



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba  
Campus João Pessoa

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação  
Nível Mestrado Profissional

JUAN CÁSSIO OLIVEIRA MARQUES

# **RECOMENDAÇÃO DE ROTAS PARA CADEIRANTES NO TRANSPORTE PÚBLICO EM JOÃO PESSOA**

JOÃO PESSOA - PB

2026

**Juan Cássio Oliveira Marques**

**Recomendação de Rotas para Cadeirantes no Transporte  
Público em João Pessoa**

Defesa de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologia da Informação pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dantas Nobre Neto

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Neiva Moreno

João Pessoa - PB

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha - *campus* João Pessoa, PB.

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| M357r | <p>Marques, Juan Cássio Oliveira</p> <p>Recomendação de rotas para cadeirantes no transporte público em João Pessoa / Juan Cássio Oliveira Marques. – 2026.</p> <p>88 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Informação) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação – PPGTI.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Francisco Dantas Nobre Neto.</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Bruno Neiva Moreno.</p> <p>1. Algoritmos de roteamento. 2. Transporte público. 3. Acessibilidade urbana. 4. Sistemas de Informação Geográfico (SIG). I. Título.</p> <p>CDU 004.421:656.121</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**JUAN CÁSSIO OLIVEIRA MARQUES**

**RECOMENDAÇÃO DE ROTAS PARA CADEIRANTES NO TRANSPORTE PÚBLICO EM JOÃO  
PESSOA**

**DISSERTAÇÃO** submetida Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB, Campus João Pessoa, como requisito para obtenção do título de **Mestre em Tecnologia da Informação**.

Aprovado em 28/05/2026 08:30.

**Membros da Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. FRANCISCO DANTAS NOBRE NETO**

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)  
*Orientador(a) Interno(a)*

**Prof. Dr. BRUNO NEIVA MORENO**

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)  
*Coorientador(a) Interno(a)*

**Prof. Dr. DIEGO ERNESTO ROSA PESSOA**

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)  
*Examinador(a) Interno(a)*

**Prof. Dr. PAULO RIBEIRO LINS JUNIOR**

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)  
*Examinador(a) Interno(a)*

**Prof.<sup>a</sup> Dra. VALERIA CESARIO TIMES**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
*Examinador(a) Externo(a)*



Documento assinado eletronicamente por:

- **Francisco Dantas Nobre Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/08/2026 09:51:07.
- **Bruno Neiva Moreno**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/08/2026 09:58:52.
- **VALERIA CESARIO TIMES**, PRESTADOR DE SERVIÇO, em 26/08/2026 16:25:14.
- **Diego Ernesto Rosa Pessoa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/08/2026 21:37:25.
- **Paulo Ribeiro Lins Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/08/2026 22:17:04.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/08/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 929396  
Verificador: fc0c78dc24  
Código de Autenticação:



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder serenidade e perseverança nos momentos mais difíceis desta trajetória. À minha família, expresso minha profunda gratidão: aos meus pais, pelo apoio incondicional e pelo constante incentivo à minha formação; à minha irmã, pelas orientações e pela generosidade de seu tempo; e à minha esposa, pela motivação diária, compreensão e apoio.

Aos meus orientadores, professor Francisco Dantas Nobre Neto e professor Bruno Neiva, agradeço pela confiança, pelas contribuições acadêmicas e pelo direcionamento ao longo desta pesquisa. Em especial, registro minha gratidão pelo apoio na definição, estruturação e amadurecimento deste trabalho, bem como pelas discussões e orientações que foram essenciais para o desenvolvimento desta dissertação

## RESUMO

O transporte público é uma das principais formas de locomoção no Brasil, especialmente em grandes centros urbanos. No entanto, pessoas com mobilidade reduzida, como cadeirantes, enfrentam diversas dificuldades devido à falta de informações centralizadas sobre a acessibilidade de espaços públicos, como calçadas, faixas de pedestres e rampas de acesso. Além disso, conforme constatado na literatura, a rota mais curta nem sempre é a mais adequada para esse público, uma vez que fatores de acessibilidade precisam ser considerados para garantir um trajeto mais seguro e com menos obstáculos. Com o avanço das tecnologias de mapeamento e processamento de dados, surgem soluções que podem ajudar a identificar caminhos mais acessíveis. Entre essas soluções, destacam-se os algoritmos de recomendação, que, ao serem integrados com sistemas de mapas, podem otimizar a escolha de rotas com base em critérios de acessibilidade. Esta pesquisa propõe um sistema computacional para recomendação de rotas acessíveis para cadeirantes no transporte público da cidade de João Pessoa, Paraíba. A heurística implementada no sistema foi avaliada preliminarmente utilizando dados oficiais, considerando atributos como largura de calçada, número de rampas de acessibilidade e faixas de pedestres. Os resultados indicam que a rota de menor distância nem sempre corresponde à alternativa mais adequada sob a perspectiva da acessibilidade, sendo frequentemente superada por rotas com melhores condições de deslocamento.

**Palavras-chave:** Mobilidade urbana; Acessibilidade; Rotas acessíveis; Cadeirantes; Transporte público; SIG; Algoritmo de Dijkstra; Algoritmo Genético; Decisão Multicritério.

# ABSTRACT

Public transportation is one of the main means of mobility in Brazil, especially in large urban centers. However, people with reduced mobility, such as wheelchair users, face several difficulties due to the lack of centralized information regarding the accessibility of public spaces, including sidewalks, pedestrian crossings, and accessibility ramps. Furthermore, as identified in the literature, the shortest route is not always the most suitable for this population, since accessibility-related factors must also be considered to ensure safer and less obstructed paths. With the advancement of mapping technologies and data processing techniques, new solutions have emerged to support the identification of more accessible routes. Among these solutions, recommendation algorithms integrated with geographic information systems can optimize route selection based on accessibility criteria. This research proposes a computational system for recommending accessible public transportation routes for wheelchair users in the city of João Pessoa, Paraíba, Brazil. The heuristic implemented in the recommendation system was preliminarily evaluated using official geospatial data, considering attributes such as sidewalk width, number of accessibility ramps, and pedestrian crossings. The results indicate that the shortest route does not necessarily correspond to the most accessible alternative, frequently being outperformed by routes with better accessibility conditions.

**Keywords:** Urban Mobility; Accessibility; Accessible Routes; Wheelchair Users; Public Transportation; GIS; Dijkstra Algorithm; Genetic Algorithm; Multi-criteria Decision.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Rebaixamento de calçada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024). | 17 |
| Figura 2 - Sinalização tátil (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024).       | 18 |
| Figura 3 - Grafo do algoritmo de Dijkstra (Elaborado pelo autor).                    | 25 |
| Figura 4 - Exemplo de trajetória.                                                    | 28 |
| Figura 5 - Fluxo de processamento do sistema computacional proposto.                 | 39 |
| Figura 6 - Exemplo de parada de desembarque próxima ao destino informado.            | 41 |
| Figura 7 - Contagem dos atributos de acessibilidade em um Espaço de Busca.           | 43 |
| Figura 8 - Paradas de Embarque identificadas próximas à origem do usuário.           | 52 |
| Figura 9 - Rotas Candidatas até a Parada de Embarque.                                | 53 |
| Figura 10 - Rotas Candidatas a partir da primeira parada.                            | 55 |
| Figura 11 - Rotas Candidatas a partir da segunda parada.                             | 55 |
| Figura 12 - Exemplo de medição manual da calçada.                                    | 60 |
| Figura 13 - Percurso 2 na 1ª Parada de Embarque indicada.                            | 64 |
| Figura 14 - Percurso 11 na 1ª Parada de Desembarque indicada.                        | 65 |
| Figura 15 - Distribuição das posições das rotas candidatas no ranking.               | 65 |
| Figura 16 - Percurso 11 na segunda Parada de Desembarque indicada.                   | 69 |
| Figura 17 - Trecho com largura de calçada não mensurável no Percurso 11.             | 69 |
| Figura 18 - Atalho recomendado pela Rota 1 no Percurso 11.                           | 70 |
| Figura 19 - Rotas da segunda Parada de Desembarque do Percurso 7.                    | 71 |
| Figura 20 - Percurso 8: ponto com POIs de acessibilidade nas proximidades.           | 72 |
| Figura 21 - Percurso 3: ponto sem POIs de acessibilidade nas proximidades.           | 72 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Paradas de ônibus próximas ao destino.                                        | 54 |
| Tabela 2 - Análise das rotas entre a Origem e Parada de Embarque.                        | 56 |
| Tabela 3 - Normalização dos atributos entre a Origem e Parada de Embarque.               | 56 |
| Tabela 4 - Resultado da análise das rotas considerando a heurística proposta.            | 56 |
| Tabela 5 - Análise das Rotas Candidatas entre a Parada de Desembarque e Destino.         | 59 |
| Tabela 6 - Normalização dos valores das rotas entre a parada de desembarque e o destino. | 60 |
| Tabela 7 - Ranking por ordem decrescente das rotas analisadas.                           | 61 |
| Tabela 8 - Ranking das rotas candidatas - Percurso 1.                                    | 69 |
| Tabela 9 - Ranking das rotas candidatas - Percurso 4.                                    | 70 |
| Tabela 10 - Ranking das Rotas Candidatas - Percurso 2.                                   | 70 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Tipos de barreiras urbanas e suas definições (Adaptado de Prandi et al. (2014)). | 26 |
| Quadro 2 - Trabalhos relacionados.                                                          | 43 |
| Quadro 3 - Dados utilizados no sistema.                                                     | 67 |
| Quadro 4 - Percursos analisados.                                                            | 68 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AG - Algoritmo Genético

FUNAD - Fundação Centro Integrado de Apoio à Pessoa com Deficiência

GNSS - Global Navigation Satellite System

GPS - Sistema de Posicionamento Global

GTFS - General Transit Feed Specification

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

OMS - Organização Mundial da Saúde

POIs - Pontos de Interesse

SEMOB - Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana

SIG - Sistema de Informação Geográfica

T.O.D - Transit-Oriented Development



# SUMÁRIO

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                                                      | <b>18</b> |
| 1.1. Questão de Pesquisa                                                  | 20        |
| 1.2. Objetivos                                                            | 20        |
| 1.2.1. Objetivo geral                                                     | 20        |
| 1.2.2. Objetivo específico                                                | 21        |
| 1.3. Estruturação do documento                                            | 21        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                           | <b>23</b> |
| 2.1. Rampas de acessibilidade e critérios físicos para rotas acessíveis   | 23        |
| 2.2. Acessibilidade Urbana e Desafios para Cadeirantes                    | 26        |
| 2.3. Caminhabilidade (Walkability)                                        | 27        |
| 2.4. Algoritmos de Roteamento                                             | 29        |
| 2.5. Algoritmos Genéticos                                                 | 32        |
| 2.6. Conceitos Básicos                                                    | 33        |
| <b>3. TRABALHOS RELACIONADOS</b>                                          | <b>36</b> |
| 3.1. Abordagens Baseadas em Algoritmos Clássicos de Roteamento            | 36        |
| 3.2. Abordagens Baseadas em Heurística e Múltiplos Critérios              | 38        |
| 3.3. Síntese Crítica dos Trabalhos Relacionados                           | 40        |
| <b>4. SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE ROTAS</b>                                | <b>43</b> |
| 4.1. Funcionamento do Sistema                                             | 43        |
| 4.1.1. Definição do percurso                                              | 44        |
| 4.1.2. Seleção das paradas e linhas de ônibus                             | 45        |
| 4.1.3. Filtragem das rotas com Dijkstra                                   | 46        |
| 4.1.4. Extração dos atributos de acessibilidade de acessibilidade         | 47        |
| 4.1.5. Aplicação da heurística                                            | 48        |
| 4.1.6. Ordenação (Ranking) das Rotas                                      | 49        |
| 4.2. Definição dos pesos da heurística                                    | 50        |
| 4.2.1. Diretriz de relevância dos atributos de acessibilidade             | 51        |
| 4.2.2. Normalização dos atributos                                         | 52        |
| 4.2.3. Calibração dos pesos                                               | 53        |
| 4.3. Execução do sistema proposto                                         | 55        |
| 4.3.1. Análise do espaço de busca entre a origem e parada de embarque     | 57        |
| 4.3.2. Análise do espaço de busca entre a parada de desembarque e destino | 59        |
| 4.4. Dados utilizados                                                     | 63        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                                          | <b>67</b> |
| 5.1. Configuração dos Testes com o sistema proposto                       | 67        |
| 5.2. Análise Geral dos Rankings                                           | 70        |
| 5.3. Estudos de Casos Representativos                                     | 73        |
| 5.4. Impacto dos Atributos da Heurística                                  | 75        |
| 5.5. Limitações do Estudo                                                 | 76        |

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| 5.6. Discussão dos Resultados               | 78        |
| <b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>              | <b>80</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                          | <b>84</b> |
| <b>APÊNDICE A - PSEUDOCÓDIGO DO SISTEMA</b> | <b>89</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

A temática da acessibilidade urbana faz-se necessária para o desenvolvimento de uma cidade inclusiva e promotora de oportunidades. O transporte público por ônibus, principal meio de deslocamento coletivo urbano considerado neste trabalho, exerce papel relevante nas grandes cidades ao promover a mobilidade e o acesso a serviços essenciais (Liu et al., 2023). No entanto, enquanto sua utilização pode ser relativamente simples para pessoas sem deficiência, pode representar um desafio significativo para usuários cadeirantes. A discussão sobre a melhoria da acessibilidade nesse sistema de transporte tem se tornado cada vez mais importante no contexto atual, sobretudo considerando que os sistemas convencionais de transporte público urbano apresentam limitações, especialmente em países em desenvolvimento (Silva et al., 2023).

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2023), há mais de 1 bilhão de pessoas em todo o mundo vivendo com alguma deficiência. No Brasil, aproximadamente 14,4 milhões de pessoas possuem algum tipo de deficiência, das quais cerca de 5,2 milhões apresentam dificuldades relacionadas à locomoção pedonal. O Nordeste apresenta o maior percentual do país, com 19,5% da população declarando alguma deficiência (IBGE, 2022).

Dados municipais também evidenciam a relevância da temática no contexto estadual. De acordo com o Cadastro Estadual da Pessoa com Deficiência, realizado pelo Governo da Paraíba entre 2021 e 2023, foram registradas 31.591 pessoas com deficiência em todo o estado (Paraíba, 2025).

Com base no artigo 2º da Lei Federal nº 13.146/2015 (Brasil, 2015), que institui o Estatuto da Pessoa com Deficiência, a acessibilidade é definida como a possibilidade e condição de alcance, percepção e utilização, com segurança e autonomia, de espaços, mobiliários, equipamentos urbanos, edificações, transportes, informação e comunicação, inclusive seus sistemas e tecnologias, bem como de outros serviços e instalações abertos ao público.

Embora a legislação descreva garantias a respeito da acessibilidade, isso não é observado nos espaços públicos. De acordo com Klein e Grigoletti (2021), pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida enfrentam obstáculos que limitam o pleno exercício de seus direitos. A acessibilidade deve garantir o uso comum, respeitando e valorizando a diversidade, assegurando o livre acesso a todos e considerando as necessidades dos diferentes grupos que compõem a sociedade.

Um dos problemas enfrentados por cadeirantes é a falta de informações sobre a acessibilidade dos ônibus e a disponibilidade de rampas para acessar as paradas de ônibus no trajeto que o usuário percorre desde a origem de seu deslocamento ao destino. Muitas cidades não disponibilizam dados abertos sobre os itinerários dos transportes públicos, nem informações sobre a acessibilidade de locais específicos, como banheiros, rampas de acesso e estacionamentos. No contexto do planejamento urbano e do desenvolvimento de cidades inteligentes, esses dados são relevantes e sua ausência constitui obstáculo à inclusão e à mobilidade das pessoas com deficiência.

Dados relacionados à acessibilidade urbana, podem ser incorporados em mapas digitais para auxiliar usuários no planejamento de seus deslocamentos. Nesse contexto, os mapas auxiliam na orientação, mobilidade e localização de ruas e Pontos de Interesse (POIs, do inglês *Point of Interest*), além de facilitar a estimativa de direções, áreas e distâncias entre lugares. Portanto, usuários, especialmente pessoas com deficiência, necessitam de informações espaciais para realizar tarefas diárias.

Parte dos dados de acessibilidade urbana, como localização de rampas, faixas de pedestres e características das calçadas, encontra-se disponível em bases públicas na Internet. Entretanto, essas informações costumam estar distribuídas em diferentes fontes, sem padronização de formato ou de atributos, o que dificulta sua integração em um único modelo (Bustamante *et al.*, 2021). Além disso, há incertezas quanto à atualização, completude e precisão geométrica desses dados, uma vez que elementos da infraestrutura urbana podem ter sido modificados ou removidos sem a correspondente atualização nas bases cartográficas.

A maioria das plataformas com integração de mapas não oferece valor agregado devido à limitação dos dados (Bustamante *et al.*, 2021). Por exemplo, uma plataforma pode fornecer informações sobre a acessibilidade de estabelecimentos, enquanto outra aborda paradas de ônibus, mas de forma individual, ou seja, ainda há o desafio de integração de múltiplas fontes de dados.

Além disso, ferramentas que recomendam rotas com acessibilidade são mais relevantes em outros países, mas no Brasil ainda é um problema devido à escassez de dados nessas plataformas. O Wheelmap<sup>1</sup>, por exemplo, é uma aplicação para identificar pontos de interesse acessíveis nas cidades, bastante reconhecido na Europa. Porém, essa aplicação não é popular no Brasil e possui poucos dados registrados (Mobasheri; Deister; Dieterich, 2017).

---

<sup>1</sup> Wheelmap: [https://wheelmap.org/?locale=pt\\_BR](https://wheelmap.org/?locale=pt_BR), acesso: fevereiro, 2025

Com o avanço tecnológico e o mapeamento de POIs em ambientes urbanos, este trabalho propõe um sistema computacional para recomendação de rotas acessíveis para cadeirantes associadas ao uso do transporte público por ônibus na cidade de João Pessoa (PB). A proposta combina algoritmos de roteamento, seleção de paradas de embarque e desembarque e uma heurística multicritério baseada em atributos de acessibilidade para gerar e ordenar rotas candidatas entre uma origem e um destino. Para isso, são considerados atributos presentes nos deslocamentos realizados entre a origem e a parada de embarque, bem como entre a parada de desembarque e o destino, incluindo largura das calçadas, presença de rampas de acessibilidade e faixas de pedestres. Dessa forma, o sistema prioriza alternativas que ofereçam melhores condições de deslocamento ao usuário nos trechos percorridos a pé. Os pesos associados aos critérios utilizados na heurística são definidos por meio de um Algoritmo Genético, com o objetivo de reduzir a subjetividade na calibração dos parâmetros do sistema.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram oriundos de fontes oficiais da SEMOB do município de João Pessoa, na qual possibilitaram o desenvolvimento da proposta do sistema de recomendação.

## **1.1. Questão de Pesquisa**

Com o intuito de servir como diretriz norteadora deste trabalho, de forma clara e precisa, foi formulada uma Questão de Pesquisa (QP) para posterior avaliação científica e experimental da proposta de sistema de recomendação de rotas desenvolvida. Abaixo, está definida a questão no contexto deste trabalho.

**QP1:** Qual o impacto da incorporação de atributos de acessibilidade na classificação das rotas recomendadas para usuários cadeirantes no transporte público?

**QP2:** Em quais situações a rota de menor distância deixa de ser a alternativa mais adequada quando são considerados critérios de acessibilidade urbana?

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo geral***

Desenvolver um sistema computacional de recomendação de rotas acessíveis para usuários cadeirantes associadas ao uso do transporte público por ônibus da cidade de João

Pessoa, considerando os deslocamentos entre a origem, as paradas de embarque e desembarque e o destino final.

### **1.2.2. Objetivo específico**

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Identificar e selecionar atributos da infraestrutura urbana relevantes à acessibilidade de usuários cadeirantes, tais como largura das calçadas, presença de rampas de acessibilidade, faixas de pedestres e distância percorrida;
- Definir e formalizar uma heurística de acessibilidade baseada nesses atributos, incorporando uma hierarquia de relevância entre os critérios;
- Empregar Algoritmo Genético para definir os pesos dos atributos de acessibilidade utilizados na heurística multicritério, respeitando as restrições e a hierarquia de relevância estabelecidas pela literatura.
- Desenvolver um sistema de recomendação de rotas acessíveis baseada em uma heurística multicritério, aplicada ao contexto do deslocamento urbano associado ao transporte público por ônibus.
- Comparar os resultados do sistema proposto com o algoritmo de Dijkstra tradicional, a fim de analisar as diferenças entre rotas baseadas exclusivamente na menor distância e aquelas orientadas por critérios de acessibilidade.

## **1.3. Estruturação do documento**

Este documento estrutura-se em seis capítulos, organizados de modo a apresentar os fundamentos teóricos, os procedimentos metodológicos, os resultados obtidos e as conclusões da pesquisa.

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho, abrangendo os conceitos de acessibilidade urbana, caminhabilidade e critérios físicos de rotas, além de examinar os algoritmos de roteamento, com ênfase no método de Dijkstra e na aplicação de Algoritmos Genéticos para a definição multicritério de pesos. Concluindo a base conceitual, o Capítulo 3 dedica-se à revisão da literatura, analisando pesquisas sobre mobilidade acessível, recomendação de rotas para pessoas com deficiência e aplicações de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

A partir dessa fundamentação, o Capítulo 4 detalha o funcionamento do sistema, expondo a estrutura computacional proposta, os dados geoespaciais e as etapas de execução da heurística, o que inclui o algoritmo de Dijkstra, a contagem de atributos, a ordenação de rotas e a calibração dos pesos. Posteriormente, o Capítulo 5 promove a avaliação experimental do sistema, descrevendo as configurações dos testes e analisando o comportamento das rotas recomendadas em comparação com as trajetórias de menor distância, complementado pelo exame de casos representativos, impactos dos atributos e limitações. Por fim, o Capítulo 6 reúne as considerações finais da pesquisa, sintetizando as principais contribuições do estudo, suas limitações e as diretrizes para investigações futuras.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são discutidos os principais conceitos e estudos que fundamentam a pesquisa, os desafios e avanços em torno da acessibilidade para pessoas com deficiência física, com foco nas barreiras enfrentadas no ambiente urbano e as soluções tecnológicas propostas.

### 2.1. Rampas de acessibilidade e critérios físicos para rotas acessíveis

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, os espaços urbanos acessíveis devem atender a critérios relacionados à circulação de pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida, incluindo requisitos para largura mínima das faixas livres de circulação, inclinações longitudinais e transversais, além das dimensões e características das rampas de acessibilidade (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2020). De forma complementar, as áreas de travessia devem ser dotadas de sinalização tátil de alerta no piso, disposta paralelamente à faixa de travessia ou perpendicularmente à linha de caminhamento, de modo a auxiliar a orientação de pessoas com deficiência visual (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2024). Na Figura 1, são apresentados alguns dos critérios que definem as condições necessárias para que uma rampa seja considerada acessível. Como observado, além da inclinação adequada, uma rampa deve estar integrada à calçada e à guia rebaixada, possibilitando uma transição segura entre os diferentes níveis do espaço urbano.

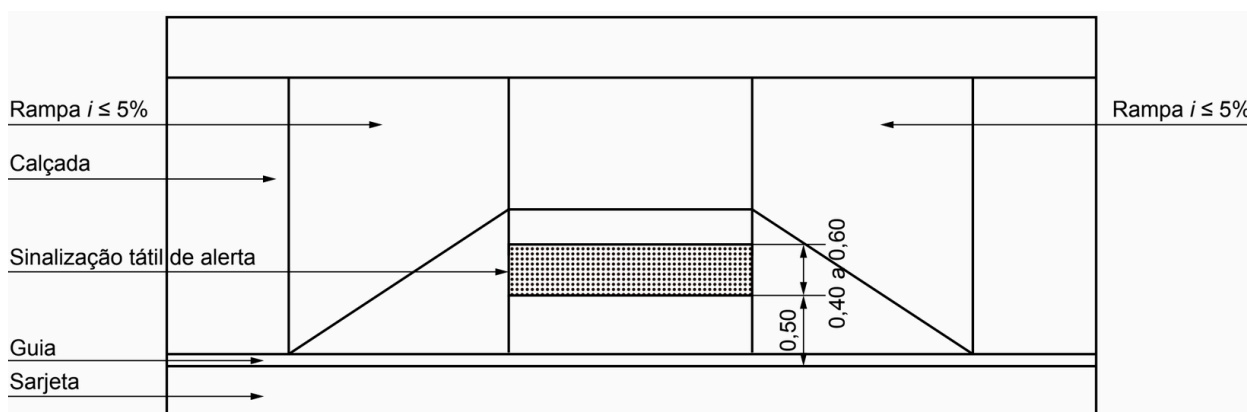


Figura 1 - Rebaixamento de calçada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024).

Além disso, deve-se levar em consideração a largura da calçada. De acordo com essa mesma norma, a faixa livre é área do passeio, via ou rota destinada exclusivamente à circulação de pedestres, livre de qualquer obstáculo, que tenha no mínimo 1,20 m de largura,



com piso firme e estável. No melhor cenário, uma calçada acessível deve ter as características antiderrapante e sem relevos, a sinalização tátil deve ser contínua, linear e acompanhada de faixas laterais lisas de no mínimo 0,60 m e deve haver espaço suficiente para a circulação de cadeirantes. Em áreas de travessia, é necessário incluir rebaixamentos ou faixas elevadas para facilitar a transição entre a calçada e a pista, conforme demonstrado na Figura 2.

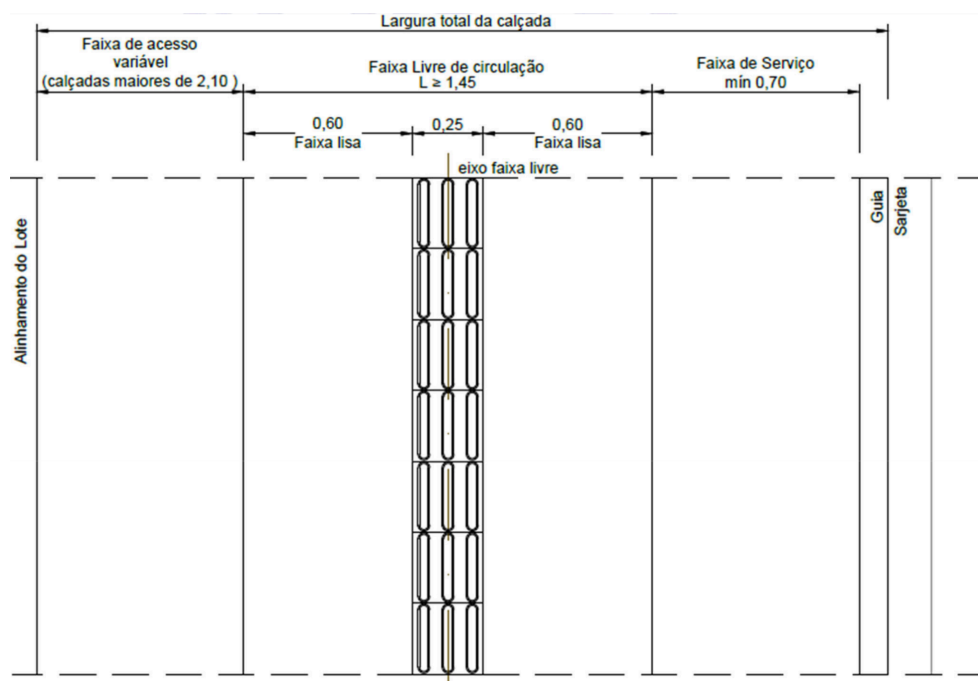


Figura 2 - Sinalização tátil (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024).

Segundo Jahromi *et al.* (2024), algumas obstruções, como rampas muito íngremes ou superfícies irregulares nas calçadas, podem tornar áreas intransitáveis para usuários de cadeiras de rodas, muletas ou outros dispositivos de mobilidade. Os autores apontam que a sensação de desconforto aumenta com o grau da inclinação transversal, com algumas pessoas relatando maiores dificuldades em inclinações de 6% ou mais.

Para definir se uma rota é acessível, é necessário considerar diversos parâmetros e condições. Elementos como obstruções, sinalização, caminhos, rampas, faixas de pedestres e estacionamentos são alguns exemplos. Caso algum desses componentes esteja ausente, mal posicionado ou em condições inadequadas, tornam-se barreiras para cadeirantes (Panta *et al.*, 2019).

De acordo com Prandi *et al.* (2014), as barreiras urbanas podem ser classificadas em seis grupos principais: lacunas, passagens, obstruções, estacionamento, superfícies e caminhos. O Quadro 1 exemplifica essas categorias. A primeira coluna da tabela apresenta as

barreiras principais, enquanto a segunda coluna apresenta uma descrição e exemplos referente a essas barreiras.

Quadro 1 - Tipos de barreiras urbanas e suas definições (Adaptado de Prandi *et al.* (2014)).

| <b>Barreira</b> | <b>Descrição</b>                                                                                                    |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lacunas         | Englobam barreiras como degraus, escadas, buracos e outras interrupções físicas.                                    |
| Passagens       | Incluem instalações para travessias rodoviárias, como faixas de pedestres, semáforos e semáforos sonoros.           |
| Obstruções      | Elementos que bloqueiam a passagem, como postes, sinalizações, lixeiras, fios, árvores caídas e obras em andamento. |
| Estacionamento  | Refere-se à disponibilidade de vagas, localização, dimensões e áreas de embarque/desembarque.                       |
| Superfícies     | Abrangem as condições de calçadas, estacionamentos e rampas, como tipo de material e regularidade da superfície.    |
| Caminhos        | Envolvem propriedades das calçadas, como largura, presença de grades ou guarda-corpos.                              |

Dentre essas condições, as superfícies destacam-se como um dos fatores mais críticos para a acessibilidade. No estudo de Park *et al.* (2023), foram utilizados cinco parâmetros para avaliar a acessibilidade de calçadas: largura, comprimento, inclinação, tipo de superfície e condições climáticas. Os autores demonstraram que condições negativas combinadas dessas variáveis podem comprometer a experiência de deslocamento.

Fatores externos, como congestionamentos, atrasos no transporte público e condições climáticas, também impactam a escolha das rotas. Além disso, uma rota acessível não se resume apenas a minimizar custos econômicos ou desgastes físicos, mas deve maximizar a satisfação e a experiência positiva dos usuários durante o trajeto (Inturri *et al.*, 2021). Por exemplo, aspectos como segurança e tranquilidade ao longo do percurso são importantes na definição de uma rota adequada.

Diante do exposto, pode-se observar que os principais critérios levantados pela literatura são os seguintes: a largura das calçadas, as inclinações longitudinal e transversal, a presença de faixas laterais livres de obstáculos, a continuidade da circulação, regularidade e o tipo do pavimento (Jahromi *et al.*, 2024; Panta *et al.*, 2019; Inturri *et al.*, 2021). Além destes, também são relevantes travessias sinalizadas, iluminação e segurança (Prandi *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2023). As normas técnicas de acessibilidade, como a Associação Brasileira de

Normas Técnicas (2024), reforçam esses parâmetros ao estabelecer limites de inclinação, dimensões mínimas e condições de circulação segura, enquanto estudos empíricos mostram que sua ausência compromete a mobilidade de cadeirantes. Logo, pode-se considerar que a qualidade do deslocamento depende da combinação integrada desses critérios ao longo do trajeto, devendo ser considerada em análises e sistemas de recomendação de rotas acessíveis.

## **2.2. Acessibilidade Urbana e Desafios para Cadeirantes**

O desafio de garantir acessibilidade para indivíduos com mobilidade limitada abrange dimensões físicas, sociais e tecnológicas. Barreiras de mobilidade, como a falta de vagas de estacionamento ou prédios inacessíveis, dificultam e atrasam a locomoção diária de pessoas com deficiência. Além disso, embora caminhos irregulares (por exemplo, ruas de paralelepípedos, pavimentação tátil, lombadas, degraus e rampas) possam representar pouco ou nenhum obstáculo para pessoas fisicamente aptas, eles podem causar desconforto e agravar lesões na coluna vertebral em usuários de cadeiras de rodas ao longo do tempo (Kamaldin *et al.*, 2019).

Com isso, as soluções atuais têm se empenhado em aprimorar a conectividade de rotas para os usuários. Porém, sabe-se que a inserção de traçados entre origem e destino com instrumentos de acessibilidade para cadeirantes ainda é um desafio. De acordo com Park *et al.* (2023), os sistemas planejadores de viagens, como Google Maps, por exemplo, podem não ser ideais para usuários cadeirantes, uma vez que as rotas selecionadas normalmente não são acessíveis ou viáveis para pessoas com deficiências.

Nesse mesmo cenário, Siriaraya *et al.* (2020) destaca que o Google Maps tornou-se um dos serviços de navegação mais populares, auxiliando no percurso de usuários a encontrar o caminho mais econômico para os destinos desejados através de condução, transporte público e caminhada. Porém, os autores ressaltam que este serviço é limitado em realizar recomendações de rotas desconsiderando a existência de barreiras. O fornecimento das informações sobre a presença ou ausência dessas barreiras exige esforços colaborativos entre as agências de transporte público (Kamaldin *et al.*, 2019).

De acordo com Santana e Kawamoto (2023), por sua vez, funcionalidades voltadas à acessibilidade em plataformas como o Google Maps foram incorporadas apenas doze anos após o lançamento da ferramenta. Ainda assim, tais recursos concentram-se predominantemente em informações sobre acessibilidade em estabelecimentos comerciais, como presença de rampas de entrada, assentos acessíveis, banheiros adaptados e vagas de

estacionamento reservadas. Além disso, a disponibilidade e abrangência desses dados restringem-se principalmente a países como Japão, Austrália, Reino Unido e Estados Unidos. Nesse contexto, destaca-se a iniciativa Local Guides<sup>2</sup>, que incentiva usuários a colaborarem com informações relacionadas à acessibilidade. Por fim, apesar desses avanços, o Google Maps ainda não disponibiliza dados estruturados sobre a acessibilidade do ambiente urbano em si, como largura e condições das calçadas, existência de rampas ou qualidade das travessias de pedestres, por exemplo (Santana e Kawamoto, 2023).

### 2.3. Caminhabilidade (*Walkability*)

Pode-se entender que o conceito de *walkability* está associado à capacidade do ambiente urbano permitir que usuários alcancem destinos por deslocamentos a pé dentro de limites de distância e esforço, constituindo elemento importante de acessibilidade ao transporte público. Diante disso, o acesso às paradas de ônibus representa a etapa inicial e final do deslocamento, sendo determinante para a utilização adequada do sistema de transporte coletivo.

De acordo com Ashour e Tarawneh (2023) apesar de variações geográficas, culturais e climáticas, o limite de caminhabilidade prevalente em pesquisas relacionadas ao transporte emprega a caminhada de cinco a dez minutos, o que representa uma distância entre 400 e 800 metros, como regra para distância caminhável. Ademais, é válido destacar que o mesmo limite de 400 metros é empregado no Índice de Acessibilidade Ideal de Paradas (ISAI) para avaliar a acessibilidade das paradas de ônibus (Foda; Osman, 2010).

Entretanto, a *walkability* não depende apenas da distância percorrida, pois acessibilidade pedonal também pode estar relacionada às condições do ambiente urbano, incluindo continuidade da rede de circulação, presença de obstáculos, segurança e esforço necessário para completar o trajeto. Logo, para avaliar a acessibilidade, Ashour e Tarawneh (2023) utilizaram, em sua pesquisa, métricas espaciais baseadas em análise de rede, como *reach*, *gravity* e *straightness*. Essas métricas mensuram, respectivamente, a quantidade de destinos acessíveis, o custo do deslocamento e o grau de desvio do trajeto em relação ao caminho direto, permitindo caracterizar a qualidade do acesso pedonal às paradas e compreender como o ambiente urbano influencia a mobilidade.

Vichiensan *et al.* (2022) propõem o conceito de *walkability* percebida, baseado em aspectos objetivos e subjetivos. A avaliação objetiva indicou que as áreas de abrangência não

---

<sup>2</sup> Local Guides: <https://maps.google.com/localguides/>, acesso em: janeiro de 2026.

eram adequadas ao pedestre e, por meio da modelagem de equações estruturais, foi estimado um índice de *walkability* percebida. Os resultados demonstraram que o pedestre considera não apenas condições físicas da calçada, como largura e presença de árvores, mas também atributos subjetivos, como segurança e conveniência. Dessa forma, a qualidade do ambiente de caminhada influencia diretamente o acesso às estações de trem ou de ônibus, podendo incentivar ou desencorajar o uso do transporte público. Vichiensan *et al.* (2022), portanto, conceitua *walkability* como a qualidade e a conectividade dos espaços destinados ao pedestre, envolvendo a possibilidade de realizar deslocamentos de forma segura, acessível e conveniente até destinos urbanos, incluindo estações de transporte público.

Shin *et al.* (2023) analisa *walkability* em associação aos componentes do Transit-Oriented Development (T.O.D), um modelo de desenvolvimento urbano que promove a construção de comunidades, incluindo moradia, comércio e lazer, localizadas dentro de uma distância caminhável (geralmente 400 a 800 metros) de estações de transporte público, com o objetivo de reduzir o uso de automóveis e promover a mobilidade sustentável. O estudo emprega o algoritmo CatBoost, uma técnica de aprendizado de máquina baseada em árvores de decisão e métodos de boosting para predição e classificação de dados, para prever níveis de *walkability* a partir de dados de transporte público, modos compartilhados, características de oferta, amenidades urbanas e elementos da rede viária. Por meio de técnicas de inteligência artificial, os resultados do estudo de Shin *et al.* (2023) permitem identificar quais variáveis impactam positiva ou negativamente a *walkability*, evidenciando que a qualidade do acesso ao transporte depende de atributos do ambiente urbano e não apenas da distância até as estações.

A avaliação da *walkability* também pode ser realizada a partir de dados reais de deslocamento. Nesse sentido, Soma e Manabe (2024) realizaram estudos baseados em dados massivos de localização e, como resultado desses estudos, propuseram analisar o ambiente de mobilidade por meio de registros GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de movimento de pedestres. Os autores observaram padrões efetivos de circulação no espaço urbano, indicando que a *walkability* não depende apenas das características físicas da infraestrutura, mas também do comportamento coletivo dos usuários, variando conforme o fluxo de pessoas, a direção dos deslocamentos e o período do dia.

Áreas com maior concentração de trajetos tendem a indicar percursos percebidos como mais seguros, ao passo que a superlotação pode reduzir a qualidade do deslocamento. Assim, a *walkability* passa a ser compreendida como um fenômeno dinâmico, influenciado tanto pela configuração urbana quanto pelo uso real do espaço pelos pedestres. Dessa forma, a análise da

*walkability* torna-se relevante para sistemas de recomendação de rotas, uma vez que trajetos mais curtos nem sempre representam as melhores alternativas quando as condições do percurso impõem barreiras ao deslocamento do usuário. A melhoria do acesso às paradas de ônibus ou estações, pode impactar diretamente o uso do transporte público, indicando que intervenções na conectividade pedonal podem ser tão relevantes quanto alterações operacionais no próprio sistema de transporte.

## 2.4. Algoritmos de Roteamento

O avanço das tecnologias de mapeamento digital e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ampliou o uso de algoritmos de roteamento em problemas relacionados à mobilidade urbana, transporte e navegação. Diferentes pesquisas têm explorado métodos computacionais voltados ao cálculo de caminhos mínimos em redes espaciais, especialmente em cenários envolvendo deslocamentos urbanos e recomendação de rotas (Gunawan; Andriani; Munfi, 2023; Grujić; Grujić, 2025).

Para representação dos deslocamentos em ambientes urbanos, é comum modelar a malha viária como um grafo, no qual os vértices representam interseções ou pontos da rede e as arestas representam conexões entre esses pontos, associadas a custos de deslocamento, como distância ou tempo. Nesse contexto, algoritmos de roteamento são empregados para determinar trajetos entre pontos de origem e destino.

Além dos algoritmos de roteamento, aplicações de navegação também utilizam fórmulas matemáticas voltadas ao cálculo de distâncias geográficas entre coordenadas espaciais. Entre elas, destaca-se a fórmula de Haversine (Sinnott, 1984), utilizada para calcular a distância entre dois pontos na superfície terrestre a partir de seus valores de latitude e longitude. Essa abordagem é amplamente empregada em aplicações geoespaciais e sistemas de recomendação de rotas (Safitri; Pratiarso; Zainudin, 2020).

A literatura apresenta diferentes algoritmos aplicados a problemas de roteamento. Entre os mais conhecidos, destaca-se o algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959), amplamente utilizado para determinação do caminho mínimo em grafos ponderados com pesos não negativos. Outro algoritmo amplamente empregado é o A\* (Hart; Nilsson; Raphael, 1968), que incorpora funções heurísticas para estimar o custo até o destino, tornando a busca mais direcionada em determinados cenários (Zhang; Wang; Zhou, 2021). Também são encontrados na literatura algoritmos como Floyd-Warshall (Floyd, 1962), utilizado para cálculo de

caminhos mínimos entre todos os pares de vértices de um grafo, e Bellman-Ford (Bellman, 1958), que possui a capacidade de lidar com arestas de peso negativo.

Dentre essas abordagens, o algoritmo de Dijkstra foi adotado neste trabalho como mecanismo para filtragem das rotas candidatas avaliadas pelo sistema proposto. Sua escolha justifica-se pela simplicidade de implementação e adequação ao contexto desta pesquisa, uma vez que os custos considerados na rede viária são não negativos. O algoritmo opera de forma iterativa, expandindo progressivamente os vértices alcançáveis a partir de um nó de origem e atualizando os menores custos conhecidos até cada destino. Em cada etapa, o algoritmo prioriza os vértices com menor custo acumulado, permitindo a construção gradual dos caminhos mínimos no grafo. Dessa forma, o processo de busca ocorre de maneira incremental, refinando continuamente as distâncias calculadas até que os menores caminhos sejam definitivamente determinados.

A Figura 3 apresenta um grafo utilizado para ilustrar o funcionamento do algoritmo de Dijkstra. Nesse grafo, cada vértice (*A, B, C, ..., I*) representa um ponto da rede, enquanto as arestas indicam as conexões entre esses pontos, sendo os valores associados a cada aresta correspondentes ao custo de deslocamento (por exemplo, distância). A partir de um nó de origem, como o vértice *A*, o algoritmo realiza a exploração progressiva dos caminhos possíveis, acumulando os menores custos até alcançar os demais vértices do grafo (Dijkstra, 1959). Por exemplo, para atingir o vértice *F* a partir de *A*, o algoritmo não necessariamente seleciona o caminho com menor número de arestas, mas sim aquele cujo custo total acumulado é mínimo, considerando as ponderações ao longo do percurso.

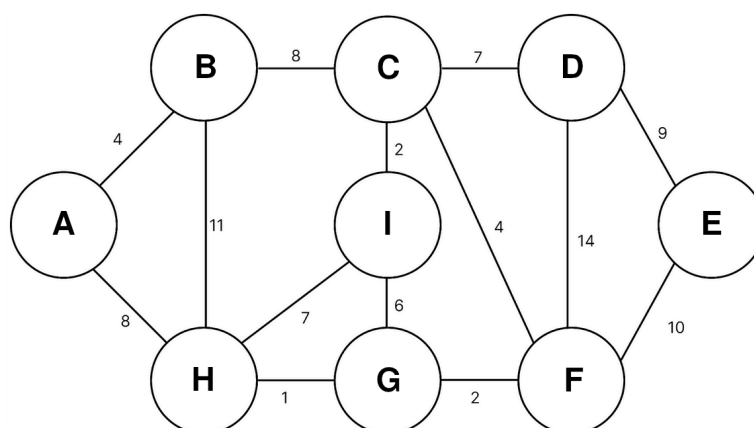


Figura 3 - Grafo do algoritmo de Dijkstra (Elaborado pelo autor).

O funcionamento do algoritmo pode ser observado a partir da busca pelo menor caminho entre os vértices A e F. Embora exista um percurso com menor número de conexões, o algoritmo seleciona o trajeto cujo custo acumulado total é mínimo. Partindo de A, o algoritmo inicialmente identifica os custos para os vértices adjacentes B (4) e H (8). Em seguida, expande progressivamente os nós com menor custo acumulado, atualizando as distâncias conhecidas para os vértices vizinhos. Nesse processo, o caminho  $A \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow F$  apresenta custo total 11 ( $8 + 1 + 2$ ), enquanto alternativas como  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow F$  resultam em custo total 16 ( $4 + 8 + 4$ ). Dessa forma, o algoritmo identifica o percurso de menor custo acumulado, independentemente da quantidade de arestas percorridas.

O algoritmo inicia atribuindo distância zero ao nó de origem e valores infinitos aos demais nós do grafo, que inicialmente são considerados não processados. A cada iteração, seleciona-se o nó não processado com a menor distância acumulada conhecida até o momento. Em seguida, são analisadas as arestas conectadas a esse nó, verificando-se se existe um caminho de menor custo até os vértices vizinhos. Caso um percurso mais curto seja identificado, o valor da distância previamente armazenado é atualizado. Após essa etapa, o nó analisado é marcado como processado, indicando que sua menor distância em relação ao nó de origem já foi definitivamente determinada. O procedimento é repetido iterativamente até que o nó de destino seja alcançado ou que todos os nós alcançáveis tenham sido processados. A eficiência do algoritmo decorre da atualização progressiva apenas das distâncias relevantes e da seleção contínua do menor custo acumulado a cada etapa da busca.

Embora amplamente utilizado e reconhecido por sua robustez, o algoritmo de Dijkstra pode apresentar desempenho inferior em cenários nos quais o objetivo é encontrar um caminho específico entre dois nós, especialmente em grafos de grande escala (Ugwoke; Nnanna; Abdullah, 2025). Isso ocorre porque o método realiza uma expansão sistemática dos nós com base apenas no custo acumulado, sem utilizar informações adicionais que orientem a busca em direção ao destino.

Neste trabalho, entretanto, o algoritmo de Dijkstra não constitui a principal contribuição da pesquisa, sendo utilizado apenas como mecanismo operacional para obtenção das rotas candidatas no espaço de busca definido pelo sistema. A contribuição proposta concentra-se na heurística multicritério de acessibilidade aplicada sobre as rotas filtradas, considerando atributos relacionados à infraestrutura urbana e às condições de mobilidade para usuários cadeirantes.



## 2.5. Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AG) constituem uma classe de métodos de otimização e busca inspirados nos princípios da evolução natural e da seleção darwiniana. Tais algoritmos simulam processos biológicos, como seleção natural, cruzamento e mutação, com o objetivo de encontrar soluções aproximadas para problemas complexos de otimização, especialmente aqueles caracterizados por múltiplos objetivos ou espaços de busca extensos (Mirjalili, 2019).

Em um AG, um conjunto de soluções candidatas é denominado população, sendo cada elemento dessa população uma possível solução para o problema em análise. A qualidade dessas soluções é avaliada por meio de uma função de aptidão (*fitness*), responsável por quantificar o desempenho de cada indivíduo de acordo com os critérios estabelecidos. Em problemas multicritério, essa função pode integrar diferentes atributos, como distância, custo, tempo ou condições de acessibilidade, permitindo comparar soluções distintas de forma sistemática (Deb *et al.*, 2002).

O processo evolutivo dos Algoritmos Genéticos ocorre de maneira iterativa ao longo de sucessivas gerações. Em cada etapa, os indivíduos mais aptos são selecionados, enquanto operadores de cruzamento (*crossover*) e mutação são utilizados para gerar novas soluções e ampliar a diversidade da população. Como resultado, o algoritmo tende a produzir conjuntos progressivamente mais qualificados de soluções, refletindo diferentes compromissos entre os critérios considerados (Michalewicz, 1996).

No contexto de problemas multicritério, os Algoritmos Genéticos apresentam vantagens por serem capazes de explorar simultaneamente diferentes regiões do espaço de soluções e produzir múltiplas alternativas otimizadas (Deb *et al.*, 2002). Estudos recentes têm aplicado AG em problemas de roteamento multicritério em redes viárias (Maram; Ponnappalli; Maddiboyina, 2022; Al Theeb; Abu-Aleqa; Diabat, 2024), permitindo a obtenção de soluções otimizadas segundo diferentes critérios (Sharma *et al.*, 2025). Nesse contexto, cada solução candidata pode ser representada como uma sequência ordenada de nós que define um caminho possível na rede viária.

Além da geração de rotas otimizadas, os Algoritmos Genéticos também têm sido utilizados na determinação automática de pesos atribuídos aos critérios em modelos multicritério. Gürler, Özçalici E Pamucar (2024), por exemplo, propõem uma abordagem baseada em AG para estimar valores de ponderação capazes de representar adequadamente a

relevância relativa dos fatores analisados em processos de tomada de decisão. Essa abordagem contribui para reduzir a arbitrariedade na definição dos pesos associados aos atributos avaliados.

No trabalho de Sharma *et al.* (2025), por exemplo, foi proposto um algoritmo genético paralelo para problemas de roteamento multicritério em redes viárias reais, no qual a função de aptidão integra simultaneamente critérios relacionados à minimização da distância e à maximização da presença de atributos relevantes ao longo do trajeto. Os resultados demonstram que essa estratégia é capaz de fornecer múltiplas alternativas de rotas otimizadas.

No contexto desta pesquisa, os Algoritmos Genéticos fornecem fundamentação teórica para a definição dos pesos atribuídos aos critérios de acessibilidade utilizados na heurística proposta. A ideia de combinar diferentes atributos urbanos em uma função de avaliação única está alinhada à lógica dos métodos evolutivos multicritério, reduzindo a arbitrariedade na ponderação dos parâmetros e reforçando o caráter multicritério do sistema computacional desenvolvido.

## 2.6. Conceitos Básicos

Nesta seção, são apresentados os principais elementos conceituais utilizados no sistema proposto para recomendação de rotas acessíveis. A Figura 4 apresenta uma representação do trajeto considerado no sistema proposto, contemplando os deslocamentos entre origem, parada de embarque, trajeto realizado pelo transporte público e deslocamento final até o destino. O ponto de Origem (O) representa o local inicial do usuário, enquanto o ponto de Destino (D) corresponde ao destino final desejado. As paradas de embarque (PEmb) e de desembarque (PDes) representam, respectivamente, os pontos de entrada e saída do usuário no transporte público, enquanto a linha tracejada vermelha representa o itinerário do ônibus. As linhas tracejadas em azul indicam os deslocamentos realizados pelo cadeirante entre o ponto de origem e a parada de embarque, bem como entre a parada de desembarque e o ponto de destino. Os conceitos de ponto de origem e ponto de destino são formalizados, respectivamente, nas Definições 1 e 2.



**Definição 8. Percurso:** Trajeto completo entre a Origem e o Destino, contemplando os deslocamentos entre Origem e Parada de Embarque, o trajeto realizado pelo transporte público e o deslocamento entre a Parada de Desembarque e o Destino.

**Definição 9. Recomendação de Rotas:** Processo de aplicação da heurística proposta para selecionar, dentre as Rotas Candidatas filtradas em cada Espaço de Busca, aquelas que apresentam melhores condições de acessibilidade com base nos critérios definidos.

**Definição 10. Sistema Computacional:** Representação de um problema real implementada por meio de procedimentos computacionais, permitindo processar dados de entrada e produzir resultados que auxiliem a tomada de decisão.

Diante do exposto, o sistema considera quatro critérios principais para recomendação das rotas: (i) *acessibilidade do ônibus*, verificada pela disponibilidade de veículos adaptados para cadeirantes; (ii) *largura da calçada*, utilizada como indicador das condições de circulação do usuário; (iii) *a presença de rampas de acessibilidade*, relacionadas à transposição entre vias e calçadas; e (iv) *a existência de faixas de pedestres*, este não representa a quantidade de travessias efetuadas ao longo do percurso, mas a presença de elementos urbanos que favorecem a segurança e a acessibilidade durante o deslocamento. Assim, percursos com maior disponibilidade de faixas de pedestres tendem a oferecer melhores condições de travessia quando comparados àqueles em que tais dispositivos estão ausentes.

### 3. TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos analisados neste capítulo adotam diferentes abordagens para a mobilidade urbana e a recomendação de rotas acessíveis para cadeirantes. Algumas propostas se concentram no desenvolvimento de aplicações baseadas em algoritmos clássicos de roteamento, enquanto outras priorizam um modelo para análise multicritério, considerando fatores como distância, presença de rampas, travessias e qualidade das calçadas.

#### 3.1. Abordagens Baseadas em Algoritmos Clássicos de Roteamento

Com foco na aplicação de algoritmos de roteamento em serviços, o trabalho de Gunawan, Andriani e Munfi (2023) tem como objetivo aplicar o algoritmo de Dijkstra para identificar as rotas mais curtas até hospitais localizados na região de Kabupaten Tegal, Indonésia, visando melhorar o acesso aos serviços de saúde, especialmente em situações de emergência. A abordagem utiliza como principal critério de otimização a distância entre os pontos da rede viária. Os dados geográficos foram obtidos a partir do Google Maps e organizados manualmente em uma estrutura de grafo, contendo informações sobre a malha viária, interseções e distâncias entre os pontos. O método realiza a recomendação do trajeto completo entre a origem e o hospital de destino, identificando a sequência de nós que minimiza a distância total do percurso. Os resultados demonstraram precisão na identificação das rotas mais curtas, quando comparadas às rotas fornecidas pelo próprio Google Maps. No entanto, a abordagem não considera critérios de acessibilidade urbana, baseando-se exclusivamente na distância como métrica de otimização.

O estudo de Kozievitch et al. (2016) teve como objetivo desenvolver um planejador de rotas para usuários de cadeira de rodas com base em dados abertos, enfatizando a integração de informações de acessibilidade urbana. Os dados utilizados foram obtidos a partir de bases oficiais do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) e do OpenStreetMap<sup>3</sup>, sendo posteriormente processados e integrados em um banco espacial para construção do modelo. A abordagem considera critérios relacionados às condições das calçadas e da infraestrutura viária, incluindo presença de rampas, inclinação, largura, obstáculos e continuidade dos percursos, incorporados como pesos em um grafo que representa caminhos acessíveis por meio de calçadas e cruzamentos. O sistema realiza a recomendação do trajeto completo entre origem e destino, utilizando algoritmos de grafos

---

<sup>3</sup> OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org>, acesso: janeiro, 2026.

como Dijkstra e A\* adaptados para considerar restrições de acessibilidade. A modelagem permite ajustar dinamicamente os pesos das arestas para representar condições do ambiente, como presença de barreiras ou alterações temporárias na via.

Outro exemplo de inovação é apresentado por Verde *et al.* (2021), por meio do desenvolvimento do aplicativo “Viana+Acessível”, projetado para recomendar rotas otimizadas para pessoas com mobilidade reduzida, especialmente deficientes visuais e pessoas com autismo, na cidade de Viana do Castelo. O estudo utilizou os algoritmos A\* e Dijkstra para o cálculo das rotas, considerando diferentes necessidades de acessibilidade dos usuários. Para isso, foram empregados dados obtidos tanto por fontes colaborativas quanto por informações disponibilizadas pelo município de Viana, contemplando condições das ruas, obstáculos urbanos, rampas de acessibilidade, pontos de interesse, vagas de estacionamento destinadas a pessoas com deficiência e informações sobre transporte público. O protótipo do aplicativo mostrou-se eficaz na melhoria da mobilidade urbana para esses grupos, e os testes indicaram potencial para aperfeiçoamentos futuros.

O algoritmo de Dijkstra também foi empregado no estudo de Ajmi *et al.* (2019), no qual é proposto o sistema ARSAWP (*Augmented Reality System for the Assistance of Wheelchair People*), que utiliza tecnologia de realidade aumentada para apoiar a mobilidade de pessoas com deficiência motora. A abordagem considera as características da via, como tipo de rua e condições das calçadas, presença de obstáculos, inclinação, iluminação e acessibilidade de edificações, os quais são integrados em um grafo de acessibilidade utilizado no planejamento das rotas. Os dados são obtidos a partir de um processo híbrido que combina levantamento inicial conduzido por especialistas, entrevistas com usuários e coleta colaborativa em tempo real, na qual os próprios usuários reportam obstáculos durante a navegação. O sistema realiza a recomendação do trajeto completo, com capacidade de adaptação dinâmica ao longo do percurso por meio do replanejamento de rotas sempre que novos obstáculos são identificados. Para isso, utiliza uma abordagem baseada no algoritmo de Dijkstra, integrada a mecanismos adaptativos e a bases de dados locais e remotas. O método apresenta desempenho satisfatório ao fornecer navegação segura e responsiva, embora dependa de atualização contínua das informações para manter a qualidade das recomendações.

Voltado ao planejamento e gerenciamento da mobilidade urbana, o estudo de Ugalde *et al.* (2022) propõe um sistema colaborativo para identificação de obstáculos e recomendação

de rotas acessíveis para pessoas com mobilidade reduzida. A abordagem considera critérios de acessibilidade relacionados principalmente à presença e condição de rampas, identificação de obstáculos e áreas inacessíveis, além de informações espaciais representadas por polígonos de restrição, utilizados para evitar trechos comprometidos do percurso. Os dados são coletados por meio de participação ativa dos usuários, que reportam, via aplicativo móvel, o estado das rampas e a ocorrência de barreiras, complementados por entrevistas para validação das informações e pelo uso de serviços externos de localização. A solução integra um aplicativo móvel a um algoritmo próprio, denominado *ShortestPathObstacleFree*, baseado em uma variação do algoritmo de Dijkstra, capaz de calcular rotas acessíveis considerando dinamicamente as condições do ambiente. O sistema realiza a recomendação do trajeto completo entre origem e destino, com capacidade de replanejamento em tempo real sempre que novos obstáculos são identificados, redirecionando o usuário para trajetos alternativos livres de barreiras. O modelo demonstrou desempenho satisfatório quanto à funcionalidade, usabilidade e confiabilidade do sistema, obtendo avaliações médias superiores a 4,8 em uma escala Likert de 1 a 5 aplicada aos usuários participantes.

### **3.2. Abordagens Baseadas em Heurística e Múltiplos Critérios**

O Wegoto, desenvolvido por Mourcou *et al.* (2013), propõe uma abordagem baseada em *smartphones* para avaliar e melhorar a acessibilidade de rotas para cadeirantes, considerando o perfil e as capacidades do usuário. O sistema utiliza um único critério relacionado às condições físicas do percurso, como inclinação, obstáculos e resistência ao deslocamento, além de informações derivadas do comportamento do usuário durante a locomoção, permitindo a construção de um índice de acessibilidade aplicado aos trechos da rota. Os dados são coletados em tempo real por meio de sensores embarcados no smartphone, como acelerômetro, giroscópio e GPS, sendo posteriormente processados por técnicas de fusão de dados, como o filtro de Kalman, para reduzir ruídos e aumentar a precisão das medições. As informações coletadas são integradas a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), o qual possibilita a recomendação de trajetos completos entre origem e destino, adaptados às condições do ambiente e ao perfil do usuário. A avaliação realizada evidencia que a abordagem é capaz de segmentar os percursos em diferentes níveis de acessibilidade e fornecer rotas personalizadas, embora dependa de coleta contínua de dados sensoriais para manter a atualização das informações.

O método VRUPOD (*Vulnerable Road User Personalized Optimal Decision*), proposto por Darko *et al.* (2021), é descrito como uma abordagem de roteamento adaptativo e personalizado voltada a usuários com mobilidade reduzida, com ênfase em cadeirantes. O método considera múltiplos critérios de acessibilidade relacionados às condições físicas do ambiente, incluindo largura das calçadas, inclinação, tipo de superfície, presença de rampas, existência de obstáculos e comprimento do trajeto, além de fatores dinâmicos, como condições meteorológicas e preferências individuais dos usuários. Os dados utilizados são provenientes de diferentes fontes, combinando inventários municipais de infraestrutura urbana, como o Boston Sidewalk Inventory Database<sup>4</sup>, levantamentos de preferência por meio de questionários e informações obtidas por crowdsourcing e tecnologias de monitoramento, incluindo aplicativos colaborativos e reconhecimento automático de obstáculos. O modelo representa o ambiente urbano como um grafo e realiza a recomendação do trajeto completo, desde a origem até o destino, considerando a atualização dinâmica das condições ao longo do percurso. A análise dos resultados indica que o VRUPOD supera modelos tradicionais e variações do algoritmo de Dijkstra ao recomendar rotas com menor custo total e maior adaptabilidade a eventos inesperados, como obstáculos temporários e mudanças climáticas.

Diferentemente dos trabalhos baseados exclusivamente em algoritmos clássicos de caminho mínimo, Patras *et al.* (2021) propõem uma abordagem heurística baseada em penalizações para recomendação de rotas acessíveis em áreas urbanas, com foco em usuários de cadeiras de rodas. O método considera atributos relacionados à infraestrutura pedonal, como nível de acessibilidade das vias, largura das calçadas, presença de obstáculos e travessias em faixas de pedestres, incorporando esses critérios diretamente à função de custo utilizada no processo de roteamento. Para isso, o peso de cada aresta é calculado a partir da combinação entre a distância física do segmento e fatores de acessibilidade previamente definidos, penalizando trechos com condições menos favoráveis ao deslocamento. A proposta utiliza o cálculo dos k-caminhos mais curtos em um grafo ponderado, permitindo recomendar trajetos que, embora possam apresentar maior extensão, oferecem melhores condições de mobilidade. O conjunto de dados empregado foi obtido a partir do mapeamento das rotas pedonais do centro histórico de Tessalônica, na Grécia, utilizando informações geoespaciais e avaliações fundamentadas em critérios normativos de acessibilidade. Os resultados experimentais indicam que a abordagem é capaz de identificar trajetos mais acessíveis em comparação com métodos tradicionais baseados apenas na distância.

---

<sup>4</sup> Boston Sidewalk: <https://data.boston.gov/dataset/sidewalk-inventory>, acesso: janeiro, 2026.



### 3.3. Síntese Crítica dos Trabalhos Relacionados

Embora os estudos revisados avancem na incorporação de critérios de acessibilidade em problemas de roteamento para cadeirantes, observa-se uma diversidade de abordagens voltadas principalmente para deslocamentos pedonais (Gunawan, Andriani E Munfi, 2023; Kozievitch *et al.* 2016) ou para a adaptação de trajetos viários específicos (Verde et al., 2021; Ajmi et al., 2019). A presente pesquisa concentra-se em um contexto complementar, no qual o deslocamento é analisado de forma integrada ao uso do transporte público por ônibus. Nesse cenário, torna-se relevante considerar o percurso completo, desde o deslocamento inicial a pé até a parada de embarque, o trajeto realizado por ônibus e o trecho final até o destino. Tal perspectiva é importante quando se observa que muitos pontos de ônibus não dispõem de infraestrutura acessível em seu entorno imediato, como rampas, travessias adequadas ou calçadas com largura definida por norma.

O Quadro 2 apresenta uma síntese comparativa dos principais trabalhos relacionados à recomendação de rotas acessíveis. A coluna “Integração com Transporte Público” indica se a abordagem incorpora informações do sistema de transporte coletivo por ônibus, como paradas, linhas, itinerários ou etapas de embarque e desembarque no processo de recomendação das rotas. A coluna “Dados Oficiais” identifica trabalhos que utilizam bases de dados disponibilizadas por órgãos governamentais ou instituições públicas responsáveis pela gestão da mobilidade urbana. A coluna “Desenvolve Heurística” refere-se à utilização de métodos heurísticos ou estratégias multicritério para avaliação das rotas acessíveis. A coluna “Validação com Usuários” indica se a proposta foi submetida à avaliação com usuários reais. Já as colunas “Fonte” e “Dados Utilizados” descrevem, respectivamente, a origem das informações empregadas e os principais atributos considerados pelos modelos, como rampas, largura das calçadas, obstáculos e condições das vias. Por fim, as colunas “Público-alvo” e “Algoritmo” apresentam o grupo de usuários atendido pelas propostas e os algoritmos utilizados para recomendação ou cálculo das rotas.

De forma geral, observa-se que a maior parte dos estudos utiliza dados provenientes de coleta colaborativa (crowdsourced) ou sensores, como GPS e dispositivos móveis. Essa abordagem apresenta vantagens, como a atualização contínua dos dados e a possibilidade de capturar informações que não estão disponíveis em bases governamentais, incluindo obstáculos temporários e condições específicas da infraestrutura. Por outro lado, desafios relacionados à padronização, cobertura espacial e consistência das informações podem

influenciar a aplicação desses dados em sistemas de recomendação. Nesse contexto, diferentes estratégias de obtenção de dados apresentam potencial complementar, podendo combinar informações oficiais e colaborativas para ampliar a representação das condições reais de acessibilidade urbana.

No que se refere aos critérios de acessibilidade, observa-se que os trabalhos analisados consideram atributos relevantes, como presença de rampas, condições das calçadas, obstáculos urbanos e características da infraestrutura pedonal. Entre esses estudos, Patras et al. (2021) aproxima-se da proposta desta pesquisa ao combinar a filtragem de múltiplas rotas candidatas, por meio dos k-caminhos mais curtos, com uma estratégia heurística para recomendação de trajetos acessíveis. Entretanto, enquanto os autores incorporam os critérios de acessibilidade diretamente na função de custo das arestas do grafo, resultando na seleção da rota de menor custo, a presente pesquisa realiza a avaliação das rotas em uma etapa independente, por meio de uma heurística multicritério. Dessa forma, o sistema proposto estabelece um ranking entre as rotas candidatas, permitindo comparar diferentes alternativas de deslocamento segundo seus níveis relativos de acessibilidade.

Em relação aos algoritmos de roteamento utilizados, observa-se a predominância de métodos clássicos de roteamento, como Dijkstra e A\*, em alguns casos combinados com técnicas como aprendizado por reforço ou filtros probabilísticos. De modo geral, os estudos buscam incorporar atributos de acessibilidade ao processo de recomendação por meio de diferentes estratégias de modelagem e avaliação das rotas. Nesse cenário, observa-se espaço para explorar abordagens multicritério voltadas à integração simultânea de diferentes atributos de acessibilidade e à definição dos pesos associados a esses critérios.

O presente trabalho diferencia-se dos estudos analisados por integrar atributos de acessibilidade urbana ao contexto do transporte público por ônibus, considerando não apenas o deslocamento pedonal entre origem e destino, mas também as etapas de embarque e desembarque associadas ao percurso. A proposta também incorpora uma heurística multicritério cujos pesos são calibrados automaticamente.

Outro aspecto refere-se ao uso de dados geoespaciais oficiais disponibilizados por órgãos municipais. Em conjunto, essas características contribuem para o avanço do estado da arte ao explorar a recomendação de rotas para usuários cadeirantes no contexto do transporte público, cenário ainda pouco abordado nos trabalhos identificados na literatura.

Quadro 2 - Trabalhos relacionados.

| <b>Autores</b>                   | <b>Integra T. Público</b> | <b>Dados Oficiais</b> | <b>Desenvolve Heurística</b> | <b>Validação com Usuários</b> | <b>Fonte</b>                       | <b>Dados Utilizados</b>                                                                                                                                                       | <b>Público-alvo</b>               | <b>Algoritmo</b>                                 |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| GUNAWAN, ANDRIANI e MUNFI (2023) | Não                       | Não                   | Não                          | Não                           | Google Maps                        | Hospitais, nome das ruas, pontos de passagem (nós), distâncias (entre os pontos em metros)                                                                                    | População geral                   | Dijkstra                                         |
| KOZIEVITCH et al. (2016)         | Não                       | Sim                   | Não                          | Não                           | IPPUC                              | Ruas, calçadas, rampas de acesso e faixas de pedestres                                                                                                                        | Cadeirantes                       | Dijkstra e A*                                    |
| VERDE et al. (2021)              | Não                       | Sim                   | Não                          | Não                           | Crowdsourced e município de Viana  | Condições das ruas, obstáculos, rampas, pontos de interesse, vagas de estacionamento para pessoas com deficiência.                                                            | População com deficiência (geral) | Dijkstra e A*                                    |
| AJMI et al. (2019)               | Não                       | Não                   | Não                          | Sim                           | GPS                                | Tipo de rua (primária, secundária, terciária), condições das calçadas (largura e superfície), iluminação, acessibilidade de edifícios, inclinação, espaço livre e obstáculos. | População com deficiência (geral) | Dijkstra                                         |
| UGALDE et al. (2022)             | Não                       | Não                   | Não                          | Sim                           | Crowdsourced                       | Localização das rampas de acessibilidade e <i>feedback</i> dos usuários sobre as condições das rampas e obstáculos nas ruas.                                                  | Cadeirantes                       | Dijkstra                                         |
| MOURCOU et al. (2013)            | Não                       | Não                   | Não                          | Sim                           | GPS                                | Aceleração, inclinação, localização geográfica, resistência ao rolamento e <i>feedback</i> do usuário com denúncias e registros de obstáculos.                                | Cadeirantes                       | Filtro de Kalman                                 |
| DARKO et al. (2021)              | Não                       | Sim                   | Não                          | Não                           | Crowdsourced e município de Boston | Calçadas (largura, comprimento, inclinação, tipo); Condições climáticas; Obstáculos.                                                                                          | Cadeirantes                       | Q-Learning (Markov)                              |
| PATRAS et al. (2021)             | Não                       | Não                   | Sim                          | Não                           | Crowdsourced                       | Largura da calçada, faixa de pedestres, presença de rampas, condições de superfície.                                                                                          | Cadeirantes                       | Caminhos curtos baseado em penalização (K-paths) |
| Autor desta pesquisa             | Sim                       | Sim                   | Sim                          | Não                           | Município                          | Itinerário de ônibus, paradas de ônibus, faixas de pedestres, rampas e largura da calçada.                                                                                    | Cadeirantes                       | Dijkstra                                         |

## 4. SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE ROTAS

A presente pesquisa tem como objetivo propor um sistema computacional baseado em uma heurística de recomendação de rotas acessíveis para cadeirantes associadas ao uso do transporte público. O percurso analisado abrange três segmentos principais: *(i)* o deslocamento entre a localização de origem do usuário e a parada de embarque; *(ii)* o trajeto realizado por meio das linhas de ônibus disponíveis, entre as paradas de embarque e desembarque; e *(iii)* o deslocamento final entre a parada de desembarque e o destino. A recomendação de rota fundamenta-se em dados de acessibilidade e no algoritmo de roteamento de Dijkstra para indicar as rotas com menor distância, adaptado por critérios relacionados às condições físicas do espaço urbano.

O sistema computacional proposto recomenda as duas paradas de ônibus mais próximas do ponto de origem e considera até três rotas candidatas para cada opção indicada, priorizando aquelas que apresentam melhores condições de acordo com os critérios de acessibilidade disponíveis. Esses parâmetros foram definidos com o objetivo de limitar o espaço de busca e reduzir redundâncias entre trajetos similares, mantendo a viabilidade computacional do processo de recomendação.

### 4.1. Funcionamento do Sistema

Esta seção descreve o funcionamento do sistema computacional proposto para recomendação de rotas acessíveis. A Figura 5 ilustra o fluxo de execução do sistema, destacando as principais etapas envolvidas no processo de recomendação.

Conforme ilustrado na Figura 5, o sistema é executado em etapas sucessivas que envolvem a avaliação dos percursos entre origem, paradas de embarque, paradas de desembarque e o ponto de destino, bem como a identificação das linhas e paradas de ônibus compatíveis com o deslocamento desejado. A partir dessas informações, o algoritmo de Dijkstra é aplicado para filtragem das rotas candidatas nos espaços de busca definidos pelo sistema. Posteriormente, são identificados e contabilizados os atributos de acessibilidade presentes nas rotas candidatas, os quais são utilizados pela heurística proposta para avaliação e ordenação dos trajetos segundo os critérios estabelecidos. Cada uma dessas etapas é detalhada nas subseções seguintes.

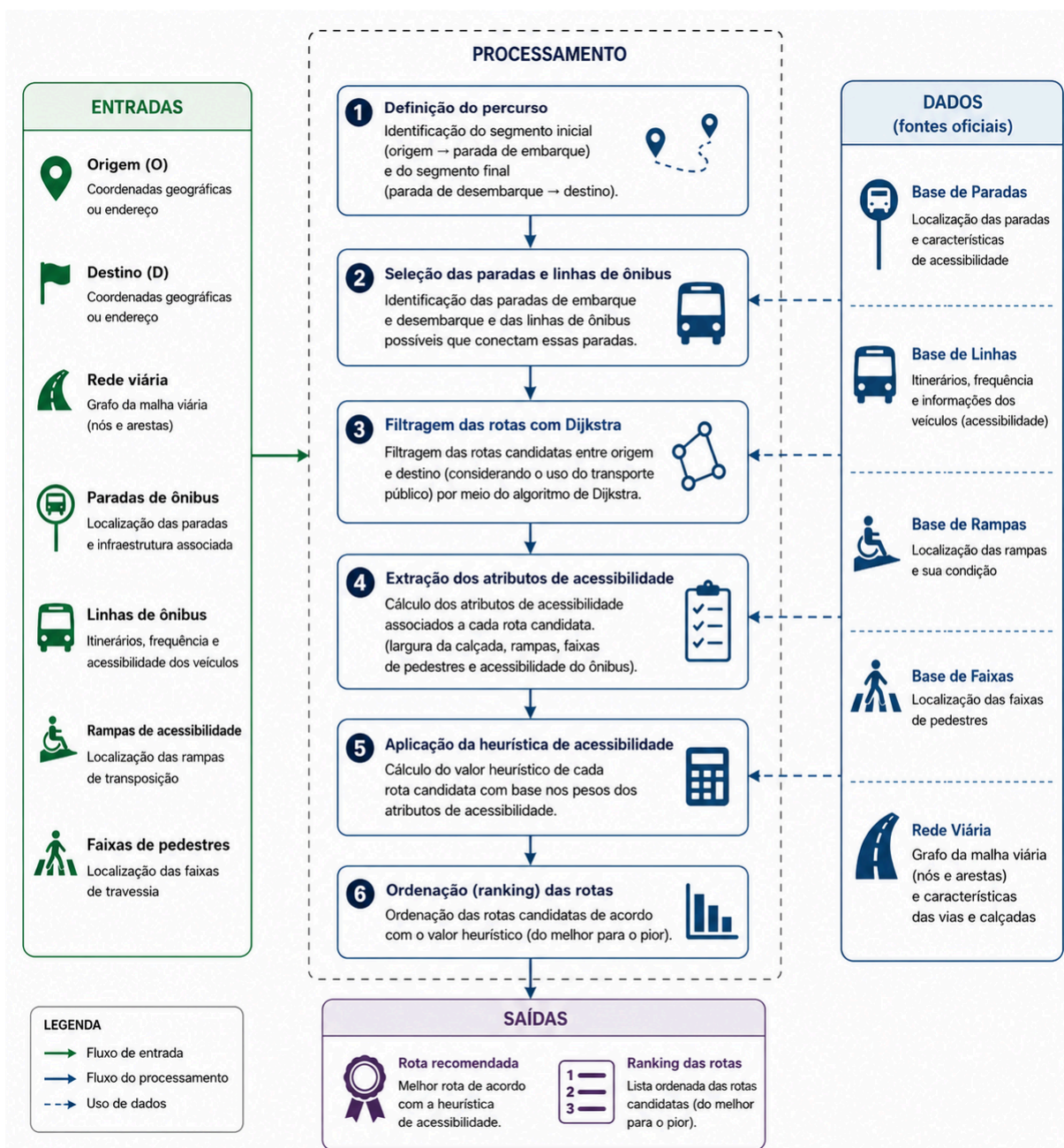


Figura 5 - Fluxo de processamento do sistema computacional proposto.

O fluxo geral do sistema computacional proposto encontra-se descrito no Algoritmo 1, apresentado no Apêndice A. Ao longo desta seção, cada etapa do algoritmo é detalhada individualmente.

#### 4.1.1. Definição do percurso

O processo de recomendação é iniciado a partir da definição do percurso desejado pelo usuário, representado pelas coordenadas geográficas de origem (O) e destino (D). A partir dessas informações espaciais, o sistema identifica os espaços de busca associados ao

deslocamento, contemplando os trajetos entre a origem e as paradas de embarque, bem como entre as paradas de desembarque e o destino final. Essa etapa permite delimitar os elementos urbanos e as linhas de ônibus potencialmente compatíveis com o deslocamento solicitado, servindo como base para as etapas subsequentes de filtragem e avaliação das rotas candidatas.

#### **4.1.2. Seleção das paradas e linhas de ônibus**

Com o objetivo de reduzir o deslocamento pedonal do usuário e priorizar os conceitos de caminhabilidade, o sistema seleciona paradas de ônibus localizadas próximas à origem e ao destino informados. Inicialmente, são identificadas as paradas mais próximas do destino por meio da distância geodésica, sendo recuperadas as respectivas linhas de ônibus que as atendem. Em seguida, o sistema verifica quais dessas linhas também estão presentes nas paradas mais próximas da origem, identificando combinações viáveis de embarque e desembarque para o deslocamento solicitado. Caso a parada mais próxima da origem ou do destino não possua linhas compatíveis para o percurso, ela é desconsiderada e o processo é repetido com as paradas subsequentes em ordem crescente de proximidade até que sejam identificadas duas alternativas válidas de embarque e desembarque. A partir dessas combinações, são definidas as paradas utilizadas na filtragem das rotas candidatas.

Os itinerários das linhas de ônibus são representados por sequências ordenadas de coordenadas geográficas (latitude e longitude), enquanto as paradas de ônibus também são representadas por suas respectivas coordenadas. Essa representação permite calcular a proximidade espacial entre os pontos de interesse do usuário e as paradas disponíveis na rede de transporte, possibilitando identificar quais paradas estão mais próximas da origem e do destino.

Por exemplo, considere um usuário localizado na região da Lagoa, no centro de João Pessoa, que deseja se deslocar até um ponto específico do bairro de Miramar. Nesse cenário, a linha 507 constitui uma alternativa viável porque atende simultaneamente uma parada próxima da origem e uma parada próxima do destino. A Figura 6 ilustra esse exemplo, destacando a localização geográfica do destino (D) e sua proximidade com uma parada de desembarque (PDes) atendida por essa linha.



de busca e possibilitando a análise de diferentes trajetos. Dessa forma, cada Espaço de Busca pode gerar até três rotas candidatas para cada parada analisada.

Após a filtragem das rotas candidatas, cada trajeto é avaliado pela heurística de acessibilidade proposta. Essa heurística considera os atributos de acessibilidade extraídos de cada rota. O resultado dessa avaliação corresponde a um valor heurístico utilizado para classificar as rotas segundo suas condições relativas de acessibilidade.

A utilização do algoritmo de Dijkstra justifica-se por sua ampla adoção em problemas de roteamento urbano e cálculo de caminhos mínimos em grafos ponderados com custos não negativos. No contexto desta pesquisa, o algoritmo é empregado exclusivamente para a filtragem das rotas candidatas, enquanto a avaliação da acessibilidade é realizada em uma etapa posterior por meio da heurística proposta.

Essa separação decorre da natureza dos atributos considerados pelo sistema. Atributos como quantidade de rampas, quantidade de faixas de pedestres e largura da calçada são obtidos a partir da análise do percurso gerado e não estão previamente associados às arestas da rede viária. Dessa forma, a aplicação direta desses atributos na função de custo do algoritmo exigiria uma modelagem de acessibilidade em cada segmento da rede, o que não era suportado pela estrutura dos dados disponíveis. Assim, optou-se por uma abordagem em duas etapas: filtragem de rotas candidatas e posterior avaliação heurística das alternativas obtidas. Essa estratégia favorece a modularidade do sistema, permitindo que diferentes algoritmos de roteamento possam ser empregados futuramente na etapa de filtragem das rotas sem necessidade de alterações na heurística de acessibilidade.

#### **4.1.4. Extração dos atributos de acessibilidade de acessibilidade**

Após a filtragem das rotas candidatas, são identificados os atributos de acessibilidade utilizados na heurística de avaliação. Essa etapa ocorre sobre o Espaço de Busca definido pelo sistema, compreendendo os trajetos entre o ponto de origem (O) e as paradas de embarque (PEmb), bem como entre as paradas de desembarque (PDes) e o ponto de destino (D). Dessa forma, apenas os segmentos efetivamente percorridos pelo usuário durante o deslocamento pedonal são considerados na análise dos atributos de acessibilidade.

A extração dos atributos foi realizada a partir da integração entre as rotas filtradas e os dados geoespaciais de infraestrutura urbana. Para identificar os elementos associados a cada rota, foi criada uma zona de influência (*buffer*) de 5 metros ao redor dos trajetos gerados.



Com o objetivo de garantir maior precisão espacial nas medições, os dados foram convertidos para o sistema de referência projetado EPSG:31985, no qual as unidades métricas são representadas em metros. Assim, apenas os elementos localizados dentro desse limite espacial foram considerados no cálculo dos atributos de cada rota candidata.

A Figura 7 ilustra um exemplo da identificação e contabilização dos atributos de acessibilidade em três rotas candidatas, representadas pelas cores vermelha (Rota 1), verde (Rota 2) e azul (Rota 3). No exemplo apresentado, a Rota 1 possui duas rampas de acessibilidade e uma faixa de pedestre. Como a Rota 3 compartilha parcialmente segmentos da mesma calçada utilizada pela Rota 1, também é contabilizada a identificação de uma rampa de acessibilidade. Já a Rota 2 não apresenta ocorrências de rampas de acessibilidade ou faixas de pedestres nesse Espaço de Busca.

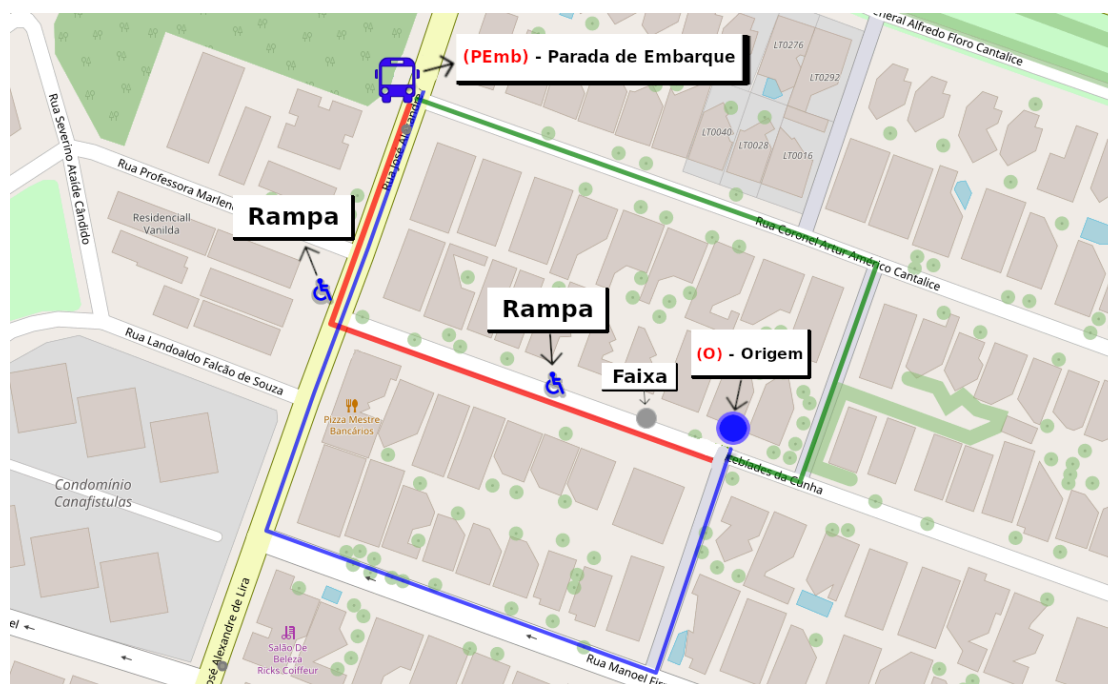


Figura 7 - Contagem dos atributos de acessibilidade em um Espaço de Busca.

Diferentemente dos atributos das rampas de acessibilidade e das faixas de pedestres obtidos automaticamente a partir das bases georreferenciadas, a largura das calçadas foi incorporada ao sistema por meio de medições manuais realizadas nos segmentos pertencentes ao Espaço de Busca analisado em cada rota candidata.

#### 4.1.5. Aplicação da heurística

Após a filtragem das rotas candidatas e a extração dos respectivos atributos de acessibilidade, cada trajeto é analisado individualmente por meio da heurística proposta, com o objetivo de identificar quais rotas apresentam melhores condições de acessibilidade para cadeirantes. Nessa etapa, os atributos associados a cada rota são combinados em uma função heurística multicritério, permitindo avaliar comparativamente as alternativas filtradas no Espaço de Busca.

A heurística aplicada no sistema proposto é expressa pela seguinte equação:

$$H = W_l \cdot L^{norm} + W_r \cdot R^{norm} + W_f \cdot F^{norm} + W_d \cdot (1 - D^{norm})$$

A distância é utilizada de forma inversamente proporcional na função heurística, de modo que percursos menores produzam maior contribuição no valor final de H. Os atributos  $L^{norm}$ ,  $R^{norm}$ ,  $F^{norm}$  e  $D^{norm}$  representam, respectivamente, a largura média das calçadas, a quantidade de rampas de acessibilidade, a quantidade de faixas de pedestres e a distância total do percurso, sendo esta última tratada como fator de penalização. Todos os atributos são previamente normalizados para o intervalo  $[0, 1]$ , permitindo a combinação proporcional de critérios originalmente representados em escalas distintas.

Os pesos  $W_l$ ,  $W_r$ ,  $W_f$ ,  $W_d$  correspondem à relevância atribuída a cada atributo de acessibilidade no cálculo heurístico. Esses pesos são definidos de acordo com a hierarquia de importância estabelecida no sistema e serão detalhados nas subseções seguintes. Dessa forma, a heurística proposta permite avaliar as rotas candidatas considerando simultaneamente múltiplos aspectos relacionados à acessibilidade urbana.

#### 4.1.6. Ordenação (Ranking) das Rotas

Após a aplicação da heurística, cada rota candidata recebe um escore associado às suas condições relativas de acessibilidade. A partir desses valores, as rotas são ordenadas em forma de ranking.

O processo de ordenação é realizado separadamente para os segmentos entre o ponto de origem (O) e as paradas de embarque (PEmb), bem como entre as paradas de desembarque (PDes) e o ponto de destino (D). Para cada segmento, o sistema considera as duas paradas mais próximas do usuário, tanto para embarque quanto para desembarque. A escolha de duas alternativas foi adotada para ampliar as possibilidades de deslocamento avaliadas sem

comprometer os princípios de caminhabilidade, uma vez que paradas mais distantes tendem a aumentar o esforço de locomoção do usuário.

Para cada parada, são filtradas até três Rotas Candidatas, denominadas Rota 1, Rota 2 e Rota 3. Esse limite foi definido porque a filtragem de um número maior de alternativas produzia trajetos muito semelhantes ou parcialmente sobrepostos. Assim, considerando duas alternativas de parada para embarque e duas para desembarque, podem ser analisadas até seis rotas distintas em cada Espaço de Busca, permitindo comparar diferentes trajetos e identificar variações nas condições de acessibilidade.

De forma análoga, o mesmo procedimento é aplicado tanto ao trecho entre origem e parada de embarque quanto ao trecho entre parada de desembarque e destino final. A normalização dos atributos e o cálculo heurístico ( $H^{norm}$ ) são realizados considerando conjuntamente todas as rotas pertencentes ao mesmo Espaço de Busca analisado. Dessa forma, os valores relativos de acessibilidade são obtidos a partir da comparação entre as seis rotas candidatas filtradas para cada segmento do percurso.

Com base nos valores heurísticos calculados, as rotas são classificadas em ordem decrescente de acessibilidade, estabelecendo um ranking entre as alternativas avaliadas. Nesse contexto, a Rota 1 desempenha papel central no processo comparativo, por representar o trajeto de menor distância obtido pelo algoritmo tradicional de Dijkstra. A comparação entre a Rota 1 e as demais rotas candidatas permite analisar se a minimização da distância é suficiente para representar as condições de acessibilidade ou se trajetos alternativos, ainda que mais longos, oferecem melhores condições de deslocamento para cadeirantes.,

## 4.2. Definição dos pesos da heurística

A definição dos pesos utilizados na heurística proposta foi realizada por meio de um Algoritmo Genético, empregado exclusivamente na etapa experimental de calibração dos coeficientes associados aos atributos de acessibilidade da heurística proposta. Nesse processo, diferentes combinações de pesos foram avaliadas com base em restrições previamente estabelecidas. Assim, o Algoritmo Genético não participa da execução operacional da heurística aplicada às rotas, atuando apenas como mecanismo auxiliar para definição dos pesos utilizados na avaliação multicritério.

As próximas subseções apresentam os principais conceitos utilizados nesse processo. São descritas a diretriz de relevância adotada para os atributos de acessibilidade, o processo de normalização e por fim a calibração dos pesos.

#### **4.2.1. Diretriz de relevância dos atributos de acessibilidade**

A heurística proposta neste trabalho é composta por diferentes atributos de acessibilidade extraídos das rotas candidatas filtradas no Espaço de Busca. Esses atributos representam características da infraestrutura urbana consideradas relevantes para o deslocamento de cadeirantes, incluindo largura das calçadas, presença de rampas de acessibilidade, de faixas de pedestres e distância total do percurso.

Entretanto, os atributos não possuem a mesma relevância no contexto da acessibilidade urbana. Dessa forma, torna-se necessário definir pesos capazes de representar a importância relativa de cada critério na composição da heurística multicritério utilizada pelo sistema.

Com base nos estudos relacionados à mobilidade urbana acessível, especialmente aqueles apresentados no Capítulo 3, foi estabelecida uma hierarquia conceitual entre os atributos de acessibilidade utilizada como restrição durante a otimização dos pesos pelo Algoritmo Genético, definida por  $W_l > W_r > W_f > W_d$  onde:

- $W_l$  representa o pesos associado à largura da calçada;
- $W_r$  representa a presença de rampas de acessibilidade;
- $W_f$  representa a existência de faixas de pedestres; e
- $W_d$  representa a distância do percurso.

A diretriz estabelece que a largura da calçada deve possuir maior influência na avaliação heurística, seguida pela presença de rampas, faixas de pedestres e, por fim, pela distância percorrida.

Essa hierarquia não representa valores arbitrários, mas sintetiza a importância relativa atribuída aos atributos de acessibilidade pela literatura. A largura das calçadas foi posicionada como o critério de maior prioridade. Em seguida, foram consideradas as rampas de acessibilidade, indispensáveis para garantir a transposição entre calçadas e vias, seguidas pelas faixas de pedestres. Por fim, a distância percorrida foi mantida como atributo de menor

prioridade, uma vez que o objetivo do sistema não consiste em recomendar apenas o menor percurso, mas identificar trajetos que conciliem deslocamentos reduzidos com melhores condições de acessibilidade. Essa hierarquia é consistente com os critérios empregados em estudos anteriores sobre recomendação de rotas acessíveis e mobilidade urbana (Kozievitch *et al.*, 2016; Ajmi *et al.*, 2019; Darko *et al.*, 2021; Verde *et al.*, 2021; Patras *et al.*, 2021; Ugalde *et al.*, 2022; Inturri *et al.*, 2021; Gunawan, Andriani e Munfi, 2023).

Além da hierarquia de relevância, foram definidas restrições adicionais para os pesos, (i) todos os valores devem permanecer no intervalo entre 0 e 1; (ii) não são permitidos pesos negativos; (iii) e a soma total dos pesos deve ser igual a 1. Essas restrições são utilizadas na definição da população inicial empregada pelo Algoritmo Genético durante o processo de calibração dos pesos.

#### 4.2.2. Normalização dos atributos

Em um Espaço de Busca, os atributos de acessibilidade devem ser normalizados, uma vez que os critérios de acessibilidade utilizados no sistema proposto apresentam diferentes escalas de representação, como distância em metros, largura das calçadas e quantidade de elementos urbanos, como rampas de acessibilidade e faixas de pedestres.

Para isso, os valores dos atributos extraídos das rotas candidatas são normalizados por meio do método Min-Max (Han; Pei; Tong, 2022), conforme a Equação:

$$A_i = \frac{A_i - A_i^{min}}{A_i^{max} - A_i^{min}}$$

em que:

- $A_i$  representa o valor original do atributo, por exemplo, o atributo largura da calçada;
- $A_i^{min}$  corresponde ao menor valor observado, por exemplo, largura min=1,28m;
- $A_i^{max}$  corresponde ao maior valor observado, por exemplo, largura max=1,98m;

A normalização Min-Max transforma os atributos para valores no intervalo entre 0 e 1, permitindo que critérios originalmente representados em escalas distintas possam ser comparados de maneira proporcional. Os vetores de pesos apresentados a seguir representam

exemplos de indivíduos pertencentes à população utilizada pelo Algoritmo Genético durante a etapa de calibração.

- $W_1 = [0, 50; 0, 30; 0, 15; 0, 05]$
- $W_2 = [0, 39; 0, 25; 0, 12; 0, 08]$
- $W_3 = [0, 45; 0, 25; 0, 20; 0, 10]$

#### 4.2.3. Calibração dos pesos

Após a definição da diretriz de relevância e da geração dos vetores de pesos válidos da população inicial, inicia-se a etapa de calibração dos pesos por meio do Algoritmo Genético. A população inicial foi composta por 50 indivíduos, isto é, 50 vetores de pesos gerados sob as restrições estabelecidas pela diretriz de relevância dos atributos. Cada indivíduo representa uma combinação distinta de pesos dos atributos de acessibilidade. Dessa forma, diferentes distribuições de importância entre largura da calçada, rampas de acessibilidade, faixas de pedestres e distância são avaliadas ao longo do processo evolutivo.

O processo de calibração foi conduzido ao longo de 20 gerações consecutivas. Cada geração compreende uma população de 50 indivíduos, representados por vetores de pesos distintos que buscam a otimização do sistema. O desempenho dos indivíduos foi avaliado com base na capacidade dos vetores de pesos em produzir maior discriminação entre as rotas candidatas. Por meio da função de aptidão foi possível realizar a separação entre os valores heurísticos atribuídos às rotas candidatas de cada percurso. Dessa forma, vetores de pesos que produzem maior diferença entre a rota melhor avaliada e a pior avaliada recebem maior valor de aptidão, favorecendo soluções capazes de discriminar de forma mais clara as alternativas de deslocamento segundo os critérios de acessibilidade considerados.

A transição entre gerações ocorre por meio de operadores genéticos, permitindo o refinamento progressivo das combinações de pesos a partir da população precedente. A estrutura da população inicial (Geração 1) e a composição dos vetores podem ser exemplificadas da seguinte forma:

##### **Geração 1:**

- $W_1 = [0, 50; 0, 30; 0, 15; 0, 05]$
- $W_2 = [0, 45; 0, 28; 0, 17; 0, 10]$
- ...  $W_{50} = [0, 39; 0, 21; 0, 18; 0, 02]$

Após a avaliação do desempenho desses vetores em 20 gerações diferentes, os indivíduos mais promissores possuem maior probabilidade de permanecer no processo evolutivo. A partir deles, operações de cruzamento e mutação produzem novos vetores para a geração seguinte. Ao longo das gerações, o algoritmo busca gradualmente combinações de pesos mais estáveis e coerentes com a diretriz.

Durante o processo de otimização, cada indivíduo foi avaliado considerando o conjunto completo de rotas candidatas para os percursos utilizados na avaliação experimental. Todos os vetores de pesos foram submetidos às mesmas condições de análise, permitindo comparar sua capacidade de discriminar as diferentes alternativas de deslocamento segundo os critérios de acessibilidade estabelecidos.

Para conduzir esse processo evolutivo, foi empregada seleção por torneio, mecanismo utilizado para priorizar os indivíduos com melhor desempenho relativo dentro da população. Nesse procedimento, pequenos grupos de vetores são selecionados para comparação, sendo escolhido aquele que apresenta melhor capacidade de diferenciação. Por exemplo, considerando os indivíduos:

- $W_1 = [0,50; 0,30; 0,15; 0,05]$
- $W_2 = [0,45; 0,28; 0,17; 0,10]$
- $W_3 = [0,39; 0,25; 0,22; 0,14]$

Caso o vetor  $W_2$  apresente melhor desempenho relativo na diferenciação, ele possui maior probabilidade de permanecer no processo evolutivo e participar da geração seguinte. Além disso, foi aplicada taxa de cruzamento de 0,80, responsável pela recombinação de características entre vetores promissores. Nesse procedimento, pares de indivíduos podem combinar parcialmente seus genes para produzir novos vetores descendentes. Por exemplo, a combinação entre os vetores:  $W_1 = [0,50; 0,30; 0,15; 0,05]$  e  $W_2 = [0,45; 0,28; 0,17; 0,10]$  pode gerar o seguinte descendente  $W_3 = [0,47; 0,29; 0,16; 0,08]$ .

De forma paralela, foi utilizada uma taxa de mutação de 0,10, permitindo pequenas alterações nos indivíduos ao longo das gerações. Por exemplo, um vetor como:  $W_n = [0,47; 0,29; 0,16; 0,08]$  pode sofrer uma pequena modificação em um de seus pesos, resultando em  $W_n = [0,46; 0,30; 0,16; 0,08]$ . A mutação atua como mecanismo de diversificação das soluções, reduzindo o risco de convergência prematura para combinações muito semelhantes de pesos.

A adoção desses parâmetros justifica-se pela baixa dimensionalidade do problema, composto por apenas quatro atributos contínuos de acessibilidade. Dessa forma, populações excessivamente grandes ou elevado número de gerações poderiam aumentar a complexidade computacional sem necessariamente produzir ganhos significativos no processo de calibração.

Ao longo das iterações, operadores evolutivos de seleção, cruzamento e mutação promovem a evolução das soluções, conduzindo o processo à obtenção de uma combinação de pesos. Como resultado desse processo, obteve-se o seguinte vetor final:  $W_{largura} = 0,41$ ,  $W_{rampa} = 0,29$ ,  $W_{faixa} = 0,20$ ,  $W_{distância} = 0,10$ , o qual reflete simultaneamente a hierarquia conceitual dos critérios de acessibilidade.

Os pesos obtidos são posteriormente incorporados ao sistema e utilizados de forma fixa durante a avaliação dos percursos analisados. Dessa forma, o Algoritmo Genético atua como um mecanismo de calibração dos parâmetros da heurística, não sendo necessário executá-lo novamente enquanto permanecerem inalterados o conjunto de atributos considerados, a estratégia de avaliação adotada e as restrições definidas para o problema. Novas execuções do algoritmo podem ser realizadas caso sejam incorporados novos atributos de acessibilidade, modificadas as prioridades entre os critérios ou disponibilizados novos conjuntos de dados que justifiquem uma recalibração dos pesos.

### 4.3. Execução do sistema proposto

Esta seção apresenta um exemplo de aplicação do modelo de recomendação de rotas descrito anteriormente, com o objetivo de tornar sua operacionalização mais clara. Foram adotados rótulos para definir cada ponto no mapa, PEmb(n), é definido por parada de embarque e “n” o número da parada indicada (1ª ou 2ª), mesmo conceito para a parada de desembarque, na qual será representada por PDes(n). Já a origem será representada pelo rótulo “O” e destino como “D”.

Considere um usuário localizado no ponto de origem (O) que deseja se deslocar até o destino (D). Para esse exemplo, a origem corresponde às coordenadas (-7.11904, -34.88714) e o destino às coordenadas (-7.11630, -34.87231). O primeiro passo consiste em identificar as paradas de desembarque mais próximas do destino do usuário. Após isso, definindo as paradas de desembarque, é possível identificar as paradas de embarque mais próximas à origem do usuário, considerando as linhas de ônibus possíveis. As duas paradas indicadas



podem ser visualizadas na Tabela 1. A coluna “Localização”, representa os dados georreferenciados (latitude e longitude) de cada parada indicada.

Tabela 1 - Paradas de ônibus próximas ao destino.

| <b>Parada de Desembarque indicada por ordem de proximidade</b> | <b>Rótulo</b> | <b>Localização</b>  |
|----------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|
| 1 <sup>a</sup>                                                 | PDes1         | -7.11974, -34.87067 |
| 2 <sup>a</sup>                                                 | PDes2         | -7.11937, -34.86854 |

As duas paradas de desembarque identificadas possuem em comum as 27 linhas disponíveis para alcançar a localização próxima ao destino. No entanto, nem todas as linhas retornadas passam pelas paradas de embarque mais próximas do usuário. Por isso, é necessário calcular a distância entre a localização de origem do usuário em O (-7.11904, -34.88714) e as paradas de embarque, a fim de determinar as paradas mais próximas. Em seguida, verificar se as linhas que passam por essas paradas estão entre as linhas que podem levar até as paradas de desembarque (PDes1 e PDes2).

Na análise desse percurso, as paradas mais próximas do ponto de origem são, respectivamente, a PEmb1 (-7.11789, -34.8896) e a PEmb2 (-7.120340, -34.8895), conforme ilustrado na Figura 8. Entretanto, embora a PEmb2 esteja entre as paradas mais próximas do usuário, as linhas de ônibus disponíveis nessa parada não realizam conexão com as paradas de desembarque associadas ao destino informado. Dessa forma, a PEmb2 não é considerada operacionalmente viável para o deslocamento analisado. Nesses casos, o modelo desconsidera paradas cujas linhas não permitem alcançar o destino desejado e seleciona a próxima alternativa mais próxima compatível com o trajeto necessário. Assim, para esse percurso, a PEmb1 foi definida como a parada de embarque mais adequada ao usuário.



Figura 8 - Paradas de Embarque identificadas próximas à origem do usuário.

Entre as linhas inicialmente identificadas nas paradas de desembarque, apenas as linhas 500, 507, 508, 510, 518 e 520 também estavam disponíveis na parada de embarque selecionada (PEmb1). As demais linhas foram desconsideradas por não atenderem simultaneamente às condições de embarque e desembarque requeridas para o deslocamento analisado. Portanto, as 6 linhas identificadas são viáveis para que o usuário chegue à parada de desembarque a partir da parada de embarque indicada.

A análise da rota mais adequada será realizada com base na heurística já apresentada, considerando as rotas candidatas filtradas para os espaços de busca associados ao percurso analisado.

#### 4.3.1. Análise do espaço de busca entre a origem e parada de embarque

Considerando que a parada de embarque mais próxima ao usuário é PEmb1, as três rotas candidatas foram identificadas e estão ilustradas na Figura 9, com cada rota representada por uma cor distinta. Na Tabela 2, são apresentados o número de elementos de acessibilidade encontrados em cada percurso, bem como os pesos finais atribuídos a cada rota.



| Rotas  | Heurística Aplicada                                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rota 1 | $H_1 = 0,41 \cdot (0,80) + 0,29 \cdot (0) + 0,20 \cdot (0,5) + 0,10 \cdot (1) = 0,528$<br>$H_{1(norm)} = 0,538$ |
| Rota 2 | $H_2 = 0,41 \cdot (1) + 0,29 \cdot (1) + 0,20 \cdot (1) + 0,10 \cdot (0,82) = 0,982$<br>$H_{2(norm)} = 1,00$    |
| Rota 3 | $H_3 = 0,41 \cdot (0) + 0,29 \cdot (0) + 0,20 \cdot (0) + 0,10 \cdot (0) = 0,00$<br>$H_{3(norm)} = 0,00$        |

Embora apresente distância superior à da Rota 1, a Rota 2 obteve o maior valor heurístico devido ao melhor desempenho nos atributos de acessibilidade analisados, incluindo maior quantidade de faixas de pedestres, maior número de rampas de acessibilidade e maior largura de calçada. A Rota 3 foi classificada na última posição do ranking, principalmente por apresentar largura de calçada inferior ao valor mínimo recomendado para circulação adequada de cadeirantes.

#### 4.3.2. Análise do espaço de busca entre a parada de desembarque e destino

A avaliação do trajeto entre a parada de desembarque e o destino considerou duas alternativas de paradas. Para cada uma delas, foram filtradas três Rotas Candidatas, representadas pelas cores vermelha (Rota 1), verde (Rota 2) e azul (Rota 3). A Figura 10 apresenta as rotas associadas à primeira parada indicada, enquanto a Figura 11 ilustra as rotas filtradas a partir da segunda parada.





Figura 10 - Rotas Candidatas a partir da primeira parada.



Figura 11 - Rotas Candidatas a partir da segunda parada.

A Tabela 5 apresenta os atributos utilizados na avaliação heurística das rotas candidatas identificadas entre as paradas de desembarque e o destino. Para cada parada analisada, foram consideradas três rotas alternativas, permitindo a comparação entre diferentes trajetos associados ao mesmo espaço de busca.

Tabela 5 - Análise das Rotas Candidatas entre a Parada de Desembarque e Destino.

| Rota                              | Linha    | Largura da calçada (m) | Nº de rampas | Nº de faixas | Distância (m) | Valor Heurístico                                                                                     |
|-----------------------------------|----------|------------------------|--------------|--------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1ª parada indicada (PDes1)</b> |          |                        |              |              |               |                                                                                                      |
| 1ª rota                           | Vermelha | 1,58m                  | 1            | 2            | 560m          | $H_{1.1(vermelha)} = 0,39$                                                                           |
|                                   |          |                        |              |              |               | $H_{1.1(vermelha)} = 0,41 \cdot (0) + 0,29 \cdot (1) + 0,20 \cdot (0) + 0,10 \cdot (1 - 0) = 0,39$   |
| 2ª rota                           | Verde    | 1,58m                  | 1            | 4            | 648m          | $H_{1.2(verde)} = 0,49$                                                                              |
|                                   |          |                        |              |              |               | $H_{1.2(verde)} = 0,41 \cdot (0) + 0,29 \cdot (1) + 0,20 \cdot (1) + 0,10 \cdot (1 - 0,936) = 0,496$ |
| 3ª rota                           | Azul     | 1,86m                  | 0            | 3            | 654m          | $H_{1.3(azul)} = 0,51$                                                                               |
|                                   |          |                        |              |              |               | $H_{1.3(azul)} = 0,41 \cdot (1) + 0,29 \cdot (0) + 0,20 \cdot (0,5) + 0,10 \cdot (1 - 1) = 0,51$     |
| <b>2ª parada indicada (PDes2)</b> |          |                        |              |              |               |                                                                                                      |
| 1ª rota                           | Vermelha | 1,58m                  | 0            | 4            | 619m          | $H_{2.1(vermelha)} = 0,10$                                                                           |
|                                   |          |                        |              |              |               | $H_{2.1(vermelha)} = 0,41 \cdot (0) + 0,29 \cdot (0) + 0,20 \cdot (0) + 0,10 \cdot (1) = 0,10$       |
| 2ª rota                           | Verde    | 1,58m                  | 1            | 4            | 665m          | $H_{2.2(verde)} = 0,33$                                                                              |
|                                   |          |                        |              |              |               | $H_{2.2(verde)} = 0,41 \cdot (0) + 0,29 \cdot (1) + 0,20 \cdot (0) + 0,10 \cdot (1 - 0,523) = 0,338$ |
| 3ª rota                           | Azul     | 1,86m                  | 1            | 5            | 707m          | $H_{2.3(azul)} = 0,90$                                                                               |
|                                   |          |                        |              |              |               | $H_{2.3(azul)} = 0,41 \cdot (1) + 0,29 \cdot (1) + 0,20 \cdot (1) + 0,10 \cdot (1 - 1) = 0,90$       |

A normalização dos dados foi aplicada para ajustar os valores de  $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5$  e  $H_6$  (conforme apresentados na Tabela 6) utilizando-se o método de normalização Min-Max.

Tabela 6 - Normalização dos valores das rotas entre a parada de desembarque e o destino.

| Heurística <sub>(rota)</sub> | Normalização aplicada                                   |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| $H_{1.1(vermelha)_{norm}}$   | $\frac{0,39-0,10}{0,80} = \frac{0,29}{0,80} = 0,3625$   |
| $H_{1.2(verde)_{norm}}$      | $\frac{0,496-0,10}{0,80} = \frac{0,396}{0,80} = 0,495$  |
| $H_{1.3(azul)_{norm}}$       | $\frac{0,51-0,10}{0,80} = \frac{0,41}{0,80} = 0,5125$   |
| $H_{2.1(vermelha)_{norm}}$   | $\frac{0,10-0,10}{0,80} = 0$                            |
| $H_{2.2(verde)_{norm}}$      | $\frac{0,338-0,10}{0,80} = \frac{0,238}{0,80} = 0,2975$ |
| $H_{2.3(azul)_{norm}}$       | $\frac{0,90-0,10}{0,80} = 1,00$                         |

Os resultados obtidos indicam que a 3ª rota da 2ª parada ( $H_{2.3} = 1,00$ ) apresenta o melhor desempenho entre todas as trajetórias analisadas. Este resultado se deu em razão da combinação mais favorável dos critérios de acessibilidade, destacando-se pela maior largura de calçada (1,86m), pela presença de rampa de acessibilidade (1) e pelo maior número de faixas de pedestres (5). Embora essa alternativa possua a maior distância total (707m), tal desvantagem é compensada pelos atributos com maior relevância na composição heurística, cujo peso associado à distância é menor.

A 3ª rota da 1ª parada ( $H_{1.3} = 0,51$ ), embora apresente maior largura da calçada (1,86 m), ocupa a segunda posição, devido à ausência de rampas e do número intermediário de faixas de pedestres (3). Por fim, a 1ª rota da 2ª parada ( $H_{2.1} = 0,00$ ) foi classificada como a pior alternativa por apresentar a menor largura de calçada (1,58m) e não ter rampas de acessibilidade.

Tabela 7 - Ranking por ordem decrescente das rotas analisadas.

| Ranking | Parada    | Rota    | Heurística <sub>(norm)</sub> |
|---------|-----------|---------|------------------------------|
| 1º      | 2ª parada | 3ª rota | $H_{2.3(azul)} = 1,00$       |
| 2º      | 1ª parada | 3ª rota | $H_{1.3(azul)} = 0,5125$     |
| 3º      | 1ª parada | 2ª rota | $H_{1.2(verde)} = 0,495$     |
| 4º      | 1ª parada | 1ª rota | $H_{1.1(vermelha)} = 0,3625$ |
| 5º      | 2ª parada | 2ª rota | $H_{2.2(verde)} = 0,2975$    |
| 6º      | 2ª parada | 1ª rota | $H_{2.1(vermelha)} = 0,00$   |

Diante dos resultados apresentados na Tabela 7, a configuração mais adequada em termos de acessibilidade corresponde ao embarque na parada PEmb1 (-7.11789, -34.88961), utilizando a segunda rota no deslocamento entre a origem e a parada de embarque. Para o trecho final do percurso, a recomendação corresponde à segunda parada de desembarque indicada (PDes2, -7.11937, -34.86854), utilizando a terceira rota candidata entre a parada e o destino. Nesse cenário, seis linhas de ônibus mostraram-se compatíveis com o deslocamento analisado.

Finalmente, considerando-se o cenário ideal para o percurso analisado, o usuário deve se deslocar até a parada de ônibus do representada por PEmb1, pois é a mais próxima do mesmo e oferece as linhas compatíveis com o deslocamento necessário para alcançar seu destino. Com base na heurística definida, o usuário deverá desembarcar na segunda parada indicada e seguir pela terceira rota sugerida. Embora essa rota apresente uma maior distância entre a parada de desembarque e o destino final, ela se destaca pela presença de pelo menos cinco faixas de pedestres e uma rampa de acessibilidade.

#### 4.4. Dados utilizados

Os dados utilizados para avaliação do sistema de recomendação proposto foram obtidos a partir de fontes institucionais fornecidas pela Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana de João Pessoa (SEMOB). Neste estudo, essas bases são tratadas de



forma integrada para compor o conjunto de informações espaciais e de acessibilidade empregado pelo sistema proposto. Esse conjunto inclui registros referentes a linhas e paradas de ônibus, rampas de acessibilidade e faixas de pedestres.

O repositório referente às linhas de ônibus possui 156 registros, correspondentes ao período de coleta entre 2022 e 2023, sendo cada registro associado a uma linha de ônibus distinta. A base contempla informações como identificador da linha, número, denominação e coordenadas georreferenciadas dos trajetos. A base de paradas de ônibus totaliza 1.983 registros, contendo identificadores, coordenadas de latitude e longitude, além dos respectivos logradouros associados. Já o conjunto de dados de rampas de acessibilidade compreende 1.978 registros georreferenciados. Por fim, a base referente às faixas de pedestres possui 3.158 registros, cada qual identificado individualmente e associado às respectivas coordenadas geográficas.

No que diz respeito à acessibilidade dos ônibus, destaca-se que, de acordo com a SEMOB, todos os ônibus atualmente em operação na cidade de João Pessoa são acessíveis. Assim, no âmbito da heurística adotada, o fator relacionado ao ônibus acessível é tratado como uma constante, não influenciando a diferenciação entre as rotas candidatas, mas assegurando que todas atendem previamente ao requisito de acessibilidade no transporte coletivo.

Por considerar a largura da calçada como um dos critérios de avaliação da acessibilidade no sistema proposto, tornou-se necessária a identificação e mensuração desse atributo. Para isso, foi realizada inspeção visual utilizando o Google Maps no modo satélite, em conjunto com o traçado da malha viária. Este procedimento permite distinguir calçadas de outros elementos urbanos, como ciclovias e pistas de rolamento. Para a estimativa da largura, foi utilizada a ferramenta “Medir distância” (Google, 2024), traçando-se uma linha entre as extremidades visíveis da calçada, obtendo-se valores aproximados. A Figura 12 ilustra esse procedimento, apresentando a medição de uma calçada localizada na Orla de Cabo Branco, em João Pessoa-PB, cuja largura estimada é de aproximadamente 3,82 metros.



Figura 12 - Exemplo de medição manual da calçada.

A adoção desse procedimento decorre da inexistência de bases públicas contendo informações sobre a largura das calçadas para o município de João Pessoa/PB. Não foi realizada a mensuração da largura das calçadas em toda a malha urbana do município, uma vez que esse procedimento demandaria elevado esforço operacional e coleta manual em larga escala. A identificação e estimativa da largura das calçadas foram realizadas de forma direcionada, considerando apenas os segmentos pertencentes ao Espaço de Busca (ie. Definição 5) definido pelo sistema. A escassez de dados relacionados à infraestrutura pedonal, incluindo a largura das calçadas, permanece um desafio para aplicações de mobilidade urbana e acessibilidade (Askari *et al.*, 2025). Essa mensuração constitui uma etapa de preparação da base de dados e não integra o processo de execução do sistema de recomendação. Dessa forma, a coleta ocorre de maneira incremental e sob demanda, apenas após a delimitação dos trajetos e filtragem das rotas candidatas.

Essa adoção direcionada aos Espaços de Busca analisados constituiu uma alternativa viável para a construção da base experimental utilizada nesta pesquisa. Paralelamente, trabalhos recentes têm investigado técnicas automatizadas para estimativa da largura de calçadas a partir de imagens obtidas por plataformas como Google Street View, evidenciando uma tendência de evolução dessa etapa em futuras aplicações (Tan; Zhang, 2026).

A utilização de procedimentos de auditoria visual para obtenção de atributos da infraestrutura pedonal é relatada na literatura, especialmente em contextos nos quais inexistem bases públicas contendo informações sobre calçadas e elementos de acessibilidade. Estudos recentes demonstram que auditorias baseadas em imagens de rua continuam sendo

empregadas para caracterização do ambiente construído, mesmo diante dos avanços em técnicas de visão computacional (Dai *et al.*, 2024).

O Quadro 3 apresenta os principais conjuntos de dados utilizados na implementação do sistema. A coluna “Dado” identifica os elementos utilizados na modelagem da acessibilidade urbana, enquanto a coluna “Fonte” indica a instituição ou plataforma responsável pelo fornecimento das informações. Já a coluna “Descrição do Dado” resume o conteúdo presente em cada base, incluindo atributos espaciais e descritivos utilizados pelo sistema. A coluna “Exemplo de Registro” ilustra o formato das informações armazenadas, como coordenadas geográficas e identificadores de linhas de ônibus. Por fim, a coluna “Quantidade de Registros” apresenta o volume de dados disponível em cada conjunto.

Quadro 3 - Dados utilizados no sistema.

| <b>Dado</b>                     | <b>Fonte</b> | <b>Descrição do Dado</b>                                   | <b>Exemplo de Registro</b>                  | <b>Quantidade de Registros</b>                         |
|---------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Itinerários dos ônibus</b>   | SEMOB        | Número, nome e trajeto georreferenciado dos ônibus.        | 510 - TAMBAÚ; lista: latitude e longitude.  | 156                                                    |
| <b>Paradas de ônibus</b>        | SEMOB        | Localização georreferenciada das paradas de ônibus.        | Coordenada geográfica (-7.18464, -34.86883) | 1983                                                   |
| <b>Faixas de pedestres</b>      | SEMOB        | Localização georreferenciada das faixas de pedestres.      | Coordenada geográfica (-7.18486, -34.86865) | 3158                                                   |
| <b>Rampas de acessibilidade</b> | SEMOB        | Localização georreferenciada das rampas de acessibilidade. | Coordenada geográfica (-7.12307, -34.87056) | 1978                                                   |
| <b>Largura da calçada</b>       | Google Maps  | Distância em metros da calçada.                            | 3,82m.                                      | pré-definido manualmente de acordo com a rota traçada. |

Além das bases institucionais fornecidas pela SEMOB, a representação da rede viária e a filtragem das rotas foram realizadas com o auxílio da biblioteca OSMnx (Boeing, 2017), que permite a extração e modelagem de dados geoespaciais a partir da base do OpenStreetMap. Por meio dessa ferramenta, foi possível obter o grafo da malha urbana do município, utilizado pelo algoritmo de Dijkstra na filtragem das Rotas Candidatas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do sistema proposto para recomendação de rotas acessíveis em diferentes cenários de deslocamento urbano. Os testes realizados buscam analisar o comportamento da heurística diante de diferentes configurações de infraestrutura urbana e oferta de transporte público presentes nos percursos avaliados.

Para essa avaliação, foram definidos diferentes percursos, contemplando origens e destinos distribuídos em regiões distintas do município de João Pessoa/PB, a partir dos quais foram filtradas e avaliadas rotas candidatas nos respectivos Espaços de Busca. Os resultados obtidos permitem observar padrões de comportamento do sistema e analisar diferenças entre rotas definidas exclusivamente pelo menor caminho e aquelas priorizadas segundo os atributos de acessibilidade adotados.

O capítulo está organizado em seis seções. Inicialmente, apresenta-se a configuração dos experimentos e os critérios utilizados na definição dos cenários avaliados. Em seguida, são discutidos os resultados gerais obtidos pelo sistema, incluindo análises comparativas entre as rotas candidatas e estudos de casos representativos. Posteriormente, são analisados os impactos dos atributos da heurística no processo de ranqueamento das rotas. Por fim, são apresentadas as limitações do estudo e a discussão consolidada dos resultados obtidos.

### 5.1. Configuração dos Testes com o sistema proposto

O Quadro 4 apresenta os 13 percursos selecionados para a avaliação experimental do sistema proposto. Para cada percurso, são indicados os pontos de origem e destino, acompanhados de suas respectivas coordenadas geográficas (latitude e longitude), bem como a quantidade de linhas de ônibus disponíveis entre essas regiões.

Quadro 4 - Percursos analisados.

| Percurso | Origem                        | Destino              | Linhas possíveis |
|----------|-------------------------------|----------------------|------------------|
| 1        | R. Des. Trindade              | Av. Visc. de Pelotas | 5                |
| 2        | R. Profa. Maria Lianza        | Via Pau Brasil       | 2                |
| 3        | R. Manoel Farias Leite        | R. Honduras          | 1                |
| 4        | Av. Rio Grande do Sul         | Praça São Gonçalo    | 35               |
| 5        | R. Pref. Osvaldo Pessoa       | Av. Rui Barbosa      | 1                |
| 6        | R. Protássio Pontes Visgueiro | R. Alírio Wanderley  | 1                |

|    |                                   |                              |    |
|----|-----------------------------------|------------------------------|----|
| 7  | R. Jorn. Lena Guimarães           | R. Franca Filho              | 3  |
| 8  | R. Helena Meira Lima              | Av. Buarque                  | 1  |
| 9  | R. Abelardo da Silva G. Barreto   | R. Otávio Soares             | 2  |
| 10 | R. Efigênio Barbosa Silva         | R. José de Anunciacao Santos | 11 |
| 11 | R. Desp. Heronides Adonias Dantas | R. Visc. de Itaparica        | 4  |
| 12 | Praça Vidal de Negreiros          | Av. Jesus de Nazaré          | 1  |
| 13 | R. Gen. Aldenor Quinderé          | R. Gov. José Gomes da Silva  | 2  |

A seleção desses percursos representa diferentes padrões de deslocamento urbano no município de João Pessoa. Foram considerados, para essa definição, quatro critérios principais: (i) a distribuição geográfica das origens e destinos, de modo a contemplar diferentes regiões da cidade, incluindo percursos localizados nos setores Leste (6 percursos), Sul (4 percursos), Oeste (2 percursos) e Norte (1 percurso); (ii) a diversidade na oferta de transporte público, refletida na quantidade de linhas de ônibus disponíveis em cada percurso; (iii) a variação nas condições de infraestrutura urbana, especialmente no que se refere à presença de atributos de acessibilidade; e (iv) a inclusão tanto de percursos com maior concentração de atributos de acessibilidade quanto de trajetos situados em áreas com baixa ou inexistente disponibilidade de pontos de interesse (POIs).

Em cada Espaço de Busca analisado, o sistema gera inicialmente a Rota 1, correspondente ao trajeto de menor distância obtido pelo algoritmo de Dijkstra. A partir dessa rota principal, são filtradas rotas alternativas (Rotas 2 e 3) por meio da estratégia de k-caminhos, permitindo a comparação entre trajetos distintos avaliados segundo os critérios de acessibilidade definidos pela heurística proposta.

Cada percurso pode gerar até 12 rotas candidatas, distribuídas entre os Espaços de Busca de embarque e desembarque, considerando até três trajetos para cada uma das duas paradas de embarque e duas de desembarque selecionadas pelo sistema. Nos 13 percursos avaliados, foram analisadas cerca de 150 rotas no total. A Rota 1 esteve presente em todos os 52 Espaços de Busca avaliados, enquanto as Rotas 2 e 3 aparecem 49 vezes cada. Essa diferença deve-se à baixa variação topológica em trechos curtos ou com poucos desvios, o que impossibilita o algoritmo de k-caminhos de gerar alternativas viáveis à trajetória principal.

Os resultados apresentados podem, em alguns casos, aparentar similaridade quanto aos atributos de acessibilidade. Isso ocorre porque as rotas candidatas, embora distintas, percorrem trechos muito próximos entre si ou até mesmo compartilhados, o que resulta em

valores semelhantes para atributos como largura de calçada, quantidade de rampas e faixas de pedestres. A Figura 13 ilustra essa situação em um dos Espaços de Busca do Percurso 2, em que a Rota 3, representada pela cor azul, compartilha trechos de calçada com a Rota 2, representada pela cor verde.

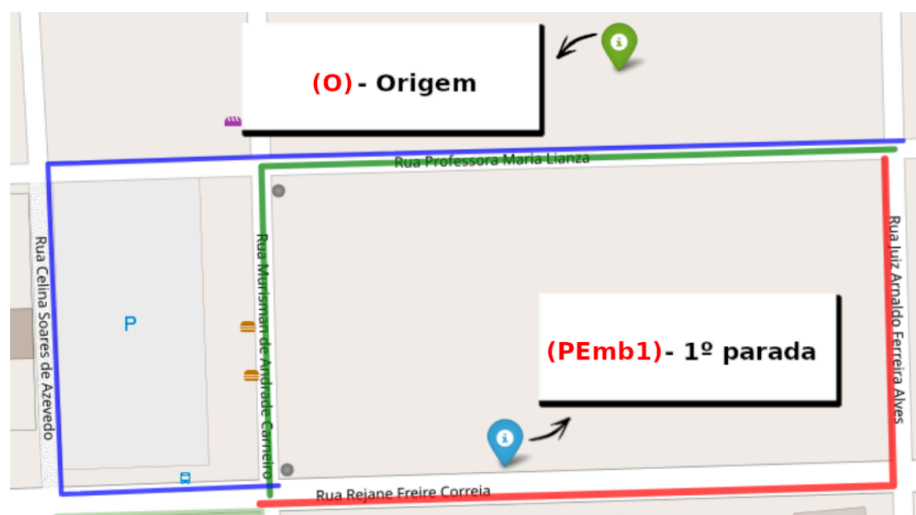


Figura 13 - Percurso 2 na 1ª Parada de Embarque indicada.

Nessas situações, a principal diferença entre as rotas passa a ser a distância total do percurso, que é considerada como um fator de penalização no sistema, de modo que trajetos mais longos tendem a receber uma pontuação inferior quando os demais atributos são equivalentes.

Alguns Espaços de Busca não possibilitaram a filtragem de três Rotas Candidatas previstas pelo procedimento de k-caminhos, conforme mencionado anteriormente. Essa situação ocorre principalmente em trechos com baixa diversidade de conexões viárias ou reduzida possibilidade de desvios na malha urbana, limitando a obtenção de caminhos alternativos. Esse comportamento pode ser observado no Percurso 11 (Figura 14), em que a primeira Parada de Desembarque encontra-se localizada muito próxima do destino final. Nesses casos, o sistema realiza a análise considerando apenas as rotas efetivamente filtradas, mantendo o processo de ordenação mesmo na ausência de alternativas adicionais.



Figura 14 - Percurso 11 na 1ª Parada de Desembarque indicada.

## 5.2. Análise Geral dos Rankings

Na análise dos percursos, a Rota 1, correspondente ao trajeto de menor custo obtido pelo algoritmo de Dijkstra, não apresentou predominância nas primeiras posições quando considerados critérios de acessibilidade. Em diferentes cenários analisados, rotas alternativas obtiveram melhor classificação.

A Figura 15 apresenta a distribuição das posições ocupadas pelas rotas candidatas nos rankings obtidos nos percursos analisados. O gráfico considera todas as avaliações realizadas nos diferentes Espaços de Busca.

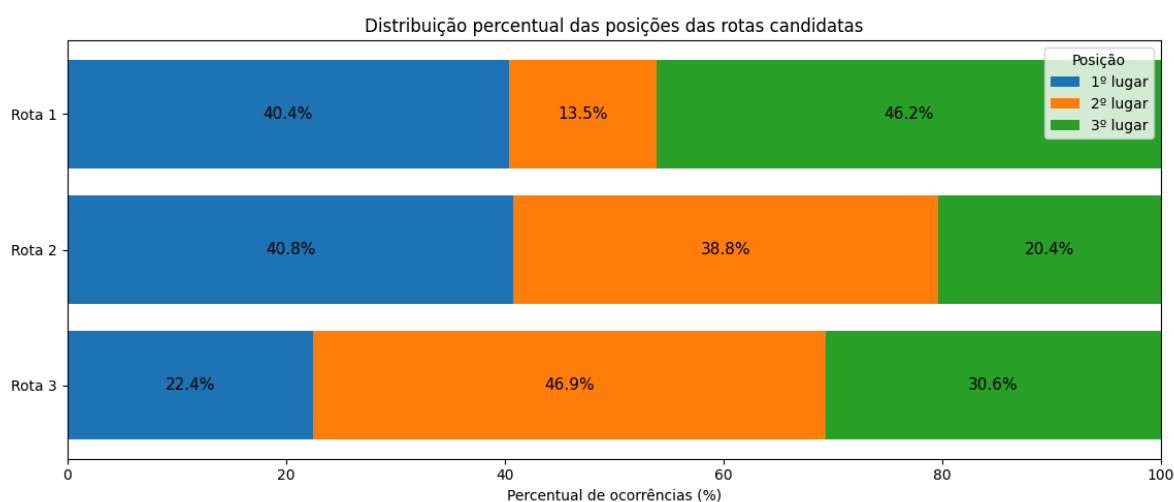


Figura 15 - Distribuição das posições das rotas candidatas no ranking.

Observa-se que a Rota 1, correspondente ao trajeto de menor distância, ocupou a primeira posição em apenas 40,4% das avaliações realizadas (21 de 52 ocorrências). Por outro lado, sua classificação mais frequente foi a terceira posição, registrada em 46,2% dos casos (24 de 52 ocorrências). Esse resultado indica que a rota de menor distância de forma recorrente, não corresponde à alternativa com melhores condições de acessibilidade segundo os critérios considerados pela heurística proposta.

No Percurso 1 (Tabela 8), por exemplo, no Espaço de Busca entre o ponto de origem e as paradas de embarque, a Rota 3 da Parada 2 foi classificada em primeiro lugar no ranking, apresentando o maior valor heurístico entre as alternativas avaliadas. Esse desempenho está associado principalmente à combinação entre maior largura de calçada (2,65m), maior quantidade de rampas de acessibilidade e maior quantidade de faixas de pedestres. Em contrapartida, a Rota 1 da mesma parada foi classificada na última posição do ranking. Essa tendência também é observada nas paradas de desembarque, onde a Rota 1 foi classificada na terceira posição na 1ª parada e na penúltima posição da 2ª parada.

Tabela 8 - Ranking das rotas candidatas - Percurso 1.

| Ranking                       | Parada   | Rota     | Largura Calçada | Rampas   | Faixas   | Distância   | H <sup>norm</sup> |
|-------------------------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|-------------|-------------------|
| <b>Paradas de Embarque</b>    |          |          |                 |          |          |             |                   |
| 1                             | 2        | 3        | 2,65m           | 2        | 4        | 386m        | 1,000             |
| <b>2</b>                      | <b>1</b> | <b>1</b> | <b>2,45m</b>    | <b>0</b> | <b>4</b> | <b>293m</b> | <b>0,653</b>      |
| 3                             | 1        | 2        | 2,06m           | 1        | 4        | 315m        | 0,600             |
| 4                             | 1        | 3        | 2,03m           | 0        | 3        | 321m        | 0,266             |
| 5                             | 2        | 2        | 1,70m           | 1        | 2        | 380m        | 0,067             |
| <b>6</b>                      | <b>2</b> | <b>1</b> | <b>1,67m</b>    | <b>0</b> | <b>3</b> | <b>376m</b> | <b>0,000</b>      |
| <b>Paradas de Desembarque</b> |          |          |                 |          |          |             |                   |
| 1                             | 2        | 2        | 2,95m           | 2        | 4        | 302m        | 1,000             |
| 2                             | 2        | 3        | 2,44m           | 0        | 2        | 367m        | 0,338             |
| <b>3</b>                      | <b>1</b> | <b>1</b> | <b>1,31m</b>    | <b>0</b> | <b>4</b> | <b>143m</b> | <b>0,318</b>      |
| 4                             | 1        | 2        | 1,10m           | 0        | 2        | 224m        | 0,065             |
| <b>5</b>                      | <b>2</b> | <b>1</b> | <b>1,31m</b>    | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>274m</b> | <b>0,015</b>      |
| 6                             | 1        | 3        | 1,10m           | 0        | 2        | 348m        | 0,000             |

Resultado semelhante foi identificado no Percurso 4 (Tabela 9), no qual a Rota 1 não ocupou a primeira posição em nenhuma das avaliações realizadas, permanecendo nas últimas posições do ranking nos Espaços de Busca. Nesse percurso, as Rotas 2 e 3 obtiveram maiores





|          |          |          |              |          |          |             |              |
|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|-------------|--------------|
| <b>1</b> | <b>2</b> | <b>1</b> | <b>2.09m</b> | <b>6</b> | <b>2</b> | <b>871m</b> | <b>1,000</b> |
| 2        | 2        | 3        | 2.03m        | 6        | 2        | 878m        | 0,973        |
| 3        | 2        | 2        | 2.52m        | 4        | 1        | 872m        | 0,337        |
| <b>4</b> | <b>1</b> | <b>1</b> | <b>2.36m</b> | <b>4</b> | <b>0</b> | <b>638m</b> | <b>0,236</b> |
| 5        | 1        | 3        | 2.03m        | 4        | 0        | 647m        | 0,022        |
| 6        | 1        | 2        | 2.05m        | 4        | 0        | 645m        | 0,000        |

Nas paradas de embarque do Percurso 2, as rotas associadas à Rota 1 apresentaram simultaneamente as maiores larguras de calçada (3,84m). Embora a quantidade de rampas tenha permanecido equivalente entre as rotas analisadas, as diferenças relacionadas à largura das calçadas e à presença de faixas de pedestres foram determinantes para o posicionamento final no ranking. Nas paradas de desembarque, a Rota 1 também apresentou os maiores valores heurísticos, associando atributos de acessibilidade superiores às menores distâncias observadas no conjunto avaliado.

Os resultados do Percurso 2 demonstram que o sistema proposto não desfavorece a rota de menor distância de forma arbitrária. Quando este trajeto apresenta melhores condições nos atributos de acessibilidade considerados pela heurística, a Rota 1 tende a ocupar naturalmente as primeiras posições do ranking.

### 5.3. Estudos de Casos Representativos

Rotas de menor distância podem utilizar vias secundárias, nas quais a infraestrutura urbana é limitada ou, em alguns casos, inexistente. No Percurso 11, entre a parada de desembarque e destino, por exemplo, a Rota 1 (representada em vermelho na Figura 16) utiliza uma via secundária cuja largura da calçada não pôde ser mensurada.



Figura 16 - Percurso 11 na segunda Parada de Desembarque indicada.

Conforme apresentado na Figura 17, o trajeto inclui um atalho entre a Rua Visconde de Itaparica (à esquerda) e a Rua São Miguel (à direita). Nessa situação, adotou-se o valor 0,00 para a largura da calçada associada à Rota 1 nesse segmento, pois a ferramenta de medição disponível do Google Maps não permitiu identificar adequadamente o valor desse atributo no trecho analisado.



Figura 17 - Trecho com largura de calçada não mensurável no Percurso 11.

A Figura 18 apresenta, à sua esquerda, a entrada do trajeto correspondente à Rota 1. A partir da análise visual realizada por meio do Google Street View, é possível identificar uma calçada estreita e superfície deteriorada. Embora esse tipo de inspeção visual não componha diretamente os critérios considerados pela heurística proposta, tais evidências reforçam a importância da priorização de vias principais, que, em geral, apresentam melhor infraestrutura urbana e maior disponibilidade de elementos associados à acessibilidade.

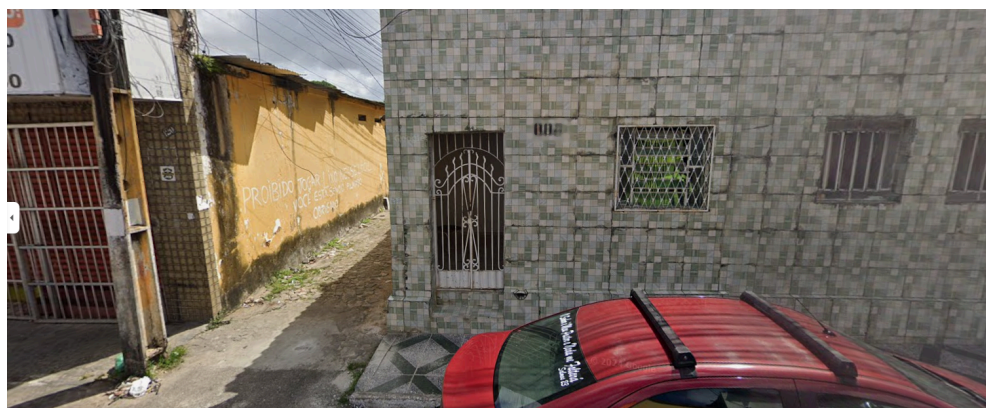


Figura 18 - Atalho recomendado pela Rota 1 no Percurso 11.

#### 5.4. Impacto dos Atributos da Heurística

Nos resultados apresentados, a largura da calçada exerce influência na classificação das rotas, podendo em determinadas situações conferir vantagem às rotas que apresentam maiores valores. No entanto, esse atributo não atua de forma isolada na definição da rota mais adequada. Em um dos Espaços de Buscas dos Percursos 13 e 7, as rotas classificadas em primeiro lugar não se destacam apenas pela largura da calçada, mas pela combinação equilibrada dos demais atributos de acessibilidade.

Na primeira parada de desembarque do Percurso 13, a calçada de maior largura não garante a primeira colocação no ranking. Embora a Rota 2 apresente maior largura de calçada, a Rota 3 foi classificada em primeiro lugar devido à melhor combinação dos demais atributos de acessibilidade, especialmente a presença de rampa e maior número de faixas de pedestres.

- **Rota 3:** ranking = 1, largura = 1,40m, rampas = 1, faixas = 3, distância = 557m
- **Rota 2:** ranking = 2, largura = 1,55m, rampas = 0, faixas = 1, distância = 541m
- **Rota 1:** ranking = 3, largura = 1,33m, rampas = 0, faixas = 2, distância = 262m

Da mesma forma, no Percurso 7, na segunda parada de desembarque, a rota com maior largura de calçada e maior número de faixas não ocupa a primeira posição. A Rota 1 se destaca pela presença de uma rampa de acessibilidade, inexistente nas demais alternativas. As rotas analisadas para a segunda parada do Percurso 7 são apresentadas na Figura 19, na qual a Rota 1 está representada pelo tracejado na cor vermelha.

- **Rota 1:** ranking = 1, largura = 1,72m, rampas = 1, faixas = 5, distância = 228m
- **Rota 2:** ranking = 2, largura = 2,10m, rampas = 0, faixas = 6, distância = 368m
- **Rota 3:** ranking = 3, largura = 1,52m, rampas = 0, faixas = 6, distância = 372m



Figura 19 - Rotas da segunda Parada de Desembarque do Percurso 7.

Portanto, ainda que a largura da calçada possua maior peso na heurística, a classificação final resulta da avaliação conjunta dos critérios, evitando que um único atributo determine, isoladamente, a escolha da rota recomendada.

## 5.5. Limitações do Estudo

Existem limitações relacionadas à disponibilidade e cobertura espacial dos dados em determinadas regiões do município, especialmente em áreas periféricas. Embora os testes tenham sido executados nesses locais, observou-se ausência ou baixa densidade de Pontos de Interesse (POIs) associados às faixas de pedestres e rampas de acessibilidade.



Na Figura 20, observa-se uma alta concentração desses elementos de acessibilidade na região da Orla de Cabo Branco (Percurso 8), onde os ícones de acessibilidade representam as rampas e os círculos em cinza indicam as faixas de pedestres. Em comparação com a Figura 21, que representa a área de origem no Bairro das Indústrias (Percurso 3), percebe-se a ausência desses elementos.

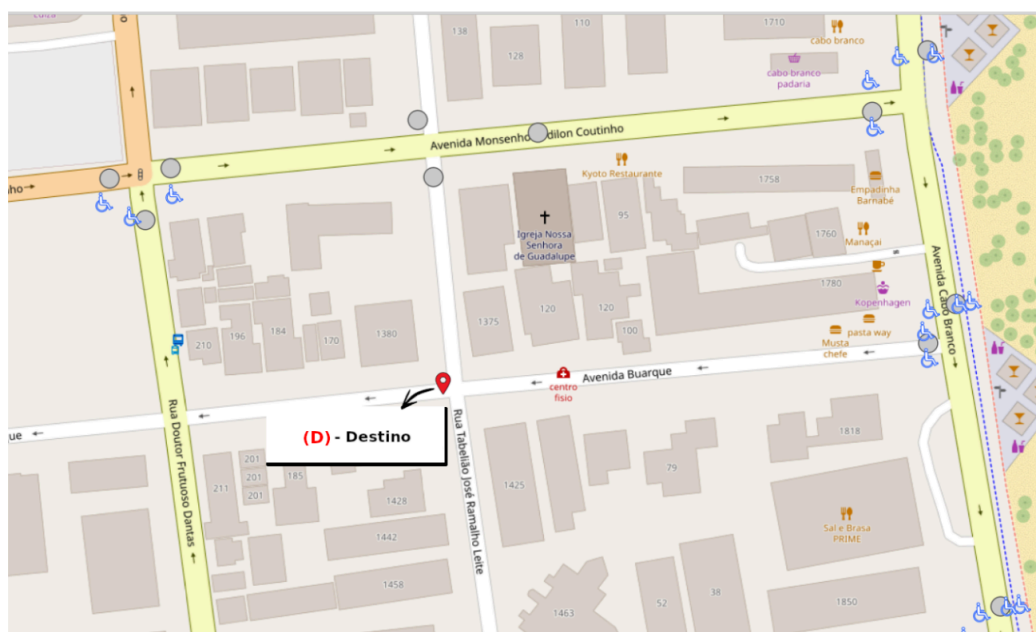


Figura 20 - Percurso 8: ponto com POIs de acessibilidade nas proximidades.



Figura 21 - Percurso 3: ponto sem POIs de acessibilidade nas proximidades.

Diante da ausência desses atributos, o processo de recomendação passa a ser conduzido por um conjunto mais restrito. Assim, os únicos atributos que influenciam na avaliação e no ranqueamento das rotas são a largura da calçada e a distância. Esse comportamento pode ser observado na 1ª Parada de Embarque indicada no Percurso 3:

- **Rota 2:** ranking = 1, largura = 3,66m, rampas = 0, faixas = 0, distância = 449m
- **Rota 3:** ranking = 2, largura = 3,30m, rampas = 0, faixas = 0, distância = 452m
- **Rota 1:** ranking = 3, largura = 3,25m, rampas = 0, faixas = 0, distância = 446m

Essa condição impacta diretamente a avaliação das rotas, uma vez que a heurística proposta depende da disponibilidade desses atributos para caracterizar o nível de acessibilidade dos trechos analisados. A baixa disponibilidade dessas informações pode estar relacionada tanto à ausência de elementos de acessibilidade na infraestrutura urbana quanto a lacunas nos processos de coleta e atualização dos dados utilizados.

## 5.6. Discussão dos Resultados

A partir dos resultados obtidos, é possível responder às questões de pesquisa e discutir as evidências observadas durante a avaliação experimental. Os dados disponíveis possibilitaram a construção de um sistema computacional baseado em uma heurística de acessibilidade voltada à recomendação de rotas mais adequadas para cadeirantes no contexto do transporte público. Diferentemente de abordagens tradicionais centradas exclusivamente na minimização da distância, o sistema proposto prioriza trajetos que apresentam melhores condições de deslocamento, considerando atributos de acessibilidade associados à infraestrutura urbana.

Os resultados indicam que o sistema proposto, ao considerar atributos de acessibilidade, produz uma ordenação das rotas distinta daquela obtida por abordagens baseadas exclusivamente na distância. De modo geral, verificou-se que a rota de menor distância (Rota 1) frequentemente não ocupa a primeira posição no ranking, sendo superada por rotas alternativas. Esse comportamento foi recorrente em diversos percursos analisados, especialmente no Percurso 4.

O sistema não favorece arbitrariamente rotas mais longas, mas realiza uma avaliação equilibrada entre os atributos considerados. Nos percursos em que a Rota 1 apresentou melhores condições nos atributos avaliados, como no Percurso 2, ela também foi classificada

em primeiro lugar. Isso reforça que a heurística não penaliza a menor distância quando esta está associada a boas condições de acessibilidade.

Outro aspecto identificado é que a largura da calçada, embora seja o atributo de maior peso na heurística, não atua de forma isolada na definição da rota mais adequada. Foram observados casos em que rotas com maior largura não obtiveram a primeira colocação, sendo superadas por alternativas que apresentavam melhor combinação dos demais atributos de acessibilidade. Esse comportamento evidencia o caráter multicritério da heurística proposta, na qual diferentes elementos de acessibilidade são considerados de forma conjunta, evitando decisões baseadas em um único fator.

Além disso, foram identificados cenários em que a ausência de determinados atributos, como rampas e faixas de pedestres, reduz a capacidade discriminativa do sistema. Nessas situações, a recomendação tende a se basear predominantemente na largura da calçada e na distância, o que limita a representatividade da avaliação em relação às condições reais de acessibilidade. Esse comportamento foi especialmente observado em regiões com menor densidade de dados, como no Percurso 3. A carência e a possível desatualização dos dados de infraestrutura urbana constituem fatores limitantes para a aplicação plena da heurística em toda a malha urbana do município. Embora os resultados obtidos corroborem a proposta da heurística, eles também evidenciam a importância da disponibilidade de dados completos e atualizados para o aprimoramento da recomendação de rotas acessíveis.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma abordagem computacional para recomendação de rotas acessíveis para usuários cadeirantes associadas ao uso do transporte público por ônibus na cidade de João Pessoa-PB. Em resposta à Questão de Pesquisa 1 (QP1), os resultados demonstram que a incorporação de atributos de acessibilidade modificou a classificação das rotas candidatas quando comparada à ordenação baseada exclusivamente na menor distância. A combinação de atributos de acessibilidade permitiu identificar rotas que, embora não fossem as mais curtas, apresentavam melhores condições para o deslocamento de usuários cadeirantes.

Em relação à Questão de Pesquisa 2 (QP2), verificou-se que a rota de menor distância deixa de ser a alternativa mais adequada principalmente em percursos nos quais existem diferenças entre as condições de acessibilidade das rotas candidatas. Nessas situações, rotas alternativas que apresentam maior disponibilidade de rampas de acessibilidade, faixas de pedestres e calçadas com largura mais adequada obtêm melhor classificação pela heurística proposta. Esse comportamento foi observado em aproximadamente 60% dos Espaços de Busca analisados, nos quais a rota recomendada não correspondeu à alternativa de menor distância. Além disso, a Rota 1 (menor distância) ocupou a primeira posição em apenas 40,4% das avaliações, sendo classificada em terceiro lugar em 46,2% dos casos.

Vale destacar que o objetivo desta pesquisa não foi determinar de forma absoluta qual rota é melhor ou pior, mas recomendar, entre as alternativas disponíveis, aquelas que apresentam melhores condições de acessibilidade com base nos atributos considerados no sistema. O estudo também não contempla a comparação entre diferentes algoritmos de roteamento, adotando o algoritmo de Dijkstra exclusivamente como mecanismo para filtragem das rotas candidatas. Da mesma forma, a proposta não tem como finalidade recomendar linhas de ônibus específicas nem avaliar aspectos operacionais do transporte público, como horários, frequência de circulação ou tempo de espera.

As principais limitações identificadas estão relacionadas à disponibilidade e qualidade dos dados urbanos. A análise da infraestrutura restringe-se aos atributos incorporados à heurística proposta, não abrangendo características como inclinação das vias, estado de conservação das calçadas ou a verificação completa da conformidade com normas técnicas de acessibilidade. No caso específico da inclinação, não foram identificadas bases de dados

contendo esse atributo para toda a malha urbana analisada. A obtenção dessas informações demandaria técnicas adicionais de levantamento altimétrico, como Modelos Digitais de Elevação (DEM) ou procedimentos equivalentes, o que extrapola o escopo desta pesquisa. Essa limitação é particularmente relevante, uma vez que uma calçada pode apresentar largura adequada e ainda assim possuir inclinações incompatíveis com o deslocamento seguro de usuários cadeirantes.

Outra limitação refere-se à ausência de informações relacionadas à qualidade dos elementos de acessibilidade. Os atributos associados às rampas de acessibilidade e faixas de pedestres foram tratados de forma binária, considerando apenas sua presença ou ausência nos trajetos avaliados. Dessa forma, aspectos como estado de conservação, conformidade com normas da ABNT, presença de piso tátil, sinalização adequada e condições efetivas de uso não foram incorporados ao processo de avaliação das rotas. O sistema também não contempla a identificação automática de obstáculos urbanos dinâmicos ou pontuais, como postes, buracos, veículos estacionados irregularmente e mobiliário urbano.

A identificação da largura das calçadas foi realizada de forma manual e direcionada aos Espaços de Busca, constituindo uma etapa de preparação da base de dados e não integrando automaticamente a execução do sistema. Essa decisão decorreu da inexistência de bases públicas padronizadas contendo esse atributo para o município de João Pessoa. Embora plataformas colaborativas, como o OpenStreetMap, disponibilizem parte dessas informações, a baixa cobertura espacial, inconsistências semânticas e ausência de padronização dificultam sua utilização direta em sistemas computacionais. Ressalta-se que a utilização de medições aproximadas obtidas manualmente representa uma decisão metodológica adotada como prova de conceito, configurando uma limitação quanto à escalabilidade, reprodutibilidade e automatização da proposta.

No contexto do transporte público, a pesquisa não incorpora variáveis temporais relacionadas à operação das linhas, como tempo estimado de viagem, frequência de circulação, tempo de espera nas paradas ou atrasos em tempo real. Além disso, os dados utilizados foram obtidos entre os anos de 2022 e 2023, podendo não refletir integralmente alterações operacionais ocorridas até o momento da conclusão desta pesquisa. Mudanças em trajetos, localização de paradas ou disponibilidade de linhas podem impactar os resultados produzidos pelo sistema, reforçando a necessidade de atualização periódica das bases utilizadas.

Como perspectivas de continuidade, destaca-se a automatização da coleta de dados urbanos por meio de técnicas de visão computacional, sensoriamento urbano e processamento de imagens obtidas por plataformas como Google Street View. Essas abordagens podem reduzir a dependência de mensuração manual e possibilitar a extração automática de atributos relacionados à largura das calçadas, inclinação das vias, qualidade do pavimento e presença de obstáculos urbanos. Também se mostra relevante a incorporação de variáveis temporais associadas ao transporte público, incluindo informações em tempo real disponibilizadas por padrões como GTFS-Realtime, tornando as recomendações mais aderentes às condições enfrentadas pelos usuários durante seus deslocamentos.

Outra linha de evolução consiste na ampliação dos critérios considerados pela heurística e na recalibração automática dos pesos por meio do Algoritmo Genético, permitindo adaptar o sistema a novos atributos de acessibilidade e diferentes contextos de aplicação. Embora os pesos utilizados nesta pesquisa sejam fixos, futuras investigações poderão explorar mecanismos de adaptação dinâmica dos critérios de avaliação em função do contexto do deslocamento. Por exemplo, em períodos noturnos, usuários podem preferir percursos mais curtos para reduzir o tempo de exposição no espaço urbano.

A validação do sistema junto a usuários cadeirantes também constitui uma etapa importante para pesquisas futuras. Embora essa atividade não tenha sido contemplada nesta dissertação em razão das limitações de prazo e dos trâmites necessários para aprovação em Comitê de Ética em Pesquisa, a participação de usuários reais poderá contribuir para o refinamento dos critérios adotados e para a avaliação prática das recomendações produzidas. Estudos futuros poderão ainda comparar o desempenho do sistema com plataformas utilizadas de navegação e acessibilidade urbana, bem como analisar sua aplicação em cenários móveis.

Como resultado adicional desta pesquisa, destaca-se a aprovação de um artigo científico derivado do trabalho no Simpósio Brasileiro de Sistemas Urbanos e Regionais (SBCUP), realizado no âmbito do Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC 2026). Essa publicação permitiu a divulgação e discussão preliminar da proposta junto à comunidade científica.

Por fim, espera-se que a abordagem proposta possa contribuir para futuras pesquisas relacionadas à mobilidade urbana acessível, especialmente em contextos urbanos nos quais existam dados geoespaciais semelhantes aos utilizados neste estudo. A incorporação de

critérios de acessibilidade ao processo de recomendação de rotas amplia a análise para além da minimização da distância, possibilitando avaliações mais compatíveis com as necessidades de deslocamento de pessoas com mobilidade reduzida.

## REFERÊNCIAS

AJMI, F. et al. An innovative system to assist the mobility of people with motor disabilities. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS (SMC), 2019, Bari. Proceedings. IEEE, 2019. p. 4037-4043. DOI: 10.1109/SMC.2019.8914332.

AL THEEB, Nader; ABU-ALEQA, Mohammed; DIABAT, Ali. Multi-objective optimization of two-echelon vehicle routing problem: vaccines distribution as a case study. Computers & Industrial Engineering, v. 187, art. 109590, 2024.

ASHOUR, Lamis; TARAWNEH, Deyala. Strategic bus stop allocation for enhanced accessibility in the Amman Bus Rapid Transit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMPUTER, COMMUNICATIONS AND MECHATRONICS ENGINEERING (ICECCME), 2023, Tenerife, Spain. Proceedings. IEEE, 2023.

ASKARI, S.; DORAN, B.; MAVOA, S.; BADLAND, H. Validating pedestrian infrastructure data: how well do crowdsourced accessibility audits compare to government data? Buildings, v. 9, n. 4, p. 130, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16537:2024: acessibilidade - sinalização tátil no piso - diretrizes para elaboração de projetos e instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9050:2020: acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BELLMAN, Richard. On a routing problem. Quarterly of Applied Mathematics, v. 16, n. 1, p. 87-90, 1958.

BOEING, Geoff. OSMnx: new methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. Computers, Environment and Urban Systems, v. 65, p. 126-139, 2017.

BRASIL. Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015. Institui a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jul. 2015. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13146.htm). Acesso em: 12 dez. 2025.

BUSTAMANTE, R. et al. Using open data to quantify accessibility to multiple public services: the study case of Lima. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING (INTERCON), 28., 2021, Lima. Proceedings. IEEE, 2021. p. 1-4. DOI: 10.1109/INTERCON52678.2021.9532730.

DAI, S.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; WANG, J.; BILJECKI, F. Street view imagery-based built environment auditing tools: a systematic review. International Journal of Geographical Information Science, 2024.

DARKO, Justice et al. Adaptive personalized routing for vulnerable road users. *IET Intelligent Transport Systems*, v. 15, n. 11, p. 1457-1473, 2021.

DEB, Kalyanmoy; PRATAP, Amrit; AGARWAL, Sameer; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DIJKSTRA, Edsger W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269-271, 1959.

FLOYD, Robert W. Algorithm 97: shortest path. *Communications of the ACM*, v. 5, n. 6, p. 345, 1962.

FODA, Mohamed A.; OSMAN, Ahmed O. Using GIS for measuring transit stop accessibility considering actual pedestrian road network. *Journal of Public Transportation*, v. 13, n. 4, p. 23-40, 2010. Disponível em: <https://digitalcommons.usf.edu/jpt/vol13/iss4/2>. Acesso em: 13 maio 2026. DOI: 10.5038/2375-0901.13.4.2.

GOOGLE. Medição da distância entre pontos. Google Maps Help, 2024. Disponível em: <https://support.google.com/maps/answer/1628031>. Acesso em: 20 abr. 2026.

GOOGLE. General Transit Feed Specification (GTFS). Mountain View: Google Developers, 2025. Disponível em: <https://gtfs.org/>. Acesso em: 24 jun. 2026.

GRUJIC, Zarko; GRUJIC, Bojana. Optimal routing in urban road networks: a graph-based approach using Dijkstra's algorithm. *Applied Sciences*, v. 15, n. 8, p. 4162, 2025. DOI: 10.3390/app15084162.

GUNAWAN, G.; ANDRIANI, W.; MUNFI, K. H. Application of the Dijkstra method in finding the shortest route for hospitals in Kabupaten Tegal. *Jurnal Mandiri IT*, v. 12, n. 2, p. 97-105, 2023.

GÜRLER, Hasan Emin; ÖZÇALICI, Mehmet; PAMUCAR, Dragan. Determining criteria weights with genetic algorithms for multi-criteria decision making methods: the case of logistics performance index rankings of European Union countries. *Expert Systems with Applications*, v. 237, art. 121387, 2024.

HAN, Jiawei; PEI, Jian; TONG, Hanghang. *Data mining: concepts and techniques*. 4. ed. Cambridge: Morgan Kaufmann, 2022.

HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, v. 4, n. 2, p. 100-107, 1968.

IBGE. Censo 2022: Brasil tem 14,4 milhões de pessoas com deficiência. Agência de Notícias IBGE, 23 maio 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br>. Acesso em: 25 out. 2025.

INTURRI, Giuseppe et al. Linking public transport user satisfaction with service accessibility for sustainable mobility planning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 10, n. 4, p. 235, 2021.

JAHROMI, Maryam Naghdizadegan et al. Enhancing sidewalk accessibility assessment for wheelchair users: an adaptive weighting fuzzy-based approach. *Heliyon*, v. 11, n. 1, p. e41101, 2024.

KAMALDIN, Nazir et al. SmartBFA: a passive crowdsourcing system for point-to-point barrier-free access. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING AND COMMUNICATIONS (PERCOM), 2019. Proceedings. IEEE, 2019.

KLEIN, Pâmela; GRIGOLETTI, Giane de Campos. Acessibilidade espacial de deficientes físicos, visuais e idosos em parque público. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 12, p. e021016, 2021.

KOZIEVITCH, N. P. et al. An alternative and smarter route planner for wheelchair users: exploring open data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART CITIES AND GREEN ICT SYSTEMS (SMARTGREENS), 2016. Proceedings. IEEE, 2016. p. 1-6.

LIU, Luyu et al. Disparities in public transit accessibility and usage by people with mobility disabilities. *Transportation Research Part A*, v. 170, p. 103728, 2023.

MARAM, Rakesh Kumar; PONNAPALLI, V. A. Sankar; MADDIBOYINA, Harsha Vardan. Smart transportation and evolutionary algorithms. In: KUMAR, A. et al. (eds.). *ICAIDS 2021*. Cham: Springer, 2022. p. 476-489.

MICHALEWICZ, Zbigniew. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. 3. ed. Berlin: Springer, 1996.

MIRJALILI, Seyedali. Evolutionary algorithms and neural networks. Cham: Springer, 2019.

MOBASHERI, Amin; DEISTER, Jonas; DIETERICH, Holger. Wheelmap: the wheelchair accessibility crowdsourcing platform. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2017.

MOURCOU, Q.; FLEURY, A.; DUPUY, P.; DIOT, B.; FRANCO, C.; VUILLERME, N. Wegoto: a smartphone-based approach to assess and improve accessibility for wheelchair users. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY (EMBC), 2013. Proceedings. IEEE, 2013. p. 1194-1197. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6609720.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Disability and health. 2023. Disponível em: <https://www.who.int>. Acesso em: 17 fev. 2025.

PANTA, Y. R. et al. Improving accessibility for mobility impaired people in smart city using crowdsourcing. In: CYBERSECURITY AND CYBERFORENSICS CONFERENCE (CCC), 2019. Proceedings. IEEE, 2019.

PARAÍBA. Governo do Estado da Paraíba. Governo divulga resultado do Cadastro Estadual da Pessoa com Deficiência. João Pessoa: FUNAD, 2025. Disponível em: <https://paraiba.pb.gov.br/noticias/governo-divulga-resultado-do-cadastro-estadual-da-pessoa-com-deficiencia>. Acesso em: junho de 2026.

PARK, Hyoshin et al. Trip Planner MODE. In: IEEE INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE (ITSC), 2023. Proceedings. IEEE, 2023.

PATRAS, Vaios et al. Revisiting shortest path algorithms for navigation systems. In: INTERCON, 2021. Proceedings. IEEE, 2021. p. 1-5.

PRANDI, Catia; SALOMONI, Paola; MIRRI, Silvia. mPASS: integrating people sensing and crowdsourcing to map urban accessibility. In: IEEE CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (CCNC), 2014. Proceedings. IEEE, 2014.

SAFITRI, R. R.; PRATIARSO, A.; ZAINUDIN, A. Mobile-based smart parking reservation system using heuristic algorithm and Haversine formula. In: INTERNATIONAL ELECTRONICS SYMPOSIUM (IES), 2020. Proceedings. IEEE, 2020. p. 332-339.

SANTANA, Alan; KAWAMOTO, André. Introducing gamification techniques into a collaborative mobile application for marking locations' accessibility level. In: CONFERÊNCIA IBÉRICA DE SISTEMAS E TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO (CISTI), 2023.

SHARMA, Harish; GALVÁN, Edgar; MOONEY, Peter. A parallel genetic algorithm for multi-criteria path routing on complex real-world road networks. *Expert Systems with Applications*, v. 259, art. 124999, 2025.

SHIN, Jaeshik; KWAK, Younghoon; PARK, Changwoo. Smart city development using transit-oriented-development (T.O.D) and walkability. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS - ASIA (ICCE-ASIA), 2023, Seoul, Korea. Proceedings. IEEE, 2023.

SILVA, Tânia et al. Accessibility strategies to promote inclusive mobility through multi-objective approach. *Sustainable Cities and Society*, v. 92, p. 104540, 2023.

SINNOTT, R. Virtues of the Haversine. *Sky & Telescope*, v. 68, p. 159, 1984.

SIRIARAYA, Panote et al. Beyond the shortest route: a survey on quality-aware route navigation for pedestrians. *IEEE Access*, v. 8, p. 126848-126878, 2020.

SOMA, Takumi; MANABE, Tetsuya. Mobility environment evaluation platform using location-based big data. Saitama: Saitama University, 2024.

TAN, K.; ZHANG, F. UrbanVGGT: scalable sidewalk width estimation from street view images. *arXiv preprint*, arXiv:2603.22531, 2026.

UGALDE, B. H. et al. Barrier-free routes in a geographic information system. In: UEMCON, 2022. Proceedings. IEEE, 2022. p. 119-123.

UGWOKE, Christopher; NNANNA, Nwojo Agwu; ABDULLAH, Saleh El-Yakub. Simulation-based review of classical, heuristic, and metaheuristic path planning algorithms. *Scientific Reports*, v. 15, art. 12643, 2025.

VERDE, D. et al. Optimized routing for people with mobility disability. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER COMMUNICATIONS (ISC2), 2021. Proceedings. IEEE, 2021.



VICHIENSAN, Varameth; FUKUDA, Atsushi; MALAITHAM, Sathita. Perceived walkability evaluation in transit station catchment areas in Bangkok. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 2022. Proceedings. IEEE, 2022.

ZHANG, Z.; WANG, S.; ZHOU, J. A-star algorithm for expanding the number of search directions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NEW TECHNOLOGIES (AINIT), 2021. Proceedings. IEEE, 2021. p. 208-211.

## APÊNDICE A - PSEUDOCÓDIGO DO SISTEMA

Este apêndice apresenta o pseudocódigo do sistema computacional proposto para recomendação de rotas acessíveis associadas ao transporte público. O algoritmo sintetiza as principais etapas descritas no Capítulo 4, desde a definição da origem e do destino informados pelo usuário até a geração do ranking das rotas candidatas segundo a heurística proposta.

Como dados de entrada, o algoritmo recebe as coordenadas geográficas da origem e do destino, bem como as bases geoespaciais, incluindo rede viária, paradas de ônibus, itinerários, rampas de acessibilidade, faixas de pedestres e largura das calçadas. Os pesos empregados na função heurística correspondem aos valores previamente calibrados pelo Algoritmo Genético, conforme descrito na Seção 4.2.

Inicialmente são identificadas as paradas de embarque e desembarque compatíveis com o deslocamento solicitado. Em seguida, são geradas as rotas pedonais candidatas por meio do algoritmo de Dijkstra. Na sequência, são extraídos os atributos de acessibilidade de cada rota, aplicando-se posteriormente a normalização Min-Max e a função heurística multicritério. Por fim, as rotas são ordenadas de acordo com o valor heurístico calculado, produzindo como saída um ranking das alternativas e a rota recomendada pelo modelo.

---

### Algoritmo 1. Pseudocódigo do Sistema Computacional Proposto

---

Para facilitar a interpretação do pseudocódigo, a **Figura 5**, presente no início do Capítulo 4, destaca seis blocos funcionais: seleção das paradas compatíveis; filtragem das rotas candidatas; extração dos atributos de acessibilidade; normalização; heurística; e ordenação das rotas.

#### # *Dados de entrada e os pesos da heurística.*

- 1: **Entrada:** origem  $O$ , destino  $D$ , rede viária ( $OSMnx$ ), paradas, itinerários, rampas, faixas e largura das calçadas
- 2: **Saída:** ranking das rotas candidatas e rota recomendada
- 3:  $W \leftarrow (W_l, W_r, W_f, W_d)$ , pesos previamente calibrados pelo Algoritmo Genético

#### # *Seleção das paradas compatíveis. Identifica pares de paradas (embarque e desembarque) que possuem linhas de ônibus comuns.*

- 4: Ordenar paradas de desembarque por distância geodésica (*Haversine*) até  $D$
- 5: Ordenar paradas de embarque por distância geodésica (*Haversine*) até  $O$
- 6:  $PDesValidas \leftarrow \emptyset$
- 7:  $PEmbValidas \leftarrow \emptyset$

```

8: for cada  $PDes$  em ordem crescente de distância até  $D$  do
9:   for cada  $PEmb$  em ordem crescente de distância até  $O$  do
10:     LinhasComuns  $\leftarrow$  Linhas( $PDes$ )  $\cap$  Linhas( $PEmb$ )
11:     if LinhasComuns  $\neq \emptyset$  then
12:       adicionar  $PDes$  em  $PDesValidas$ 
13:       adicionar  $PEmb$  em  $PEmbValidas$ 
14:     end if
15:     if  $|PEmbValidas| = 2$  e  $|PDesValidas| = 2$  then
16:       interromper busca
17:     end if
18:   end for
19: end for
20: if  $PEmbValidas = \emptyset$  ou  $PDesValidas = \emptyset$  then
21:   return não há combinação viável de embarque e desembarque
22: end if

```

**# Filtragem das rotas candidatas.** Filtra as rotas pedonais candidatas utilizando Dijkstra e suas variações ( $k$ -rotas).

```

23: RotasOrigem  $\leftarrow \emptyset$ 
24: RotasDestino  $\leftarrow \emptyset$ 
25: for cada  $PEmb \in PEmbValidas$  do
26:   gerar até  $k = 3$  rotas entre  $O$  e  $PEmb$  utilizando Dijkstra
27:   adicionar rotas filtradas em RotasOrigem
28: end for
29: for cada  $PDes \in PDesValidas$  do
30:   gerar até  $k = 3$  rotas entre  $PDes$  e  $D$  utilizando Dijkstra
31:   adicionar rotas filtradas em RotasDestino
32: end for
33: Rotas  $\leftarrow$  RotasOrigem  $\cup$  RotasDestino
34: if Rotas  $= \emptyset$  then
35:   return nenhuma rota candidata foi filtrada
36: end if

```

**# Extração dos atributos de acessibilidade.** Calcula os atributos de acessibilidade de cada rota candidata.

```

37: for cada rota  $Rt \in Rotas$  do
38:   calcular distância percorrida  $Dist(Rt)$ 
39:   obter largura da calçada  $L(Rt)$ 
40:   contar rampas  $R(Rt)$  em buffer de 5 m
41:   contar faixas  $F(Rt)$  em buffer de 5 m
42:   if nenhuma rampa for encontrada then
43:      $R(Rt) \leftarrow 0$ 
44:   end if
45:   if nenhuma faixa for encontrada then
46:      $F(Rt) \leftarrow 0$ 
47:   end if
48: end for

```

**# Normalização.** Normaliza os atributos para o intervalo de  $[0,1]$ .

```

49: for cada atributo  $A \in \{L, R, F, Dist\}$  do
50:   aplicar normalização Min-Max aos valores de  $A$ 
51: end for

```

**# Heurística.** *Aplica a heurística para calcular o valor de cada rota.*

```

52: for cada rota  $Rt \in \text{Rotas}$  do
53:    $H(Rt) = W_l \cdot L^{norm} + W_r \cdot R^{norm} + W_f \cdot F^{norm} + W_d \cdot (1 - D^{norm}(Rt))$ 
54: end for

```

**# Ordenação das rotas.** *Ordena as rotas pelo valor heurístico, retornando o ranking final e a rota recomendada.*

```

55: ordenar RotasOrigem por  $H(Rt)$  em ordem decrescente
56: ordenar RotasDestino por  $H(Rt)$  em ordem decrescente
57: MelhorOrigem  $\leftarrow$  primeira rota de RotasOrigem
58: MelhorDestino  $\leftarrow$  primeira rota de RotasDestino
59: return rankings de RotasOrigem e RotasDestino, MelhorOrigem, MelhorDestino

```