Sistema de Roteamento Multimodal

Otimização Multi-Objetivo para a Área Metropolitana do Porto

PG11605 - Carlos da Mota Bergueira

PG42201 - Filipa Araújo Pereira

PG59999 - Diego Jefferson Mendes Silva

PG7942 - Rui Manuel Martins Marques Rodrigues

Grupo 6 - CIN 2025/2026
Universidade do Minho

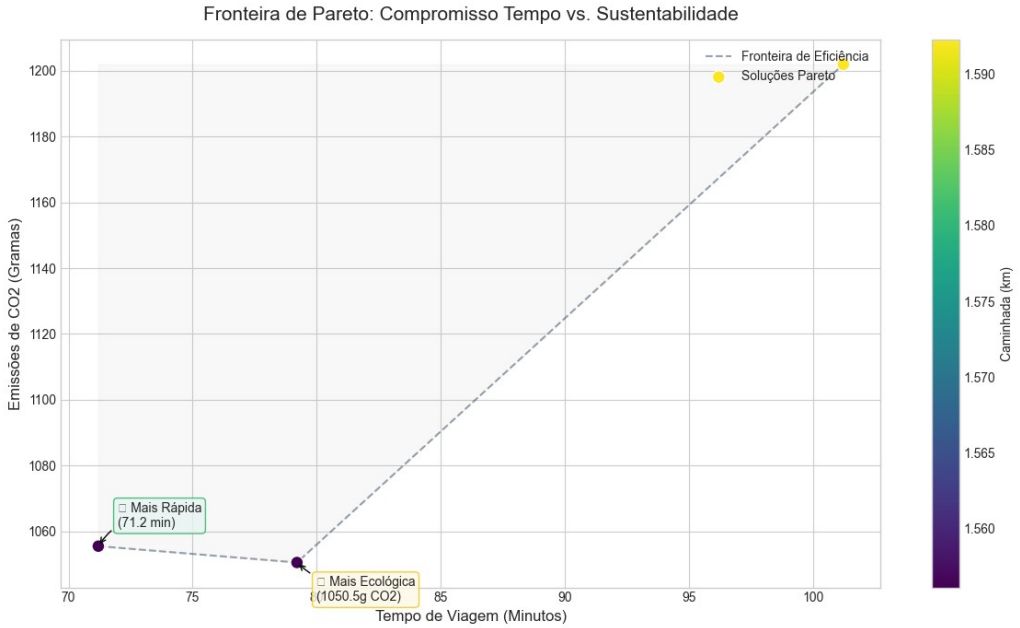
Índice

Visão Geral do Projeto

🎯 Objetivo: Motor de roteamento multimodal inteligente

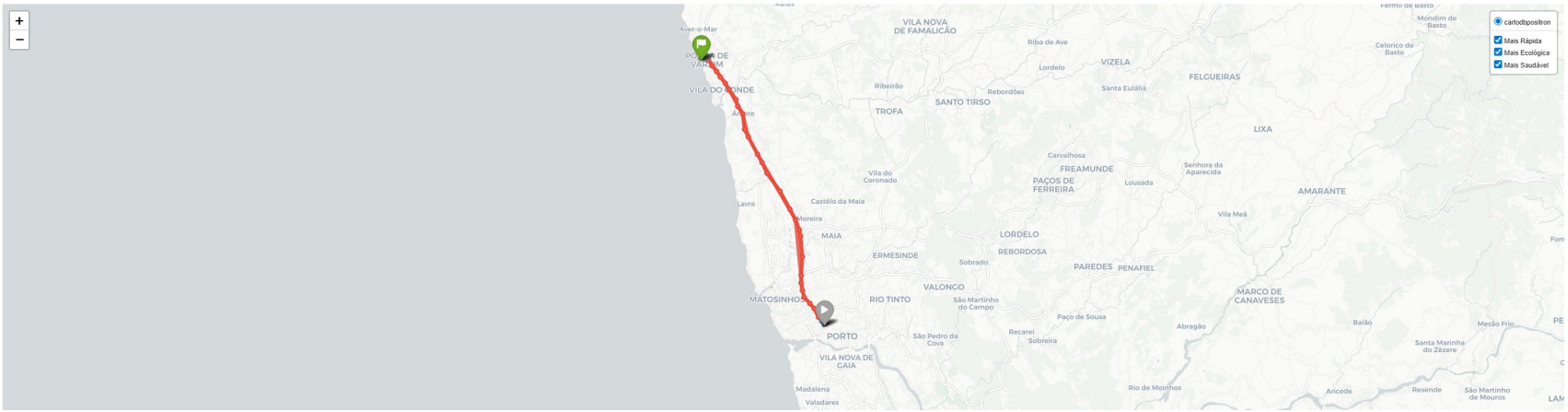
Critérios de Otimização:

- ⏱️ Tempo de viagem (minimizar)
- ♻️ Emissões de CO_2 (minimizar)
- 🚶 Exercício físico (maximizar)
- 📊 Resultado: Fronteira de Pareto com múltiplas rotas eficientes



Características Principais

- ✓ Otimização Multi-Objetivo com fronteira Pareto rigorosa
- ✓ Dados Reais: GTFS (Metro + STCP) + OSMnx
- ✓ 3 Algoritmos Avançados:
  - A* Heurístico (rápido)
  - Dijkstra Multi-Label (exaustivo, 100% garantido)
  - ACO Estocástico (criativo)
  - ✓ Análise Geográfica com ruas reais
  - ✓ 22 Casos de Teste (trivial a extremo)



Stack Tecnológico

Python 3.12+ - Linguagem principal

NetworkX 3.x - Estrutura de grafos

OSMnx 1.x - Dados geográficos (OpenStreetMap)

Pandas 2.x - Processamento GTFS

Folium 0.14+ - Visualização de mapas

NumPy 1.24+ - Cálculos numéricos

Poetry 2.0+ - Gestão de dependências

Arquitetura do Projeto

Componentes

services/ - Lógica de negócio

utils/ - Operações auxiliares

models/ - Estruturas de dados

algoritms/ - Implementações

graph.py - Rede multimodal

solution.py - Classe de solução

Algoritmos

a_star.py - Heurístico rápido

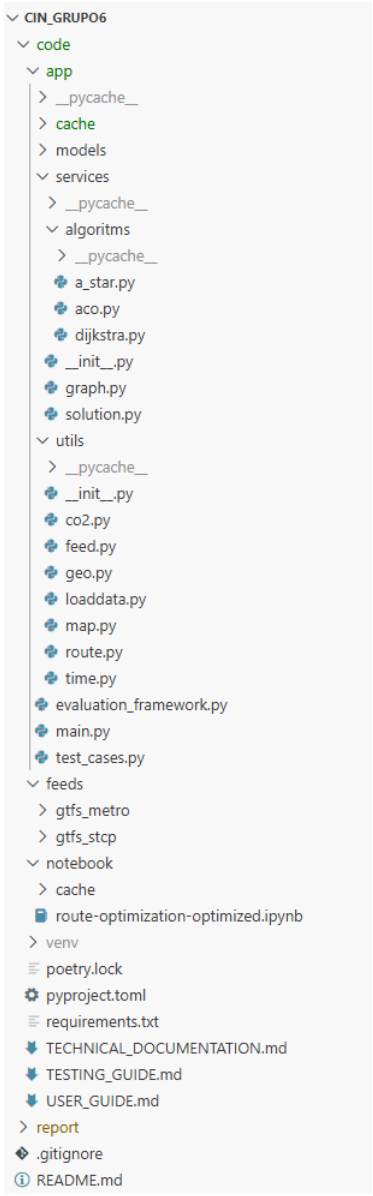
dijkstra.py - Exaustivo garantido

aco.py - Estocástico criativo

Cada retorna Fronteira Pareto

Comparação automática

Validação cruzada



A* Multi-Objetivo

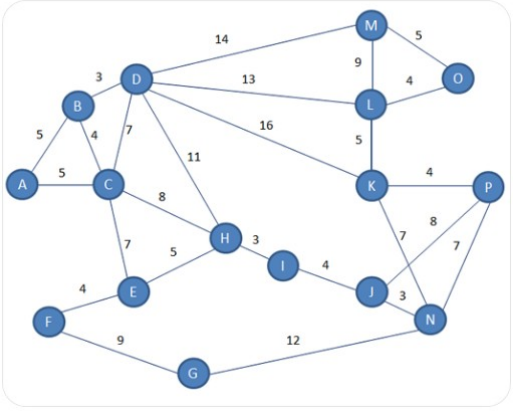
Tipo: Algoritmo heurístico guloso

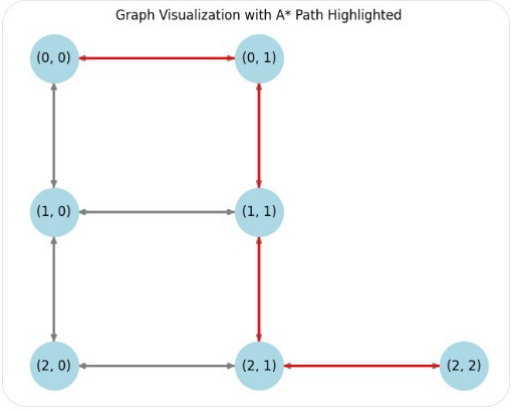
Complexidade: O(E log V)

Características:

- ✓ Utiliza heurísticas para guiar a busca
- ✓ Prioriza nós promissores
- ✓ Encontra rotas de boa qualidade rapidamente
- ✗ Não garante Fronteira Pareto completa

Ideal para: Aplicações em tempo real





Dijkstra Multi-Label (Exaustivo)

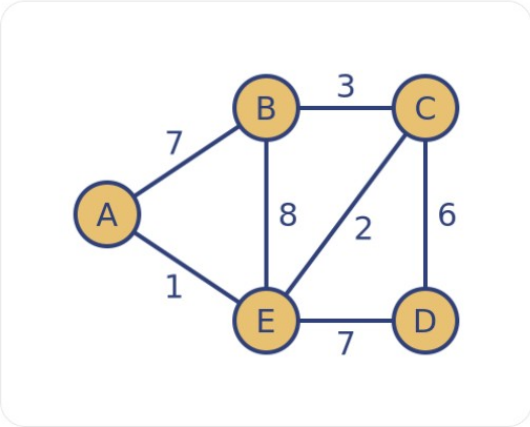
Tipo: Algoritmo de rótulo-setting multi-objetivo

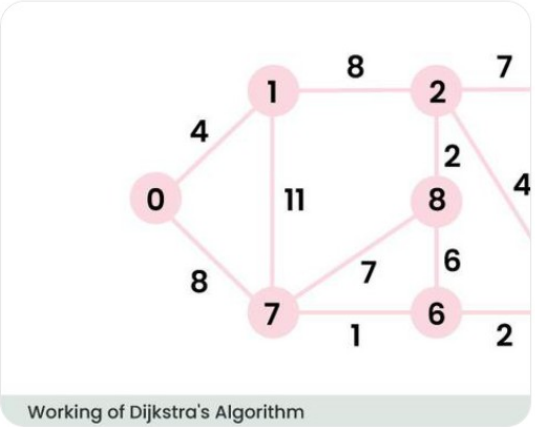
Complexidade: O(E × L log V) onde L = nº de etiquetas

Características:

- ✓ Mantém múltiplas etiquetas por nó
- ✓ Propaga todas as soluções não-dominadas
- ✓ Remove soluções dominadas iterativamente
- ✓ GARANTE Fronteira de Pareto completa e exata

Ideal para: Gold standard de otimização multi-objetivo





ACO (Ant Colony Optimization)

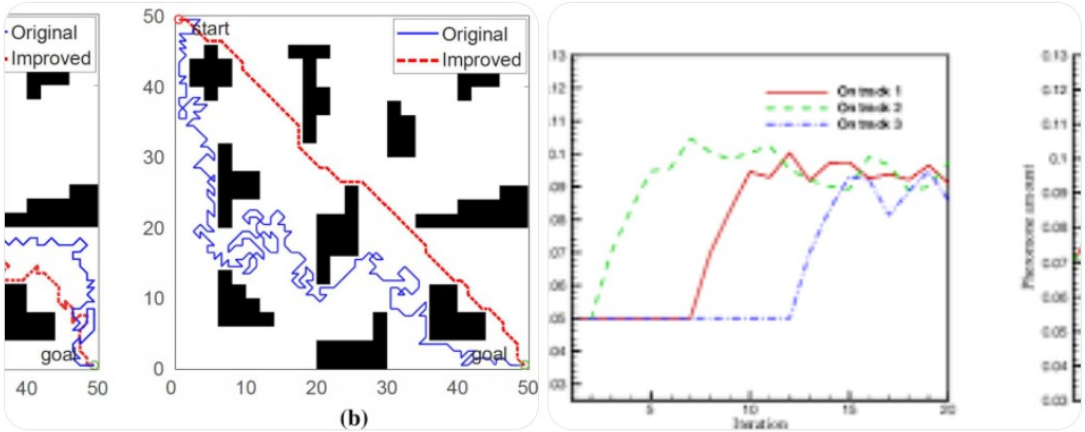
Tipo: Algoritmo estocástico inspirado na natureza

Complexidade: O(I × A × E) - I iterações, A formigas

Características:

- ✓ Simula comportamento coletivo de formigas
- ✓ Cada formiga constrói uma solução
- ✓ Atualiza feromónios baseado em qualidade
- ✗ Heurístico (pode não encontrar todas as soluções)

Ideal para: Exploração criativa e inovação



Fontes de Dados

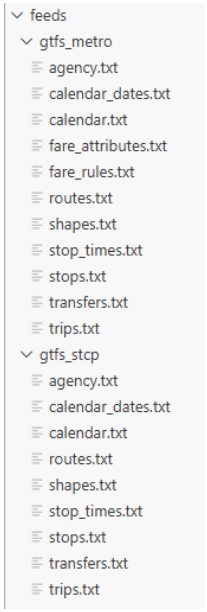
GTFS

🚇 Metro do Porto

- 95+ paragens
- 6 linhas
- Horários atualizados

🚌 STCP (Autocarro)

- 600+ paragens
- Múltiplas linhas



OpenStreetMap (OSM)

🗺️ Rede viária completa

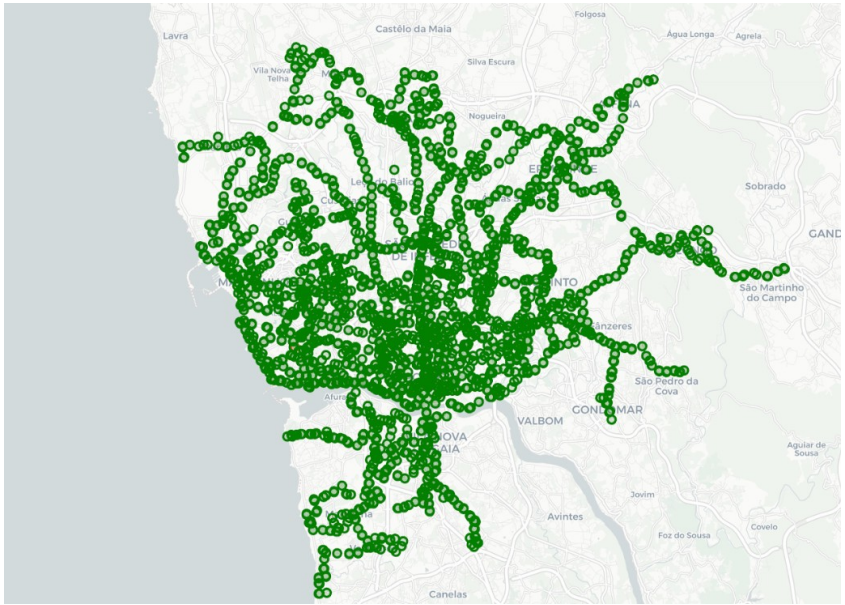
🚶 Caminhos pedonais

⏱️ Velocidades estimadas

📍 Coordenadas geográficas

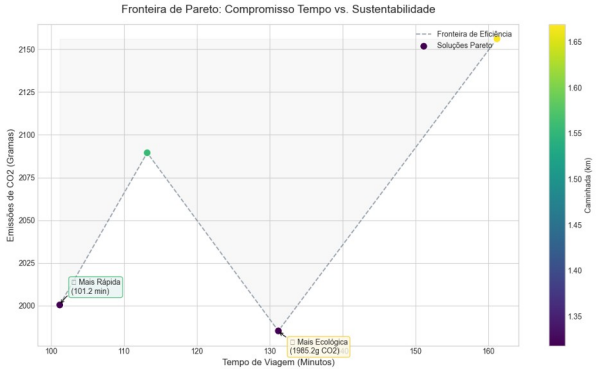
Cálculos Derivados:

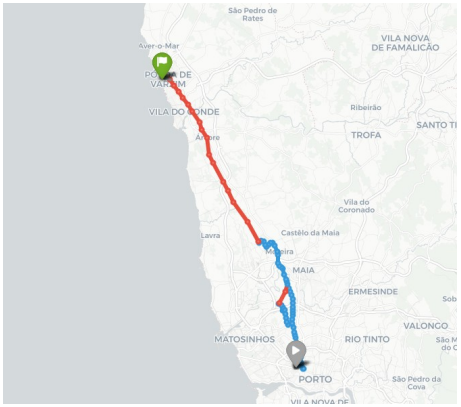
- CO_2, transferências, caminhada



Exemplo de Uso - Python API

```
from app.services.graph import GraphRoute

from app.services.algoritms.a_star import
optimized_multi_objective_routing


graph = GraphRoute('Casa da Musica', 'Casino da
Póvoa')

routes = optimized_multi_objective_routing(...)


for rota in routes:

    print(f'Tempo: {rota.total_time} min')

    print(f'CO2: {rota.total_co2}g')

    print(f'Caminhada: {rota.total_walk_km}km')
```






```
Tempo Total: 1h 41m 12s
CO2 Total: 1201.97 g
Hora de Partida: 8h 0m 0s
Hora de Chegada: 9h 41m 12s
--- Detalhes do Percurso ---
 Caminhada: De Ponto de Partida para CARVALHIDO (0h 10m 56s)
 Trânsito (Viagem STCP_204_0_U_100): De CARVALHIDO para CASA DE SAÚDE DA BOAVISTA - (Viagem: 0h 6m 17s)
 Trânsito (Viagem STCP_204_0_U_100): De CASA DE SAÚDE DA BOAVISTA para MOREIRA SÁ - (Viagem: 0h 3m 33s)
 Trânsito (Viagem STCP_203_0_U_20): De MOREIRA SÁ para CASA DA MÚSICA (METRO) - (Viagem: 0h 13m 37s)
 Caminhada: De CASA DA MÚSICA (METRO) para Casa da Música (0h 6m 53s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Casa da Música para Francos - (Viagem: 0h 3m 43s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Francos para Ramalde - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Ramalde para Viso - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De Viso para NorteShopping I Sete Bicas - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De NorteShopping I Sete Bicas para Senhora da Hora - (Viagem: 0h 1m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De Senhora da Hora para Fonte do Cuco - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De Fonte do Cuco para Custóias - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De Custóias para Esposade - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De Esposade para Crestins - (Viagem: 0h 3m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BDF5): De Crestins para Verdes - (Viagem: 0h 1m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Verdes para Pedras Rubras - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Pedras Rubras para Lidador - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Lidador para Vilar do Pinheiro - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Vilar do Pinheiro para Modivas Sul - (Viagem: 0h 2m 0s)
...
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Alto de Pega para Portas Fronhas - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De Portas Fronhas para São Brás - (Viagem: 0h 1m 0s)
 Trânsito (Viagem METRO_BU5): De São Brás para Póvoa de Varzim - (Viagem: 0h 2m 0s)
 Caminhada: De Póvoa de Varzim para Ponto de Chegada (0h 8m 12s)
```

Framework de Avaliação

Metodologia:

22 Casos de Teste (trivial a extremo)

3 Algoritmos com comparação automática

Métricas: Tempo, CO_2, Exercício físico

Validação via pytest

Categorias:

Trivial: <1km | Moderado: 1-5km

Desafiante: 5-20km | Extremo: múltiplas transferências

Execução: python -m app.test_cases

```
# ======================================================================
# GRUPO 1: CASOS TRIVIAIS / MUITO SIMPLES (Validação Básica)
# ======================================================================

TEST_CASES = [
    {
        "id": "TC-1.1",
        "name": "Distância Muito Curta (Walking Only)",
        "origem": "Livraria Bertrand, Porto",
        "destino": "Torre dos Clérigos, Porto",
        "start_time": "09:00:00",
        "complexity": "trivial",
        "expected_distance_km": 0.3,
        "expected_duration_sec": 180,
        "description": "Apenas caminhada, distância < 500m. Sem opções de transporte.",
        "metrics": {
            "expected_walk_km_min": 0.2,
            "expected_walk_km_max": 0.5,
            "num_solutions_expected": "1",
            "transport_used": "walk_only",
        }
    },
```

```
# ======================================================================
# GRUPO 3: CASOS MODERADOS (Média Complexidade)
# ======================================================================

{
    "id": "TC-3.1",
    "name": "Distância Longa com 2 Transferências",
    "origem": "Campanhã, Porto",
    "destino": "Francelos, Vila Nova de Gaia",
    "start_time": "11:00:00",
    "complexity": "medium",
    "expected_distance_km": 12.0,
    "expected_duration_sec": 2400,
    "description": "Rota interurbana com 2 transferências. Trade-off tempo vs CO2.",
    "metrics": {
        "num_solutions_expected": "5-10",
        "max_transfers": 2,
        "expected_co2_range": (100, 300),
        "transport_used": "mixed",
    }
},
```

```
# ======================================================================
# GRUPO 4: CASOS COMPLEXOS (Alta Complexidade)
# ======================================================================

{
    "id": "TC-4.1",
    "name": "Distância Longa com Múltiplas Alternativas",
    "origem": "Maia, Porto",
    "destino": "Santo Ovídio, Vila Nova de Gaia",
    "start_time": "07:00:00",
    "complexity": "high",
    "expected_distance_km": 20.0,
    "expected_duration_sec": 2700,
    "description": "Rota longa dentro da área metropolitana com muitas combinações possíveis.",
    "metrics": {
        "num_solutions_expected": "6-12",
        "max_transfers": 2,
        "expected_co2_range": (200, 600),
        "computation_time_limit_sec": 30,
        "transport_used": "mixed",
    }
},
```

Comparação de Algoritmos

⚡ Tempo de Execução: A* > ACO > Dijkstra

✓ Qualidade Garantida: Dijkstra > ACO > A*

📊 Cobertura Pareto: Dijkstra > ACO ≈ A*

💡 Criatividade: ACO > A* > Dijkstra

📈 Escalabilidade: A* > ACO > Dijkstra

Recomendações:

- Use Dijkstra para garantias de otimalidade
- Use A* para tempo real
- Use ACO para exploração criativa

```
best_sol_time = min(dijkstra_pareto_solutions, key=lambda s: s.total_time)
print(best_sol_time.summarize_solution(graph.G, start_sec))
```

```
Tempo Total: 1h 11m 12s
CO2 Total: 1055.46 g
Hora de Partida: 8h 0m 0s
Hora de Chegada: 9h 11m 12s
--- Detalhes do Percurso ---
 🚶 Caminhada: De Ponto de Partida para Francos (0h 10m 30s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem METRO_ADF3): De Francos para Ramalde - (Viagem: 0h 3m 30s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem METRO_ADF3): De Ramalde para Viso - (Viagem: 0h 2m 0s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem METRO_FS3): De Viso para NorteShopping I Sete Bicas - (Viagem: 0h 2m 0s)
```

```
best_sol_co2 = min(dijkstra_pareto_solutions, key=lambda s: s.total_co2)
print(best_sol_co2.summarize_solution(graph.G, start_sec))
```

```
Tempo Total: 1h 19m 12s
CO2 Total: 1050.50 g
Hora de Partida: 8h 0m 0s
Hora de Chegada: 9h 19m 12s
--- Detalhes do Percurso ---
 🚶 Caminhada: De Ponto de Partida para Francos (0h 10m 30s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem METRO_ADF3): De Francos para Ramalde - (Viagem: 0h 3m 30s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem METRO_ADF3): De Ramalde para Viso - (Viagem: 0h 2m 0s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem METRO_FS3): De Viso para NorteShopping I Sete Bicas - (Viagem: 0h 2m 0s)
```

```
best_sol_walk = max(dijkstra_pareto_solutions, key=lambda s: s.total_walk_km)
print(best_sol_walk.summarize_solution(graph.G, start_sec))
```

```
Tempo Total: 2h 47m 12s
CO2 Total: 1382.25 g
Hora de Partida: 8h 0m 0s
Hora de Chegada: 10h 47m 12s
--- Detalhes do Percurso ---
 🚶 Caminhada: De Ponto de Partida para CARVALHIDO (0h 11m 51s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem STCP_602_1_U_18): De CARVALHIDO para QUINTA AMARELA - (Viagem: 0h 7m 1s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem STCP_602_1_U_18): De QUINTA AMARELA para CRUZ VERMELHA - (Viagem: 0h 1m 1s)
🚌/🚇 Trânsito (Viagem STCP_508_1_U_69): De CRUZ VERMELHA para BOAVISTA-CASA DA MÚSICA - (Viagem: 0h 6m 49s)
```

Exemplo de Resultados

Rota: Casa da Música → Casino da Póvoa de Varzim

Rota 1 (Rápida): 45 min | 850g CO_2 | 2.5km caminhada

Rota 2 (Ecológica): 58 min | 350g CO_2 | 5.2km caminhada

Rota 3 (Activa): 62 min | 400g CO_2 | 8.1km caminhada

Rota 4 (Balanceada):52 min | 550g CO_2 | 4.8km caminhada

⚡ Nenhuma rota é superior em todos os critérios

✓ Decisão depende de prioridades do utilizador

Principais Realizações

Implementação

- ✓ 3 algoritmos funcionais
- ✓ Integração GTFS completa
- ✓ Grafo multimodal
- ✓ 22 casos de teste
- ✓ Framework avaliação

Inovação

- ✓ Fronteira Pareto real
- ✓ Multi-critério genuíno
- ✓ Dados reais (GTFS)
- ✓ 3 perspectivas diferentes
- ✓ Interface amigável

Impacto Potencial

🚗 Reduzir emissões de carbono

Oferecendo rotas ecológicas alternativas

⏱️ Otimizar tempo de deslocação

Através de roteamento inteligente

🏃 Combater sedentarismo

Com opções que maximizam exercício físico

Sustentabilidade urbana e bem-estar pessoal

Desafios Encontrados

🔧 Técnicos:

Complexidade de multi-objetivo | Integração GTFS

📋 Metodológicos:

Métricas CO_2 consistentes | Tempos realistas

✓ Soluções Implementadas:

Dijkstra multi-label robusto

Validação cruzada entre algoritmos

Testes extensivos (22 casos)

Trabalho Futuro

🌍 Expansão Geográfica

Outras cidades + bike-sharing

🔬 Melhorias Algorítmicas

NSGA-II | Otimização paralela

🎨 Interface Utilizador

Aplicação web interativa | Mapas 3D

♻️ Sustentabilidade

Impacto real | Dados de energia

Conclusões

- ✅ Sistema robusto de roteamento multimodal implementado
- ✅ Algoritmos multi-objetivo de vanguarda
- ✅ Integração com dados reais (GTFS + OSM)
- ✅ Fronteira Pareto rigorosa e validada
- ✅ Demonstração de Computação Inspirada na Natureza para mobilidade urbana sustentável

Avaliação de Pares

PG11605 - Carlos da Mota Bergueira = 0

PG59999 - Diego Jefferson Mendes Silva = 0

PG42201 - Filipa Araújo Pereira = 0

PG7942 - Rui Manuel Martins Marques Rodrigues = 0

Pressuposto: deltas de avaliação podem ser negativos, nulos ou positivos e em cada grupo, a soma dos deltas deve ser sempre igual a 0.00, e, individualmente, nunca podem exceder um.

Obrigado!

Questões?

Repositório: github.com/MIA-CDFR/CIN_GRUPO6
Grupo 6 - CIN 2025 - Universidade do Minho