

Mapeamento de Rotas Inteligente

Otimização Multi-Objetivo de Rotas Multimodais no Grande Porto

27.12.2025

Pedro Reis

PG59908

João Azevedo

PG61693

Guilherme Pinto

PG60225

Luís Silva

PG60390

1 Introdução

Desafio:

- Mobilidade urbana no Grande Porto requer integração fluida entre modos (a pé, metro e autocarro).

Motivação:

- O trajeto “melhor” deixou de ser apenas o mais rápido: há um compromisso entre rapidez e impacto ambiental.

Objetivo do Projeto

Objetivo:

- Sistema de planeamento de rotas **multimodais e dependentes do tempo.**

Entrada do utilizador:

- Origem, destino e hora de partida.

Saída:

- Conjunto de rotas alternativas (não dominadas) com diferentes **trade-offs** (Tempo vs CO₂).

Objetivos (2):

- **Tempo total:** inclui caminhada, viagem e tempos de espera.
- **Emissões de CO₂:** derivadas do modo e distância percorrida em transportes.

2 Metodologia de Projeto

Fase 1 – Análise:

- Definição de requisitos e dos 2 objetivos (Tempo e CO₂).

Fase 2 – Dados e Modelação:

- OSM (rede pedonal) + GTFS (STCP e Metro do Porto).

Fase 3 – Algoritmos:

- Motor de routing (A^* dependente do tempo) + otimização evolutiva (NSGA-III).

Fase 4 – Protótipo e Validação:

- Interface geográfica e testes de conectividade/consistência temporal.

3 Modelação da Rede

Rede Pedonal (OSM/OSMNX):

- Grafo viário para caminhada (velocidade média 1,38 m/s).

Transportes (GTFS):

- Paragens/estações: `stops.txt`
- Horários: `stop_times.txt`, `calendar.txt`, `calendar_dates.txt`
- Geometria: `shapes.txt`

Emissões (fatores):

- Autocarro: 109,9 g/km
- Metro: 40 g/km
- Caminhada : 0 g/km

Ideia:

- Fundir camadas walk + bus + transit num único grafo.

Ligação eficiente:

- Uso de **K-D Tree** para ligar cada paragem ao nó pedonal mais próximo.
- Arestas bidireccionais com custo pedonal (distância/tempo).

4 Construção de grafos unimodais

Grafo pedonal (G_{walk})

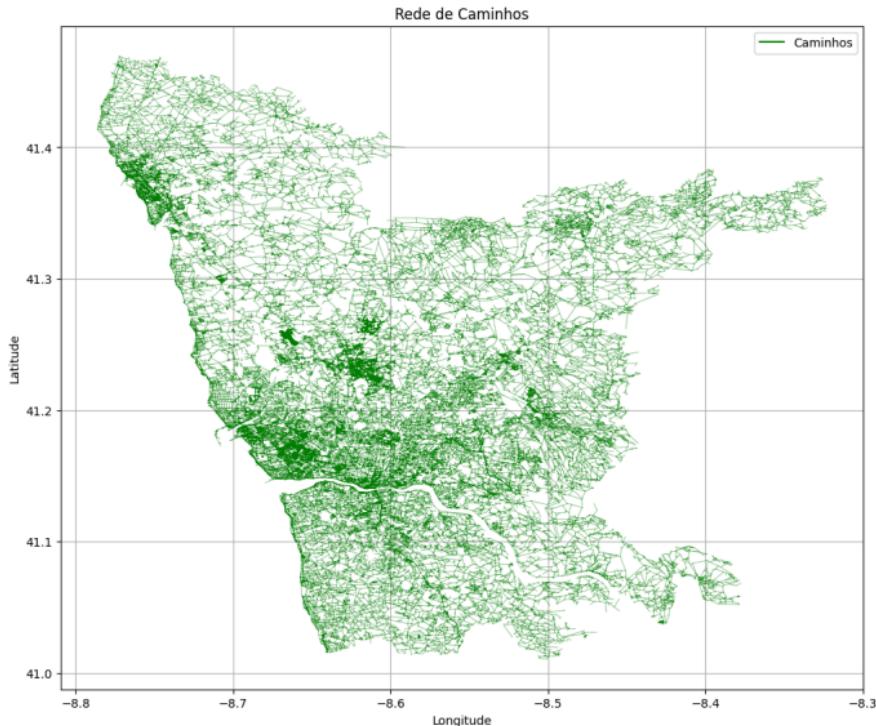


Figura 1: Grafo da rede viária pedonal extraída do OpenStreetMap

Grafos de transportes (G_{bus} e G_{transit})

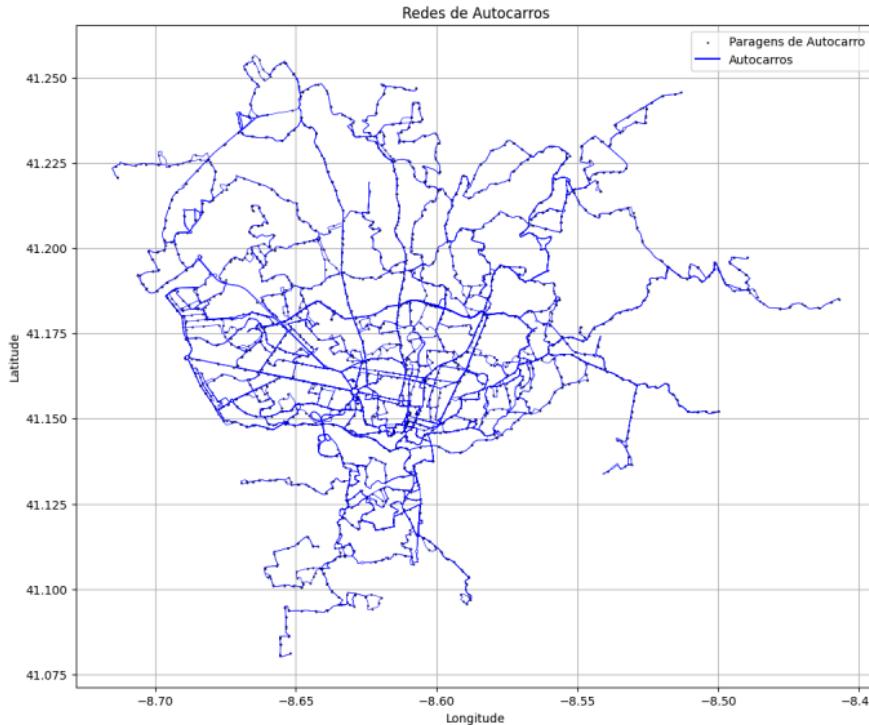


Figura 2: Grafo da rede de autocarros

Grafos de transportes (G_{bus} e G_{transit}) (ii)

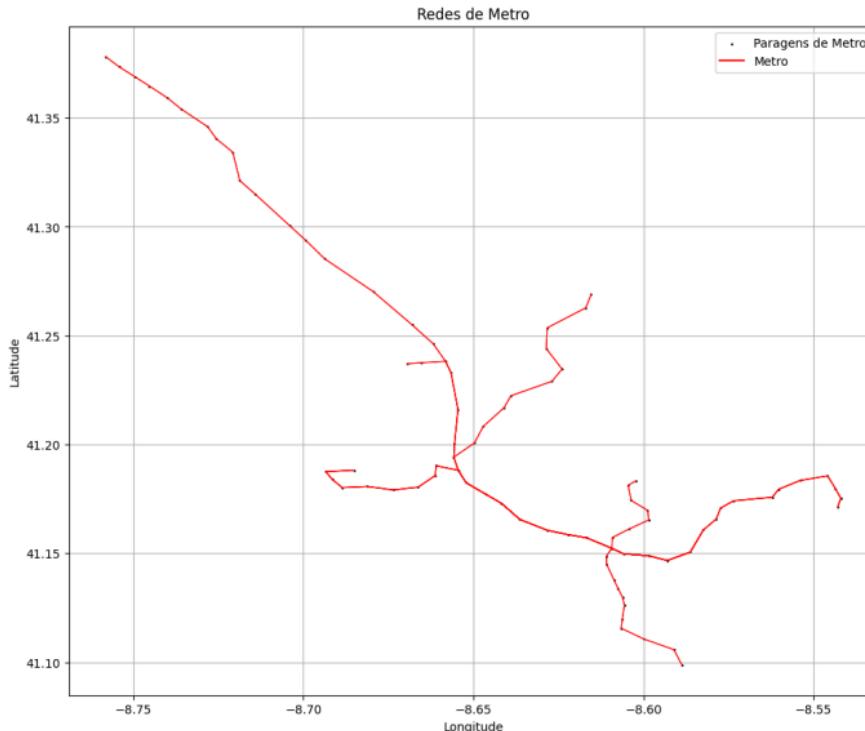


Figura 3: Grafo da rede de metro

5 Construção do Grafo Multimodal

Resultado:

- Grafo multimodal navegável entre modos.

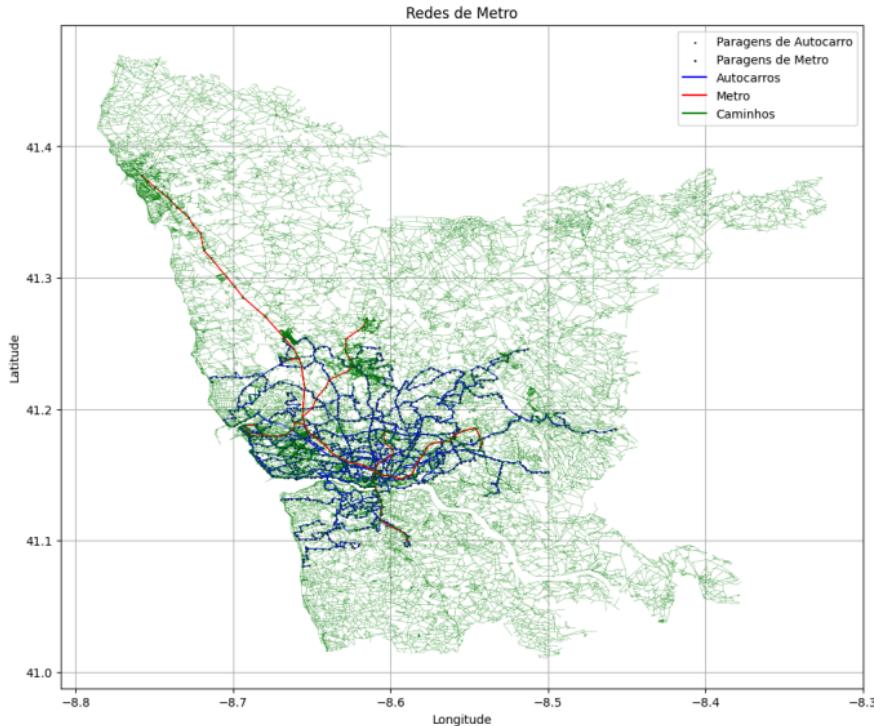


Figura 4: Sobreposição das redes após integração multimodal

Problema detetado:

- Fragmentação na rede pedonal quando a área era extraída por concelhos.

Correção:

- Delimitação do Grande Porto por polígono (extração contínua), garantindo conectividade global.

Impacto:

- Permite rotas multimodais corretas entre concelhos.

6 Algoritmos de Procura

Routing: Dijkstra vs. A*

Dijkstra:

- Ótimo com pesos não negativos, mas expande muitos nós em redes grandes.

A*:

- Usa heurística para guiar a procura e reduzir o espaço explorado.

Escolha do projeto:

- Melhor desempenho para uso “quase em tempo real”.

Comparação: Dijkstra vs. A^*

Critério	Dijkstra	A^* (<i>A-Star</i>)
Tipo de Procura	Não informada	Informada (Heurística)
Garantia de Ótimo	Sim	Sim (heurística admissível)
Eficiência	Mais lenta	Mais rápida em redes grandes

Tabela 1: Comparação entre Dijkstra e A^*

A^* Dependente do Tempo

Ideia:

- Em transportes públicos, o custo depende da hora de chegada à paragem.

Como funciona:

- Ao expandir um nó de paragem, calcula-se a próxima partida válida e o tempo de espera.

Peso total:

- $\text{Tempo total} = \text{viagem} + \text{espera}$.

7 Inicialização Inteligente (MOEA/D inspirado no A^*)

Problema:

- Inicialização aleatória gera muitas rotas inválidas ou desconexas.

Solução:

- Inicialização inteligente baseada em executar o A^* (dependente do tempo) várias vezes com diferentes perfis de preferência.

Intuição:

- Ao variar a importância relativa entre tempo e emissões, obtêm-se rotas distintas (mais rápidas vs mais sustentáveis), aumentando diversidade e qualidade desde o arranque.

Objetivo:

- Gerar sementes com compromissos diferentes entre Tempo e CO₂.

Estratégia:

- Perfis desde “priorizar tempo” até “priorizar sustentabilidade”.
- Cada perfil → uma execução do A^* → uma rota seed.

Custo escalarizado:

- Tempo por aresta (deslocação + espera, quando aplicável)
- Emissões por aresta (dependentes do modo; caminhada = 0)

Efeito:

- Seeds já refletem compromissos realistas (tempo vs impacto ambiental).

Passos:

- Converter hora para formato interno (ex.: segundos desde a meia-noite).
- Filtrar serviços ativos via `calendar` e `calendar_dates`.
- Validar transições em transporte apenas com partidas compatíveis.

Evita:

- Rotas inviáveis (usar metro/autocarro fora do serviço).

A^* (para gerar seeds)

Estado mantido:

- Custo acumulado;
- Hora corrente no nó (atualizada com deslocação e espera);
- Caminho parcial (lista de nós).

Heurística:

- Admissível (não sobrestima): limite inferior do tempo até ao destino; termo ambiental otimista.

Controlo de custo:

- Possível limite de exploração (máx. nós visitados).

Robustez:

- Se uma execução falhar → reutiliza-se a última rota válida.
- Se não houver conectividade → rota fallback (pedonal/geométrica).
- Se faltarem caminhos → replicação de solução válida para preencher a população.

Integração:

- As seeds são usadas como amostra inicial (**sampling**) no NSGA-III.

Vantagens:

- Soluções iniciais viáveis;
- Diversidade controlada;
- Menor dependência de mutações aleatórias nas primeiras gerações.

8 Operadores de Crossover e Mutação

Representação

Indivíduo:

- Uma rota = sequência de nós conectados no grafo.

Crossover por Interseção

Ideia:

- Combinar dois caminhos usando um nó comum interno.

Robustez:

- Se não existir nó comum: não aplicar crossover.
- Remoção de ciclos locais quando surgem repetições.

Ideia:

- Selecionar dois pontos e recalcular um subcaminho alternativo entre eles.

Robustez:

- Se não houver subcaminho viável, manter a rota original.

9 Otimização Multiobjetivo (NSGA-III)

Motivação:

- Gerar uma frente de Pareto bem distribuída sem escolher pesos fixos à partida.

Diversidade:

- Direções de referência + seleção ambiental preservam soluções em regiões pouco representadas.

Em cada geração:

- Seleção de pais
- Crossover + mutação
- Avaliação (Tempo e CO₂)
- Seleção de sobreviventes com direções de referência

Configuração típica:

- População: 100
- Gerações: 50
- Crossover: 0,8
- Mutação: 0,3

10 Pontos Fortes e Limitações

Pontos Fortes

- Multimodalidade e conectividade (grafo integrado).
- Integração de dados reais (OSM + GTFS) para modelação da rede.
- Apoio à decisão: múltiplas alternativas (trade-offs).
- Inicialização inteligente com múltiplas execuções de A^* (diversidade e qualidade inicial).

Limitações

- **Sem dados em tempo real:** horários são GTFS estático (atrasos/trânsito não modelados).
- **Limitação temporal no processo de otimização:** o algoritmo evolutivo não realiza consulta dinâmica aos horários durante a expansão.
- **Altimetria ausente:** esforço pedonal em subidas não é contabilizado.
- **Escalabilidade:** grafo detalhado consome memória; expansão exige otimizações.

11 Conclusão

Conclusão

Resumo:

- Sistema multimodal e multiobjetivo para o Grande Porto (Tempo vs CO₂).
- Inicialização inteligente (MOEA/D inspirado no A^*) + otimização com NSGA-III.
- Conjunto de rotas não dominadas que evidenciam trade-offs e suportam decisão informada.

Futuro:

- Integração de dados em tempo real e incorporação de altimetria.
- Implementação de mais objetivos
- Implementação de restrições