontos ideais para esse tipo de transporte. Além disso, foram abordados outros tópicos, sendo eles: sistema de bicicletas compartilhadas, modelagem e simulação computacional, simulação híbrida, além de uma revisão bibliométrica e a utilização da simulação em transporte. A apresentação dos conceitos facilitou o entendimento do problema apresentado que será desenvolvido ao longo desta dissertação.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a classificação da pesquisa, os métodos e as características para desenvolver o modelo, assim como suas regras e dados da área de estudo, descrevendo aspectos locais e de deslocamento.

3.1 Classificação de pesquisa

A Figura 8 traz a classificação desta pesquisa na forma de um diagrama. O método utilizado neste estudo é a modelagem e simulação. O processo de modelagem e simulação permite representar um sistema real por meio de um modelo matemático computadorizado. Esse modelo é composto por componentes ou processos que interagem com parâmetros de entrada e é capaz de fornecer resultados com propósitos definidos. Além disso, o método de modelagem e simulação permite: conhecer como o sistema opera; desenvolver políticas operacionais e recursos para otimizar o sistema; testar novos conceitos e/ou sistemas antes de implementá-los; e obter informações sem alterar o sistema atual (MIGUEL *et al.*, 2010).

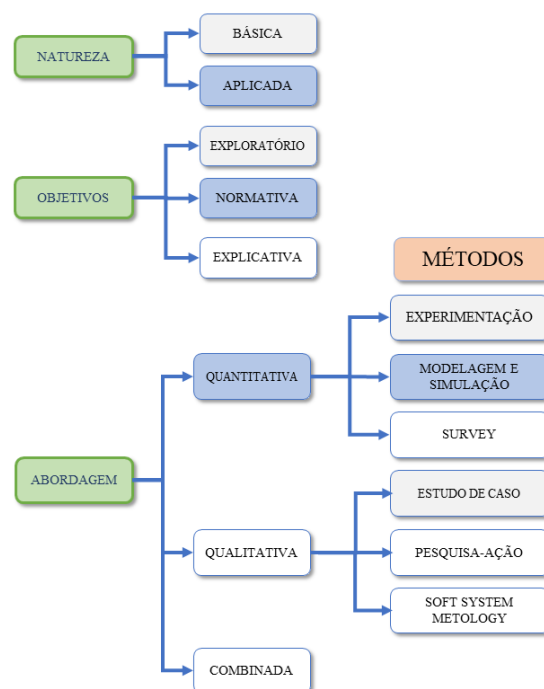


Figura 8 - Classificação da pesquisa

Fonte: Adaptado de Miguel, Morabito e Pureza (2009)

Quanto à natureza do estudo, esta pesquisa se caracteriza como aplicada, que propõe desenvolver produtos ou processos novos, colaborando assim, para as necessidades direcionadas pelo mercado (APPOLINARIO, 2015).

No que diz respeito à abordagem, esta pesquisa pode ser classificada como quantitativa, na qual, a medição das variáveis é prevista com o intuito de explicar a influência sobre as outras variáveis observadas. Essa abordagem possui uma perspectiva mais generalista em relação aos dados, sem se preocupar com as exceções (APPOLINARIO, 2015).

3.2 Localização da simulação

O local da simulação é a região do Contorno, situada na região central da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. A escolha do local se justifica, pois possui uma base de dados públicos do transporte do local com dados de tempo entre as linha tempo médio de espera e número de usuários que se locomovem para cada uma das regiões da capital. Esses dados são disponibilizados pela empresa BHTrans (2022). Além disso, Belo Horizonte é uma das capitais onde se tem um tempo de espera muito grande no transporte público estando entre as quatro capitais brasileiras onde se gasta mais tempo no transporte público. Levando esses fatores em consideração, existe também o fator da cidade ser populosa e possuir um certo nível de estrutura para a locomoção por meio de bicicletas, incluindo bicicletas compartilhadas. A Figura 9 apresenta uma visualização da região de estudo.

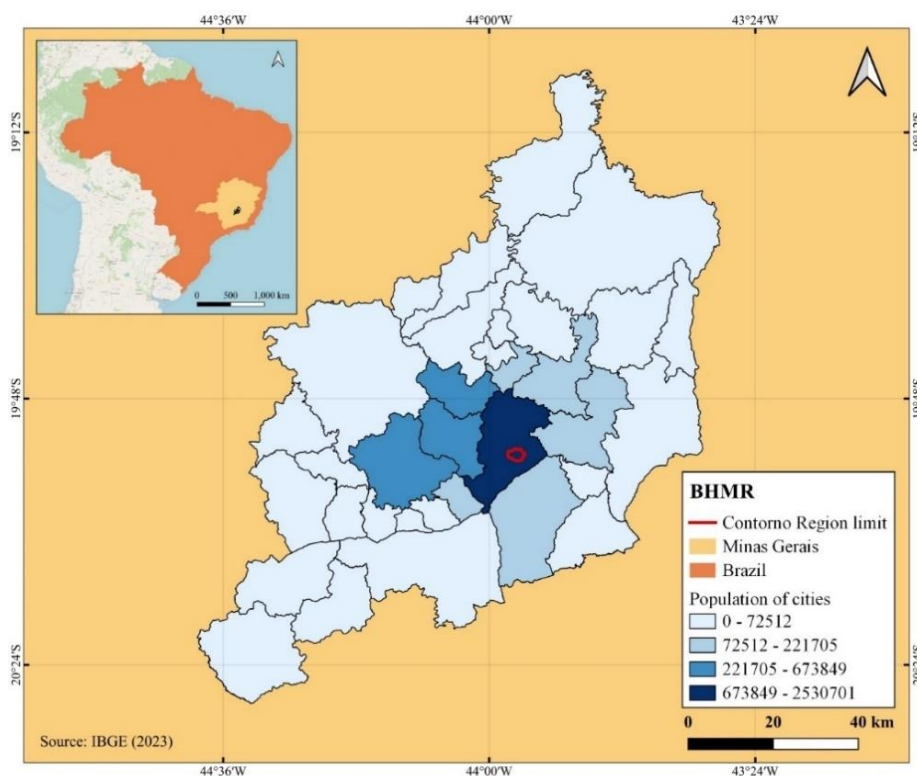


Figura 9 – Identificação dos limites da região de estudo (em vermelho)
Fonte: Autor próprio

A região possui dados públicos referentes a locomoção da população. As informações a seguir foram geradas a partir de matrizes de telefonia móvel e abrangem toda a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), conforme a Tabela 1. Os dados foram coletados no ano de 2021, entre os dias 01/05 e 20/05, e foram disponibilizados pela Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Tabela 1 - Dados de transporte urbano da RMBH

Período de 2021	
Total de Viagens	4.937.451
População +18	1.946.034
Média de viagens/dia	352.675,07
Índice mobilidade - dia útil	0,18
Índice mobilidade - Sábado	0,1
Índice mobilidade - Domingo	0,06
Índice mobilidade - Feriado	0,07

Fonte: RMBH (2021)

Segundo a Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a faixa etária da população que mais utiliza o transporte público está entre 18 e 29 anos, totalizando cerca de 100 mil viagens por dia, como apresentado na Figura 10.

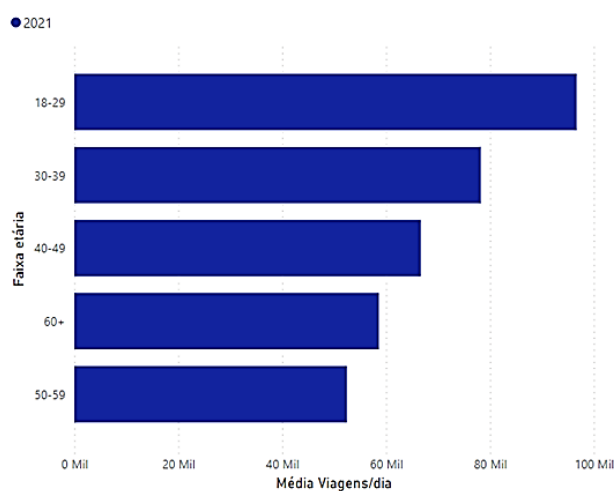


Figura 10 – População usuária do transporte público por faixa etária
Fonte: RMBH (2021)

Na Figura 11, é demonstrada a média de viagens diárias, a partir dos pontos de origem. Pode-se observar que a região com maior movimentação de pessoas é a região do bairro Vila Paquetá, que possui uma média de 11.710 viagens por dia.

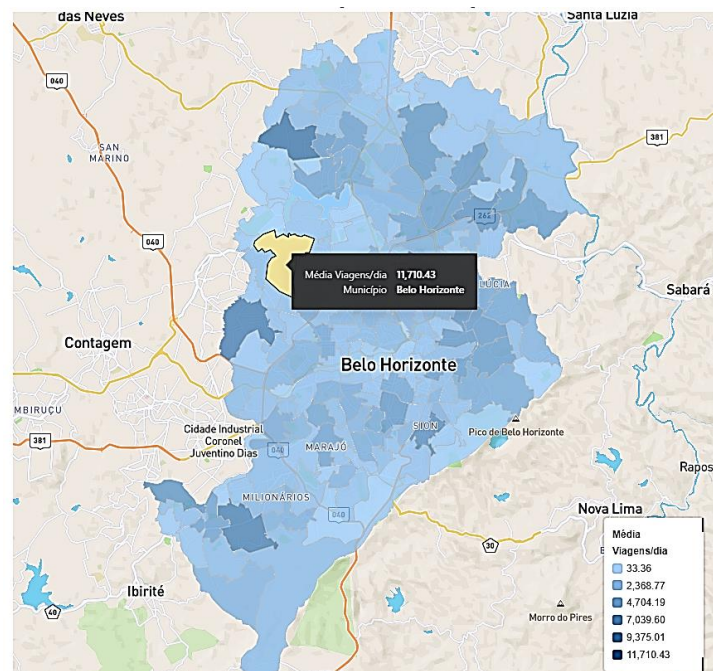


Figura 11 – Identificação da Vila Paquetá (em amarelo)
Fonte: RMBH (2021)

Na Figura 12, pode-se observar que a região de origem que concentra a maior média de viagens diárias como destino, é próxima à região central da cidade, nos bairros de Lourdes e Santo Agostinho, com aproximadamente 8.022 viagens por dia. Portanto, a região escolhida para a simulação dos sistemas de bicicletas compartilhadas e ônibus foi próxima da região central da cidade.

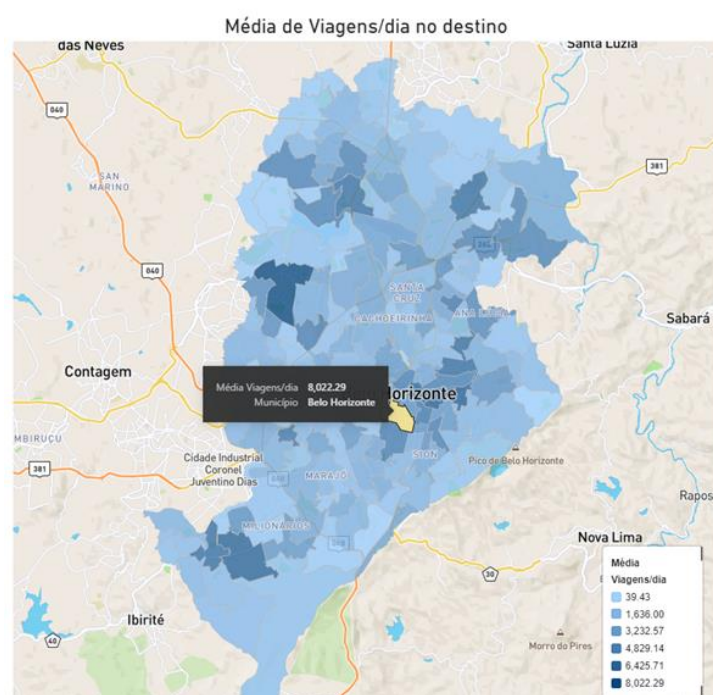


Figura 12 – Identificação do Centro de Belo Horizonte (em amarelo)
Fonte: RMBH (2021)

A Figura 13 delimita a região onde ocorrerão as interações dos BSS e ônibus na região central de Belo Horizonte. Os locais escolhidos como destino foram a Praça da Liberdade; Praça da Assembleia; Parque Municipal e Praça Raul Soares. Os destinos foram selecionados por serem pontos de referência entre usuários e serem locais de grande fluxo de pessoas na cidade. Através do aplicativo *Moovit* e *Google Maps*, foi possível coletar as rotas dos ônibus para os pontos de destino em comum com o sistema de bicicleta compartilhadas.



Figura 13 - Mapa com as rotas de bicicleta e ônibus.
Fonte: Autor próprio

3.3 Etapas de modelagem e simulação

Nesta seção é descrita a aplicação das fases propostas por Chwif e Medina (2015), seguindo as etapas apresentadas na Seção 2.5 da fundamentação teórica, que consistem em concepção, implantação e análise.

3.3.1 Concepção

Na etapa de concepção, foi utilizado o Protocolo ODD proposto por Grimm *et al.* (2006), descrito na Seção 2.5 desta dissertação. O objetivo do protocolo é propor e gerar uma padronização para possibilitar a replicação do modelo em outros estudos.

Nessa etapa, foram desenvolvidos o objetivo e definição do sistema, modelo abstrato e modelo conceitual. Essas três subetapas, que englobam a concepção, serão

adequadas ao protocolo ODD, utilizando os itens: visão geral, conceitos do projeto e detalhes.

Os processos serão representados por fluxogramas que demonstram as possíveis interações de cada elemento no sistema. Além disso, são apresentadas as descrições dos dados de entrada que deverão ser inseridos no sistema. Ao final, será gerado um submodelo do sistema, finalizando a etapa de concepção.

É importante frisar que, como esse protocolo não abrange o desenvolvimento computacional do modelo, ele será utilizado apenas na etapa de concepção da metodologia de simulação (GRIMM *et al.*, 2006).

3.3.2 Implementação

Na fase de implementação será gerado o modelo computacional, baseado no modelo conceitual descrito anteriormente. Essa etapa é dividida em três fases: construção do modelo computacional, verificação do modelo e validação do modelo.

Para a etapa de construção do modelo computacional será utilizado o *software AnyLogic*, que é uma plataforma de simulação multimétodo que permite aos usuários modelar e simular sistemas complexos em diversos setores, como manufatura, logística, transporte, saúde, entre outros. É uma ferramenta na qual pode-se combinar até três métodos de simulação, sendo eles: SBA, simulação de dinâmica de sistemas e SED.

O *software* permite aos usuários modelar sistemas complexos de forma integrada, combinando diferentes abordagens de simulação em um único modelo. Isso é especialmente útil quando os sistemas em questão possuem interações complexas e dinâmicas entre agentes individuais ou componentes e eventos discretos; o sistema oferece uma ampla gama de recursos e bibliotecas prontas para uso, que permitem aos usuários modelar diferentes aspectos dos sistemas; por fim, o sistema oferece suporte para conexão a bancos de dados, *softwares* de análise estatística e outros sistemas de suporte à decisão, permitindo uma análise mais abrangente e a tomada de decisões.

Ainda nessa etapa, foram feitas as verificações do modelo, que visam a análise do código com o objetivo de encontrar possíveis inconsistências, utilizando para tal, a ferramenta de *debug* disponível no *software Anylogic*.

O modelo será validado matematicamente a partir da comparação dos dados obtidos na simulação com os valores obtidos em campo. Na pesquisa de campo foram coletados dados de velocidade, posição geográfica, tempo de deslocamento e dados topográficos.

3.3.3 Análise

Na etapa de análise, foram definidos diferentes cenários de simulação. Esses cenários consideram variações nas velocidades dos ônibus e bicicletas, presença ou ausência de ciclofaixas e trânsito. Os cenários representam situações diversas ao longo da semana, com ônibus e bicicletas compartilhando o mesmo destino. Os valores de saída obtidos por meio do modelo serão os tempos em cada rota e cenário simulados. A análise desses dados permitirá determinar a melhor estrutura ou abordagem a ser implementada para este tipo de transporte, contribuindo para tomadas de decisão mais adequadas e definindo soluções mais eficientes.

4 MODELAGEM

Nesse capítulo serão apresentados as etapas e processos para a construção do modelo, utilizando os métodos apresentados no Seção 2.5. Na fase de concepção foram utilizadas as etapas descritas no protocolo ODD; nas fases seguintes serão utilizadas as etapas propostas por Chwif e Medina (2015).

4.1 Fase de concepção

4.1.1 Propósito e padrões

O propósito é simular, através de um modelo híbrido, um sistema de bicicletas compartilhadas, focando na criação de um modelo que represente um sistema real, que auxilie na tomada de decisões referentes a implantação e construção de infraestruturas públicas que atendam esse tipo de transporte. O modelo foi construído baseando-se nas possíveis interações entre os agentes representados dentro do sistema com suas respectivas características.

4.1.2 Entidades, variáveis de estado e escala

Para a elaboração do modelo conceitual, mapeou-se as possíveis ações e interações entre os agentes no sistema. Neste trabalho foram considerados um sistema de transporte público e um sistema de bicicletas compartilhadas. O modelo tem a interação entre três agentes que serão classificados como:

- Usuário;
- Ônibus;
- Bicicleta.

4.1.3 Usuários

Partindo do ponto inicial, o usuário tem duas possibilidades de ação:

- **Primeira:** pegar a bicicleta e se deslocar até o local de destino;
- **Segunda:** embarcar no ônibus e se deslocar até o local de destino.

Os destinos possíveis para este modelo são Praça da Liberdade, Praça da Assembleia, Parque Municipal e Praça Raul Soares. Os usuários foram distribuídos uniformemente no ponto inicial do modelo, representados pelas estações de metrô Estação


```

1  String clima = comboClima.getValue();
2  String[] querIr = {"nao", "sim"};
3  String[] preferencia = {"naopedala", "pedala"};
4
5  boolean escolha = false;
6  Random random = new Random();
7  String randomQuerIr = querIr[random.nextInt(querIr.length)];
8  String randomPreferencia = preferencia[random.nextInt(preferencia.length)];
9
10 if (clima.equals("Sol") && randomPreferencia.equals("pedala")) {
11     escolha = true;
12 }
13 if (clima.equals("Sol") && randomPreferencia.equals("naopedala")) {
14     if (randomQuerIr.equals("sim")){
15         escolha = true;
16     } else {
17         escolha = false;
18     }
19 }else
20 if (clima.equals("Chuva") && randomPreferencia.equals("naopedala")) {
21     escolha = false;
22 }
23 if (clima.equals("Chuva") && randomPreferencia.equals("pedala")) {
24     if (randomQuerIr.equals("sim")){
25         escolha = true;
26     } else {
27         escolha = false;
28     }
29 }
30 System.out.println("Valores gerados: " + escolha);
31 return escolha;

```

Figura 15 - Código de tomada de decisão
Fonte: Autor próprio

O código apresentado simula um processo de decisão envolvendo a escolha de pedalar ou não pedalar em diferentes condições climáticas (sol e chuva). O código utiliza variáveis para representar o clima, as preferências do usuário e as opções de escolha. A partir de uma seleção aleatória, determina se o usuário prefere ir de bicicleta ou não, levando em consideração o clima atual.

As opções de escolha, apesar de serem binárias, são distribuídas de forma aleatória. O algoritmo produz uma distribuição de probabilidade variável de 80% a 90% de escolha de usuário para os ônibus e de 10% a 20% de escolha para as bicicletas, ambos com a condição de sol e chuva variando aleatoriamente. É importante ressaltar que essas porcentagens podem alterar de acordo com as condições e os critérios individuais a serem aplicadas em cada local da simulação. Os valores adotados estão de acordo com os percentuais apresentados em um estudo realizado na cidade de São Carlos, SP, no qual 50% das 400 pessoas entrevistadas, consideraram 15 minutos como tempo aceitável para deslocamento de bicicleta entre as áreas. A escolha das variáveis de condições meteorológicas e situação de ciclovias/ciclofaixas para avaliar a preferência entre bicicletas

pedelecs compartilhadas e o ônibus da USP mostrou-se adequada, pois essas variáveis estão entre os fatores mais influentes para evitar o uso de bicicletas (CADURIN, 2017).

Após a definição das variáveis e da geração de valores aleatórios, o código verifica as condições climáticas e as preferências do usuário. Se estiver ensolarado e o usuário preferir pedalar, a escolha é definida como verdadeira. Se estiver ensolarado e o usuário preferir não pedalar, a decisão depende de uma resposta aleatória sobre se o usuário quer ou não pedalar. Se estiver chovendo e o usuário preferir não pedalar, a escolha é sempre falsa, sendo assim o código modela uma situação em que a preferência por pedalar ou não pedalar varia dependendo do clima e de uma resposta aleatória sobre o desejo do usuário de sair.

O código faz uso de seleção aleatória para simular a incerteza e a variabilidade no processo de decisão do usuário. Ao escolher aleatoriamente entre as opções "sim" e "não" para a vontade de ir ou não (*randomQuerIr*), o código introduz uma camada adicional de complexidade na decisão. Isso simula a imprevisibilidade do comportamento humano.

A Figura 16 apresenta o fluxograma que representa as ações e escolhas dos agentes (usuários) no qual o usuário seleciona o destino, e em seguida na etapa de decisão é feito o processo descrito na Figura 16. Por fim os usuários, após realizar os trajetos, saem do sistema.

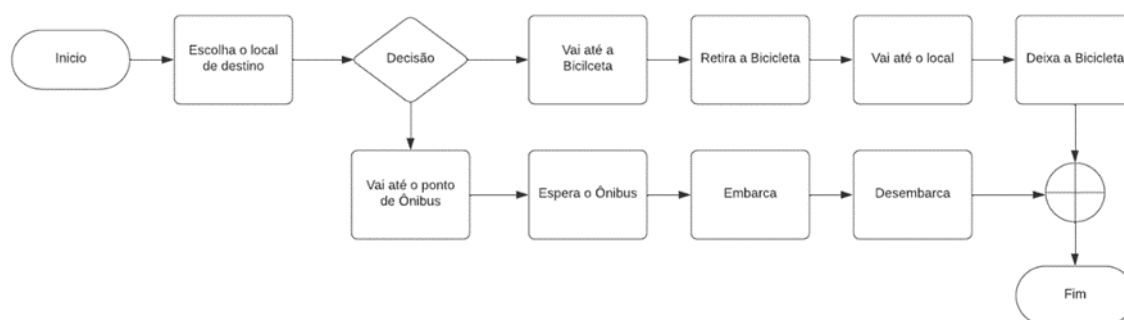


Figura 16 - Fluxograma dos usuários
Fonte: Autor próprio

Os tempos de trajeto de cada usuário serão contabilizados e, posteriormente, serão analisados e comparados aos tempos de locomoção dos ônibus até os locais de destino.

4.1.4 Ônibus

Os agentes “ônibus” são inseridos automaticamente no sistema de acordo com o intervalo de tempo fornecido pela empresa de ônibus e por aplicativos de mobilidade.

Ao chegar ao ponto de embarque, o ônibus coleta os usuários e se desloca até os respectivos pontos de desembarque. Ao chegar no destino, o ônibus é removido do sistema, e os dados são contabilizados para análise futura. A Figura 17 apresenta o fluxo do processo descrito.

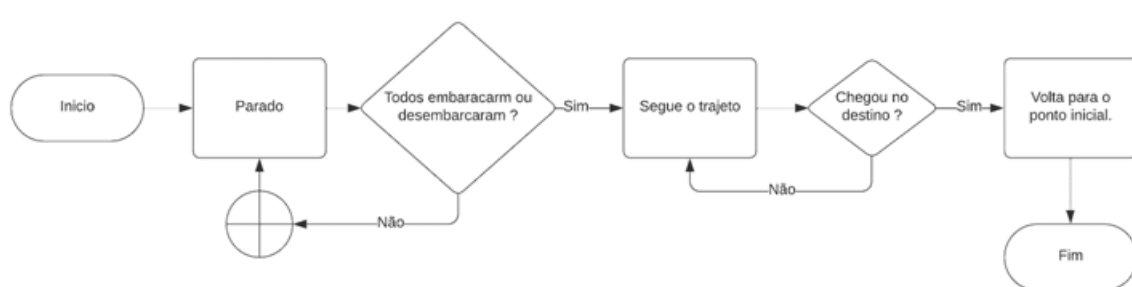


Figura 17 - Fluxograma dos ônibus
Fonte: Autor próprio

As rotas dos ônibus no modelo são padronizadas e replicam os trajetos das linhas locais. As coordenadas de início e fim de rota foram designadas a partir de pontos de ônibus existentes no local de estudo.

4.1.5 Bicicletas

O agente “bicicleta” é inserido no sistema em pontos próximos aos locais de desembarque do metrô, onde ficarão disponíveis para que os usuários possam utilizá-las. Quando o usuário interage com uma bicicleta, ela é atribuída a ele. A ação de deslocamento até o ponto de interesse deve respeitar os destinos e trajetos gerados pelo *Anylogic* 8.8.6.

A velocidade de deslocamento da bicicleta pode variar de 5 km/h até 25 km/h atendendo a velocidade média de 15 km/h, padrão médio estabelecido em Soriguera e Jiménez-Meroño (2020). Ao chegar no destino, a bicicleta é removida do sistema, e os dados são contabilizados para análise futura. A Figura 18 ilustra o processo descrito.

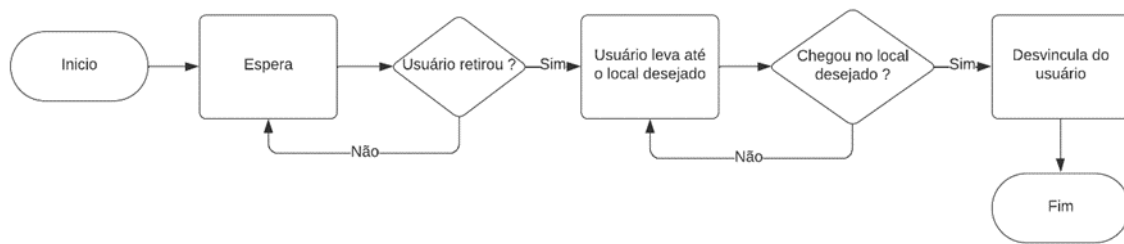


Figura 18 - Fluxograma das bicicletas
Fonte: Autor próprio

4.1.6 Visão geral do processo e programação

Nesta etapa, será apresentada uma visão geral do processo, a partir de um panorama mais amplo do fluxo no qual a modelagem percorre. O modelo desenvolvido tem como objetivo simular os comportamentos dos sistemas de bicicleta compartilhada e de ônibus a fim de compará-los. Para facilitar o entendimento, na Figura 19, é apresentado um fluxograma com a visão geral dos processos do modelo.

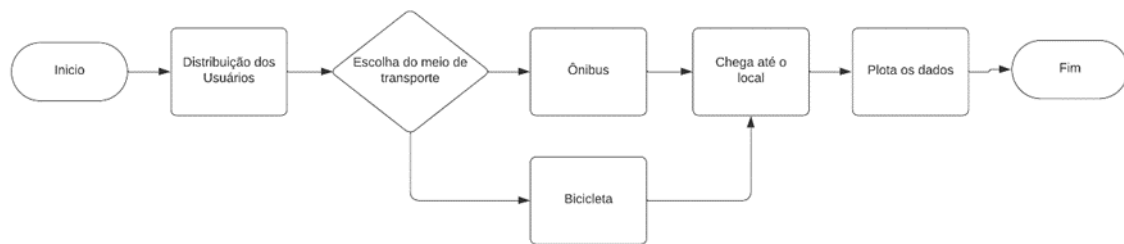


Figura 19 - Fluxograma com a visão geral dos processos do modelo
Fonte: Autor próprio

O primeiro processo realizado é a distribuição de agentes no modelo, a disposição segue uma taxa fixa de 25% para cada uma das rotas sendo o valor de entrada de 8.022 usuários. Em seguida, no bloco de decisão, ocorre a tomada de decisão do agente usuário sobre qual transporte utilizar, depois, o usuário seguirá para o fluxo do transporte escolhido, conforme apresentado na Figura 19. Ao chegar no destino, os agentes serão removidos do sistema, e os dados serão contabilizados para análise futura.

4.1.7 Conceitos do projeto

Nesta etapa, serão apresentados os conceitos do projeto conforme proposto pelo Protocolo ODD, introduzido no Seção 2.6. Apesar de possuir onze subitens, não é necessário desenvolver todos eles na construção do modelo.

Desta forma, os subitens aplicáveis a este modelo são:

- **Objetivos:** Os agentes têm como objetivo replicar os comportamentos de cada sistema para auxiliar na tomada de decisões.
- **Adaptação:** No modelo, as decisões dos agentes são influenciadas por preferências pessoais, adaptando-se dinamicamente às escolhas de transporte.
- **Antecipação:** Os agentes no modelo não possuem a capacidade de determinar em qual estágio do processo se encontram.
- **Comunicação:** Os agentes interagem entre si; em uma das etapas do processo, os usuários adquirem características do agente selecionado, formando um agente combinado.
- **Coordenação:** O modelo não considera o comportamento coletivo, pois os agentes não têm conhecimento das ações de outros agentes.
- **Seleção:** Os agentes selecionam diferentes opções de comportamento de forma randômica a partir de características pré-estabelecidas a eles.

4.1.8 Inicialização e dados de entrada

Para a inicialização da simulação é necessário a inserção dos valores de entrada das variáveis consideradas na elaboração deste modelo. O Quadro 3 apresenta as variáveis, valores iniciais adotados, variações possíveis e descrições correspondentes. Os valores iniciais adotados representam as características descritas na seção 3.2 sobre o local de estudo. Cada inicialização pode variar de acordo com o cenário de análise.

Quadro 3 - Valores iniciais do modelo

Variável	Valor inicial	Variação possível	Descrição
Número de Usuários	8.022	Valor correspondente à realidade do local da simulação	Com base nos dados da seção 3.2.
Tempo de Espera do Ônibus	24 minutos (média no local)	Valor correspondente à realidade do local da simulação	Com base nos dados da seção 3.2.
Velocidade do Ônibus	10 km/h	Varia entre 10 km/h e 45 km/h	Dependendo do cenário.
Velocidade da Bicicleta	5 km/h	Varia entre 5 km/h e 25 km/h	Dependendo do cenário.
Velocidade a Pé	3,6 km/h (HELENE,2023)	N/A	Velocidade média de uma pessoa a pé.
Clima	Sol	Chuva	Dependendo do cenário.
Coleta de Dados	Tempo Real	N/A	Os tempos são coletados em tempo real e plotados em gráfico.
Apresentação de Resultados	Tempo Total de Deslocamento	N/A	Ônibus e bicicleta são apresentados a cada finalização.

Os dados de entrada utilizados foram obtidos através da literatura e informações públicas fornecidas por empresas de mobilidade BHTrans que atuam no local de estudo. Os dados obtidos foram:

- Quantidade de usuários que se deslocam para a região;
- Velocidade de deslocamento a pé;
- Velocidade de deslocamento das bicicletas;
- Velocidade de deslocamento dos ônibus;
- Tempo de intervalo entre os ônibus.

Adicionalmente, realizou-se uma pesquisa de campo para coletar dados e validar o modelo, para a realização da coleta de dados foram utilizados cinco dias, sendo dois deles para reconhecimento do local e suas características como elevação e extensão e três para a coleta de dados. Com isso, foram coletados mais de 10 mil pontos de *tracker* e cerca de 40 km em trajetos. Além disso, alguns dos trajetos foram repetidos para garantir uma média mais próxima da realidade do local nas condições atuais. Durante esse processo, as rotas de bicicleta sugeridas pelo modelo foram testadas, a infraestrutura local foi avaliada e as velocidades médias e tempos de deslocamento de bicicleta nas rotas sugeridas foram registradas. As etapas e as descrições da coleta de campo serão apresentadas na Seção 4.2.

4.2 Fase de implementação

4.2.1 Construção do modelo computacional

O *software* utilizado nesta dissertação será o *AnyLogic*, pois com ele é possível criar modelos computacionais utilizando a SBA e SED, podendo representar os comportamentos dos agentes dentro de um sistema complexo. A ferramenta utilizada para construção do modelo dos mapas e rotas foi o Sistema de Informação Geográfica, em inglês *Geographic Information System* (GIS). A Figura 20 apresenta o GIS e a tela de ambiente do *AnyLogic*.

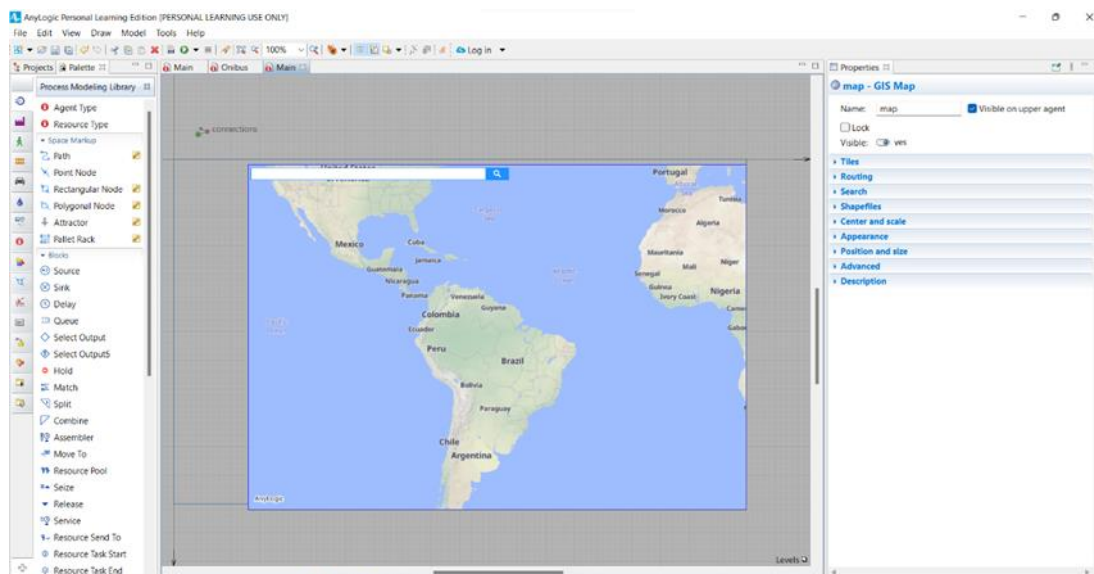




Figura 20 - Ambiente de desenvolvimento do modelo de simulação
Fonte: Autor próprio

Com a ferramenta do GIS Point, foram inseridos pontos com as coordenadas dos locais de partida e saída dos usuários. Os usuários podem ser distribuídos de forma aleatória, utilizando distribuições de probabilidade, ou amostra de número de pessoas, dependendo do tipo de análise de interesse.

Além da ferramenta de localização por coordenadas, foi utilizada também a ferramenta *GIS Router*, que permite a criação das rotas que cada agente utilizará para se locomover até seu local de destino. No Quadro 4, estão descritas as funções e nome das demais ferramentas utilizadas para a construção do modelo.

Quadro 4 - Funções e descrição dos componentes

Ícone	Nome	Descrição das funções
	<i>Source</i>	Gera agentes.
	<i>Sink</i>	Descarta agentes de entrada.
	<i>Queue</i>	Agentes na ordem especificada (fila).
	<i>SelectOutput</i>	Encaminha o agente para uma das portas de saída, dependendo da condição.
	<i>SelectOutput5</i>	Encaminha os agentes de entrada para uma das cinco portas de saída, dependendo das condições (probabilísticas ou determinísticas).
	<i>Combine</i>	Espera por dois agentes, então produz um novo agente deles.
	<i>Assembler</i>	Reúne um certo número de agentes de várias fontes (5 ou menos) em um único agente.
	<i>MoveTo</i>	Move um agente de sua localização atual para nova localização.
	<i>Seize</i>	Aprende o número de unidades do recurso especificado exigido pelo agente.
	<i>ResourceTaskStart</i>	Define o início do fluxograma modelando o processo de tarefa para unidades de recursos (geralmente é um processo de preparação de recursos).
	<i>Enter</i>	Insera agentes criados em outros lugares no fluxograma.

	<i>TimeMeasureStart</i>	O <i>TimeMeasureStart</i> , bem como o <i>TimeMeasureEnd</i> compõem um par de blocos medindo o tempo que os agentes passam entre eles, como "tempo no sistema", "tempo de permanência", etc.
	<i>TimeMeasureEnd</i>	O <i>TimeMeasureEnd</i> , bem como o <i>TimeMeasureStart</i> compõem um par de blocos medindo o tempo que os agentes passam entre eles.

O modelo desenvolvido utilizando o *software AnyLogic* possibilita a geração aleatória de usuários, os quais possuem características individuais, como valores de interesse e preferências. Essas características influenciam a quantidade de usuários que utilizam o sistema de bicicletas.

Os *inputs* são únicos para cada um dos tipos de agentes, possibilitando a diversificação dos cenários das simulações. Desta forma, cada agente deverá se comportar seguindo os valores inseridos. Os parâmetros de entrada são descritos no Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros de entradas do modelo (*Inputs*)

Agentes	Inputs (Parâmetros)
Usuário	População Taxa de Usuários
Bicicleta	População Velocidade Mínima Velocidade Máxima
Ônibus	Intervalo de tempo Velocidade Mínima Velocidade Máxima

As linhas de ônibus presentes nesse modelo são:

- Trajeto 1 - 4108 (Estação Ponto São José);
- Trajeto 2 - linha 2152 (Cruzeiro);
- Trajeto 3 - SC04B (Santa Efigênia);
- Trajeto 4 - 7660 (Industrial São Luiz).

As rotas de todas essas linhas de ônibus foram coletadas no *Google Maps*, indicando o trajeto entre os pontos de partida e chegada no local de interesse, conforme é apresentado na Figura 21.

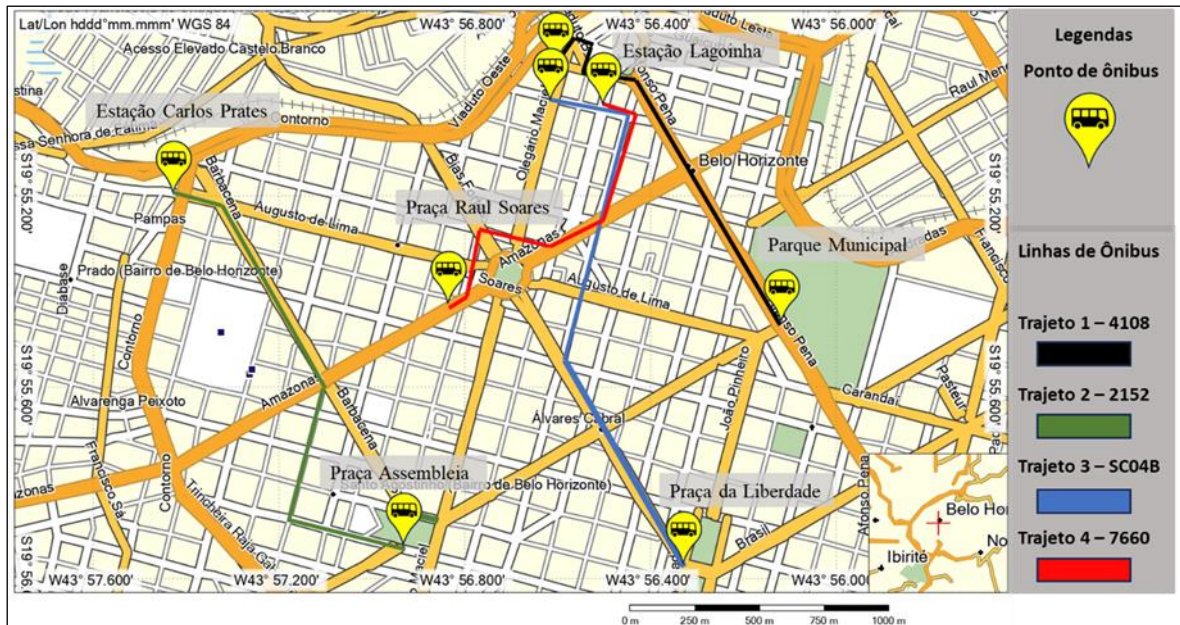


Figura 21 - Trajetos das linhas de ônibus
Fonte: Autor próprio

A quantidade de ônibus no modelo será determinada de acordo com o intervalo de tempo entre os ônibus na região de estudo, variando de acordo com o tempo de simulação. No trabalho em questão, utilizou-se os intervalos de tempo disponibilizados pela empresa de ônibus das linhas citadas.

As velocidades no modelo podem ser configuradas através de um *slide bar* que, para os ônibus, varia entre 10 km/h e 45 km/h e, para as bicicletas, varia entre 5 km/h e 25 km/h. Os agentes ônibus e bicicleta, ao surgirem no sistema, recebem como atributo individual a variável de velocidade, que segue uma distribuição normal, a partir da velocidade indicada no *slide bar*. A velocidade é mantida constante ao longo de todo o trajeto, não sendo simulados acelerações e desacelerações.

Os pontos de partida para o sistema de bicicletas compartilhadas estão localizados próximos às estações de metrô Carlos Prates e Lagoinha. Essas estações foram escolhidas, pois ficam próximas aos bairros que foram analisados e não excedem o raio de 5 km, distância que os usuários estão dispostos a se deslocar utilizando bicicletas.

Na Figura 22, é apresentado o fluxo de interações do modelo proposto, que possibilita ao usuário escolher o tipo de transporte e realizar as diferentes etapas do processo de deslocamento. O modelo representa os sistemas de ônibus e bicicletas compartilhadas a fim de comparar diferentes deslocamentos em curtas distâncias na cidade de Belo Horizonte (BH) entre as estações de bicicletas compartilhadas escolhidas. Além disso, é possível alterar as rotas sugeridas pelo *software*, inserindo as rotas que possuem

estrutura para esse tipo de locomoção ou rotas nas quais a elevação seja menor para os usuários.

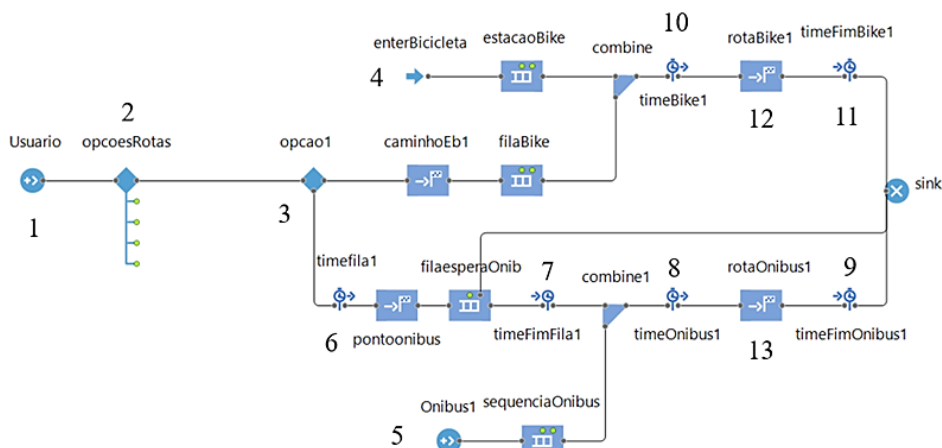


Figura 22 - Fluxo de interações no modelo
Fonte: Autor próprio

Descrição das etapas de SED no sistema:

- Os usuários são inseridos no sistema no ponto 1;
- No ponto 2, a estrutura *SelectOutput* distribui a população de usuários igualmente para cada uma das 4 opções disponíveis;
- No ponto 3, o usuário realiza a tomada de decisão com base nos critérios citados na Seção 4.1.2;
- No ponto 4, as bicicletas são inseridas no sistema;
- No ponto 5, os ônibus são inseridos no sistema;
- Para os ônibus, o tempo de espera é registrado entre os pontos 6 e 7 e o tempo de viagem entre os pontos 8 e 9;
- Para as bicicletas, o tempo de viagem é registrado entre os pontos 10 e 11;
- Os pontos 12 e 13 movem o agente de sua localização atual para o destino desejado utilizando as ferramentas de marcação de *GIS Point* disponíveis no *AnyLogic*.

4.2.2 Coleta de dados em campo

Nesta etapa, realizou-se uma coleta de dados em campo para validar o modelo proposto. A pesquisa foi realizada entre os dias 11 e 16 de março de 2023, na região central da cidade de BH. A coleta foi feita utilizando o GPS (Garmin 60CSx), foram coletados dados de velocidade, localização, tempo e elevação dos deslocamentos de bicicleta.

Para a coleta de dados, foi necessário alugar uma bicicleta próxima ao local de estudo. Optou-se pelas bicicletas disponibilizadas pela *Bike BH*, que estão em funcionamento na região central desde 22 de setembro de 2022 (VIVERBEM, 2022), data anterior à elaboração do modelo proposto nesta dissertação. Os destinos selecionados no início da pesquisa não foram influenciados pelo sistema já existente.

A região central da cidade possui 10 pontos de bicicletas compartilhadas, como apresentada na Figura 23. Os tempos de coleta eram limitados, pois o tempo de permanência máximo com a bicicleta era de 1 (uma) hora, com intervalo obrigatório de 15 minutos entre as liberações. Durante os intervalos, realizou-se *backups* dos pontos coletados com o propósito de garantir o salvamento das etapas coletadas.



Figura 23 - Estações de bicicletas compartilhadas
Fonte: Unimed Belo Horizonte (2022)

As rotas realizadas foram sugeridas pelo modelo antes da coleta, com o objetivo de testar na prática os caminhos sugeridos em Belo Horizonte. Além disso, foram realizadas coletas em outros caminhos alternativos, buscando locais que oferecessem melhor infraestrutura para pedalar.

No primeiro dia, realizou-se o reconhecimento prévio dos locais de coleta na região Central, Parque Municipal e Savassi. O Parque Municipal de BH, é um ponto turístico frequentado por diversas pessoas e possui estrutura para a população em geral, com quadras de futebol, tênis e *playground*, sendo, portanto, um ótimo local para incentivar a mobilidade ativa. O reconhecimento prévio do local permitiu levantar os principais pontos indicados pelo modelo e avaliar as necessidades de alterações.

No segundo dia, realizou-se o reconhecimento prévio das estruturas nos bairros Barro Preto, Santo Agostinho, Lourdes e Centro-Sul. Notou-se que esses bairros possuem pouca infraestrutura para bicicletas, além de possuir topografia que poderia dificultar o deslocamento. Ainda assim, concluiu-se que seria possível efetuar a coleta dos dados.

Finalizada a etapa de reconhecimento do local de estudo, deu-se início, no terceiro dia, à coleta de dados. Optou-se por retirar a bicicleta na estação 15 de bicicletas compartilhadas da *Bike BH*, por ser a estação mais próxima do início das rotas de estudo. Durante a coleta de dados, além de passar pelas rotas sugeridas, indicadas na Figura 24 pelas linhas na cor azul e verde, foi necessário testar caminhos alternativos para investigar novas possibilidades de rotas não sugeridas pelo modelo que estão indicadas no mapa com a linha na cor vermelha (Figura 24). No primeiro dia de coleta, percorreu-se aproximadamente 20 km, respeitando as restrições de tempo do sistema. As rotas coletadas foram Centro e Parque Municipal. A Figura 25 e Figura 26 apresentam as distâncias e as elevações coletadas com o GPS.

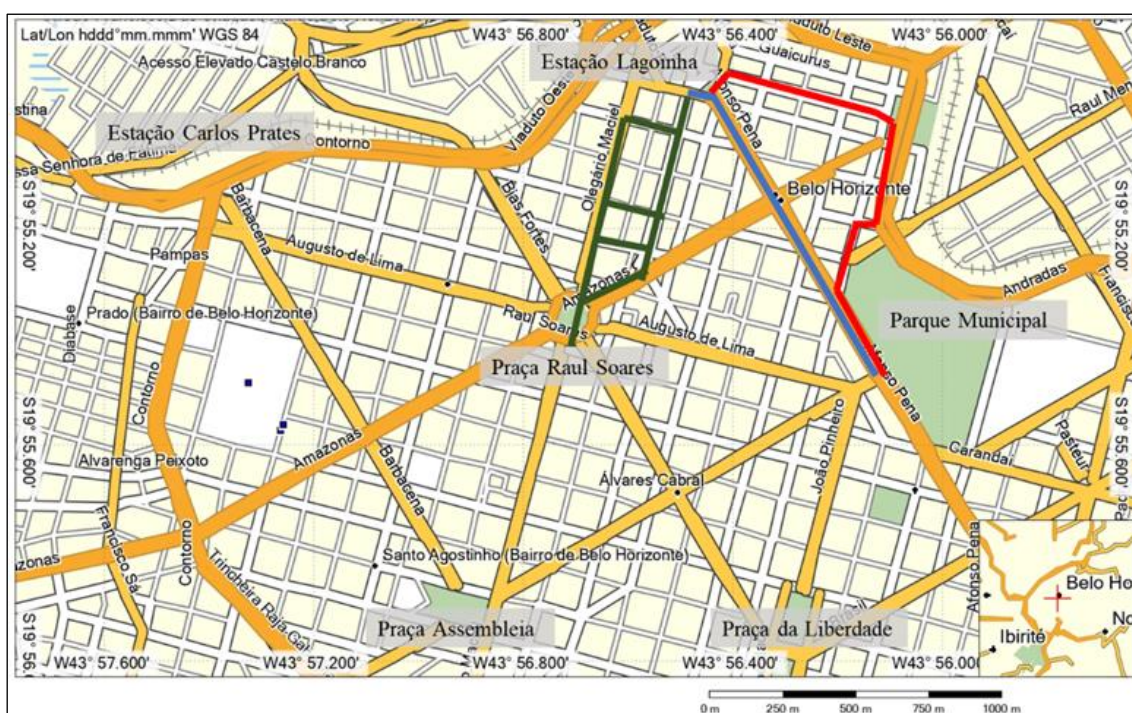


Figura 24 – Percurso da primeira coleta de dados
Fonte: Autor próprio

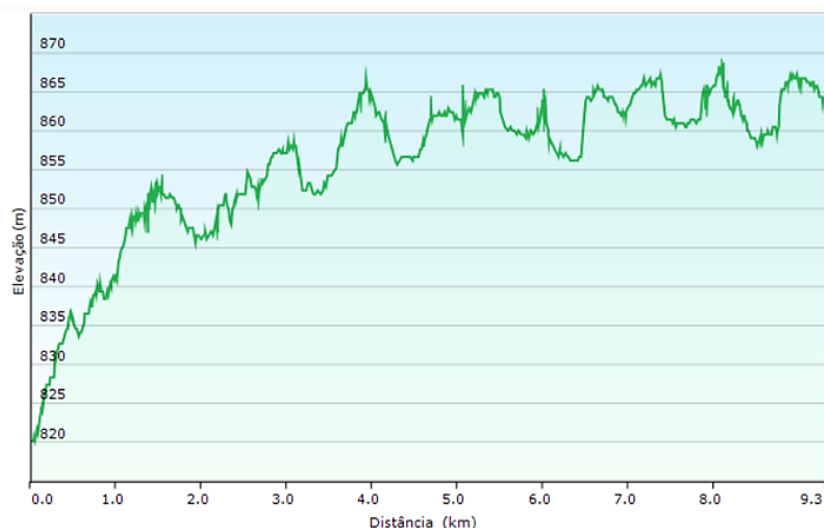


Figura 25 - Distância e elevação Lagoinha/Parque Municipal

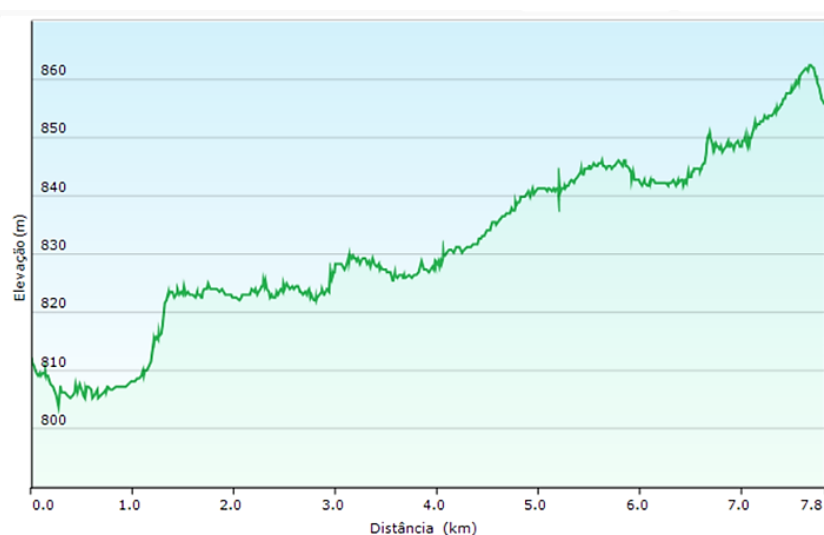


Figura 26 - Distância e elevação Lagoinha/Praça Raul Soares

No quarto dia, foram coletados dados nos bairros: Barro Preto, Santo Agostinho, Lourdes e Centro-Sul, região que possui grande elevação, como verificado na etapa de reconhecimento. Diferente da primeira coleta, não havia ponto de bicicleta compartilhada próxima aos locais de início das rotas sugerida, sendo, portanto, necessário um maior deslocamento por parte do pesquisador. O ponto de retirada escolhido foi a estação 18 do sistema, localizada próxima à Praça da Liberdade, um dos destinos indicados pelo modelo. Após a retirada da bicicleta para a coleta dos dados, foi possível realizar os dois trajetos indicados pelas cores azul e verde do mapa na Figura 27. Devido às limitações de tempo do sistema e a elevada distância dos pontos de bicicletas compartilhadas, o tempo útil de coleta foi inferior ao dia anterior, sendo possível coletar apenas 15 km de dados. A Figura 28 e Figura 29 apresentam as distâncias e as elevações coletadas com o GPS.

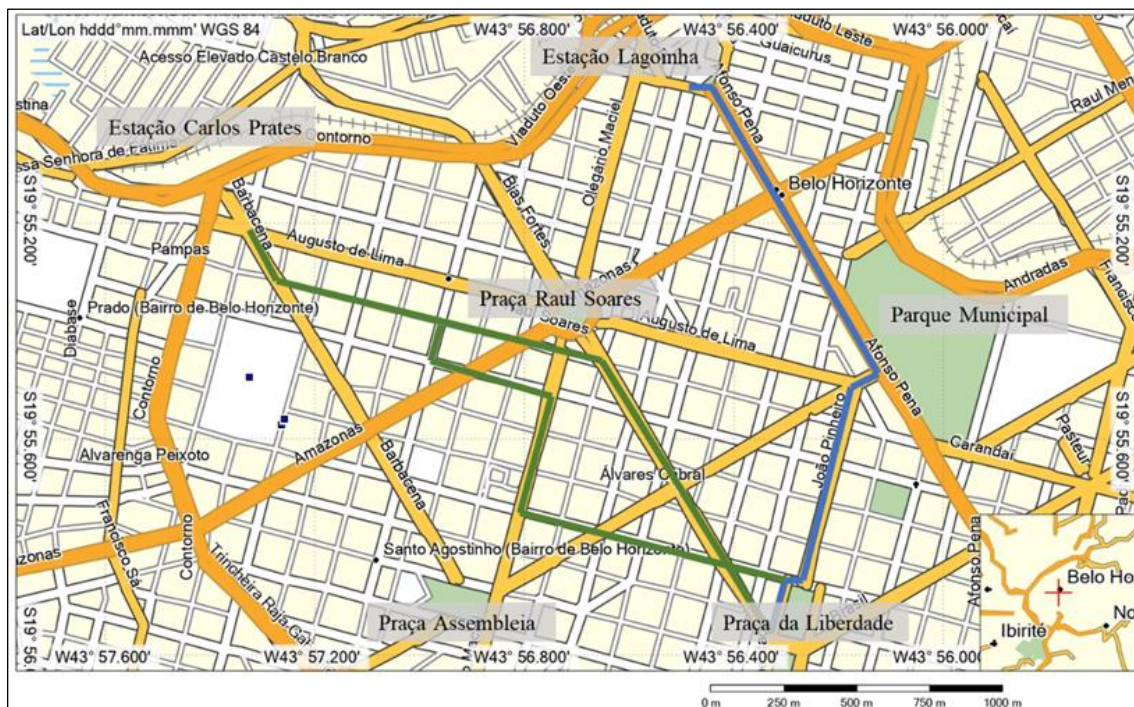


Figura 27 – Percurso da segunda coleta de dados
Fonte: Autor próprio

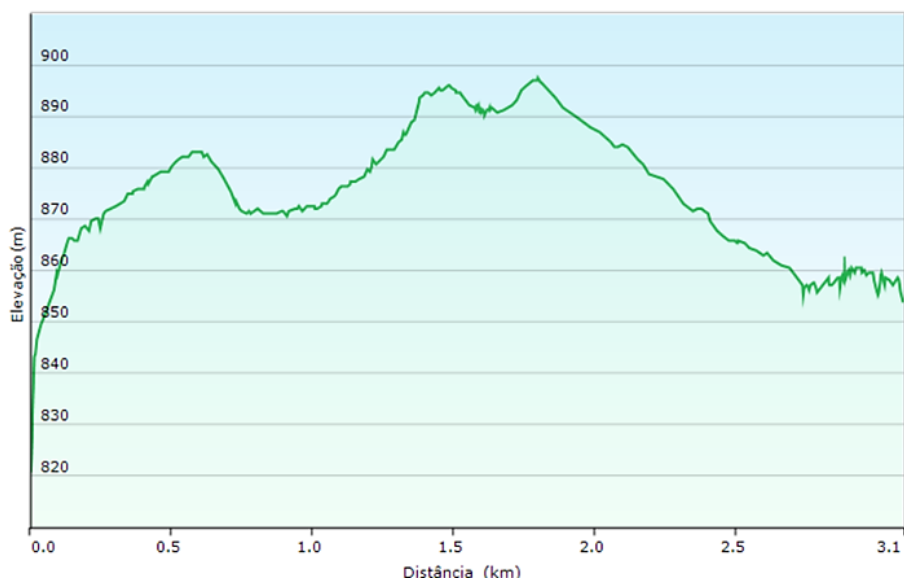


Figura 28 - Distância e elevação Lagoinha/Praça da Liberdade



Figura 29 - Distância e elevação Carlos Prates/Praça da Liberdade

No último dia, coletou-se dados de deslocamento por bicicleta no Parque Municipal, além de testar rotas alternativas para a Praça da Liberdade, as quais acrescentaram muito à pesquisa, mostrando-se mais confortáveis para pedalar, pois as rotas sugeridas pelo modelo apresentaram grandes inclinações. Portanto, além de coletar todos os dados necessários para a pesquisa, foi possível testar outros caminhos além do sugerido pelo modelo, adicionando opções para tomadas de decisões referentes a estrutura de ciclovias na cidade de Belo Horizonte. A Figura 30 destaca os percursos realizados na terceira coleta de dados ambos indicados pela cor azul e verde. Algumas ruas e avenidas não possuíam ciclofaixa, o que diminuiu a velocidade média dos deslocamentos por bicicleta. Para essa coleta foram registrados 7,5 km, se somados a todas as distâncias dos outros dias de coletas totalizam 38,2 km, percorridos de bicicleta no local de estudo. A Figura 31 apresenta a distância e elevação Carlos Prates/Praça da Assembleia.

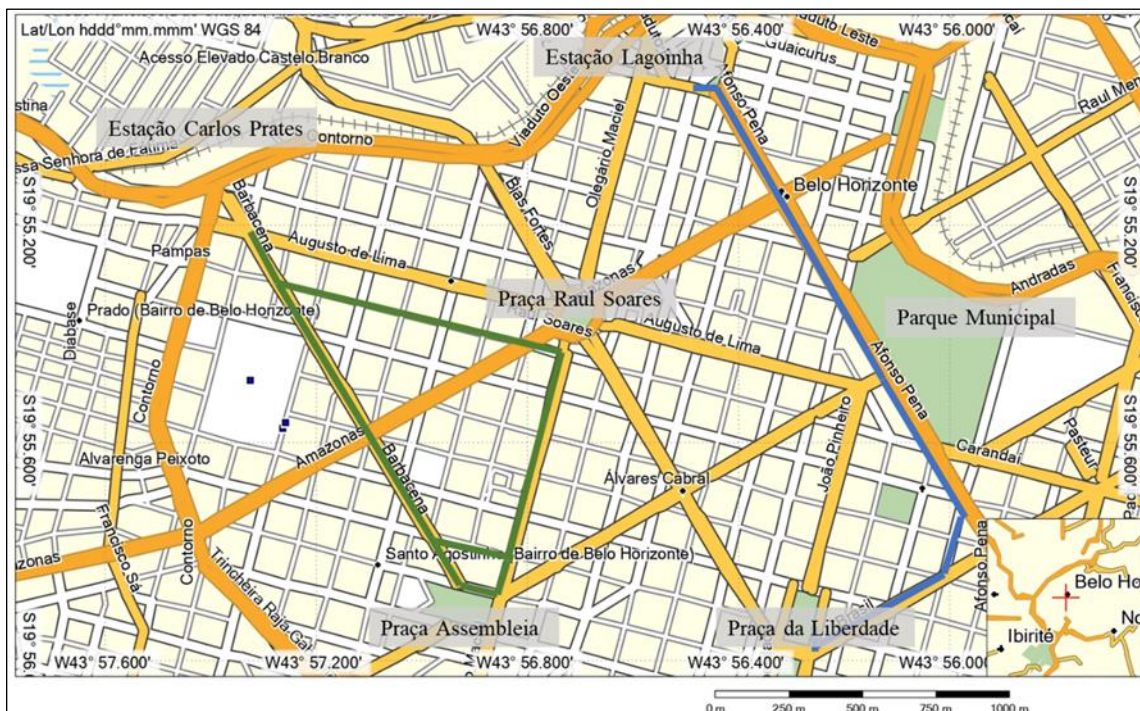


Figura 30 - Percurso da terceira coleta de dados
Fonte: Autor próprio



Figura 31 - Distância e elevação Carlos Prates/Praça da Assembleia

Para ilustrar os locais de coleta de dados e a estrutura da cidade em relação a rotas cicláveis, nas Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37, são apresentados os locais nos quais foram realizadas as coletas com suas características e infraestrutura.



Figura 32 - Estação Afonso Arinos



Figura 33 - Av. Olegário Maciel



Figura 34 - Av. Afonso Pena

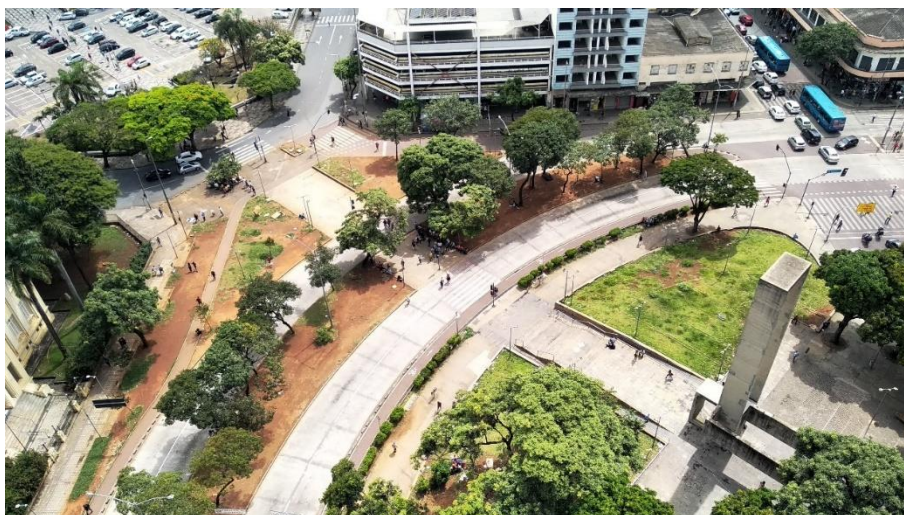


Figura 35 - Praça Rio Branco



Figura 36 - Ciclofaixa do Parque Municipal



Figura 37 - Av. Barbacena

4.2.3 Verificação e validação

Após a construção do modelo, foram realizadas várias verificações com o objetivo de identificar inconsistências, como *bugs* ou erros no código, que pudessem afetar o seu funcionamento. A estratégia adotada para a verificação consistiu na realização de testes práticos e na análise dos relatórios de execução. O processo foi concluído quando não foram encontradas quaisquer inconsistências.

Na etapa de validação do modelo, utilizou-se o *framework* proposto por Leal *et al.* (2011). Para a aplicação do *framework*, utilizaram-se os dados reais (coletados em campo) e compararam-nos aos dados gerados pelo modelo de simulação, no caso dessa dissertação foram os respectivos tempos no deslocamento.

A rota escolhida para a validação do modelo representa o percurso entre a estação Lagoinha e o Parque Municipal, pois foi a rota com o maior número de dados coletados em campo. Após a definição da rota, realizou-se a etapa de simulação do modelo para a obtenção de dados simulados referentes ao mesmo trecho. Com os dados reais e simulados, seguindo as etapas do *framework*, aplicou-se um cálculo de logaritmo natural para comparar os resultados.

Utilizando o *software Minitab*, aplicou-se o teste de normalidade de *Anderson-Darling* em ambos os conjuntos dados. As Figura 38 e Figura 39 demonstram os resultados obtidos pela aplicação da ferramenta.

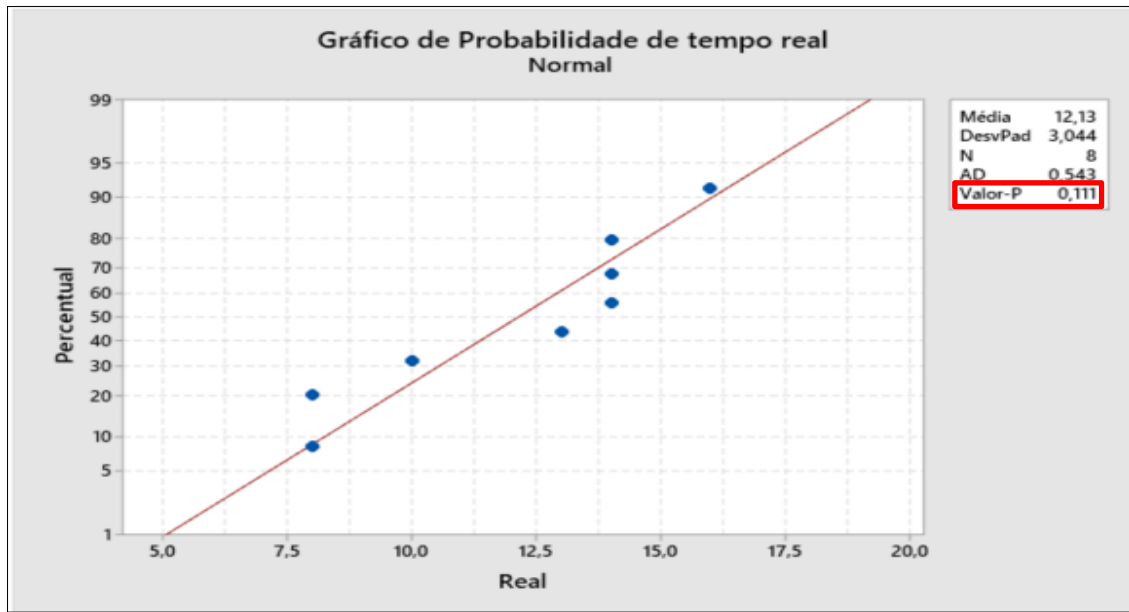


Figura 38 - Probabilidade de tempo real

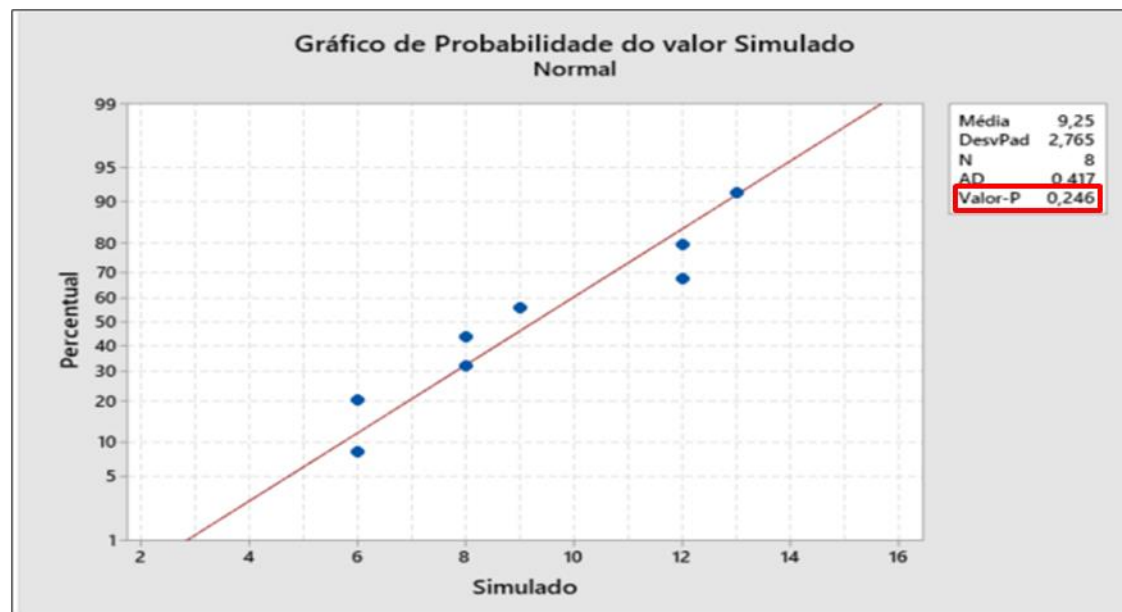


Figura 39 - Probabilidade do valor simulado

A Figura 38 apresenta os valores coletados em campo, com um *p-value* de 0,111 para este cenário. Na Figura 39, são apresentados os valores simulados, com um *p-value* de 0,246. Em ambos os casos, a hipótese normativa foi rejeitada com um nível de confiança de 95%.

A etapa seguinte consiste na comparação entre as duas amostras, para tal, utilizou-se do Teste F presente na ferramenta do *Minitab*. A Figura 40 apresenta os resultados obtidos no teste.

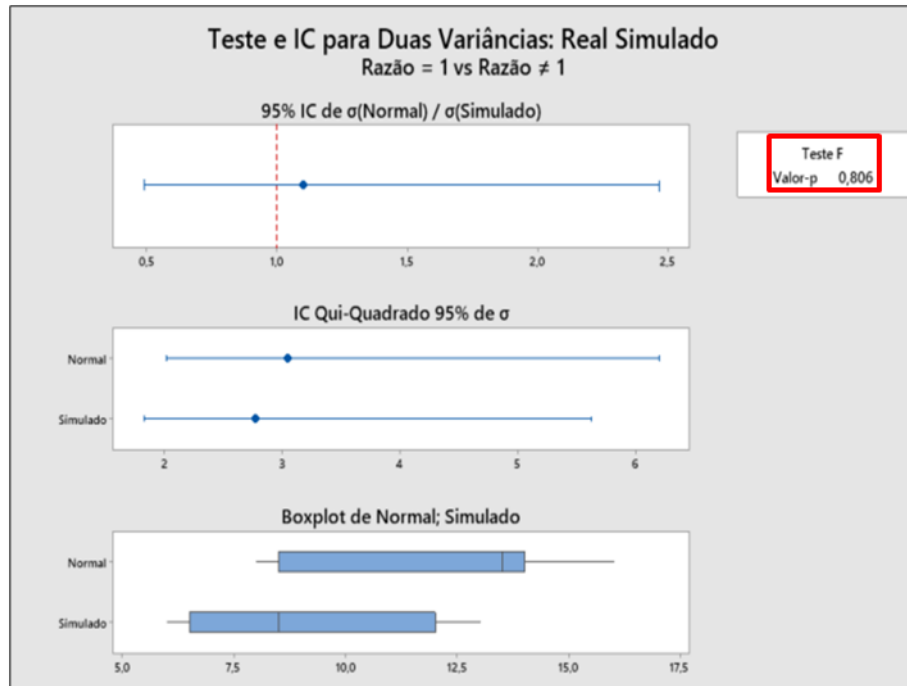


Figura 40 - Teste F

A partir do Teste F, obteve-se um *p-value* de 0,806, o que é maior do que o nível de significância usualmente escolhido de 0,05 (para um nível de confiança de 95%). Após a realização dessas etapas, foi necessário validar os resultados utilizando o método de Smith-Satterthwaite. O *Minitab* possui, na ferramenta de Teste T, a possibilidade de configuração para que as variâncias sejam consideradas diferentes entre si. Portanto, esta ferramenta pode substituir o método de Smith-Satterthwaite (LEAL *et al.*, 2011). A Figura 41 apresenta os resultados do Teste T.

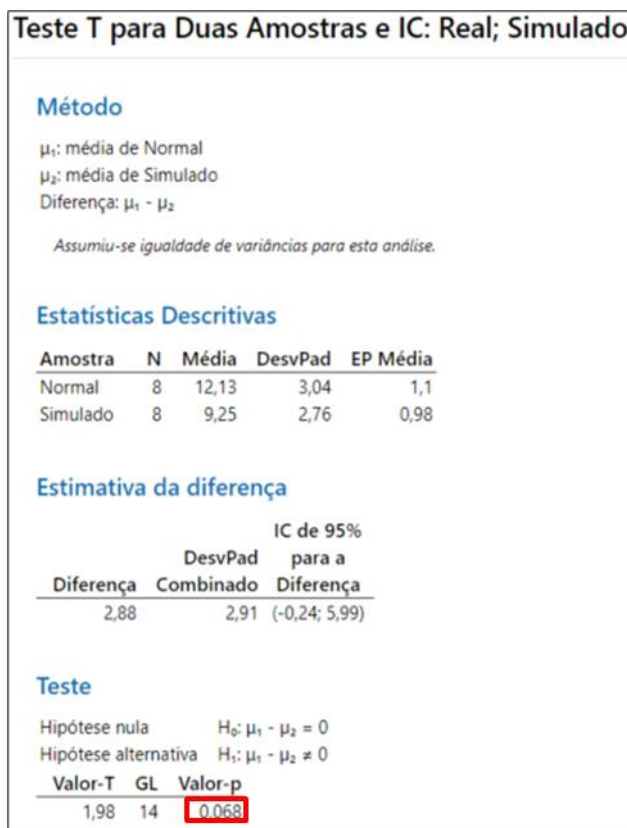


Figura 41 - Teste T

Conforme a Figura 41, o valor de *p-value* obtido no Teste T foi de 0,068, o que é maior do que o nível de significância de 0,05, mantendo um nível de confiança de 95% para a hipótese de que médias são estatisticamente iguais e, portanto, não pode ser rejeitada. Portanto, os valores das médias entre os dados simulados e os dados reais são considerados estatisticamente iguais, validando assim o modelo computacional.

4.3 Fase de análise

4.3.1 Cenários de simulação

Os nove cenários foram simulados, divididos em dois grupos. O primeiro grupo é chamado de 'cenário principal' e inclui os cenários C1 a C4. Em seguida, os cenários alternativos são apresentados, compostos pelos cenários C5 a C9. Dessa forma, o presente trabalho é composto de nove cenários de simulação divididos em quatro rotas.

Os cenários simulados para o cenário principal foram divididos nas seguintes situações:

- **Atual (C1)**, com as variáveis coletadas em campo;
- **Ideal (C2)**, com ciclofaixa e um sistema de ônibus eficiente;

- **Intermediário (C3)**, com ciclovias e sistema de ônibus atual;
- **Pior cenário (C4)**, com trânsito lento, ambos os transportes andam em velocidade abaixo da esperada (17 km/h para ônibus e 15 km/h para as bicicletas).

A Tabela 2 indica os valores de velocidade para cada situação simulada.

Tabela 2 - Valores de entrada dos cenários principais

Cenários		Velocidade (km/h)	
C1	Atual	Ônibus	17
		Bicicleta	9
C2	Ideal	Ônibus	25
		Bicicleta	15
C3	Intermediário	Ônibus	17
		Bicicleta	20
C4	Pior cenário	Ônibus	15
		Bicicleta	10

Os cenários foram criados para representar situações reais no modelo de simulação. As simulações foram feitas por um período de 5 dias úteis (segunda a sexta), e demonstraram, tanto o sistema de bicicletas compartilhadas (objeto de estudo do presente trabalho), quanto o sistema de transporte público de ônibus (base para comparação). A população inserida no modelo será de 8.022 usuários, distribuídos de maneira igualitária entre as diferentes rotas. O valor de intervalo entre os ônibus foi de 24 minutos. As variações de velocidade entre os agentes ônibus e bicicleta são diferentes, pois cada indivíduo pode enfrentar circunstâncias diferentes, levando a uma ampla gama de tempos de deslocamento. A partir das variáveis de entrada apresentadas, foram gerados um montante de 60 variáveis de saída para cada uma das condições.

Para os cenários alternativos foram simuladas situações nas quais os valores de velocidade aumentam e diminuem em intervalos de 5 km/h, alternando entre favorecer ônibus e bicicletas. Isso permitiu analisar os cenários nos quais cada meio de transporte teria vantagens ou não para o deslocamento. As velocidades dos ônibus variaram de 10 km/h a 30 km/h, enquanto as velocidades das bicicletas variaram de 25 km/h a 5 km/h. A

Tabela 3 apresenta como as velocidades foram inseridas.

Tabela 3 - Valores de entrada cenários alternativos

Cenários		Velocidade (km/h)	
C5	Cenário alternativo 5	Ônibus	10
		Bicicleta	25
C6	Cenário alternativo 6	Ônibus	15
		Bicicleta	20
C7	Cenário alternativo 7	Ônibus	20
		Bicicleta	15
C8	Cenário alternativo 8	Ônibus	25
		Bicicleta	10
C9	Cenário alternativo 9	Ônibus	30
		Bicicleta	5

Portanto, na etapa de análise, os grupos inicial e alternativo foram comparados, e posteriormente serão analisados separadamente de acordo com seus trajetos em diferentes cenários, divididos pelas suas respectivas rotas.

5 SIMULAÇÃO

Neste capítulo, serão descritos os nove cenários simulados no modelo computacional desenvolvido no presente trabalho. Para cada cenário simulado, inserem-se os valores de entrada descritos no Seção 4.3 e obtém-se como resposta os dados de saída para o estudo e análise.

O modelo possui quatro destinos possíveis para o usuário, a partir dessa definição, gera-se automaticamente uma rota para cada destino determinado. Na validação de campo, três destas quatro rotas, mostraram-se eficientes e, apenas uma delas, necessitou ser alterada devido à elevação da rota sugerida ser maior que de vias próximas.

Partindo da estação Lagoinha, o usuário pode seguir para os destinos: Parque Municipal Americo Renné, Praça da Liberdade e Praça Raul Soares. Partindo da estação Carlos Prates, o usuário tem como único destino a Praça da Assembleia.

O período de simulação para cada cenário foi de 5 dias úteis e, os valores de saída obtidos representam a média das variáveis analisadas para o período. Para análise de performance, considera-se como tempo médio total para os ônibus a soma dos tempos de espera e deslocamento em sua utilização.

5.1 Cenários principais

No primeiro cenário, a velocidade média foi de 17 km/h para os ônibus, refletindo a média na capital, e 9 km/h para as bicicletas, média coletada durante a fase de coleta de dados. Na Tabela 4 são apresentados os valores de entrada e de saída do cenário descrito.

Tabela 4 - Média de tempos para C1 (em minutos)

		Dias da Semana				
		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Rota 1	Bicicleta	7,330	8,060	5,590	7,372	6,530
	Ônibus	3,540	3,560	6,601	3,107	4,574
	Tempo de espera	4,511	4,511	4,511	6,184	4,511
Rota 2	Bicicleta	9,326	7,383	11,421	9,776	9,263
	Ônibus	5,309	6,167	5,791	6,147	5,702
	Tempo de espera	3,697	3,697	21,225	3,697	3,697
Rota 3	Bicicleta	14,910	13,587	13,371	15,922	15,434
	Ônibus	6,749	9,051	8,171	8,537	8,221
	Tempo de espera	9,442	9,442	9,442	11,577	9,442
Rota 4	Bicicleta	8,368	7,677	7,360	6,124	8,000
	Ônibus	4,119	3,929	4,796	3,657	4,098
	Tempo de espera	6,196	6,195	6,198	6,196	6,196

Ao analisar os resultados obtidos para este primeiro cenário, percebe-se que o deslocamento utilizando o sistema de bicicletas compartilhadas, mostra-se mais eficiente que o deslocamento utilizando o transporte público por ônibus em todas as rotas simuladas neste cenário, tendo um ganho de eficiência de tempo de até 30%. Esses valores podem ser observados na Figura 42.

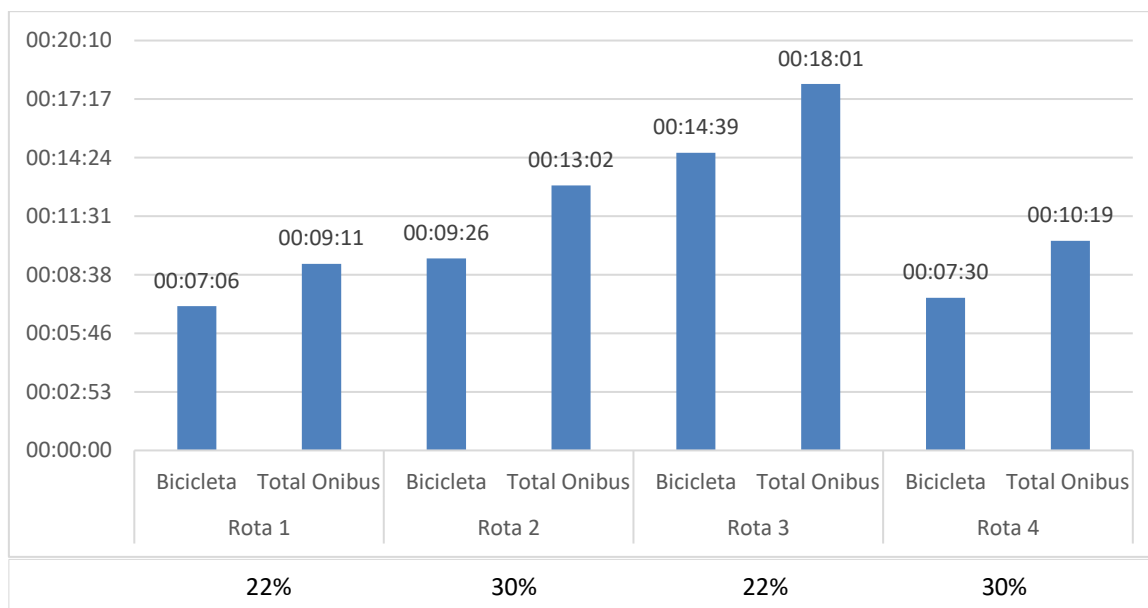


Figura 42 – Média de tempo - segunda a sexta - para C1 (em minutos e segundos)

A rota 1, entre a estação Lagoinha e o Parque Municipal via Av. Afonso Pena, destaca-se por possuir vias largas e trajeto plano, tornando o deslocamento por bicicletas rápido, apesar de não oferecer segurança. No entanto, a estrutura local permite a implementação de infraestrutura adequada que tornaria o deslocamento por bicicleta seguro.

O cenário C2 representa uma situação ideal, com infraestrutura de ciclofaixa e um sistema de ônibus eficiente, que permite velocidades médias maiores, tanto para os ônibus, quanto para as bicicletas. A velocidade média para os ônibus é de 25 km/h e, para as bicicletas, é de 15 km/h. Na Tabela 5 são apresentados os valores de entrada e de saída do cenário descrito.

Tabela 5 - Média de tempos para C2 (em minutos)

		Dias da Semana				
		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Rota 1	Bicicleta	4,162	4,558	4,433	5,042	4,722
	Ônibus	2,287	2,226	2,749	2,909	2,531
	Tempo de espera	4,511	4,511	4,592	4,511	4,511
Rota 2	Bicicleta	6,374	5,367	6,339	6,062	6,180
	Ônibus	3,853	3,817	4,086	4,060	4,419
	Tempo de espera	3,697	3,697	3,697	3,697	3,697
Rota 3	Bicicleta	9,038	9,372	7,180	9,724	9,627
	Ônibus	6,329	5,881	6,299	6,042	5,077
	Tempo de espera	9,442	9,442	9,442	9,442	9,442
Rota 4	Bicicleta	5,398	4,877	5,084	5,563	4,844
	Ônibus	2,465	2,296	2,587	2,626	2,568
	Tempo de espera	6,196	6,195	6,198	6,196	6,196

Ao analisar os resultados obtidos para este segundo cenário, percebe-se que o deslocamento utilizando o sistema de bicicletas compartilhadas, mostra-se mais eficiente que o deslocamento utilizando o transporte público por ônibus em todas as rotas simuladas neste cenário, tendo um ganho de eficiência de tempo de até 44%.

Ao comparar os resultados deste cenário com os obtidos no cenário C1, nota-se que a presença de infraestrutura adequada para o deslocamento por bicicletas, e menos trânsito, que viabiliza velocidades maiores para os ônibus, torna ambos meios de transportes mais eficientes, reduzindo os tempos de deslocamento em até 37% para bicicletas e 47% para os ônibus.

Os tempos obtidos para este segundo cenário são apresentados na Figura 43.

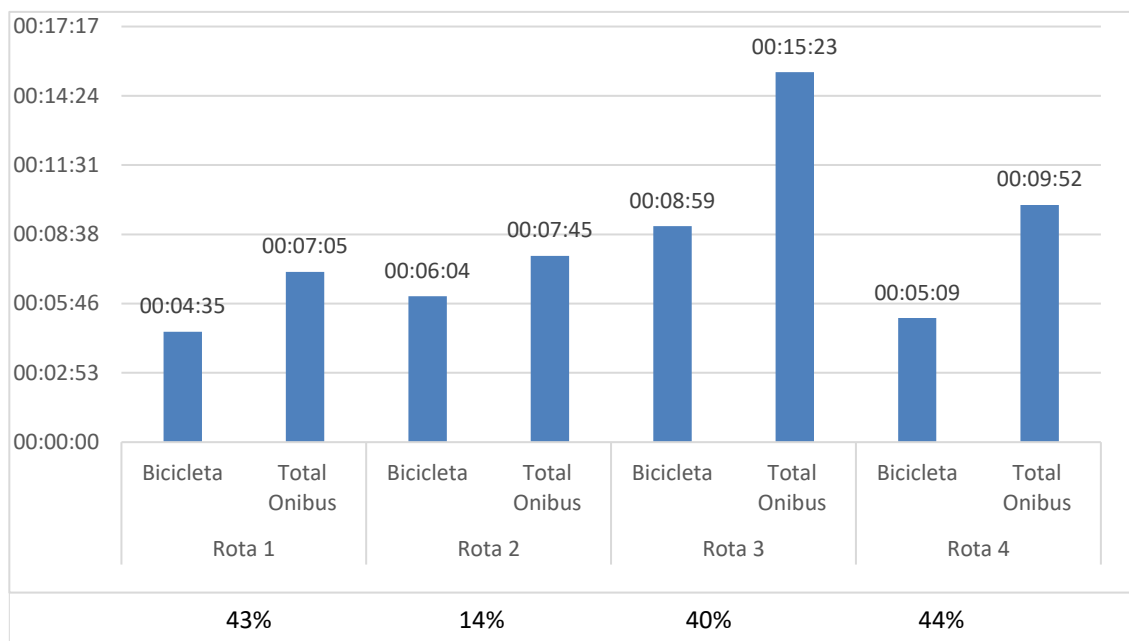


Figura 43 - Média de tempo - segunda a sexta - para C2 (em minutos e segundos)

O cenário C3 representa uma situação intermediária, com ciclovias e o sistema de ônibus atual. A presença de ciclovias promove a segregação das bicicletas nas vias, o que permite velocidades médias maiores para as bicicletas. Neste cenário, a velocidade média para os ônibus é de 17 km/h e, para as bicicletas, é de 20 km/h. Na Tabela 6, são apresentados os valores de entrada e de saída do cenário descrito.

Tabela 6 - Média de tempos para C3 (em minutos)

		Dias da Semana				
		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Rota 1	Bicicleta	3,671	3,778	3,540	3,314	3,708
	Ônibus	3,802	3,384	4,224	3,249	3,427
	Tempo de espera	4,511	4,511	4,511	4,511	4,511
Rota 2	Bicicleta	3,893	4,218	4,327	4,403	4,227
	Ônibus	7,792	6,341	5,057	5,072	6,220
	Tempo de espera	3,697	3,697	3,697	3,697	3,697
Rota 3	Bicicleta	6,840	7,381	7,328	7,149	7,821
	Ônibus	8,767	8,187	10,525	9,664	8,268
	Tempo de espera	9,442	9,442	9,442	9,442	9,442
Rota 4	Bicicleta	4,197	4,302	3,779	3,606	3,597
	Ônibus	3,922	3,704	3,522	3,626	3,597
	Tempo de espera	6,196	6,195	6,298	6,196	6,196

Ao analisar os resultados obtidos para este terceiro cenário, percebe-se que o deslocamento utilizando o sistema de bicicletas compartilhadas, mostra-se mais eficiente que o deslocamento utilizando o transporte público por ônibus em todas as rotas simuladas neste cenário, tendo um ganho de eficiência de tempo de até 61% na rota 3.

Ao comparar os resultados deste cenário com os obtidos no cenário inicial, nota-se que a presença de infraestrutura adequada para o deslocamento por bicicletas, torna este meio de transporte mais atrativo, reduzindo os tempos de deslocamento em até 58% para bicicletas.

Os tempos obtidos para este terceiro cenário são apresentados na Figura 44.

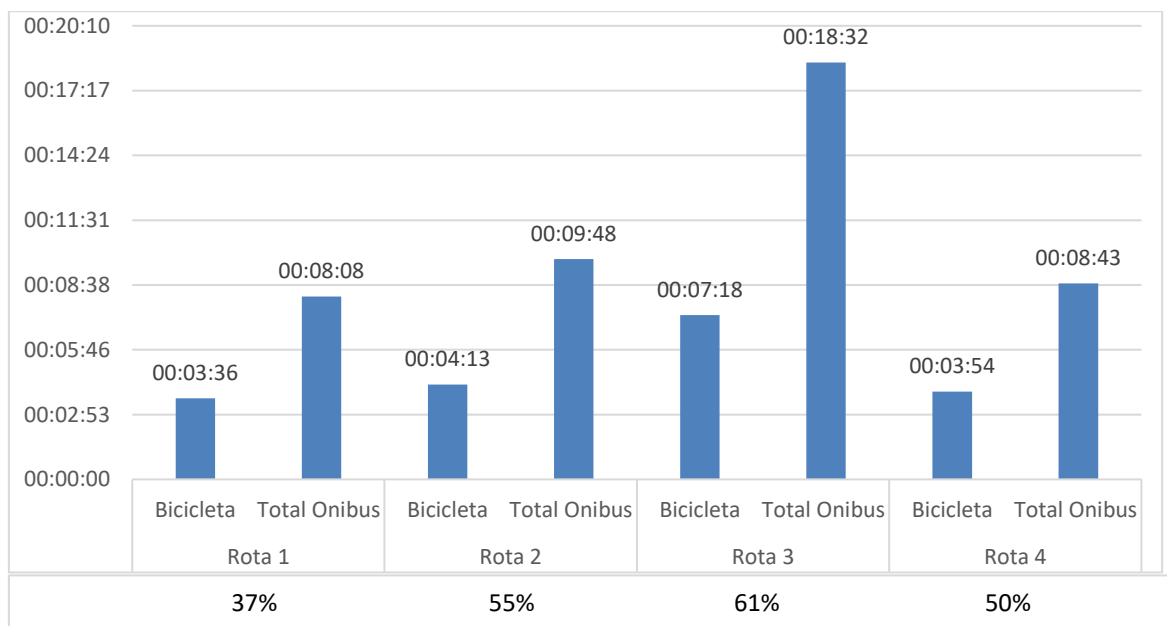


Figura 44 - Média de tempo - segunda a sexta - para C3 (em minutos e segundos)

O cenário C4 representa a situação na qual há uma piora nas condições de deslocamento por ônibus, ou seja, cenário com trânsito lento. Neste cenário, não há infraestrutura adequada para o deslocamento por bicicletas, mantendo a velocidade média próxima da coletada em campo para este meio de transporte, no entanto, o trânsito simulado para os ônibus causa uma diminuição na velocidade média para o transporte público. Para este cenário, a velocidade média para os ônibus é de 15 km/h e, para as bicicletas, é de 10 km/h. Na

Tabela 7, são apresentados os valores de entrada e de saída do cenário descrito.

Tabela 7 - Média de tempos para C4 (em minutos)

		Dias da Semana				
		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
Rota 1	Bicicleta	5,765	5,495	6,582	6,265	6,222
	Ônibus	4,475	4,420	4,285	4,310	4,218
	Tempo de espera	4,511	4,511	4,511	4,511	4,511
Rota 2	Bicicleta	8,291	8,094	7,204	7,487	9,557
	Ônibus	6,558	6,360	7,584	6,800	7,688
	Tempo de espera	3,697	3,697	3,697	3,697	3,697
Rota 3	Bicicleta	13,156	14,019	14,032	11,574	12,858
	Ônibus	9,183	9,226	10,680	9,152	8,929
	Tempo de espera	9,442	9,442	9,442	9,442	13,247
Rota 4	Bicicleta	10,763	6,973	8,732	7,655	9,299
	Ônibus	3,926	3,988	4,137	4,048	3,863
	Tempo de espera	6,196	6,202	6,198	6,196	6,196

Neste quarto cenário, mesmo não havendo infraestrutura para o deslocamento por bicicletas, o meio de transporte se mostrou mais vantajoso que a utilização de ônibus para pequenos deslocamentos.

Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que o deslocamento utilizando o sistema de bicicletas compartilhadas, mostra-se mais eficiente que o deslocamento utilizando o transporte público por ônibus em todas as rotas simuladas neste cenário, tendo um ganho de eficiência de tempo de até 31%.

Ao comparar os resultados deste cenário com os obtidos no cenário C1, nota-se que a redução das velocidades médias dos ônibus devido ao trânsito, torna o uso de bicicletas compartilhadas como meio de transporte mais atrativo, reduzindo os tempos de deslocamento em até 15% para bicicletas.

É importante ressaltar que, apesar do cenário com os ônibus apresentarem os maiores tempos médios nos deslocamentos, por serem compostos pelos tempos de espera e os tempos do trajeto, os valores de tempo médio de espera considerado na simulação ainda apresentam um tempo menor que o valores de tempo de espera fornecidos pela empresa de transporte local.

Os tempos obtidos para este quarto cenário são apresentados na Figura 45.

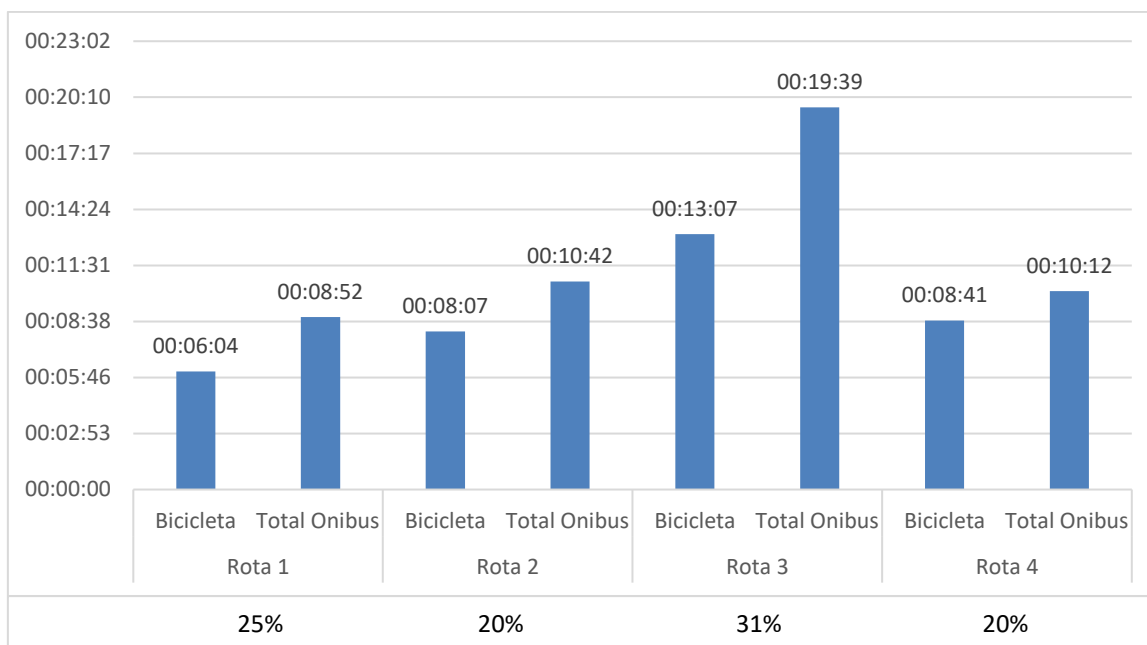


Figura 45 - Média de tempo - segunda a sexta - para C4 (em minutos e segundos)

No geral, o deslocamento utilizando bicicletas compartilhadas mostrou-se mais eficiente que o deslocamento por ônibus em todos os cenários e rotas simulados nesta primeira etapa, principalmente por não possuir tempo de espera para a utilização deste meio de transporte. No entanto, cenários em que foram simulados deslocamentos com infraestrutura adequada para bicicletas (C2 e C3), demonstraram-se mais eficientes e seguros para os usuários, pois, desta forma, não é necessário dividir espaço com outros veículos.

Nesta próxima etapa foram simulados cenários alternativos nos quais os valores de velocidade aumentam e diminuem em intervalos de 5 km/h, alternando entre favorecer ônibus e bicicletas. A finalidade dessa etapa é analisar os cenários nos quais cada meio de transporte tem vantagens ou não para o deslocamento. As velocidades dos ônibus variam de 10 km/h a 30 km/h, enquanto as velocidades das bicicletas variam de 25 km/h a 5 km/h.

5.2 Cenários alternativos

Assim como na etapa anterior, considera-se como tempo médio total para os ônibus a soma dos tempos de espera e deslocamento em sua utilização. As rotas simuladas continuam sendo as quatro trajetórias previamente estabelecidas e ajustadas no modelo, mantendo o contexto físico, mas modificando os dados de entrada da simulação. A

Tabela 3, descrita na seção 4.3.1, demonstra como as velocidades serão inseridas.

Para o cenário C5 desta segunda etapa, considera-se que deslocamento por bicicletas ocorre a uma velocidade média de 25 km/h. Neste cenário, o ganho de eficiência em tempo foi de até 79% em comparação com o tempo necessário para o deslocamento por ônibus para o mesmo destino. Os tempos obtidos na simulação deste cenário são apresentados na Figura 46.

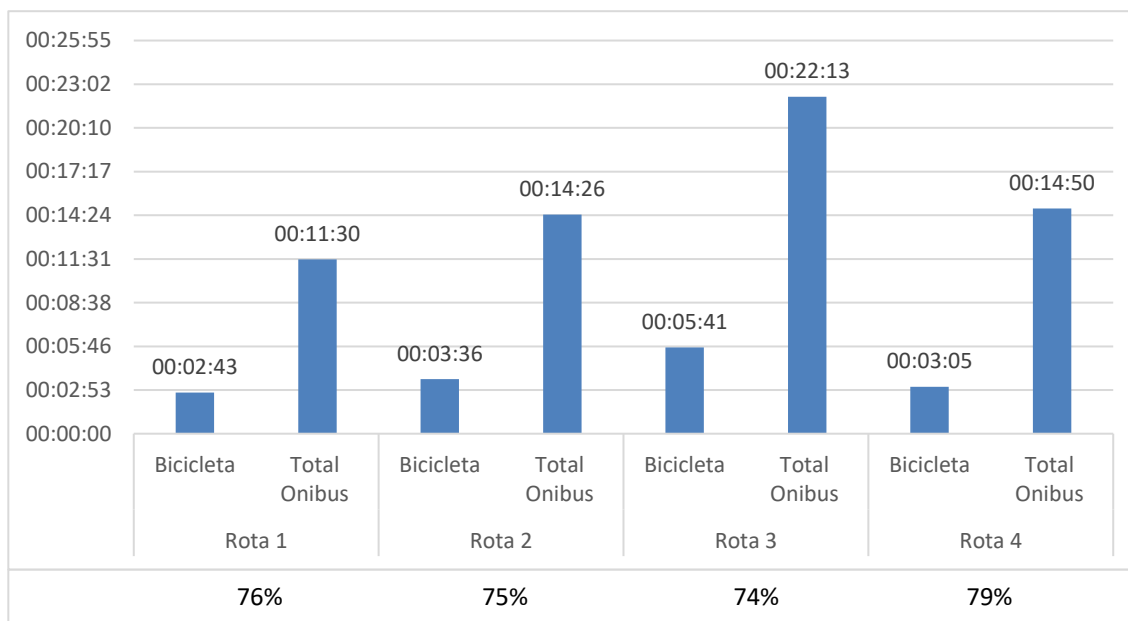


Figura 46 - Média de tempo - segunda a sexta - para C5 (em minutos e segundos)

Para o cenário C6, considera-se que deslocamento por bicicletas ocorre a uma velocidade média de 20 km/h. Neste cenário, ainda é possível visualizar um ganho de tempo expressivo ao comparar os deslocamentos para os mesmos destinos. Apresentando um ganho de eficiência que variou entre 54% e 64% nas rotas simuladas. Os tempos obtidos na simulação deste cenário são apresentados na Figura 47.

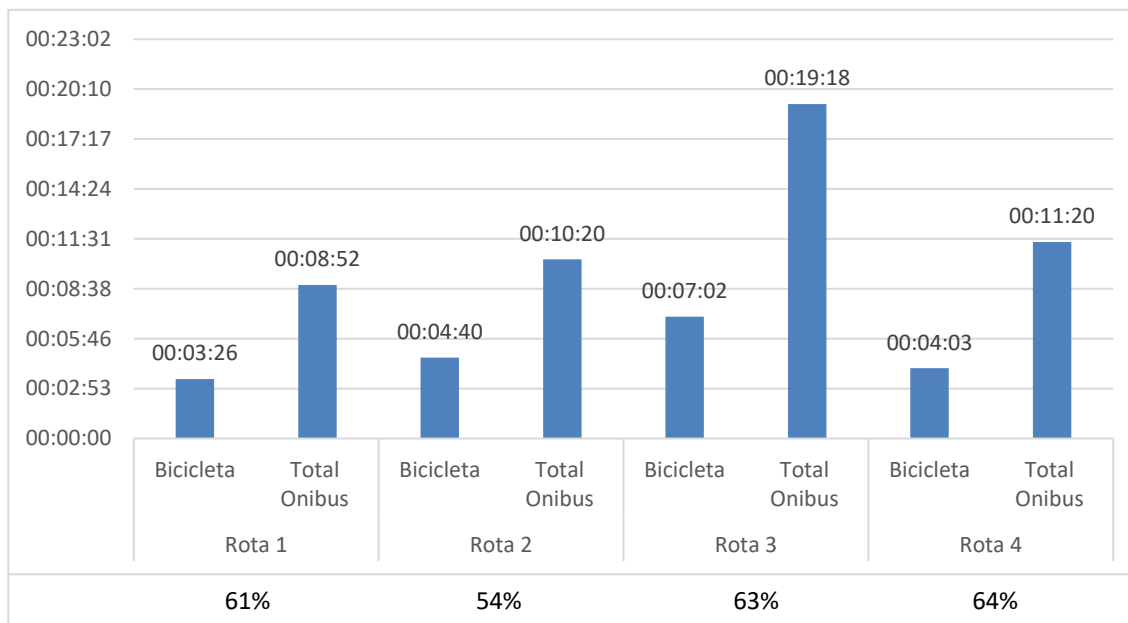


Figura 47 - Média de tempo - segunda a sexta - para C6 (em minutos e segundos)

O cenário C7 representa as velocidades intermediárias desta etapa de simulação, na qual a velocidade média para os ônibus é de 20km/h e, para as bicicletas, 15km/h. Apesar do transporte por ônibus possuir uma velocidade média maior que as bicicletas, os resultados demonstram que as bicicletas ainda apontam vantagem em relação aos tempos de deslocamento. Apresentando um ganho de eficiência que variou entre 38% e 51% nas rotas simuladas. Os tempos obtidos na simulação deste cenário são apresentados na Figura 48.

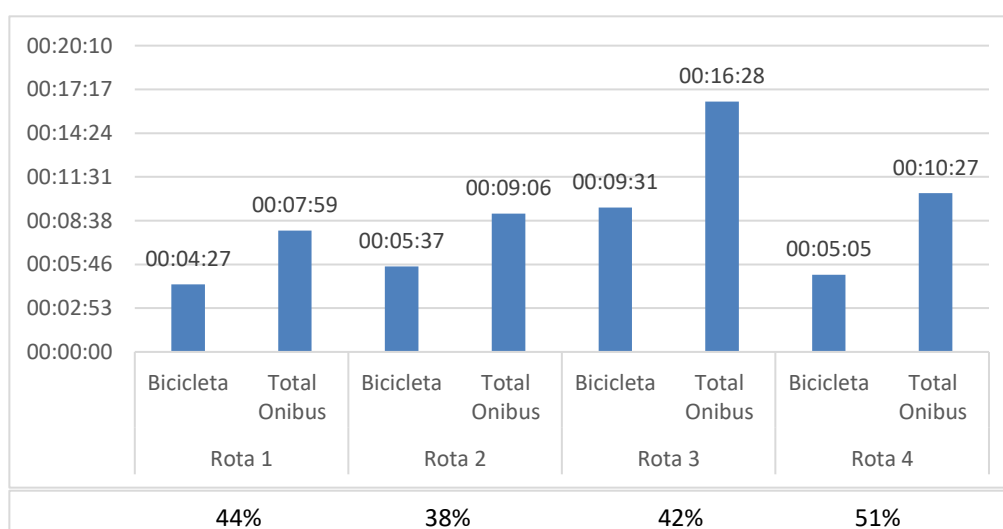


Figura 48 - Média de tempo - segunda a sexta - para C7 (em minutos e segundos)

A partir do cenário C8 a vantagem passa a ser do deslocamento realizado por ônibus. Neste cenário, considera-se que deslocamento por ônibus ocorre a uma velocidade média de 25 km/h. Os resultados indicaram, pela primeira vez, desvantagem com relação ao uso de bicicletas, com perda de eficiência de até 12% em comparação com o tempo necessário para o deslocamento por ônibus para o mesmo destino. Os tempos obtidos na simulação deste cenário são apresentados na Figura 49.

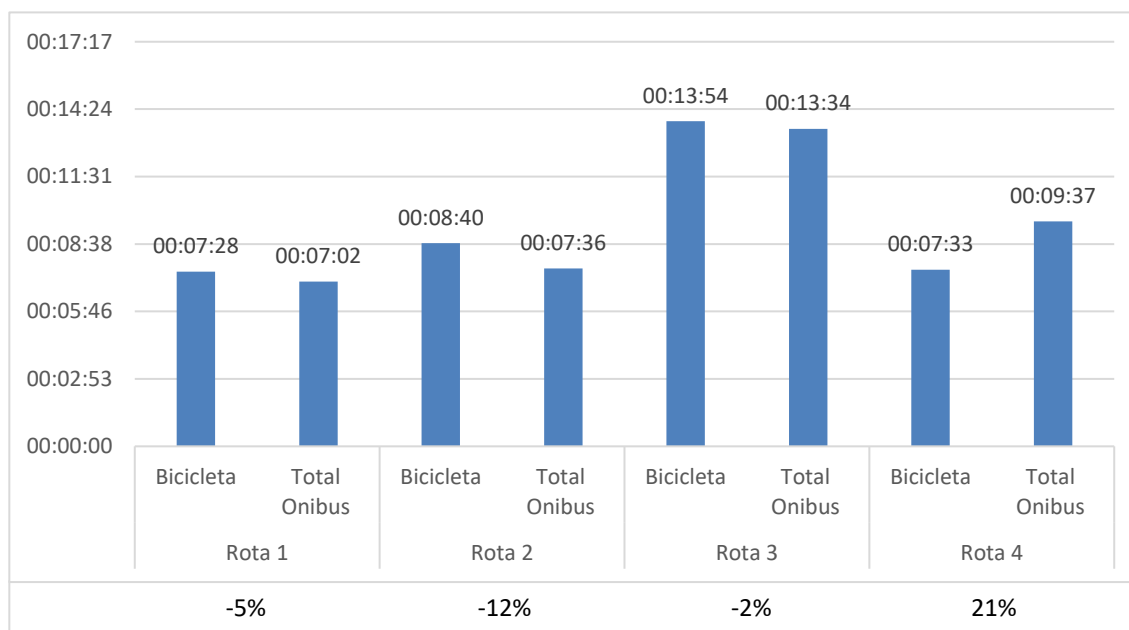


Figura 49 - Média de tempo - segunda a sexta - para C8 (em minutos e segundos)

Neste último cenário, C9, a velocidade média simulada para os ônibus foi de 30 km/h, 76% mais elevada que a média da cidade, enquanto a velocidade média simulada para as bicicletas foi de apenas 5 km/h, 44% menor que a média coletada em campo. Os resultados apontam uma perda de até 50% de eficiência em tempo para as bicicletas, quando comparada aos ônibus para o mesmo destino. Os tempos obtidos na simulação deste cenário são apresentados na Figura 50.

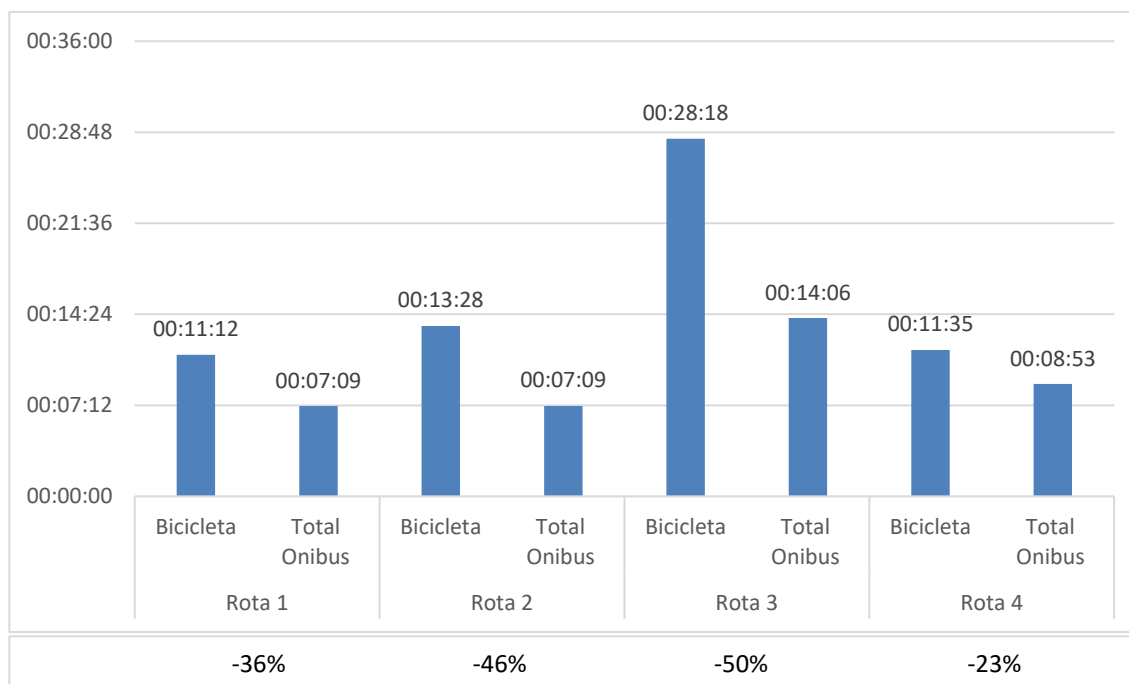


Figura 50 - Média de tempo - segunda a sexta - para C9 (em minutos e segundos)

Os resultados obtidos nesta segunda etapa de simulação apresentam considerações importantes para a análise. Nos C5 e C6 simulados nesta etapa, consideramos a vantagem de velocidade para o deslocamento por bicicletas, apresentando um ganho de eficiência de tempo superior a 70% para alguns destinos. No C7, onde houve equilíbrio entre as velocidades, as bicicletas ainda mantiveram vantagem, com resultados próximos aos simulados na primeira etapa. Entretanto, nos C8 e C9, a vantagem passou para o deslocamento por ônibus, fazendo com que a velocidade de deslocamento por bicicleta chegasse a apenas 5 km/h. Nesta situação, a perda de eficiência de tempo para o deslocamento por bicicleta chegou a até 50% quando comparada aos ônibus.

Desta forma, nota-se que, quanto melhor a infraestrutura nos trajetos, mais vantajosa a utilização de bicicletas compartilhadas, ainda que o deslocamento por ônibus seja eficiente no local. Esses resultados reforçam a importância não apenas da presença de ciclovias e ciclofaixas, mas também da expansão e melhoria dessas infraestruturas para incentivar e facilitar o uso de bicicletas como meio de transporte, proporcionando eficiência, segurança e promovendo alternativas sustentáveis para a mobilidade urbana.

A utilização do modelo de simulação permitiu a análise dos diversos cenários, sem necessidade de alteração física do local de estudo. Desta forma, este modelo demonstra ser uma ferramenta útil para auxílio na tomada de decisão quanto à implantação de infraestrutura adequada entre as estações de bicicletas compartilhadas.

5.3 Análise dos tempos das rotas

Na análise do gráfico, foram considerados todos os tempos por rota, representando cada um dos cenários propostos. Compararam-se os tempos de bicicleta e ônibus em quatro rotas diferentes. Nesta etapa, como análise complementar, foram demonstrados os nove cenários com os tempos em cada uma das rotas, iniciando em C1 e finalizando em C9.

Para esta primeira análise com base na Figura 51, utilizou-se os dados obtidos na Rota 1 (que pode ser visualizada na Figura 13). Assim, é possível identificar os pontos extremos de ambos os tempos para os dois meios de transporte.

Os tempos de ônibus foram observados nos cenários com os menores tempos foram C2, C8 e C9, sendo o maior tempo atribuído ao ônibus no cenário C5. Para as rotas de bicicleta, o menor tempo foi registrado no cenário C5, enquanto os maiores tempos foram nos cenários C8 e C9. Esses tempos nos permitem compreender as relações entre os resultados e os fatores que os influenciam.

Na Rota 1, tanto os ônibus quanto as bicicletas tiveram uma queda nos tempos no cenário C2, onde é simulada uma eficiência no sistema de transporte público, com ônibus e ciclofaixas. No cenário C5, os ônibus estão em baixa velocidade (10 km/h) e as bicicletas em sua velocidade máxima (25 km/h). Nos cenários C8 e C9, as bicicletas tiveram tempos piores devido à discrepância de velocidades entre os transportes: 5 km/h para bicicletas e 30 km/h para ônibus. Apesar dos resultados, observa-se uma vantagem no uso da bicicleta, devido ao tempo de espera inexistente no sistema e à possibilidade de se locomover entre os veículos mesmo em tráfego parado e denso.

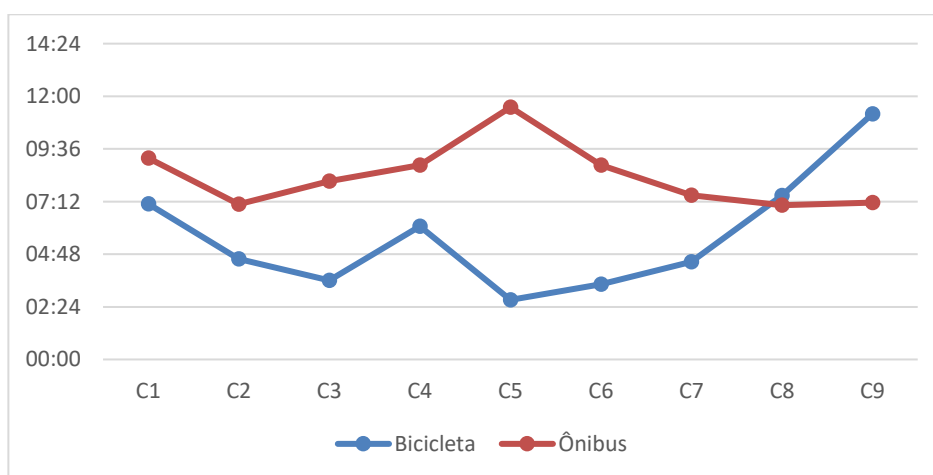


Figura 51 – Tempos para diferentes cenários na Rota 1 (em minutos e segundos)

Para esta segunda análise com base na Figura 52, utilizou-se os dados obtidos na Rota 2 (que pode ser visualizada na Figura 13), os menores valores de tempo para os ônibus foram registrados nos cenários C2, C8 e C9, enquanto o maior tempo gasto ocorreu no

cenário C5. Quanto às bicicletas, o menor tempo foi novamente observado no cenário C5, enquanto os maiores valores foram registrados nos cenários C8 e C9. O gráfico representado na Figura 52 reflete a mesma tendência identificada na análise anterior da Rota 1. Apesar das diferenças nas extensões das rotas, as bicicletas continuam a enfrentar desvantagens devido à sua velocidade comparativamente menor nos últimos dois cenários. No entanto, ao longo dos testes, as bicicletas demonstram uma vantagem relativa quando comparadas ao deslocamento de ônibus para o mesmo destino.

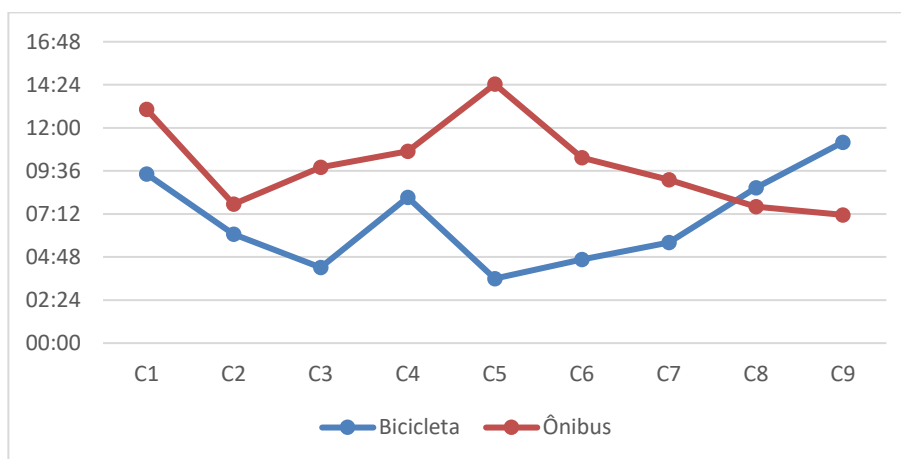


Figura 52 - Tempos para diferentes cenários na Rota 2 (em minutos e segundos)

Na análise para a Rota 3 com base na Figura 53, os menores valores de tempo para os ônibus foram registrados no cenário C9, enquanto o maior tempo gasto ocorreu no cenário C5. Quanto às bicicletas, o menor tempo foi novamente observado no cenário C5, enquanto o maior valor foi registrado o cenário C9. Neste gráfico pode-se analisar valores interessantes, pois o maior valor obtido de tempo para a bicicleta foi somente no cenário C9. Sendo assim, nota-se uma queda nos tempos diferentes dos obtidos nas rotas 1 e 2, resultado que pode estar relacionado à diferença dos trajetos realizado pelos ônibus, que é maior do que a da bicicleta.

Na análise da rota 4 com os valores presentes na Figura 54, os menores valores de tempo para os ônibus foram registrados no cenário C9, enquanto o maior tempo gasto ocorreu no cenário C5. Quanto às bicicletas, o menor tempo foi novamente observado no cenário C5, enquanto o maior valor foi registrado no cenário C9. Esses resultados seguem a tendência dos cenários da rota 3, no qual no C9 apresenta um maior tempo com o deslocamento de bicicleta e diferente dos outros no C4 os valores de tempo se encontram mais próximo das quatro rotas.

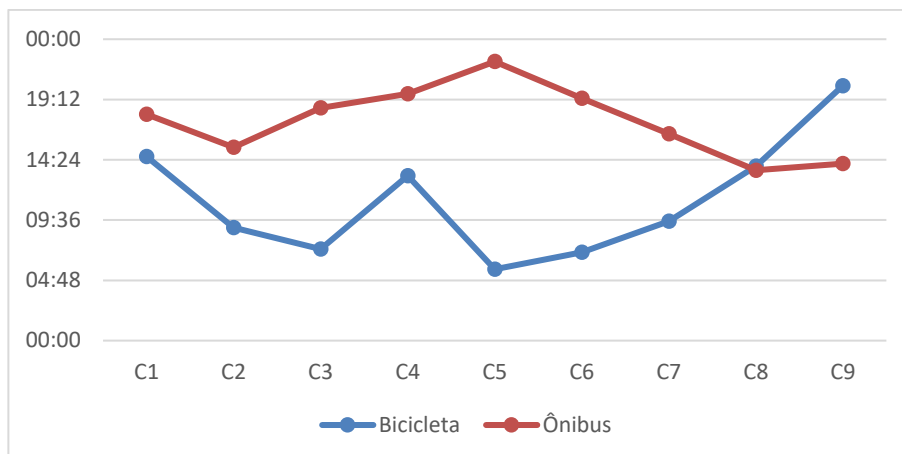


Figura 53 - Tempos para diferentes cenários na Rota 3 (em minutos e segundos)

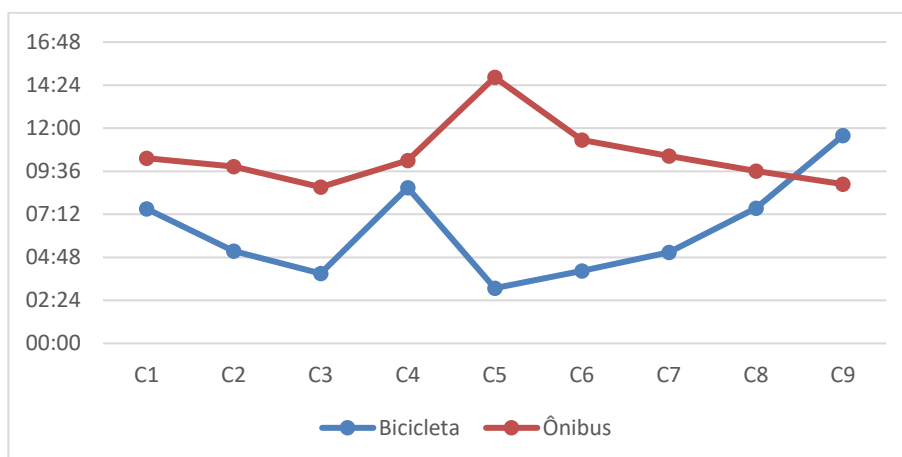


Figura 54 - Tempos para diferentes cenários na Rota 4 (em minutos e segundos)

Nas quatro rotas apresentadas pode-se observar que, apesar dos cenários alterarem muito as velocidades entre si, verifica-se a tendência das bicicletas terem vantagem na questão de tempo em seus trajetos. Verifica-se uma consistência e tendência na maioria dos cenários, tendo um aumento no tempo de percurso somente nos dois últimos cenários (C8 e C9), nos quais os ônibus tem vantagem de 20 a 25 km/h a mais em suas velocidades se comparadas a das bicicletas. Sendo assim, é possível afirmar que em locais nos quais as bicicletas tenham uma estrutura que proporcione uma maior fluidez em seu trajeto, se obtém vantagem ao utilizá-las para pequenas distâncias se comparadas a utilização do transporte público.

6 DISCUSSÕES

Neste capítulo, discute-se os aspectos do desenvolvimento do modelo de simulação para implantação de sistema de bicicletas compartilhadas e os resultados obtidos por meio dele.

Primeiro, deve-se ressaltar que, apesar de o modelo ter sido idealizado e desenvolvido para a cidade de Belo Horizonte, pode ser aplicado a qualquer outra cidade, de pequeno, médio ou grande porte, desde que tenha as informações necessários para inserção no modelo. Além disso, é possível adaptar o código de tomada de decisão do usuário, a partir de pesquisas qualitativas de perfil, que podem variar com a localidade.

Para esta aplicação, optou-se pela inclusão do sistema de ônibus local no modelo, com o motivo específico de comparação no tempo de deslocamento entre o sistema de bicicleta compartilhada e o sistema público de ônibus, sendo possível alteração de rotas e nível de serviço.

O uso deste modelo como ferramenta para auxílio à tomada de decisão, a partir da simulação de diferentes cenários, fornece um conjunto de informações para o planejamento de infraestruturas necessárias para a implantação de sistemas de bicicletas compartilhadas, além de auxiliar na integração das estruturas já existentes, como as ciclofaixas, promovendo a incorporação das bicicletas nos ambientes urbanos.

A adoção de um planejamento cicloviário por uma cidade ocorre por diversas razões, como: aprimoramento da mobilidade, diminuição nos índices de poluição sonora e atmosférica, promoção da saúde pública e redução dos custos e tempos associados aos deslocamentos urbanos. A integração da bicicleta ao sistema de mobilidade urbana deve ser planejada, levando em consideração as características específicas do local (BICICLETA NAS CIDADES, 2010).

A comparação dos resultados obtidos nos cenários de simulação, demonstrou que os deslocamentos utilizando o sistema de bicicletas compartilhadas apresentaram menor tempo de deslocamento para curtas distâncias em relação aos ônibus. Dentre os cenários simulados, pode-se destacar que, mesmo no cenário ideal, no qual ambos se deslocam de maneira eficiente, o deslocamento com bicicleta apresentou um ganho de tempo de até 44%.

Ao analisar os cenários adicionais, nota-se vantagem de até 79% nos tempos de deslocamento utilizando as bicicletas em comparação aos ônibus. Um ponto de destaque foi o desempenho alcançado quando a velocidade de deslocamento dos ônibus e bicicletas

eram próximos, cujo resultado ainda foi 51% melhor. Isso demonstra que em locais nos quais há segregação das vias, o deslocamento por bicicletas se torna eficiente e seguro.

O deslocamento por bicicletas é mais adequado para pequenas distâncias, demonstrando que esse tipo de transporte, quando bem implantado, faz parte de um sistema de transporte sustentável, além de promover a saúde e o bem-estar (SHAHEEN; GUZMAN; ZHANG, 2010; BANDEIRA *et al.*, 2017). Os modos não motorizados, especialmente a bicicleta, são essenciais para a mobilidade urbana no Brasil. A bicicleta, aliada à caminhada, é financeiramente viável para a maioria da população, sendo um modo democrático que proporciona amplo acesso aos benefícios urbanos e contribui para uma melhor qualidade de vida ao promover atividade física e evitar a poluição atmosférica (SANTOS *et al.*, 2021).

A etapa de pesquisa em campo possibilitou a coleta de dados na região de estudo. Desta forma, foi possível obter informações sobre a topografia, tempo e velocidade de deslocamento nas rotas propostas pelo modelo. Além disso, foram realizadas coletas em caminhos alternativos, buscando locais que oferecessem melhor infraestrutura para pedalar. Com isso, viu-se a possibilidade de mudança em uma das rotas sugeridas entre a estação Lagoinha e a Praça da Liberdade, a substituição do trajeto da Av. João Pinheiro para Av. Brasil, aumentou o deslocamento em 250 metros, porém a rota apresentou menor declividade.

Durante a coleta, observou-se que em locais onde não havia infraestrutura adequada para o deslocamento utilizando bicicletas, foi necessário compartilhar as vias com outros meios de transporte e, essa interação mostrou-se menos amigável em locais com elevado fluxo de veículos e onde a velocidade permitida era maior. A segurança é um ponto importante para incentivar o uso das bicicletas compartilhadas. Além disso, é importante que os ciclistas possam ter acesso a essa locomoção.

De acordo com Zhang *et al.* (2017), as características específicas das diferentes áreas urbanas de uma cidade têm um impacto direto nas escolhas da população local. Os autores sugerem que a aceitação dos usuários é maior em regiões com maior densidade populacional, diversidade, acessibilidade e infraestrutura voltada para bicicletas. Portanto, o acesso a esse tipo de transporte possibilita uma maior utilização do próprio sistema de compartilhamento de bicicletas.

Um dos fatores de limitação é que o modelo não considera a elevação nas vias, sugerindo rotas com base somente na distância e nos sentidos permitidos. Dessa forma, o modelo pode sugerir rotas que não são confortáveis para os deslocamentos por bicicletas.

Para a inclusão dessa variável a ser considerada no modelo, seria necessário um estudo aprofundado sobre o grau de esforço em inclinação na cidade de estudo.

Apesar de já existirem as bicicletas compartilhadas no entorno do centro, a estrutura e a quantidade de bicicletas oferecidas são baixas. Além disso, durante a coleta, observou-se que grande parte das bicicletas e dos pontos de retirada não recebiam manutenção há algum tempo. Isso ficava mais visível devido ao desgaste aparente nos locais de retirada das bicicletas.

A coleta de dados em campo é uma fase essencial para pesquisa. Configura-se como um procedimento metodológico fundamental, orientando o pesquisador na decisão de aplicar ou não os resultados em sua área de estudo. É crucial destacar que a confiabilidade e a validade não são características estáticas, variando conforme as circunstâncias, a população-alvo, o tipo de pesquisa e os objetivos do estudo (SANTANA; WARTHA, 2020). Essa etapa, além de possibilitar a validação estatística do modelo, auxilia na tomada de decisão de quem for aplicar esse tipo de ferramenta, pois a partir da coleta no local de estudo, é possível conhecer as condições reais do local e buscar alternativas para mitigar ou até mesmo evitar locais nos quais dificultariam o deslocamento utilizando as bicicletas.

Soriguera e Jiménez (2020), apresentaram, através do SBA, um modelo simplificado para o *design* estratégico de sistemas de compartilhamento de bicicletas, considerando variáveis como o número de bicicletas, estações e operações de desbalanceamento. O modelo de simulação proposto no presente trabalho apresenta uma diferença significativa, ao passo que oferece uma visualização gráfica, que torna a análise do comportamento do sistema mais intuitiva. Ao contrário das ferramentas que utilizam de modelos matemáticos, o *software* utilizado para a construção do modelo não depende exclusivamente de fórmulas matemáticas para conduzir as simulações. Outra diferença relevante é que os pontos das estações são determinados pelos idealizadores do projeto, em vez de serem calculados automaticamente pelo modelo, o que permite maior flexibilidade e controle na definição dos locais estratégicos para a implantação das estações de compartilhamento de bicicletas.

7 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi desenvolver e aplicar um modelo de simulação híbrida para a análise de sistemas de transporte urbano com bicicletas compartilhadas, integrando duas metodologias: a Simulação Baseada em Agentes (SBA) e a Simulação de Eventos Discretos (SED). O modelo foi desenvolvido e aplicado na região da Avenida do Contorno, na região central de Belo Horizonte, MG. Além da construção do modelo, realizou-se um comparativo entre os tempos de deslocamento dos sistemas de transporte público por ônibus disponíveis na região e do sistema de bicicletas compartilhadas.

O estudo revelou-se promissor ao representar as situações por meio da simulação, permitindo a alteração dos parâmetros de entrada, como a velocidade e número de agentes, trajetos e escolha do usuário, para a criação de diferentes cenários. Isso proporcionou flexibilidade para análise e estudo de diferentes condições e situações. O *software AnyLogic*, mostrou-se adequado para a criação do modelo, e as ferramentas de SBA (Análise Baseada em Agentes) e SED (Análise de Sistemas Dinâmicos) foram eficazes para a aplicação, trabalhando em conjunto para permitir seu funcionamento.

No que diz respeito a análise dos resultados nos cenários principais, os deslocamentos por bicicletas compartilhadas superaram o transporte público por ônibus em termos de eficiência de tempo. Mesmo em condições desafiadoras, como congestionamentos, as bicicletas ofereceram ganhos de tempo expressivos, variando de 14% a 61%.

A análise dos cenários alternativos, nos quais houve maior discrepância de velocidade entre os modos de transporte, mostra que o deslocamento por bicicletas compartilhadas na região de estudo tem desempenho de tempo inferior aos ônibus quando a infraestrutura favorece o deslocamento por ônibus, tendo uma perda de até 50%, porém, quando há infraestrutura adequada para ambos os meios de transporte, ou vantagem para as bicicletas compartilhadas, o ganho de tempo no deslocamento pode chegar até 79%.

Na análise dos tempos de rotas, a comparação dos cenários C5 a C9 revela uma tendência crescente no tempo de deslocamento para bicicletas à medida que a velocidade diminui, resultando em uma perda de eficiência de até 82% no cenário menos favorável. Essa diminuição na eficiência pode ser atribuída a uma combinação de fatores, como a distância percorrida, as condições da estrada, a presença de obstáculos e o fluxo de tráfego.

Esses resultados enfatizam a importância vital de investimentos em infraestrutura cicloviária para promover uma mobilidade urbana mais ágil, sustentável e eficiente.

Durante a coleta de dados no local, ficou evidente a falta de estrutura em algumas das rotas, o que dificultou tanto a coleta quanto o deslocamento na cidade. Isso se deve não apenas ao grande número de veículos, mas também à necessidade, em algumas situações, de dividir o espaço com pedestres que utilizam a ciclofaixa, nos locais onde existe essa infraestrutura.

Os resultados apresentados indicam que o modelo desenvolvido possibilita a avaliação de diversos cenários nos quais os agentes interagem com diferentes tipos de transporte. Ele é capaz de auxiliar na tomada de decisão, demonstrando que o deslocamento por bicicletas é viável no local de estudo.

É importante ressaltar que, além do modelo, é necessário verificar o local em que se pretende implementar o sistema de bicicletas, pois isso facilita a tomada de decisão e pode influenciar os trajetos em que se pretende inserir ciclofaixas ou ciclovias para atender aos usuários de bicicleta. Durante a pesquisa de campo no local de estudo observou-se a possibilidade de mudança em uma das rotas sugeridas entre a estação Lagoinha e a Praça da Liberdade, a substituição do trajeto da Av. João Pinheiro para Av. Brasil, devido as inclinações acentuadas da rota originalmente sugerida. Portanto, foi extremamente importante a coleta de dados no local de estudo para a validação do modelo e entendimento das características da cidade, além de vivenciar a experiência do ciclista em um grande centro, lidando com a divisão de espaços com outros meios de transporte e pedestres e a variabilidade do relevo local.

Uma das rotas sugeridas pelo modelo indicava o trajeto pela Av. Afonso Pena, a qual, na época da construção do modelo, ainda não contava com ciclovias. No entanto, ao decorrer da pesquisa, a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (2022), informou que a Av. Afonso Pena será revitalizada, melhorando as vias públicas e implantando ciclovias, exatamente como o modelo havia sugerido.

Com base na análise dos dados apresentados, pode-se concluir que existem vantagens no uso da bicicleta, especialmente em termos de tempo de espera (inexistente) e capacidade de navegação em situações de tráfego congestionado. Isso sugere que medidas para promover o uso da bicicleta, como infraestrutura cicloviária adequada e políticas de compartilhamento de vias, podem ser benéficas para melhorar a eficiência do transporte urbano. No entanto, é importante reconhecer que cada cidade apresenta suas próprias características e desafios, e a implementação de soluções eficazes requer uma abordagem integrada que leve em consideração as necessidades e preferências dos usuários, bem como as condições específicas de cada localidade.

Conclui-se, portanto, que a inclusão de um sistema de bicicletas compartilhadas como alternativa de transporte urbano para curtas distancias, além de se mostrar uma opção viável, proporciona diversos benefícios para os usuários, como redução nos tempos de espera e de deslocamento, redução nos índices de poluição sonora e ambiental, redução do trânsito de veículos, implantação de infraestrutura adequada e segurança. Além disso, por ser um transporte ativo, o retorno para a saúde do usuário é positivo, uma vez que ele estaria praticando atividade física diária nos deslocamentos.

7.1 Limitações e trabalhos futuros

Um dos fatores limitantes é que o modelo não leva em consideração a elevação nas vias, sugerindo rotas com base apenas na distância e nos sentidos permitidos. Embora o *AnyLogic* 8.8.6 forneça ferramentas para incorporar informações geográficas no modelo, não inclui dados relativos à elevação das vias. Além disso, seria necessário um estudo aprofundado sobre o grau de esforço em inclinação na cidade de estudo.

Para futuros trabalhos a inclusão do grau de esforço como uma variável para a tomada de decisão do modelo tornaria o resultado mais abrangente em cidades que apresentam uma topografia variada. Além disso, seria relevante calcular a quantidade de bicicletas conforme a demanda e a localização, levando em consideração o interesse da população.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, J. A. R., PINYOL, F., NORIA, X. E SANCHEZ, M. L. State-of-the-art of software tools for agent-based simulations, **Research Report**, 2001.

AHMEDH.M., SCOBLEM.J., DUNBARE.S. A comparison between Offset Herringbone and El Teniente underground cave mining extraction layouts using a discrete event simulation technique, **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**. v.30, n.2, p.71-91, 2016.

ALPKOKIN, P.; BLACK, J.; IYINAM, S.; E KESTEN, A. S. Historical analysis of economic, social and environmental impacts of the Europe-Asia crossings in Istanbul. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 10, n. 2, p. 65–75, 2016.

ALVES, R. *et al.* Modelo de simulação baseada em agentes para avaliar política de distribuição de cargas urbanas do e-commerce. **TRANSPORTES**, v.27, n.3, p.99–114, 13 nov. 2019.

APPOLINARIO F. **Metodologia da Ciência Filosofia e Prática da Pesquisa**. GENGAGE Learning, 2ª edição, p.60-63, 2015.

AZIZ, H. M. A. *et al.* A high-resolution agent-based model to support walk-bicycle infrastructure investment decisions: A case study with New York City. **TRANSPORTATION RESEARCH PART C-EMERGING TECHNOLOGIES**, v.86, p.280–299, jan. 2018.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-Event System Simulation**. 5. Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.

BARCZAK, R., & DUARTE, F. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. Urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.4, n.1, p.13-32, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S2175-33692012000100002>.

BATTISTON M, OLEKSZECHEN N, DEBATIN NETO A. Barreiras e facilitadores no uso da bicicleta em deslocamentos diários: alternativas para a mobilidade urbana, **Revista de Ciências Humanas**, v.51, n.1, p.269-286, 2017.

BERTRAND J. W. M., FRANSOO J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, p.241-264, 2002.

BHTRANS - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte. **Rotas Cicloviárias**. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transportes/bicicletas/rotas-cicloviarias>. Acesso em: 20/06/2023.

BONABEAU, E. Agent-Based Modelling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)**, v.99, n.3, p.7280-7287, 2002.

BORGES, Fernanda. **Espera média por transporte público em BH foi de 24 minutos em 2022**. Estado de Minas, Belo Horizonte, 31 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2023/01/31/interna_gerais,1451074/espera-media-por-transporte-publico-em-bh-foi-de-24-minutos-em-2022.shtml>. Acesso em: 20/06/2023.

BRITO, SVA, **O novo conceito de mobilidade urbana, dos limites do planeta e sua relação com as políticas de mudanças climáticas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Direito ambiental e desenvolvimento sustentável), Escola Superior Dom Helder Câmara - (ESDH), Belo Horizonte, 2013.

BURSE, F.; FERRARA, A.; GRASSI, A. e RONZONI, C. Simulating continuous time production flows in food industry by means of discrete event simulation. **International Journal of Food Engineering**, v.11, n.1, p.139-150, 2015.

CADURIN, L. D. P.; RODRIGUES DA SILVA, A. N.. Estudo exploratório da demanda potencial para um sistema de compartilhamento de bicicletas pedelecs. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, p. 372–384, out. 2017.

CAGGIANI, L; CAMPOREALE, R. Toward Sustainability: Bike-Sharing Systems Design, Simulation and Management. **Sustainability**, 13, 2021.

CELIS-MORALES CA, LYALL DM, WELSH P, *et al*. Associação entre deslocamento ativo e doenças cardiovasculares, câncer e mortalidade incidentes: estudo de coorte prospectivo. **BMJ** v.357: p.1456, 2017.

CHWIF, L.; MEDINA, A. **Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria e aplicações**. 4ed. São Paulo: Elsevier Brasil, 2015.

COMISSÃO EUROPEIA. **Cidades para bicicletas, Cidades de Futuro. Bruxelas**, 2000. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/archives/cycling/cycling_pt.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2022.

COMITÉ DE DIRECÇÃO DO PROGRAMA PAN-EUROPEU TRANSPORTES, Saúde e Ambiente. **Quarta Reunião de Alto Nível sobre Transporte, Saúde e Meio Ambiente**. Paris, França, 2014.

CORRÊA R, CUNHA K, BOARETO R. **A bicicleta e as cidades: como inserir a bicicleta na política de mobilidade urbana**. 2.ed. – São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2010/01/02%20-%20BRASIL_A%20bicicleta%20e%20as%20cidades_IEMA.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2022.

- DUPUY, G., “Cidades e dependência do automóvel”. **Les contrariétés de la densité, Revue d'Economie Régionale et Urbaine**, v.I, p.141–156, 2002.
- FAKHIMI, M.; ANAGNOSTOU, A.; STERGIOULAS, L.; TAYLOR, S. J. E. **A Hybrid Agent-Based and Discrete Event Simulation Approach for Sustainable Strategic Planning and Simulation Analytics**. In: Winter Simulation Conference, Proceedings. Savannah, GA, USA, 2014.
- FAN, YIWEI; WANG, GANG; LU, XIAOLING. Distributed forecasting and ant colony optimization for the bike-sharing rebalancing problem with unserved demands. **PLoS ONE**, v.14, n.1, p. e0209979, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0209979.
- FERNÁNDEZ-HEREDIA, A.; MONZÓN, A.; JARA-DÍAZ, S. Understanding Cyclists’ Perceptions, Key for Successful Bicycle Promotion. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v.63, p.1-11, 2014.
- FERREIRA; MELO SR; LIMA, DUTRA TJ. Dutra. Por que compartilhar? um estudo sobre a Economia Compartilhada na cidade de Fortaleza. **Revista Gestão em Análise**, v.7, n.2, p.120-132, dez. 2018.
- FRANCO, C. M. A. **Incentivos e empecilhos para a inclusão da bicicleta entre universitários**. Dissertação (Mestrado em Psicologia) - Curso de Pós-graduação em Psicologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 107 f, 2011.
- GOMIDE, A. A. **Mobilidade urbana, iniquidade e políticas sociais**. In IPEA. Políticas sociais – acompanhamento e análise. p.242-250. Brasília: IPEA, 2006.
- GRIGORYEV, I., **AnyLogic in three days: a quick course in simulation modeling**. Hampton, NJ:AnyLogic North America, 2012.
- GRIMM, V. *et al.* A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. **Ecological Modelling**, v.198, n.1-2, p.115-126, 15 set. 2006.
- GRIMM, V. *et al.* The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v.23, n.2, 2020.
- GUO, Y. *et al.* Station Function Discovery: Exploring Trip Records in Urban Public Bike-Sharing System. **IEEE Access**, v.6, p.71060–71068, 2018.

GUZMAN, L. A.; ARELLANA, J.; ALVAREZ, V. Confronting congestion in urban areas: Developing Sustainable Mobility Plans for public and private organizations in Bogotá. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v.134, n. March 2019, p.321–335, abr. 2020.

HELENE, Otaviano Augusto Marcondes. **Andar confortavelmente**. Disponível em: <<https://axpfep1.if.usp.br/~otaviano/Andar.html#:~:text=Assim%2C%20a%20velocidade%20confort%C3%A1vel%20de,bem%20t%C3%ADpicas%20para%20seres%20humanos>>. Acesso em: 14 jan, 2023.

HICKMAN, R.; HALL, P.; BANISTER, D. Planning more for sustainable mobility. **Journal of Transport Geography**, v.33, p.210–219, 2013.<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.07.004>

HIPOGROSSO, S.; NESMACHNOW, S. Analysis of sustainable public transportation and mobility recommendations for montevideo and parque rodó neighborhood. **Smart Cities**, v.3, n.2, p.479–510, 1 jun. 2020.

HOLDEN B, Linnerud K, Banister D. Sustainable passenger transport: Back to Brundtland. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v.54, p.67–77, 2013.

HU, Y. *et al.* Examining and optimizing the BCycle bike-sharing system – A pilot study in Colorado, US. **Applied Energy**, v.247, p.1–12, 1 ago. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Cidades e Estados**, 2021, Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-horizonte.html>>. Acesso em: 10 set. 2022.

INGALLS, R. G. **Introduction to simulation**. In: Winter Simulation Conference, Proceedings... Miami, FL, USA, 2008.

ITAU. Bicicletas compartilhadas: veja a evolução e as vantagens para mobilidade. **Bike Itaú**, 2022, Disponível em: <<https://bikeitau.com.br/blog/bicicletas-compartilhadas/>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

ITDP. Financiamento e administração de sistemas públicos de bicicletas compartilhadas, **Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento**. 2018, Disponível em: <http://itdpbrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/01/ITDP_TA_Financiamento_Bicicletas_Compartilhadas_Jan_2018-2.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2022.

ITDP. Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento, Guia de Sistemas de Bicicletas Compartilhadas, **Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento**, 2018, Disponível em: <http://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2019/05/2-BSPG_Portugu%C3%AAs-1.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2022.

JIA, Y., ZENG, W., XING, Y., YANG, D., LI, J. The Bike-Sharing Rebalancing Problem Considering Multi-Energy Mixed Fleets and Traffic Restrictions. **Sustainability**, v.13, n.270, 2021.

KAGER, R., L. BERTOLINI E M. TE BROMMELSTROET. Characterization and Reflections on the Synergy of Bicycles and Public Transport. **Transport Research Part A: Policy and Practice**, v.85, p.208-219, 2016.

KAMAU, J; AHMED, A; REBEIRO, A; KITAOKA, H; OKAJIMA, H; RIPON, ZH, Demand responsivo mobilidade como serviço. **IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)**, pp. 001741–001746, 2016.

KELTON, W. D.; LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. McGraw Hill Boston, 2000.

LARGURA, A. E. **Fatores que influenciam o uso de bicicleta em cidades de médio porte - estudo de caso em Balneário Camboriú-SC**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Curso de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 111 f, 2012.

LARRANAGA, A. M., ARELLANA, J., GARZÓN, L., JANSSON ALMEIDA, B., & TRICHÈS LUCCHESI, S Willingness of public transport users to walk for more frequent service: application of best-worst and stated preference. **TRANSPORTS**, v.29, n.3, 2021.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 2 edição ed. McGraw-Hill, v. 2, 1991.

LI, W; KAMARGIANNI, M. Providing quantified evidence to policy makers for promoting bike-sharing in heavily air-polluted cities: A mode choice model and policy simulation for Taiyuan-China. **Transportation Research Part A**, v.111, p.277-291, 2018.

LITMAN, T. Planilha de requisitos de transporte terrestre. Victoria: **Victoria Transport Policy Institute**, 2014.

LOAIZA-MONSALVE, D; RIASCOS, A. P. Human mobility in bike-sharing systems: Structure of local and non-local dynamics. **PLoS ONE**, v.14, n.3, 2019.

LOBO, Z. Bike Rio, 4ª Geração já está nas ruas, **transporte ativo**, 2018. Disponível em: <<http://transporteativo.org.br/ta/?p=11115>>.Acessado em: 10 jan. 2023.

MACAL, C. M. E NORTH, M. J. (2006) Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation Part 2: How to model with agents, in Perrone, L. F., Wieland, F. P. Lawson, B. G., Nicol, D. M. and Fujimoto R. M., J. A. (eds.), **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, 2006.

MACAL, C. M. Everything you need to know about agente-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v.10, n.02, pp.144-156, 2016.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. SAMUELSON, D. A. **Elements of Agent-Based Simulation In:** GASS, S. I.; FU, M. C. (Ed). Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 3. Ed. New York: Springer, Cap. Agent-Based Simulation, pp.8-16, 2013.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agente-based modeling and simulation. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Florida, 2005.

MACAL, C.; NORTH, M. Introductory Tutorial: Agent-Based Modeling and Simulation. In: **Winter Simulation Conference, Proceedings**. Savannah, GA, USA, 2014.

MACHÍ CASTAÑER, CARME & ALONSO, MARCELA & RUCHTI, VALÉRIA. A bicicleta como modal de transporte sustentável para a cidade de São Paulo: o estudo de caso da trilha norte-sul. Revista LABVERDE.MARICATO, **O impasse da política urbana no Brasil**. (3a Ed.). Petrópolis: Vozes, 2015.

MATTIOLI, G. *et al.* The political economy of car dependence: A systems of provision approach. **Energy Research & Social Science**, v.66, n. February, p.101486, ago. 2020.

MIGUEL, P. A. C.; MORABITO, R.; PUREZA, V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2009.

MIGUEL, P. A.; FLEURY, A; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N... **Research methodology in Production Engineering and Operations Management**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MILLER, P. *et al.* Public transportation and sustainability: areview. **Ksce Journal of Civil Engineering**, v.20, n.3, p.1076–1083, 2016.

MINAYO, M. C. S. **Seis características das mortes violentas no Brasil**. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v.26, n.1, p.135-140, 2009.

MOBILIDADE ESTADÃO. Uso de bikes compartilhadas no Brasil aumentou 400% em 10 anos. **Revista Estadão**, São Paulo. 2023 Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/pesquisa-uso-de-bikes-compartilhadas-no-brasil-aumentou-400-em-10-anos/>. Acesso em: 20/06/2023.

MONTEVECHI J.A.B., LEAL F., PINHO A.F., COSTA R.F.S., OLIVEIRA M.L.M, SILVA A.L.F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company, **Winter Simulation Conference, Proceedings**... Baltimore, USA, 2010.

NAÇÕES UNIDAS. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil, **ONU**. 2022. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v.33, p.241-261, 2014.

OLIVEIRA, J. M. de. **Identificação de fatores que contribuem para o uso da bicicleta como transporte urbano**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Curso de Pós- graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 173 f, 2012.

PEZZUTO, C. P. E SANCHES, S. P. Identificação dos fatores que influenciam o uso da bicicleta. **XVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Florianópolis, 2004.

PIDD, M. Computer Simulation in Management Science. **John Wiley and Sons**, Chichester, UK. 2004.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. Números do Transporte Coletivo. **Prefeitura de Belo Horizonte**, 2022 Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transparencia/transparencia-no-transporte-coletivo/numeros-transporte-coletivo>>Acesso em: 17 ago. 2022.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. Prefeitura anuncia projeto de revitalização da Avenida Afonso Pena. **Prefeitura de Belo Horizonte**, 2023 Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/prefeitura-anuncia-projeto-de-revitalizacao-da-avenida-afonso-pena>. Atualizado em: 3 ago. 2022, 19:16. Acesso em: 6 jun. 2023.

RABELLO, CRUZ RENATA, **Sistema de Bicicletas Compartilhadas: disputa de espaço urbano**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

RICHARDSON, B. C. Sustainable transport: Analysis frameworks. **Journal of Transport Geography**, v.13, n.1, p.29–39, 2005.

RIJSMAN, L., N. VAN OORT, D. TON, S. HOOGENDOORN, E. MOLIN E T. TEIJL. Áreas de Captação de Caminhadas e Bicicletas de Paragens de Eléctricos: Fatores e Percepções. Proc., 6th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Cracóvia, Polónia, IEEE, Nova York, 2019.

RMBH. Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, **Matrizes de origens e destino**, 2021 Disponível em: < <http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/bi-matrizes-origem-destino/>>

ROBINSON, S. Choosing the right model: Conceptual modeling for simulation. Proceedings of the 2011 **Winter Simulation Conference (WSC)**, p.1423–1435, 2011.

RUBIM, B., & LEITÃO, S. O Plano de Mobilidade Urbana e o futuro das cidades. **Estudos Avançados**, v.27, n.79, p.55-66, 2013.

SANTANA, DRIANE ANNE SILVA DE; WARTHA, EDSON JOSÉ. Construção e validação de instrumento de coleta de dados na pesquisa em Ensino de Ciências. Construction and validation of data collection instrument in science teaching research. Amazônia: **Revista de Educação em Ciências e Matemáticas**, v.16, n.36, p.39-52, 2020. ISSN: 2317-5125.

SANTOS, JANIO LAURENTINO DE JESUS; SANTOS, LUIZ EDUARDO PEREIRA FERREIRA DOS. **Planejamento e Mobilidade Urbana no Brasil: O Uso da Bicicleta como uma Nova Maneira de Pensar e Construir a Cidade**. Feira de Santana, BA: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), 2021.

SHAHEEN, S. A., GUZMAN, S., & ZHANG, H: Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, p.159-16, 2010.

SIEBERS, P. O.; MACAL, C. M.; GARNETT, J.; BUXTON, D.; PIDD, M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! **Journal of Simulation**, v.4, n.3, p.204-210, 2010.

SMITH, M.J.; GOODCHILD, M.F.; LONGLEY, P.A Geopatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, **Techniques and Software Tools Leicester**, Londres: Troubador Publishing Ltda., 2007.

SORIGUERA, F.; JIMÉNEZ-MEROÑO, E. A continuous approximation model for the optimal design of public bike-sharing systems. **Sustainable Cities and Society**, v.52, 1 jan. 2020.

SORIGUERA, F; CASADO, V; JIMÉNEZ-MEROÑO, E. A simulation model for public bike-sharing systems. **Transportation Research Procedia**. V.33, p.139-146, 2018.

STEIL FERRAZ, I; SIMÕES GOMES, N; KOB, F., CORREA DA SILVA, M; FASSI CASAGRANDE JÚNIOR, E. Avaliação do uso da primeira Via Calma em Curitiba/PR para ciclomobilidade. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urban.**, v.9, n.2, 2017.

STERN, N; STERN, NH. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, **Cambridge University Press**: Boston, 2007.

TANIGUCHI, E; THOMPSON, R. G; YAMADA, T. *Emerging Techniques for Enhancing the Practical Application of City Logistics Models*. **Procedia -Social and Behavioral Sciences**, v.39, p.3–18, 2012.

UNIÃO EUROPEIA. Transportes seguros, sustentáveis e conectados. **EU**, 2022. Disponível em: <https://european-union.europa.eu/priorities-and-actions/actions-topic/transport_pt>. Acesso em: 28 jul. 2022.

UNIMED BELO HORIZONTE. Bicicletas Unimed-BH: mobilidade urbana sustentável. 2022. Disponível em: <<https://viverbem.unimedbh.com.br/qualidade-de-vida/bicicletas-unimed-bh/>>. Acesso em: 13 jan. 2022.

VASCONCELLOS, EA; BALBI, R; KRAUSE, C; LINKE, CC. Cidade e movimento: mobilidades empresariais e negócios, no desenvolvimento urbano). Ipea: Brasília, ITDP, p.326, 2016.

VEIGA DE CAMARGO, P; BARBIERI DA CUNHA, C. An hybrid simulation-optimization model for assessing the capacity of a closed-loop rail transport system for bulk agricultural grains. **Journal of Transport Literature**, v.6, n.2, p.33–65, 2012.

WAHLGREN, L.; SCHANTZ, P. Bikeability and methodological issues using the active commuting route environment scale (ACRES) in a metropolitan setting. **BMC Medical Research Methodology**, v.11, n.6, p.1-20, 2011.

WBCSD, World Business Council for Sustainable Development. Methodology and Indicator Calculation Method for Sustainable Urban Mobility. **Technical Report 978-2-940521-26-5**, 2015. Acesso em: <https://www.eltis.org/sites/default/files/trainingmaterials/smp2.0_sustainable-mobility-indicators_2ndedition.pdf> 8 de junho de 2022.

WCED. Our Common Future. World Commission on Environment and Development. **Oxford University Press**, Oxford, 1987.

YAN, D; GUO, J; LIU, Z; HUANG, W. A Novel Hybrid Evaluation Method for Transfer Efficiency Assessment between Rail Transit and Public Bicycles. **PROMET - Traffic&Transportation**. v.32, p.279-282, 2020.

ZHANG, T; ZHANG, D. Agent-based simulation of consumer purchase decision-making and the decoy effect. **Journal of Business Research**. v.60, p.912-922, 2007.

ZHAO, X. *et al.* Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. **Journal of Cleaner Production**, v.256, p.120404, maio 2020.

ZHOU, X; WANG, M; LI, D. Bike-sharing or taxi? Modeling the choices of travel mode in Chicago using machine learning. **Journal of Transport Geography**, 79, 102479, 2019.