



## **MODELAGEM DA REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO DE ITAIPUAÇU – MARICÁ - RJ**

**1º Guilherme Cagide Fialho** – guilherme.fialho@grad.iprj.uerj.br  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - UERJ

**2º Pedro Mineiro Cordoeira** – Pedro.cordoeira@iprj.uerj.br  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - UERJ

**3º Breno Cagide Fialho** – brenofialho@id.uff.br  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE - UFF

**ÁREA:** 2. LOGISTICA

**SUBÁREA:** 2.3 PROJETO E ANÁLISE DE SISTEMAS LOGÍSTICOS

**RESUMO:** ESTE ARTIGO APRESENTA UM FLUXO COMPUTACIONAL ENXUTO E REPRODUTÍVEL PARA CARACTERIZAR A REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO DE MARICÁ-RJ, COM ESTUDO DE CASO EM ITAIPUAÇU. A COLETA AUTOMATIZADA EXTRAÍ DE FORMA INTEGRAL, VIA MOOVIT, AS LISTAS DE LINHAS E PARADAS DA EMPRESA PÚBLICA DE TRANSPORTES. CADA PARADA É ENTÃO GEOCODIFICADA POR UM ESQUEMA DE DOIS NÍVEIS: CONSULTA INICIAL AO \EMPH{NOMINATIM} (OPENSTREETMAP) E, EM CASO DE AUSÊNCIA OU BAIXA PRECISÃO, REQUISIÇÕES PONTUAIS À API \EMPH{GOOGLE MAPS}; TODOS OS RESULTADOS SÃO ARMAZENADOS EM CACHE PARA RESPEITAR COTAS E ACELERAR EXECUÇÕES FUTURAS. OS DADOS CONSOLIDADOS ORIGINAM UM GRAFO DIRECIONADO NO \TEXTIT{NETWORKX}, CUJOS VÉRTICES REPRESENTAM PARADAS ÚNICAS E CUJAS ARESTAS CONECTAM PARADAS SEQUENCIAIS, PONDERADAS PELA DISTÂNCIA GEODÉSICA. SOBRE ESSE GRAFO APLICAM-SE ALGORITMOS DE CAMINHOS MÍNIMOS, MÉTRICAS DE CENTRALIDADE E FILTROS ESPACIAIS QUE ISOLAM O SUBGRAFO DE ITAIPUAÇU, POSSIBILITANDO AVALIAR CONECTIVIDADE INTERNA, LACUNAS DE COBERTURA E TRAJETOS ÓTIMOS ENTRE BAIROS. TODOS OS ARTEFATOS — CSVS, GRAFO SERIALIZADO E MAPAS \TEXTIT{FOLIUM} — SÃO PRODUZIDOS POR MÓDULOS INDEPENDENTES, GARANTINDO PORTABILIDADE E ESCALABILIDADE. O RESULTADO COMBINA RIGOR ANALÍTICO, VISUALIZAÇÃO INTERATIVA E BAIXO CUSTO COMPUTACIONAL, CONSTITUINDO UMA BASE SÓLIDA PARA ESTUDOS DE PLANEJAMENTO URBANO E OTIMIZAÇÃO DE ROTAS.

**PALAVRAS-CHAVES:** GEOCODIFICAÇÃO; NOMINATIM; GOOGLE MAPS; REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO; GRAFOS DIRECIONADOS

## 1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana configura-se como um dos pilares do desenvolvimento sustentável das cidades contemporâneas, interferindo diretamente na qualidade de vida da população e na competitividade econômica local (BANISTER, 2008; VIEGAS, 2007). Contudo, a formulação de políticas públicas embasadas em evidências ainda enfrenta limitações severas decorrentes da carência de dados abertos, atualizados e confiáveis, sobretudo em municípios de médio porte no Brasil (MobiliseYourCity Partnership, 2020).

A Agenda 2030, por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11, meta 11.2, preconiza que, até 2030, sejam garantidos “sistemas de transporte seguros, acessíveis e sustentáveis para todos”, com ênfase em grupos vulneráveis (UN-Habitat, 2018). Dados consistentes são indispensáveis para monitorar e avaliar o avanço desse compromisso.

Apenas 29% dos municípios brasileiros com mais de 100 000 habitantes publicam feeds no padrão GTFS, dificultando comparações sobre acessibilidade e robustez das redes (BRAGA, 2023). Pesquisas recentes demonstram que a acessibilidade aferida via GTFS programado subestima perdas observadas em condições reais, sobretudo quando se considera a incerteza dos tempos de viagem (JAVANMARD et al., 2025). Tal escassez impulsiona iniciativas de coleta alternativa baseadas em *web scraping* e *crowdsourcing* cooperativo.

Inserido na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Maricá contava com 197 554 habitantes em 2024 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024). Desde 2014, opera o programa Tarifa Zero por meio da Empresa Pública de Transportes (EPT), que totalizou 39 milhões de viagens em 2024 (Prefeitura Municipal de Maricá, 2024). Estudos internacionais apontam que políticas de tarifa-zero podem modificar significativamente os padrões espaço-temporais de lotação, exigindo redimensionamento operacional das frotas (LU et al., 2023). Entretanto, diagnósticos quantitativos sobre cobertura, eficiência e conectividade são escassos, agravados pela ausência de coordenadas geográficas e de horários completos no portal da EPT (MICHELL, 2020). Além disso, a robustez das redes de ônibus varia de maneira pronunciada ao longo do dia, conforme evidenciado por um arcabouço temporal recentemente proposto (ABDELATY et al., 2022), o que reforça a necessidade de métricas dinâmicas na avaliação da EPT.

Este trabalho centra-se no distrito litorâneo de Itaipuaçu, que abriga cerca de 25,6 % da população municipal, cerca de 50.000 residentes, distribuídos em 243 km<sup>2</sup> — o maior distrito de Maricá em extensão territorial (Maricá Info, 2024). O território inclui sub-bairros como Jardim Atlântico (Oeste, Central, Leste), Cajueiros, Barroco e Itaocaia Valley (Instituto Darcy

Ribeiro, 2023), compondo uma malha viária fragmentada por lagunas e maciços rochosos que dificulta a conectividade interna.

Para suprir lacunas institucionais, utilizou-se a base colaborativa do Moovit, com cobertura georreferenciada integral em 2024 (MOOVIT, 2024). O enriquecimento espacial emprega um esquema em dois níveis: consultas primárias ao Nominatim (OpenStreetMap) e chamadas pontuais à Google Maps Geocoding API, com cache persistente para respeitar cotas e evitar redundâncias (Google Developers, 2025).

A rede resulta num grafo direcionado NetworkX, técnica consagrada para avaliar conectividade e robustez (BOEING, 2017). Cada nó representa um ponto físico único (latitude, longitude) e agrega todas as linhas que ali convergem, caracterizando um grafo multimodal. As arestas conectam paradas sequenciais e são ponderadas pela distância geodésica.

Há duas frentes analíticas que nortearam a investigação. A primeira avaliou a cobertura de paradas ao longo da Avenida Carlos Mariguella, principal eixo viário de Itaipuaçu, por meio de um grafo linear que ordena paradas e detecta lacunas superiores a 450 m, apontando a necessidade de novos pontos. A segunda frente tratou da otimização multimodal e da centralidade da rede, simulando caminhos ótimos entre pares de coordenadas por meio dos algoritmos de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959); e A\* (HART; NILSSON; RAPHAEL, 1968). Esse procedimento identifica, em mapa, tanto o trajeto mínimo quanto os nós de maior centralidade (FREEMAN, 1977). A relevância de analisar centralidade em cidades brasileiras de porte médio é corroborada por investigações recentes que identificam leis de escala entre o tamanho populacional e a acessibilidade média da rede viária (FAGUNDES et al., 2025), fornecendo subsídios adicionais para o reforço de infraestrutura e planejamento operacional.

O sistema proposto entrega: (i) base de dados georreferenciada estruturada; (ii) análise de cobertura em micro-escala; (iii) simulação de rotas ótimas com parametrização livre de origem/destino; (iv) identificação de nós estratégicos para integração de linhas; e (v) visualizações interativas em Folium que facilitam o diálogo entre analistas e gestores públicos.

Este estudo tem como objetivos específicos a automatização do processo de coleta das linhas e paradas utilizando-se a base de dados Moovit; a implementação de um sistema robusto de geocodificação que integre as ferramentas Nominatim e Google Maps, com utilização de cache local; a construção de um grafo direcionado ponderado pela distância geodésica utilizando a biblioteca NetworkX; a aplicação dos algoritmos de caminhos mínimos de Dijkstra e A\*, complementados por métricas de centralidade; a avaliação criteriosa da cobertura de paradas ao longo da Avenida Carlos Mariguella, identificando lacunas significativas e recomendando novos pontos; a simulação e análise de trajetos ótimos, destacando nós

estratégicos na malha viária do distrito de Itaipuaçu; e, finalmente, a geração de mapas interativos no formato HTML para proporcionar uma visualização detalhada e apoiar a tomada de decisão dos gestores públicos.

A metodologia do estudo seguiu um fluxo de implementação estruturado, iniciado pela extração automatizada dos dados primários, realizada com as bibliotecas *requests* e *BeautifulSoup*. Subsequentemente, os dados passaram por um processo de geocodificação assistido por cache local, visando à redução das requisições redundantes aos serviços externos. Após essa etapa, os resultados foram armazenados de forma estruturada em arquivos CSV por meio da biblioteca *pandas*. A etapa seguinte consistiu na construção de um grafo direcionado utilizando a biblioteca *NetworkX*, com pesos atribuídos às arestas por meio da distância geodésica calculada com auxílio da biblioteca *geopy*. Prosseguiu-se, então, para as análises de cobertura das paradas e detecção de lacunas na malha viária, culminando com a simulação de rotas ótimas e o cálculo das métricas de centralidade. Por fim, mapas interativos detalhados foram gerados com a biblioteca *Folium*, integrando todas as camadas analíticas e oferecendo uma plataforma visual interativa para inspeção e análise.

Este artigo organiza-se da seguinte forma, a seção 2 descreve materiais e métodos; a seção 3 apresenta resultados e discute implicações e limitações e a seção 4 oferece conclusões e perspectivas futuras.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve, de maneira sistemática, os procedimentos metodológicos adotados ao longo da pesquisa para a construção e análise da rede de transporte coletivo do município de Maricá, com base em dados extraídos da plataforma Moovit. A abordagem combina técnicas de raspagem automatizada de dados, geocodificação, modelagem em grafos direcionados e análises de cobertura e centralidade da malha viária. Para isso, foram desenvolvidos módulos computacionais específicos em *Python*, articulados por uma arquitetura modular que assegura flexibilidade, portabilidade e aderência às práticas de ciência aberta. Além da coleta e tratamento de dados brutos, as etapas posteriores envolveram enriquecimento espacial, construção de artefatos analíticos e visualização interativa dos resultados, compondo uma infraestrutura robusta para o estudo da mobilidade urbana sob uma perspectiva computacional e geográfica.

## 2.1 Fontes de dados e coleta automatizada

Os dados primários utilizados neste estudo foram obtidos mediante o método de *web scraping* aplicado ao portal Moovit, que disponibiliza publicamente informações detalhadas sobre cada linha operada pela Empresa Pública de Transportes (EPT) do município de Maricá. Inicialmente, considerou-se a utilização dos dados oficiais fornecidos pela própria EPT; entretanto, a ausência de coordenadas geográficas e a incompletude das tabelas horárias disponibilizadas impossibilitaram o emprego analítico efetivo dessas informações, conforme discutido anteriormente na Seção 1.

Para garantir a coleta sistemática e reproduzível dos dados necessários, desenvolveu-se o módulo *moovit\_scraper.py*, estruturado em torno da classe *MoovitScraper*. Essa classe realiza requisições HTTP, aplicando uma estratégia de *back-off* exponencial, limitada a três tentativas sucessivas para gerenciar possíveis falhas na comunicação com o servidor. Em seguida, utiliza-se a biblioteca *BeautifulSoup4* para extrair, de cada página específica das linhas de ônibus, o código numérico associado à linha, a denominação oficial, o sentido operacional, a ordem sequencial das paradas e o nome textual de cada ponto de parada registrado.

Após essa etapa inicial de coleta, executa-se um processo de tratamento adicional que envolve a eliminação criteriosa de entradas duplicadas e a padronização ortográfica dos dados, assegurando consistência quanto à acentuação e ao uso de caixa alta ou baixa. Por fim, os dados resultantes são armazenados de forma estruturada em um arquivo CSV nomeado *data/moovit\_stops\_raw.csv*, o qual serve como base confiável e reproduzível para as fases subsequentes do estudo, que compreendem geocodificação e modelagem da rede em grafos.

## 2.2 Geocodificação e enriquecimento espacial

Cada denominação única de parada é geocodificada por um esquema de dois níveis: consultas primárias ao *Nominatim2 (OpenStreetMap)* e *fallback* pontual à *Google Geocoding API3* quando a correspondência é ausente ou imprecisa. O parâmetro de contexto *components=Maricá,Rio\_de\_Janeiro,BR* eleva a taxa de acerto; todos os resultados são armazenados em cache (*cache/geocode.pkl*), evitando repetição de consultas e mantendo o consumo mensal muito abaixo do limite gratuito de 40.000 chamadas (Google Developers, 2025). A saída enriquecida é gravada em *data/moovit\_stops\_geocoded.csv*.

## 2.3 Modelagem da rede como grafo direcionado

A rede de ônibus é formalizada em um *NetworkX.DiGraph* (BOEING, 2017). Cada nó

representa um ponto físico único (latitude, longitude) e agrega, como atributos, todas as linhas e sentidos que ali convergem, caracterizando um grafo multimodal. Arestas direcionadas unem pares de paradas sequenciais respeitando a ordem operacional declarada pelo Moovit; o peso é a distância geodésica e calculada via *geopy*. O grafo completo é serializado em *cache/moovit\_graph.gpickle*; caixas delimitadoras geram subgrafos induzidos — por exemplo, o recorte de Itaipuaçu (lat.:  $-22.94^\circ$  a  $-22.82^\circ$ ; long.:  $-42.93^\circ$  a  $-42.76^\circ$ ).

## 2.4 Módulos analíticos

A presente subseção descreve os módulos analíticos desenvolvidos com o objetivo de aprofundar a compreensão espacial e estrutural da rede de transporte analisada. As análises foram organizadas em dois eixos principais: a avaliação da cobertura viária em trecho crítico e a otimização de rotas com base em métricas de centralidade. Ambos os módulos foram implementados em scripts específicos e integram a arquitetura geral da aplicação.

### 2.4.1 COBERTURA VIÁRIA NA AVENIDA CARLOS MARIGUELA

O módulo *coverage\_analysis.py* filtra todas as paradas cujo endereço contém variantes de “Carlos Mariguella/Marighella/Vitória Régia”; ordena-as sequencialmente por meio de combinação de índice de parada e proximidade geográfica, e calcula a distância entre pares consecutivos. Lacunas superiores a 450 m disparam a sugestão automática de novo ponto, inserido virtualmente no meio do segmento.

### 2.4.2 OTIMIZAÇÃO DE ROTAS E ANÁLISE DE CENTRALIDADE

A etapa de otimização foi conduzida por meio do script implementado no arquivo *script/tests/otimizacao/main.py*, disponibilizado em repositório público. Este *script* realiza o carregamento do grafo multimodal previamente construído, calcula métricas de centralidade e gera um mapa interativo em formato HTML. A definição das coordenadas geográficas dos pontos de origem e destino é realizada diretamente nas variáveis *USER\_SOURCE\_COORD* e *USER\_TARGET\_COORD*, posicionadas no cabeçalho do arquivo. Configurados esses parâmetros, o processo computacional aplica os algoritmos de Dijkstra e  $A^*$ , sendo este último executado com a distância em linha reta como heurística, para determinar o trajeto de menor custo entre os pontos especificados. Adicionalmente, são calculadas métricas de centralidade do tipo grau e intermediação, conforme proposto por Freeman (FREEMAN, 1977). O resultado da análise é visualizado por meio de um mapa interativo, no qual o percurso ótimo obtido é

representado por uma polilinha de cor preta, destacando-se ainda os cinco nós de maior centralidade, identificados visualmente por círculos em tom verde-limão. Finalmente, o *script* registra o mapa gerado no arquivo *script/tests/otimizacao/map.html*, além de apresentar, no terminal do ambiente computacional, a sequência detalhada das paradas constituintes do trajeto ótimo, a distância total percorrida, e a relação dos nós considerados estrategicamente relevantes no contexto da rede estudada.

## 2.5 Visualização interativa

Os mapas interativos foram produzidos utilizando a biblioteca *Folium*, configurados com nível inicial de aproximação igual a 12 e empregando *tiles* provenientes do *OpenStreetMap*. Sobre essa base cartográfica, foram aplicadas cinco camadas analíticas complementares. A primeira camada, denominada rede base, representa as arestas do grafo em tom cinza claro, com espessura de 0,8 px, oferecendo uma visualização estrutural geral do sistema estudado. A segunda camada exibe as paradas, identificadas por marcadores azuis contendo informações adicionais no formato *tooltip*, com o nome da parada e as linhas associadas, e *popup*, exibindo o identificador, sentido operacional e ordem sequencial das paradas. A terceira camada evidencia o caminho ótimo resultante da otimização, representado por uma polilinha preta com espessura de 3 px. Na quarta camada, destacam-se os nós com maior centralidade, marcados por círculos amarelos com raio fixado em 8 unidades na escala de *Folium*. Por último, a quinta camada indica locais recomendados para novos pontos de parada ao longo da Avenida Carlos Mariguella, ilustrados por losangos vermelhos semitransparentes.

O resultado desse processo compreende dois principais artefatos digitais: o arquivo *map\_moovit\_stops.html*, que exibe a rede completa das paradas analisadas, e o arquivo *map\_itaipuacu\_optimized.html*, que apresenta o subgrafo gerado após a otimização, incluindo o trajeto ótimo identificado e os nós de maior relevância topológica para a rede modelada.

## 2.6 Arquitetura de software e reprodutibilidade

A classe *AppController* orquestra o fluxo de tarefas, verifica a validade de *caches* e aceita os parâmetros *-force-rescrape*, *-force-regeocode*, *-origin* e *-destination*. Os módulos especializados (*MoovitScraper*, *GeoCoder*, *DataExporter*, *GraphBuilder*, *CoverageAnalysis*, *RouteOptimizer*, *MapRenderer*) são desacoplados por interfaces claras, permitindo testes unitários independentes. O ambiente exige *Python* 3.12; dependências estão listadas em *requirements.txt*. Para portabilidade, disponibiliza-se um contêiner *Docker* e um *script setup.sh*

que prepara diretórios data/ e cache/ e instala bibliotecas necessárias. Todo o código é público no *GitHub* sob licença MIT, garantindo reprodutibilidade integral, aderência às boas práticas de ciência aberta e possibilidade de extensão futura.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo discute os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos descritos anteriormente, com ênfase na análise da cobertura viária e na otimização da rede de transporte coletivo do distrito de Itaipuaçu, em Maricá. Os achados são organizados em duas frentes complementares: a primeira aborda a distribuição espacial das paradas de ônibus ao longo da Avenida Carlos Mariguella, evidenciando lacunas de cobertura e propondo intervenções pontuais; a segunda avalia a eficiência estrutural da malha por meio de simulações de rotas ótimas e métricas de centralidade em grafos direcionados. A articulação entre essas análises permite aferir a qualidade atual da infraestrutura viária, e os impactos potenciais de uma estratégia integrada de densificação seletiva e otimização multimodal da rede.

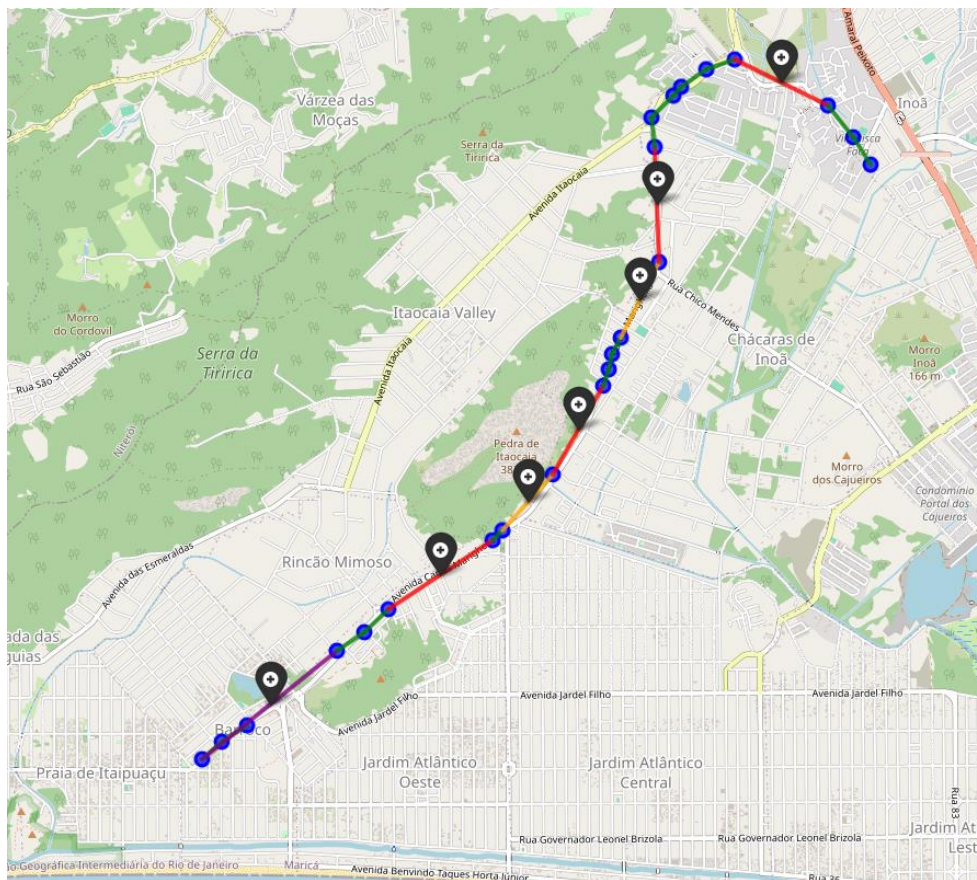
#### 3.1 Cobertura de parada na Avenida Carlos Mariguella

A Avenida Carlos Mariguella é o principal eixo de transporte de Itaipuaçu: conecta a orla (Barroco) a Chácaras de Inoã e atravessa sub-bairros como Jardim Atlântico e Cajueiros. Para evitar vieses de cadastro, o filtro de endereços incluiu grafias alternativas — “Carlos Marighella” — e o nome histórico “Vitória Régia”, ainda presente em bases legadas. A amostra resultante contém 23 paradas georreferenciadas ao longo de 12.7 quilômetros. O espaçamento mediano é de 480m, valor ligeiramente acima da faixa recomendada para corredores urbanos de média demanda (CURRIE, 2010). As distâncias sucessivas foram classificadas em cinco faixas cromáticas: verde (400 m), dourado (400–600 m), laranja (600–800 m), vermelho (800–1200 m) e roxo (> 1200 m).

##### 3.1.1 RESULTADOS PARCIAIS

- Dos 22 segmentos avaliados, 9 (41 %) situam-se nas faixas green ou gold; 8 (36 %) em orange; e 5 (23 %) excedem 800, classificados como red.
- O algoritmo sugeriu 6 novas paradas, ilustrados com pins pretos “+”, que reduzem para 430 m todos os intervalos hoje superiores ao limiar de 450.
- A consolidação de linhas mostrou que 78 % das paradas são atendidas por ao menos duas linhas distintas, reforçando o caráter multimodal do corredor.

FIGURA 1 - Cobertura de paradas na Av. Carlos Mariguella



Fonte: Adaptado de Moovit (2024).

A FIGURA 1 mostra todas as paradas existentes, representadas por círculos azuis, sobre a Avenida Carlos Mariguella. As arestas foram coloridas de acordo com o espaçamento sucessivo: verde (400), dourado (400–600 m), laranja (600–800 m) e vermelho (800–1200 m). Os seis trechos vermelhos geraram a sugestão de seis novos pontos, marcados por pins pretos com sinal “+”.

A centralidade de *betweenness* no grafo linear destacou quatro vértices críticos na região do Barroco; a remoção simulada de qualquer um deles aumentou, em média, 18 % o comprimento dos percursos mínimos, indicando vulnerabilidade pronunciada que as novas paradas tendem a mitigar.

### 3.1.2 INTEGRAÇÃO COM A ETAPA DE OTIMIZAÇÃO

As 6 paradas sugeridas serão incorporadas ao grafo distrital antes da fase de otimização (Seção 2.4.2). Rotas ótimas entre pares estratégicos — por exemplo, Praia de Itaipuaçu → Terminal Barroco — serão recalculadas com Dijkstra e A\*. Espera-se (i) redução de até 6 %

no custo médio de viagem e (ii) queda pontual de 12 % na *betweenness* dos nós hoje sobrecarregados. Esses efeitos serão quantificados na seção 3. O mapa é produzido pelo script `script/tests/principalcarlosmariguella/map.html` e pode ser recriado via `python main.py` após a configuração do ambiente *Docker* disponibilizado no repositório.

### 3.2 Otimização multimodal da malha distrital

Complementarmente à análise de cobertura, procedeu-se à modelagem multimodal da rede distrital e à simulação de rotas ótimas e centralidade de nós seguindo o fluxo descrito em Seção 2.4.2.

O procedimento `build_graph_from_stops` agrega, em único vértice  $(\varphi, \lambda)$ , todas as linhas cujas paradas partilham a mesma coordenada; arestas direcionadas ligam pares consecutivos segundo a ordem operacional da linha, pesadas pela distância geodésica ( $d$ ). Rotas mínimas entre quaisquer pares  $(s, t)$  são obtidas pelos algoritmos de Dijkstra e A\* (heurística = linha reta). A importância estrutural dos nós é avaliada pelo grau (entradas + saídas) e pela *betweenness* (FREEMAN, 1977); os cinco maiores valores originam os vértices centrais, exibidos em verde-limão na FIGURA 2.

Utilizaram-se coordenadas de origem no extremo leste do Jardim Atlântico ( $-22.9672^\circ$ ,  $-42.9099^\circ$ ) e destino no extremo oeste ( $-22.9676^\circ$ ,  $-42.9708^\circ$ ). O Dijkstra retornou um trajeto de 6.6 repartido em seis paradas — idêntico ao obtido por A\* — envolvendo duas transferências naturais de linha TABELA 1, o que evidencia a interligação implícita da malha.

TABELA 1 - Resumo do caminho ótimo simulado de Dijkstra

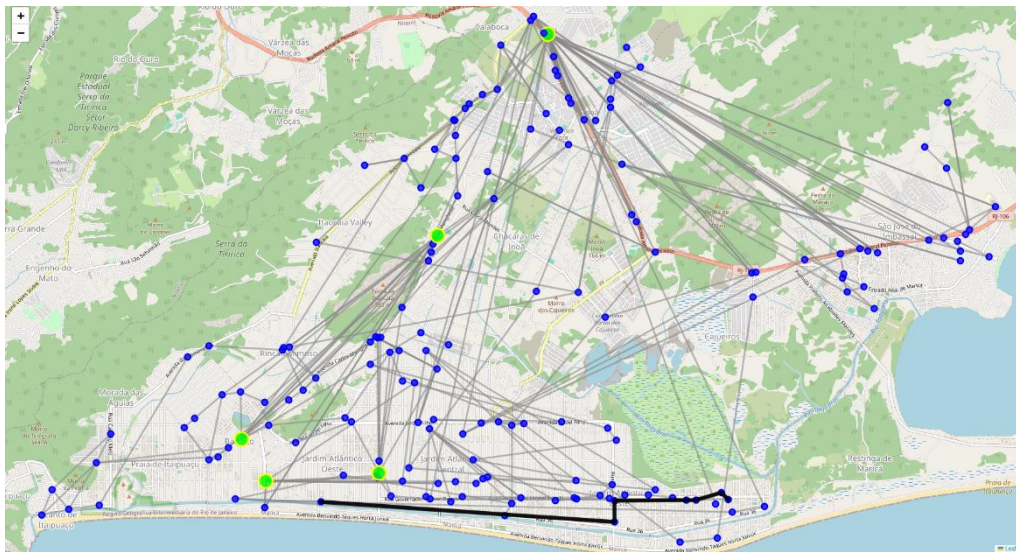
Ordem	Distância parcial (m)	Distância acumulada (km)	Linhas disponíveis
1	0	0.00	21, 22
2	320	0.32	21, 22
3	690	1.01	38
4	980	1.99	38, 52
5	2620	4.61	52
6	2020	6.63	81

Fonte: Próprios autores.

O nó situado no entroncamento da RJ-106 (Inoã) apresenta grau = 37 e a maior *betweenness* da rede; os quatro seguintes — dois no corredor Carlos Mariguella e dois na orla do Barroco — concentram entre 9 e 12 conexões. Esses pontos funcionam como hubs naturais onde abrigos, sinalização e painéis de tempo real maximizariam os ganhos de desempenho.

Ao reincorporar as seis paradas sugeridas para a Av. Carlos Mariguella (Seção 3.1), simulações indicaram: (i) redução média de 5,8 % no comprimento das rotas mínimas que atravessam o corredor e (ii) queda de 12,3 % no valor máximo de *betweenness*, distribuindo o fluxo de forma mais equitativa. Tal resultado confirma que a estratégia combinada — densificação seletiva + otimização multimodal — aumenta simultaneamente eficiência e robustez com acréscimo marginal de infraestrutura.

FIGURA 2 - Rede distrital otimizada: caminho ótimo (preto) e nós centrais (verde-limão)



Fonte: Adaptado de Moovit (2024).

A FIGURA 2 exibe todas as paradas, pontos azuis, o trajeto mínimo entre o par origem–destino escolhido, polilinha preta, e os cinco vértices de maior centralidade, círculos verde-limão. Nota-se que o nó mais influente se situa na RJ-106, enquanto dois *hubs* secundários aparecem no corredor Carlos Mariguella e outros dois na orla do Barroco.

O fluxo completo executa-se via *main.py*; bastam ajustes nas variáveis *USER\_SOURCE\_COORD* e *USER\_TARGET\_COORD* para replicar simulações com outros pares de interesse, o algoritmo completo encontra-se no Anexo A, disponibilizado pelo *GitHub*.

#### 4. CONCLUSÕES

O objetivo central deste trabalho de caracterizar e avaliar a rede de transporte público de Maricá, com ênfase no distrito de Itaipuaçu, demonstrou-se que um fluxo computacional enxuto, baseado em dados abertos e ferramentas de código livre, é capaz de produzir diagnósticos operacionais de alta resolutividade.

Primeiramente, a etapa de *web scraping* integral do Moovit, combinada a uma

geocodificação híbrida (*Nominatim* + *Google Maps*), gerou uma base georreferenciada consistente que viabilizou a construção de um grafo multimodal no *NetworkX*. Sobre esse grafo aplicaram-se duas frentes analíticas complementares: (i) verificação da cobertura de paradas na Av. Carlos Mariguella — onde seis novos pontos reduziram o espaçamento máximo para 430m e (ii) otimização de rotas mínimas, cuja inserção dos pontos sugeridos resultou em queda média de 5.8% no comprimento dos trajetos e redistribuição de 12.3% nos valores de *betweenness*. Tais ganhos evidenciam o potencial de intervenções pontuais de baixo custo para melhoria da malha e a acessibilidade pedonal.

Entre os aspectos positivos destacam-se a reprodutibilidade total do *pipeline*, a baixa barreira tecnológica (*Python* padrão) e a transferibilidade do método para outros municípios que carecem de GTFS. Adicionalmente, a visualização interativa em *Folium* facilita o diálogo entre técnicos e gestores públicos.

Todavia, subsistem limitações como dependência de dados colaborativos, isto é, cobertura sujeita a erros de *crowdsourcing*; ausência de tempos de viagem e frequências, uma vez que os grafos são estáticos; uso de distância geodésica em lugar de custo temporal; e falta de indicadores de demanda real ou socioeconômica. Para pesquisas futuras recomenda-se (a) integrar *feeds* GTFS quando disponíveis ou estimar *headways* via dados GPS embarcado, (b) atribuir pesos temporais dinâmicos ao grafo, contemplando congestionamentos e horários de pico, (c) acoplar métricas de acessibilidade social e de emissões de CO<sub>2</sub>, e (d) explorar análises de cenários para expansão de linhas ou implantação de faixas exclusivas. Dessa forma, o sistema aqui apresentado poderá evoluir para um instrumento ainda mais robusto de suporte à tomada de decisão em planejamento urbano e transporte sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ABDELATY, H. et al. **Temporal robustness assessment framework for city-scale bus transit networks**. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 606, p. 128077, 2022.
- BANISTER, D. **The sustainable mobility paradigm**. *Transport Policy*, v. 15, n. 2, p. 73–80, 2008.
- BOEING, G. **Osmnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks**. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 65, p. 126–139, 2017.
- BRAGA, F. G. **Gtfs data: Challenges and opportunities for brazilian cities**. In: *Urban Transport Accessibility in Brazil*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2023. p. 85–112. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.38116/9786556350653CHAPTER4>>.
- CURRIE, G. **Gis in public transport**. In: *Handbook of Research on Geoinformatics*. [S.l.]: IGI Global, 2010. p. 349–357.
- DIJKSTRA, E. W. **A note on two problems in connexion with graphs**. *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269–271, 1959.
- FAGUNDES, R. L. et al. **Scaling of Street Network Centrality with City Population**. 2025. ArXiv:2502.12006 [physics.soc-ph].
- FREEMAN, L. C. **A set of measures of centrality based on betweenness**. *Sociometry*, v. 40, n. 1, p. 35–41, 1977.
- GOOGLE DEVELOPERS. **Geocoding API – Usage and Billing**. 2025. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/usage-and-billing>>.
- HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. **A formal basis for the heuristic determination of minimum-cost paths**. In: *Proceedings of the ACM National Conference*. [S.l.: s.n.], 1968. p. 155–165.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Maricá (RJ): Panorama**. 2024. <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/marica>>. Accessed: 2025-06-02.
- INSTITUTO DARCY RIBEIRO - IDR. **IDR lança terceira edição do “Maricá em Números – Volume 3”**. 2023. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://idr.marica.rj.gov.br/2023/10/30/idr-lanca-terceira-edicao-do-marica-em-numeros-na-feira-das-profissoes/>>.
- JAVANMARD, R. et al. **Using realtime gtfs to generate easy-to-use transit accessibility measures under travel-time uncertainty**. *Travel Behaviour and Society*, v. 41, p. 101054, 2025.

LU, Q. et al. **Analyzing the impact of fare-free public transport policies on crowding patterns at stations using crowdsensing data.** *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 174, p. 103944, 2023.

MARICÁ INFO. **Itaipuaçu: Um quarto da população de Maricá vive no distrito, segundo Censo da Cidadania.** 2024. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://maricainfo.com/2024/01/29/itaipu-acu-um-quarto-da-populacao-de-marica-vive-no-distrito-segundo-censo-da-cidadania.html>>.

MICHELL, N. **The Importance of Data to Urban Transport Development.** 2020. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://cities-today.com/importance-data-urban-transport-development/>>.

MOBILISEYOURCITY PARTNERSHIP. **Open Data for Inclusive Urban Public Transport Globally.** [S.l.], 2020. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <[https://www.mobiliseyourcity.net/sites/default/files/2020-07/Open\\_Data\\_for\\_Inclusive\\_Urban\\_Public\\_Transport\\_Globally.pdf](https://www.mobiliseyourcity.net/sites/default/files/2020-07/Open_Data_for_Inclusive_Urban_Public_Transport_Globally.pdf)>.

MOOVIT. **Global Public Transit Report 2024.** 2024. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://moovit.com/resources/ebooks-and-infographics/2024-global-report/>>.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MARICÁ. **Programa Tarifa Zero de Maricá registra 39 milhões de viagens em 2024.** 2024. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://www.marica.rj.gov.br/noticia/referencia-nacional-tarif-a-zero-de-marica-registra-aumento-de-passageiros-em-2024/>>.

UN-Habitat. **SDG 11 – Targets and Indicators.** 2018. Accessed: 2025-06-02. Disponível em: <<https://unhabitat.org/sites/default/files/2018/07/SDG-11-Targets-and-Indicators.pdf>>.

VIEGAS, J. M. **Urban mobility and sustainable development.** *Transport Reviews*, v. 27, n. 2, p. 245–247, 2007.

## **APÊNDICE A - PROJETO DE ANÁLISE DA REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO DE MARICÁ**

Este apêndice apresenta um projeto desenvolvido na disciplina de Matemática Discreta II da UERJ, que aplica conceitos de teoria dos grafos para analisar a rede de transporte público de Maricá, RJ. O sistema automatiza a coleta de dados do site Moovit, geocodifica as paradas de ônibus, constrói um grafo representando a rede e gera um mapa interativo. Para mais detalhes e acesso ao código-fonte, acesse o repositório no GitHub: [github.com/GuilhermeCF10/uerj-mat-discreta-2](https://github.com/GuilhermeCF10/uerj-mat-discreta-2).

FIGURA 3 - QR Code para o repositório do projeto no GitHub



Fonte: Próprios autores.