

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Informática
Programa de Pós-Graduação em Informática

SmartSubway: Um Sistema Colaborativo para Apoiar o Estudo
da Eficiência Energética em Trens Urbanos no Contexto de
Cidades Inteligentes

Mayrton Dias de Queiroz

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em
Informática da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisi-
tos necessários para obtenção do grau de Mestre em Informática.

Área de Concentração: Ciência da Computação
Linha de Pesquisa: Computação Distribuída

Prof^a Dr^a Natasha Correia Queiroz Lino

João Pessoa, Paraíba, Brasil

©Mayrton Dias de Queiroz, Agosto de 2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

Q3s Queiroz, Mayrton Dias de.
 SmartSubway: Um Sistema Colaborativo para Apoiar o
 Estudo da Eficiência Energética em Trens Urbanos no
 Contexto de Cidades Inteligentes / Mayrton Dias de
 Queiroz. - João Pessoa, 2018.
 121 f. : il.

 Orientação: Natasha Correia Queiroz Lino.
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CI.

 1. Sistemas Colaborativos. 2. Algoritmos Genéticos. 3.
 Eficiência Energética. 4. Transportes Inteligentes. 5.
 Cidades Inteligentes. I. Lino, Natasha Correia Queiroz.
 II. Título.

UFPB/BC

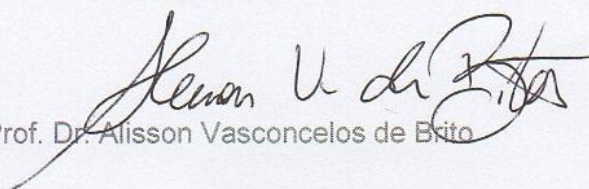


UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA



Ata da Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado de Mayrton Dias de Queiroz, candidato ao título de Mestre em Informática na Área de Sistemas de Computação, realizada em 30 de julho de 2018.

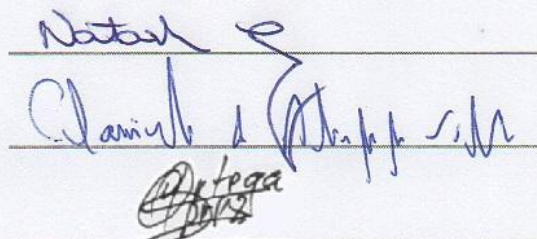
1 Aos trinta dias do mês de julho, do ano de dois mil e dezoito, às oito horas, no Centro de
2 Informática da Universidade Federal da Paraíba, em Mangabeira, reuniram-se os membros
3 da Banca Examinadora constituída para julgar o Trabalho Final do Sr. Mayrton Dias de
4 Queiroz, vinculado a esta Universidade sob a matrícula nº 20161020336, candidato ao grau
5 de Mestre em Informática, na área de "Sistemas de Computação", na linha de pesquisa
6 "Computação Distribuída", do Programa de Pós-Graduação em Informática, da Universidade
7 Federal da Paraíba. A comissão examinadora foi composta pelos professores: Natasha
8 Correia Queiroz Lino (PPGI-UFPB), Orientadora e Presidente da Banca, Claurton de
9 Albuquerque Siebra (PPGI-UFPB), Examinador Interno, Joaquín Pérez Ortega (CNI DT),
10 Examinador Externo à Instituição. Dando início aos trabalhos, o Presidente da Banca,
11 cumprimentou os presentes, comunicou aos mesmos a finalidade da reunião e passou a
12 palavra ao candidato para que o mesmo fizesse a exposição oral do trabalho de dissertação
13 intitulado "SmartSubway: Um Sistema Colaborativo para Apoiar o Estudo da Eficiência
14 Energética em Trens Urbanos no Contexto de Cidades Inteligentes". Concluída a exposição,
15 o candidato foi arguido pela Banca Examinadora que emitiu o seguinte parecer: "**aprovado**".
16 Do ocorrido, eu, Alisson Vasconcelos de Brito, Vice-Coordenador do Programa de Pós-
17 Graduação em Informática, lavrei a presente ata que vai assinada por mim e pelos
18 membros da banca examinadora. João Pessoa, 30 de julho de 2018.


Prof. Dr. Alisson Vasconcelos de Brito

Prof. Dr^a. Natasha Correia Queiroz Lino
Orientadora (PPGI-UFPB)

Prof. Dr. Claurton de Albuquerque Siebra
Examinador Interno (PPGI-UFPB)

Prof. Dr. Joaquín Pérez Ortega
Examinador Externo à Instituição (CNI DT)



Aos meus pais, Sandoval e Maria.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à Deus por ter sido minha fortaleza e meu refúgio, por me ensinar que existe tempo para tudo, tempo de plantar e tempo para colher.

À meu pai Sandoval Dias pela força, à minha mãe Maria José por tudo, principalmente por compreender durante essa fase, à minha avó Santina Maria, por sua fonte de sabedoria, à minha irmã Shirley Dias pelo seu apoio, à meu cunhado Vamberto Costa por sua amizade, à meu sobrinho Zico por trazer alegria e a todos meus tios, primos e familiares.

À minha orientadora Natasha Lino por toda sua paciência, dedicação, incentivo, confiança e apoio durante a graduação e o mestrado, bem como também por todo conhecimento transmitido.

À meu coorientador Gustavo Motta, que eu tive o prazer de ser aluno, por todo seu conhecimento e disponibilidade. Ao coordenador do PPGI, Claurton Siebra, por sempre me ajudar a resolver os problemas durante o mestrado. À Lucidio Cabral, por todo conhecimento. Aos professores que participaram da banca examinadora, Danielle Rousy, Gledson Elias e Joaquin Ortega pelas sugestões e dicas.

À meus grandes amigos Felipe Tiago, Ruan Palmeira e Augusto César por toda ajuda durante esse tempo. Ao meu grande amigo e irmão Vitor Soares, à Carlos Magno pela sua companhia singular e seus conhecimentos, a Felipe Crispim pelo momentos alegres, à Hozana por nos mostrar uma nova forma de entender a vida, à Joanacelle por ajudar com seus conhecimentos e principalmente pela amizade.

À Maria Helena pelas oportunidades oferecidas e mesmo sem saber, por seus conselhos que levo até os dias atuais, aos professores, amigos e funcionários da Escola do Legislativo.

À todos do grupo *Smart Cities*, em especial, Marcelle, Ana Lima, Rodrigo e Ícaro. À todos do LIAA, COMPOSE e LARQSS, em especial, Lucas Vale, Júlio e Carlos Souza.

À todos os funcionários das bibliotecas Central, CCEN, e CTDR, em especial Maria José Paiva por ser um exemplo de profissional que faz o que ama. Aos funcionários que estão todos os dias na luta para preparar a universidade para nossa chegada, que enfrentam muitas dificuldades, mas sempre estão com um sorriso no rosto.

Agradeço à todos que participaram dessa caminhada, que por ventura não esteja citado nas linhas anteriores.

"Quem foi que disse que é o fim
que não há nada a fazer
E que o sol não vencerá a madrugada
De onde vem esta voz
que resolveu te mentir
e que insiste em condenar teu coração
Acima do chão existe o céu
Acima do não existe o sim
Depois dessa curva eu sei
Que existe nova estrada..."
Padre Fábio de Melo

Resumo

Com o aumento populacional torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de soluções que reduzam os impactos gerados pelo aumento no consumo de recursos naturais. A adoção dos transportes elétricos, como trens urbanos, é uma alternativa para a diminuição de gases poluentes na atmosfera e a redução na ocupação do espaço urbano. No entanto, com a utilização de trens elétricos surge o problema do gasto energético, que precisa de soluções sustentáveis. Esse trabalho tem como objetivo criar um método genérico para apoiar especialistas de forma colaborativa, na busca de um perfil de velocidade (do inglês, *speed profile*) que reduza gastos energéticos. Esta abordagem é baseada nos Algoritmos Genéticos da Inteligência Artificial, onde os especialistas podem inserir informações sobre o domínio, colaborando entre si, e de forma que se possa obter vantagens reais com o uso dessa conhecida e comprovadamente eficiente meta heurística usada para problemas de otimização. A fim de obter uma prova de conceito, foi desenvolvido um sistema colaborativo, denominado SmartSubway. Para validação do sistema é considerado um estudo de caso onde são capturados dados referentes ao trajeto de um trem, e análises são realizadas por meio de experimentos com diferentes configurações dos algoritmos genéticos. Como resultados o sistema indica os perfis de velocidade com menores gastos energéticos. Trazendo assim benefícios ambientais, econômicos e de conforto em mobilidade urbana, no contexto de soluções para Cidades Inteligentes.

Palavras-chave: Sistemas Colaborativos, Algoritmos Genéticos, Eficiência Energética, Transportes Inteligentes e Cidades Inteligentes.

Abstract

With the increase in population, it becomes increasingly necessary to develop solutions that reduce the impacts generated by the increase in the consumption of natural resources. The adoption of electric transports, such as urban trains, is an alternative for the reduction of polluting gases in the atmosphere and the reduction in the occupation of urban space. However, with the use of electric trains, comes the problem of energy expenditure, which needs sustainable solutions. This work aims to create a generic method to support specialists in a collaborative way, in search of a speed profile that reduces energy costs. This approach is based on Genetic Algorithms from Artificial Intelligence, where experts can enter information about the domain, collaborating with each other, and in order to obtain real advantages with the use of this well-known and proven efficient meta-heuristic used for optimization problems. In order to obtain a proof of concept, a collaborative system, called SmartSubway, was developed. To validate the system, a case study is considered, where trajectory data is captured, and analyzes are performed through experiments with different configurations of the genetic algorithms. As results, the systems indicates the speed profiles with lower energy costs. Bringing environmental, economic and comfort benefits in urban mobility, in the context of solutions for Smart Cities.

Keywords: Collaborative Systems, Genetic Algorithms, Energy Efficiency, Smart Transportation and Smart Cities.

Lista de Figuras

2.1	Quantidade de trabalhos relacionados com a <i>string</i> de busca “ <i>Smart Cities</i> ” entre os anos de 2010 e 2017 na base <i>Association for Computing Machinery</i> .	6
2.2	Resultado da aplicação <i>Connected Smart Cities</i> .	8
2.3	Porcentagem de emissão de CO_2 referente a cada veículo automatizado.	9
2.4	Distribuição modal do transporte de passageiros.	10
2.5	Ilustração de um possível cenário para aplicação da tabela de horário.	12
2.6	Ilustração do reuso de energia entre dois veículos.	13
2.7	Exemplo de perfis de velocidade entre duas estações.	14
2.8	Exemplo de Algoritmo Genético.	15
2.9	Detalhes da Representação Binária e Representação Real.	16
2.10	Tabela de indivíduos com suas avaliações e a roleta representando os indivíduos de forma proporcional.	19
2.11	<i>Crossover</i> de um Ponto.	20
2.12	Mutação uniforme.	21
2.13	Etapas para a documentação do conhecimento coletivo.	23
2.14	Relação entre as três dimensões do modelo 3C de colaboração.	24
3.1	Resultado da Questão de Pesquisa 1.	30
3.2	Resultados em forma de gráfico e pizza da Questão de Pesquisa 1.	31
3.3	Resultado da Questão de Pesquisa 2.	31
3.4	Resultado da Questão de Pesquisa 3.	32
3.5	Resultado da Questão de Pesquisa 4.	33
4.1	Passos para realização de um experimento.	36
4.2	Etapas da metodologia da pesquisa.	37

4.3	Representação cromossomial.	39
4.4	Processo para validar a função de avaliação.	41
4.5	Criação da População.	42
4.6	Processo para suavização de um perfil de velocidade.	43
4.7	Operador de um ponto do SmartSubway.	45
5.1	Imagens do SmartSubwaySensor.	48
5.2	Estações da CBTU Paraíba.	48
5.3	Página Inicial do SmartSubway	51
5.4	Página com a área de experimentos	51
5.5	Criação de um novo experimento	52
5.6	Página com o histórico das edições de um experimento	52
5.7	Página da definição da representação	53
5.8	Página da definição da função de avaliação	54
5.9	Página da Criação da População Inicial	55
5.10	Página da Definição dos Parâmetros	55
5.11	Página da Definição dos Operadores	56
5.12	Página dos Resultados	57
5.13	Comparação entre os experimentos	58
5.14	Perfil de Velocidade resultante gerado pelo algoritmo para cada experimento	59
A.1	Método do torneio.	69
A.2	<i>Crossover</i> Aritmético.	69
A.3	<i>Crossover</i> Dois Pontos.	70
A.4	<i>Crossover</i> Flat.	70
A.5	<i>Crossover</i> Heurístico.	71
A.6	<i>Crossover</i> Linear.	72
A.7	<i>Crossover</i> Média.	72
A.8	<i>Crossover</i> Média Geométrica.	73
A.9	<i>Crossover</i> Uniforme.	74
A.10	<i>Simulated Binary Crossover</i>	74
E.1	Tela 1 com a página inicial do sistema.	96

E.2	Tela 2 dos experimentos.	97
E.3	Tela 3 com a página de discussão.	98
E.4	Tela 4 de definição do gene.	99
E.5	Tela 5 com a definição da função de avaliação.	100
E.6	Tela 6 de definição da criação da população inicial.	101
E.7	Tela 7 para a definição dos parâmetros.	102
E.8	Tela 8 com a definição dos operadores.	102
E.9	Tela 9 para a análise dos resultados.	103

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre os modos de transporte em relação a emissão de CO_2 , energia média consumida e capacidade.	11
3.1	Engenhos de Busca adotados no Mapeamento Sistemático	28
3.2	Quantidade de artigos em cada engenho de busca.	29
3.3	Questão de Pesquisa 3	33
5.1	Identificação dos operadores de seleção, <i>crossover</i> e mutação dos seis experimentos	50

Lista de Símbolos

ACM : *Association for Computing Machinery*

AG : Algoritmo Genético

CBTU : Companhia Brasileira de Trens Urbanos

CSCW : *Computer Supported Cooperative Work*

ESA : *Department of Economic and Social Affairs*

GEE : Gases do Efeito Estufa

IA : Inteligência Artificial

ONU : Organização das Nações Unidas

PNMU : Política Nacional de Mobilidade Urbana

TIC : Tecnologia da Informação e Comunicação

VLТ : Veículo Leve sobre Trilhos

Lista de Códigos Fonte

4.1	Pseudocódigo do SmartSubway	41
-----	---------------------------------------	----

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Publicações Relacionadas	3
1.4	Estrutura da Dissertação	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Cidades Inteligentes, Transportes Inteligentes e Eficiência Energética	5
2.1.1	Mobilidade Urbana	8
2.1.2	Transportes Elétricos e Eficiência Energética	10
2.2	Algoritmos Genéticos	14
2.2.1	Representação Cromossomial	16
2.2.2	Criação da População Inicial	17
2.2.3	Método de Avaliação	18
2.2.4	Seleção dos Pais	18
2.2.5	Crossover	19
2.2.6	Mutação	20
2.3	Sistemas Colaborativos	22
2.3.1	Modelo 3C de Colaboração	23
2.4	Considerações Finais	24

3	Trabalhos Relacionados	26
3.1	Revisão da Literatura	26
3.1.1	Planejamento	26
3.1.2	Condução	29
3.1.3	Publicação dos Resultados	30
3.2	Considerações Finais	34
4	SmartSubway	35
4.1	Descrição	35
4.1.1	Passos para Realização dos Experimentos	36
4.2	Etapas da Metodologia	37
4.2.1	Etapa 1. Explorar estudos que abordam eficiência energética em trens	37
4.2.2	Etapa 2. Definir o SmartSubway	38
4.2.3	Etapa 3. Implementar o SmartSubway	46
4.2.4	Etapa 4. Validar o SmartSubway	46
5	Avaliação Experimental	47
5.1	Aquisição dos dados	47
5.2	Configuração do Domínio	48
5.2.1	Função de Avaliação	49
5.2.2	Parâmetros de Entrada	49
5.2.3	Operadores Seleccionados	50
5.3	Inserção da Configuração do Domínio no Sistema	50
5.4	Resultados dos Experimentos	58
5.5	Considerações Finais	59
6	Conclusão	61
	Referências Bibliográficas	67
A	Outros Operadores	68
A.1	Operador de Seleção	68
A.1.1	Método do Torneio	68
A.2	Operador Crossover	69

A.2.1	Crossover Aritmético	69
A.2.2	Crossover Dois Pontos	69
A.2.3	Crossover Flat	70
A.2.4	Crossover Heurístico	70
A.2.5	Crossover Linear	71
A.2.6	Crossover Média	72
A.2.7	Crossover Média Geométrica	73
A.2.8	Crossover Uniforme	73
A.2.9	Simulated Binary Crossover	74
B	Artigos do Mapeamento Sistemático	75
C	Lista com as Variáveis e Funções	78
C.1	Artigo 01	78
C.2	Artigo 02	78
C.3	Artigo 03	79
C.4	Artigo 04	80
C.5	Artigo 05	80
C.6	Artigo 06	84
C.7	Artigo 07	85
C.8	Artigo 08	86
C.9	Artigo 09	86
C.10	Artigo 10	86
C.11	Artigo 11	87
C.12	Artigo 12	87
C.13	Artigo 13	89
C.14	Artigo 14	90
C.15	Artigo 15	91
C.16	Artigo 16	91
C.17	Artigo 17	92
C.18	Artigo 18	93

D Gramática	94
D.0.1 Gramática	94
E Protótipo Inicial do SmartSubway	96
E.1 Tela 1 - Página Inicial do Sistema	96
E.2 Tela 2 – Página dos Experimentos	97
E.3 Tela 3 – Página de Discussão	97
E.4 Tela 4 – Definição da Representação	98
E.5 Tela 5 – Definição da Função de Avaliação	99
E.6 Tela 6 – Criação da População Inicial	100
E.7 Tela 7 – Definição dos Parâmetros	101
E.8 Tela 8 – Definição dos Operadores	101
E.9 Tela 9 – Apresentação dos Resultados	102

Capítulo 1

Introdução

Nesse capítulo será apresentada a contextualização do trabalho, o objetivo geral e os objetivos específicos, a motivação para esse estudo e por fim a estrutura do trabalho.

1.1 Contextualização

Diante dos dados apresentados pela Organização das Nações Unidas (ONU), atualmente a população mundial é composta por cerca de 7,3 bilhões de pessoas. No ano de 2015 a ONU disponibilizou um relatório denominado "Perspectivas da População Mundial: A Revisão de 2015" (ONU, 2017), onde estima que a população atingirá a marca de 8,5 bilhões até 2030, e de 9,7 bilhões até 2050. Seguindo esse ritmo, em 2100 chegará a 11,2 bilhões, ou seja, um crescimento de 53%, quando comparado aos dados do ano de 2015. Já o Departamento de Economia e Assuntos Sociais da ONU (ESA, 2017), afirmou que em 2010, a população urbana ultrapassou 80% em relação a população rural e com base nas estimativas realizadas pelo departamento, a previsão é que em 2050 alcance 90%.

De posse desses dados, é possível observar o crescimento populacional, bem como a concentração das pessoas na região urbana. Dessa forma, surgem preocupações com relação aos problemas ambientais, entre eles a emissão dos gases do efeito estufa, poluição sonora, ocupação do espaço urbano, consumo da água e matérias-primas, entre outros.

Nesse contexto, surge uma alternativa para minimizar tais problemas, as cidades inteligentes (do inglês, *Smart Cities*), que podem ser vistas como a inserção das tecnologias de informação e comunicação no ambiente urbano a fim de prover soluções sustentáveis e mo-

dernas (AQUINO et al., 2015). Além disso, esse conceito tem se mostrado fundamental no processo de tornar os centros urbanos mais eficientes, e de oferecer boa qualidade de vida e gestão dos recursos naturais por meio de um processo participativo.

As cidades inteligentes podem ser vistas na perspectiva de eixos ou indicadores, por exemplo, saúde, energia e habitação, mobilidade urbana entre outros (COSTA, 2014) e (AFONSO et al., 2013). Para esse trabalho será enfatizada a mobilidade urbana, pois como afirma Soares (2012) a cidade deve ter um inteligente sistema logístico e de transporte de pessoas, meios eficientes de acessibilidade local e internacional, um sistema de transporte sustentável não agressivo ao meio ambiente.

Em relação aos tipos de transportes urbanos, pode-se destacar os trens elétricos, como uma forma de minimizar os efeitos da emissão de gases poluentes, a diminuição do tráfego de veículos individuais, bem como a redução do consumo dos combustíveis fósseis. No entanto, surge um problema com relação ao gasto de energia, fazendo-se necessária a adoção de medidas que visam a eficiência energética.

Em Huang et al. (2015), os autores fazem um levantamento sobre 18 artigos alinhados ao problema da eficiência energética em trens urbanos, destacando o objetivo principal e as estratégias adotadas. Eles apresentam um comparativo, onde é possível identificar que 50% dos trabalhos adotaram os Algoritmos Genéticos como estratégia. Os Algoritmos Genéticos são *metaheurísticas* que têm uma boa aceitação na literatura para solucionar problemas de otimização, entre eles o problema da eficiência energética em trens elétricos.

Ao explorar trabalhos na literatura, pode-se observar que esses são direcionados a um cenário particular, adotando-se uma técnica de otimização, selecionando-se dados relevantes, como velocidade, distância percorrida, altitude, entre outros, que por sua vez são avaliados para obter o gasto energético nos sistemas metroferroviários. No entanto, nota-se que não existe uma solução que atenda a todos os cenários, fazendo-se necessária a análise conforme surgem alterações, como mudança de trajeto, inserção ou remoção de estações, alteração do horário, inserção ou remoção de um veículo entre outras.

Ao iniciar um experimento o especialista irá identificar a técnica de otimização, selecionar os dados e a forma de avaliação, em seguida será realizada a implementação e análise da solução obtida. Dessa forma o especialista irá contribuir a luz das suas competências, seja um Engenheiro Elétrico, Engenheiro Mecânico, Cientista da Computação, entre outros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho consiste em criar um sistema colaborativo, denominado Smart-Subway, que auxilie especialistas na construção e manutenção de experimentos com a finalidade de diminuir o gasto energético em trens.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, esse trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- **Objetivo 1** - Obter um levantamento sobre as variáveis e parâmetros adotados em trabalhos que abordam eficiência energética;
- **Objetivo 2** - Identificar um método para usuários inserirem a função de avaliação e informações sobre o domínio de forma colaborativa;
- **Objetivo 3** - Dispor de uma ferramenta para avaliação da eficiência energética por meio de perfis de velocidade;
- **Objetivo 4** - Obter uma alternativa para realizar comparações entre os resultados obtidos dos experimentos efetuado pelos especialistas;
- **Objetivo 5** - Identificar a aceitação do sistema através de um estudo de caso, matematicamente, e por uma ferramenta de experiência de usuário.

1.3 Publicações Relacionadas

Com a realização desse trabalho, foi possível realizar três publicação. A primeira publicação no Encontro Unificado de Computação (ENUCOMP) (QUEIROZ et al., 2016). A segunda publicação no Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (QUEIROZ et al., 2019). A terceira publicação no *Brazilian Journal of Development* (QUEIROZ et al., 2020).

- Queiroz, M., Martins, M., Daniel, R. G., & Lino, N. (2016). Um estudo exploratório sobre o uso de algoritmos genéticos para o problema de eficiência energética em trens urbanos. **Anais do IX ENUCOMP**.

- de Queiroz, M. D., Palmeira, R. A., de Melo, F. T., Daniel, R. G., de A. Rique, Í. T., Guimarães, A. C., Martins, M. & Lino, N. C. A Framework to Support Experts in the Study of Energy Efficiency in Urban Trains. In: **Proceedings of the XV Brazilian Symposium on Information Systems**. 2019. p. 1-8.
- de Queiroz, M. D., Palmeira, R. A. P., de Melo, F. T. S., Daniel, R. G., de Alexandria Rique, I. T., Guimarães, A. C. D. B. P., Martins, M. & Lino, N. C. Q. Um Framework para Apoiar Especialistas no Estudo da Eficiência Energética em Trens Urbanos/A Framework to Support Experts in the Study of Energy Efficiency in Urban Trains. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 34227-34250, 2020.

1.4 Estrutura da Dissertação

O conteúdo desse trabalho está dividido em seis capítulos. Nesse capítulo foi apresentado a contextualização, objetivos e divisão do trabalho.

No Capítulo 2, da Fundamentação Teórica, serão apresentadas as principais definições sobre cidades inteligentes, algoritmos genéticos e sistemas colaborativos. No final do capítulo as considerações finais.

No Capítulo 3, os Trabalhos Relacionados, mostrando o Mapeamento Sistemático e suas fases principais.

No Capítulo 4, sobre SmartSubway, apresenta os passos básicos para um especialista realizar um experimento e a Metodologia, onde serão apresentadas as etapas adotadas para a realização dessa pesquisa.

No Capítulo 5, sobre a Avaliação, serão apresentados os detalhes sobre o estudo de caso do SmartSubway.

No Capítulo 6, serão apresentadas as conclusões e os trabalhos futuro.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão dos principais conceitos necessários para o desenvolvimento desse trabalho, sendo esses as Cidades Inteligentes, Algoritmos Genéticos e Sistemas Colaborativos.

2.1 Cidades Inteligentes, Transportes Inteligentes e Eficiência Energética

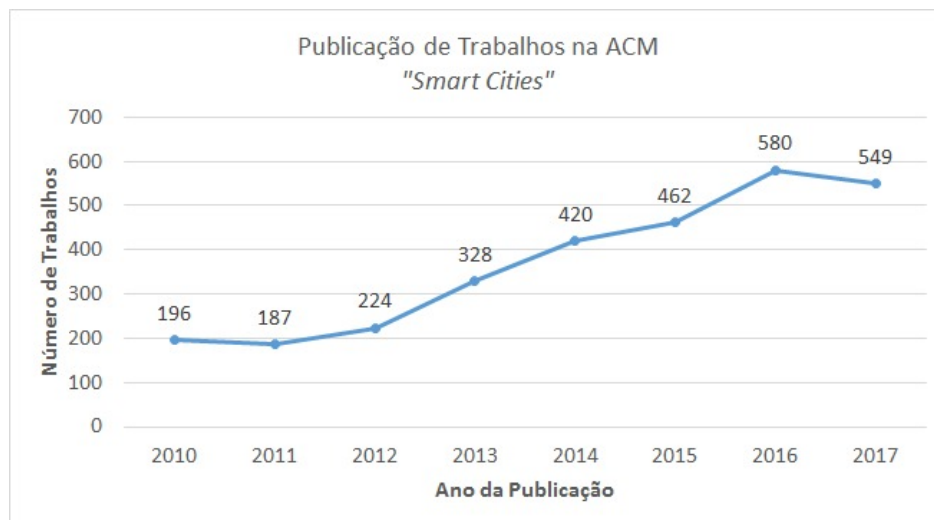
No Trabalho de Falcão, Baptista e Menezes (2012), os autores informam que na década de 1990 iniciou-se a utilização da expressão “Cidades Inteligentes” (do inglês, *Smart Cities*). Na Figura 2.1 é apresentado um gráfico sobre a quantidade de trabalhos relacionados com a *string* de busca “*Smart Cities*” na base *Association for Computing Machinery* (ACM, 2017) entre os anos de 2010 e novembro de 2017. Ao relacionar os trabalhos com seus respectivos anos, é possível identificar o crescimento do número de trabalhos que abordam o tema *Smart Cities*.

Ao investigar trabalhos na literatura científica, é possível observar termos utilizados como sinônimos de Cidades Inteligentes. Entre eles, destacam-se Cidades Digitais (do inglês, *Digital Cities*), Cidades Cabeadas (do inglês, *Wired Cities*), Cidades do Conhecimento (do inglês, *Knowledge Cities*), Cidades Verdes (do inglês, *Green Cities*), Cidades Inteligentes (do inglês, *Intelligent Cities*) e outros (SILVA, 2017). Dentre as definições sobre Cidades Inteligentes encontradas durante a realização desse trabalho, algumas foram selecionadas e

apresentadas abaixo:

1. "Cidades Inteligentes são ecossistemas urbanos inovadores caracterizados por uma utilização generalizada de Tecnologias da Informação e Comunicação, as TIC's, na gestão de seus recursos" (DEPINÉ, 2016, p. 05).
2. "O termo "Cidades Inteligentes" refere-se a um dispositivo estratégico para o planejamento e gestão inteligente de cidades" (GAMA; ALVARO; PEIXOTO, 2012, p. 150).
3. "Uma Cidade Inteligente se forma quando investimentos em capital humano e social e tradicional (transporte) e modernas infraestruturas de tecnologias de comunicação (TIC) alimentam um crescimento econômico sustentável e qualidade de vida, com uma gestão sábia dos recursos naturais por meio de uma governança participativa"(CARAGLIU; BO; NIJKAMP, 2011).

Figura 2.1: Quantidade de trabalhos relacionados com a *string* de busca "Smart Cities" entre os anos de 2010 e 2017 na base *Association for Computing Machinery*.



Fonte: ACM (2017)

Diante das definições sobre Cidades Inteligentes enumeradas acima, é possível observar que, de maneira geral, essas definições destacam que as Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) são ferramentas necessárias para melhorar a infraestrutura e serviços da cidade, consequentemente trazendo melhor qualidade de vida.

Dentre os aspectos abordados nos trabalhos que relatam sobre Cidades Inteligentes, um que se alinha ao presente trabalho é a divisão dos principais indicadores em Cidades Inteli-

gentes. No trabalho de Afonso et al. (2015) é apresentada uma metodologia que obtém dados públicos com objetivo de realizar comparações e formação de grupos em cidades brasileiras a partir de indicadores, tais como água, educação, energia, governança, moradia, ambiente, saúde, segurança, tecnologia e transporte.

Já no trabalho de Teixeira e Catapan (2016), são listadas as 10 cidades mais inteligentes do Brasil, considerando o *ranking* informado pela aplicação *Connected Smart Cities*, que no mês de junho apresentou uma listagem referente ao ano de 2016 com as 50 cidades brasileiras com maior potencial de desenvolvimento. Para determinar a posição de cada cidade a aplicação faz uso de 11 setores, sendo eles mobilidade, urbanismo, meio ambiente, energia, tecnologia e inovação, saúde, segurança, educação, empreendedorismo, economia e governança.

A aplicação *Connected Smart Cities*¹ faz uso de infográficos para melhorar a visualização dos setores selecionados pela mesma. Na Figura 2.2, pode ser visto uma tela referente à aplicação, onde o usuário pode selecionar um dos 11 setores, na parte superior, fazendo com que seja apresentado o *ranking* com as dez cidades com as melhores posições. No exemplo dessa figura, foi selecionado o setor Mobilidade e Acessibilidade. Outras informações adicionais são apresentadas na parte inferior esquerda, tais como Melhores Posições por Porte e Melhores posições por Região.

Apesar das nomenclaturas distintas com relação às divisões, ou seja, eixo em Costa (2014), setores em Sator (2017) e indicadores em Afonso et al. (2015), o objetivo desses trabalhos consiste em realizar uma distinção sobre pontos relacionados as Cidades Inteligentes. Sobre estes aspectos Frare (2014) faz a seguinte observação:

São “instrumentos” que permitem identificar e medir aspectos relacionados a um determinado conceito, fenômeno, problema ou resultado de uma intervenção na realidade. Sua principal finalidade é traduzir, de forma mensurável, determinado aspecto de uma realidade dada ou construída, de maneira a tornar operacional a sua observação e avaliação. É uma abstração que procura expressar uma dada realidade. (FRARE, 2014, p. 173).

¹Disponível em : <<http://www.connectedsmartcities.com.br/>>

Figura 2.2: Resultado da aplicação *Connected Smart Cities*.

Fonte: Sator (2017).

2.1.1 Mobilidade Urbana

Atualmente, um desafio enfrentado pelas cidades diz respeito a mobilidade urbana, ou seja, oferecer transporte de qualidade com capacidade de atender a demanda de deslocamentos atual e futura (COSTA, 2014). Em relação à frota de veículos automotores do Brasil, no trabalho de GIZ (2017), ele destaca que a frota brasileira ultrapassou a marca de 50 milhões, sendo estes automóveis, motocicletas, caminhões e ônibus.

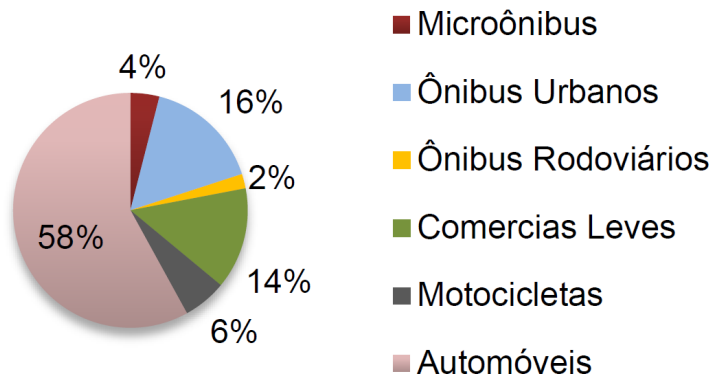
Com o aumento da frota de veículos automotores, uma causa preocupante é a emissão de CO_2 . A expectativa é que em 2020 a quantidade de emissão desse gás poluente causado pelos veículos atinjam a 135,4 milhões de toneladas, o que, comparado ao ano de 2010, corresponde a um aumento de 52% (GIZ, 2017). A Figura 2.3 possui um gráfico de pizza referente à porcentagem de emissão de CO_2 para cada tipo de veículo automotor.

Conforme mostra a Figura 2.3, a maior proporção de emissão de CO_2 está associada aos automóveis. Em Castro et al. (2012), o autor informa que a distribuição desproporcional pela preferência em transporte particular motorizado, como automóveis, tem gerado congestionamentos viários, acidentes e poluição atmosférica, causando grandes impactos na sociedade e

no meio ambiente.

Figura 2.3: Porcentagem de emissão de CO_2 referente a cada veículo automatizado.

Emissões de CO_2 no transporte de passageiros



Fonte: GIZ (2017)

Então, se faz necessário estabelecer diretrizes que deem apoio as cidades, no que diz respeito a mobilidade urbana sustentável. No Brasil, no ano 2012, foi desenvolvida a Política Nacional de Mobilidade Urbana – PNMU conforme é descrita na Lei 12.587/2012, onde Conceição e Guimarães (2016) a descreve da seguinte forma:

A PNMU visa promover a mobilidade urbana sustentável, com equidade e universalidade para a população brasileira por meio de ações entre os entes federativos considerando a participação da sociedade e estabelece diretrizes para contribuir com o crescimento urbano sustentável e o uso democrático dos espaços públicos, fornecendo um apoio à circulação segura, rápida e confortável, priorizando os transportes coletivos e os meios não motorizados. (CONCEIÇÃO; GUIMARÃES, 2016, p. 3).

Como intuito que seja atendida a PNMU, é necessário que as cidades criem planos que se alinhem às diretrizes. Conforme descreve a lei no artigo 24 em Brasil (2012) “O Plano de Mobilidade Urbana é o instrumento de efetivação da Política Nacional de Mobilidade Urbana e deverá contemplar os princípios, os objetivos e as diretrizes desta Lei”. Os planos devem enfatizar a adoção de transportes coletivos e a circulação de pedestres, de forma que o acesso ao espaço público seja democrático, e a reorganização do sistema viário possua ações de promoção à inclusão social (ÁLVARES; COELHO; SOUZA, 2016).

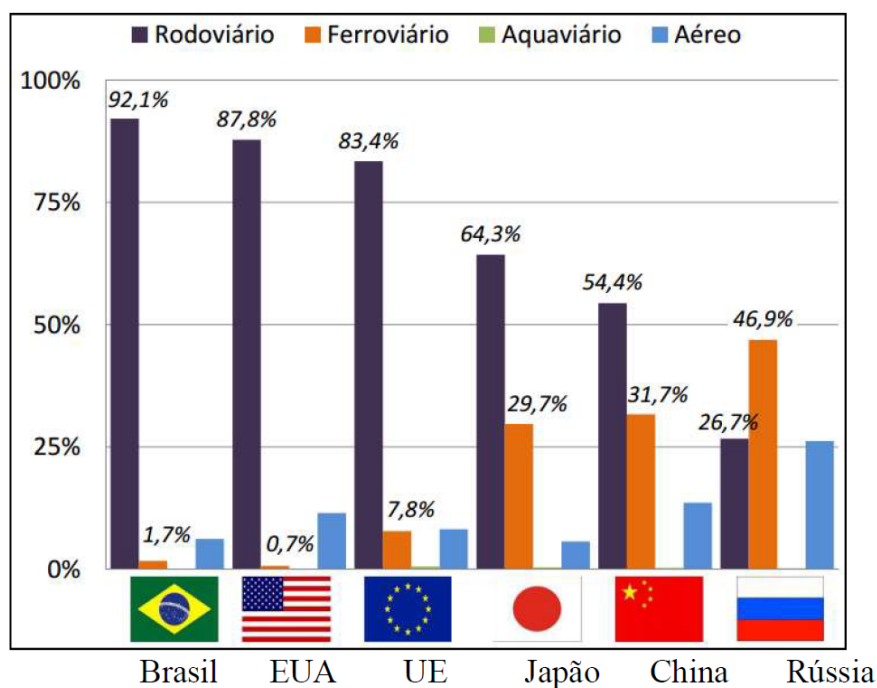
Pensar em um plano de mobilidade para 2040 pode parecer distante, no entanto, com o surgimento de novas tecnologias, mudanças em relação aos combustíveis, do veículo elétrico

e a relação atual com o automóvel, onde as soluções encontradas atualmente podem tornar-se obsoletas, dessa forma, se faz necessária a adoção de novas soluções (VECHI, 2016).

2.1.2 Transportes Elétricos e Eficiência Energética

Na Figura 2.4 elaborada no trabalho de Monzoni e Nicolletti (2014), baseada nos dados fornecidos pelo Ministério de Minas e Energia, os autores apresentaram os dados referentes a distribuição modal do transporte de passageiros, sendo estes o rodoviário, ferroviário, aquaviário e aéreo. Para realização do comparativo foi adotada a métrica *bilhoes de passageiros/km* entre seis países, que são Brasil, Estados Unidos da América, União Europeia², Japão, China e Rússia.

Figura 2.4: Distribuição modal do transporte de passageiros.



Fonte: Monzoni e Nicolletti (2014)

Com base na Figura 2.4, é possível observar que no Brasil o transporte de passageiro dominante é o rodoviário, obtendo 92,1%. Já na Rússia destaca-se o transporte Ferroviário, atingindo a marca de 46,9%. Cada país possui uma distribuição distinta sobre esses quatro

²A União Europeia é um bloco econômico, político e social composto por 28 países europeus que são: Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Chipre, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Países Baixos (Holanda), Polônia, Portugal, Reino Unido, República Tcheca, Romênia e Suécia.

modos de transporte, que por sua vez se diferem quanto ao impacto ambiental e quantidade de passageiros.

Ainda no trabalho de Monzoni e Nicolletti (2014), os autores organizaram dados encontrados em trabalhos na literatura, os quais foram organizados na Tabela 2.1. Nessa tabela são exibidos os dados sobre ônibus, automóvel e veículo leve sobre trilhos (VLT) com relação à emissão de CO_2 , energia média consumida e capacidade de transporte. Na tabela, observa-se o valor elevado da emissão de CO_2 e a baixa capacidade de transporte do automóvel, quando comparado aos demais. Já o VLT possui baixo valor de emissão de CO_2 e alto valor na capacidade de transporte.

Tabela 2.1: Comparação entre os modos de transporte em relação a emissão de CO_2 , energia média consumida e capacidade.

Modo de Transporte	Emissões CO_2 ($gCO_2/pass.km$)	Energia média consumida ($kJ/pass.km$)	Capacidade de Transporte ($pass/veiculo$)
Ônibus Convencional com MCI* traseiro a diesel	16	266	80
Automóvel compacto com MCI* gasolina	127	2766	1,3
VLT	2	183	225

MCI* = motor de combustão

Fonte: Monzoni e Nicolletti (2014)

Diante dessas informações, se faz necessária a participação do setor público em investimentos a fim de que haja uma maior diversificação dos modos de transporte urbanos coletivos, por exemplo, trem e metrô, que reduzem a intensidade carbônica (MONZONI; NICOLLETTI, 2014). "O transporte ferroviário pode ser um importante aliado tanto para a melhoria da mobilidade urbana quanto para o meio, principalmente porque atende uma alta capacidade de transporte emitindo menos gases do efeito estufa (GEE) "(BORTOLAZZO; CAVALLAZZI; VALENTE, 2016).

Com a adoção do sistema ferroviário, em especial os trens elétricos, nasce uma preocupação com o gasto energético. Diante do aumento do preço da energia e as preocupações ambientais, o uso de técnicas de operação eficientes em termos de energia está chamando atenção de pesquisadores como um dos métodos efetivos para redução de custos e consumo de energia (SU et al., 2013).

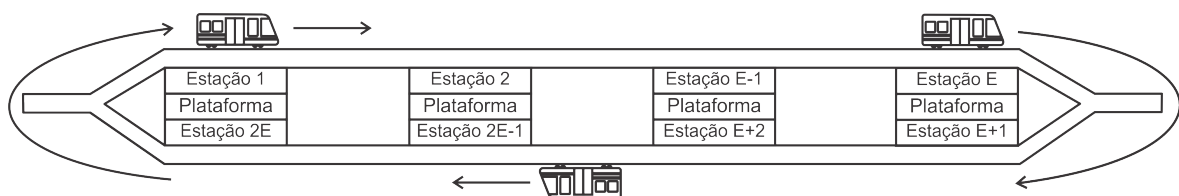
No que diz respeito a Eficiência Energética é possível destacar três abordagens conhecidas como tabela de horário (do inglês, *Timetable*) (GREENWADE, 1993), (YONG et al., 2011) e (CUCALA et al., 2012), reuso de energia (do inglês, *Regenerative Energy*) (LI; LO, 2014), (YANG et al., 2015) e (GONG et al., 2014) e perfil de velocidade (do inglês, *Speed Profile*) (FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ; FERNÁNDEZ-CARDADOR; CUCALA, 2015), (HAMID et al., 2016) e (SICRE; CUCALA; FERNÁNDEZ-CARDADOR, 2014). Cada uma dessas abordagens possui características específicas de forma que é possível utilizar uma ou uma combinação dessas abordagens a fim de diminuir o gasto energético.

Na abordagem tabela de horário a preocupação principal é com relação a distribuição do tempo de todos os veículos no sistema metroferroviário. Ou seja definir:

- tempo necessário para o embarque e desembarque de passageiros;
- tempo entre as viagens;
- tempo para o veículo transitar entre as estações;
- tempo para o veículo realizar manobras.

Na Figura 2.5, é possível observar uma ilustração de um cenário em que pode ser aplicada a tabela de horário. Nesse caso, para que o trajeto seja realizado se faz necessário trafegar por todas as estações, ou seja, o veículo sairá da Estação 1 até a Estação E no itinerário origem até o destino. Chegando na Estação E , o veículo realizará uma manobra se posicionando na Estação $E + 1$, em seguida o mesmo irá realizar o trajeto retornando a origem, mais especificamente para a Estação $2E$ completando assim a trajetória que passa por todas as estações.

Figura 2.5: Ilustração de um possível cenário para aplicação da tabela de horário.

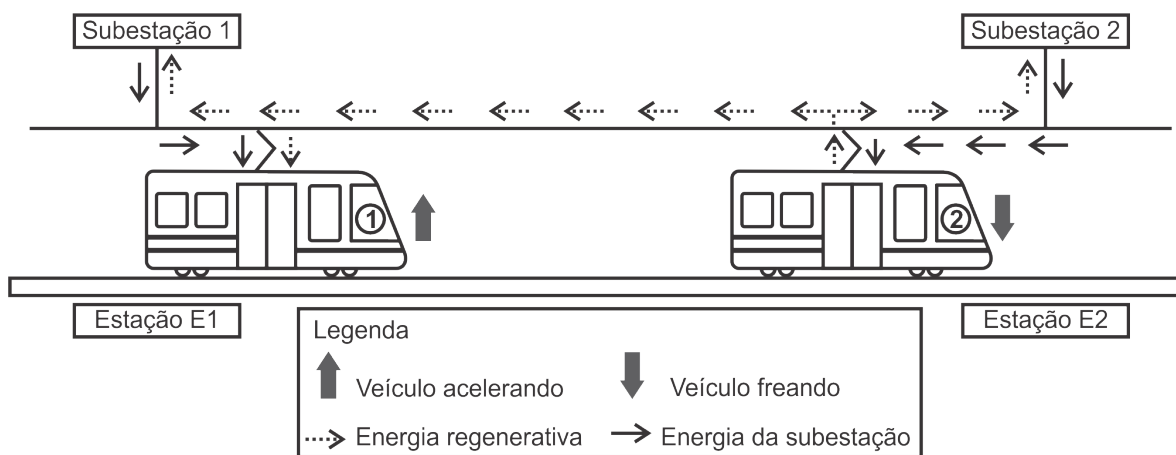


Fonte: Elaborada pelo autor.

Já no reuso de energia, o ganho energético é obtido através da transferência de energia de um veículo para outro. Considere o cenário ilustrado na Figura 2.6 onde é possível observar

dois veículos, duas estações e duas subestações. Nesse caso, ao passo que o veículo 2 se aproxima da Estação *E2*, o mesmo inicia o processo de frenagem. Simultaneamente, o sistema do veículo que converterá a energia cinética gerada pela frenagem em energia elétrica que será disponibilizada para o veículo mais próximo e para as subestações adjacentes. Ainda no mesmo cenário, o maquinista ao acelerar o veículo 1 para sair da Estação *E1*, faz com que seja necessário uma quantidade maior de energia. Sendo assim, o veículo 1 receberá a energia fornecida pelo veículo 2, somada a energia da Subestação 1.

Figura 2.6: Ilustração do reuso de energia entre dois veículos.



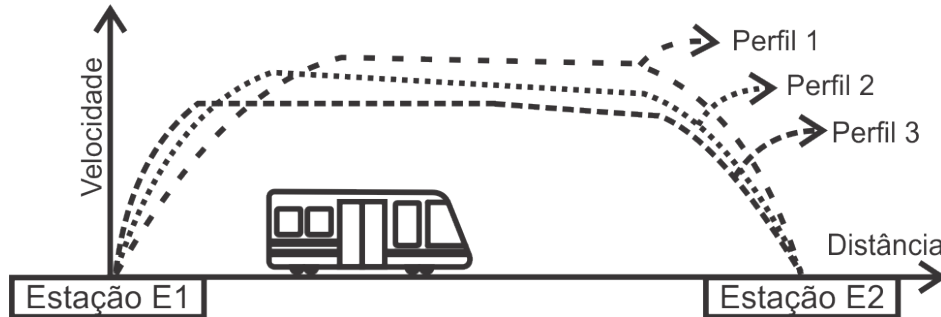
Fonte: Elaborada pelo autor.

É válido destacar que essa abordagem, de reuso de energia, só é possível se o veículo possuir um sistema para captar a energia. Adicionalmente essa abordagem é adotada em conjunto com a abordagem de tabela de horário, onde serão sincronizados os horários de chegada e saída de dois veículos. Caso a energia obtida não seja utilizada por outro veículo, então a mesma irá para subestação que será utilizada para iluminação ou outros serviços necessário na estação.

A estratégia do perfil de velocidade consiste em encontrar um perfil de condução energeticamente eficiente durante o percurso do veículo. Na Figura 2.7 é possível observar uma ilustração de um veículo saindo de uma Estação *E1* até a Estação *E2*, no entanto, ao realizar o trajeto, o mesmo possui um valor para a velocidade em uma determinada posição, formando assim o perfil de velocidade. Nessa mesma figura, observam-se três perfis distintos que podem ser realizados por maquinistas diferentes ou condições distintas, como número de passageiros, modelo do veículo, entre outras. Diante dos diversos perfis existentes, é impor-

tante ressaltar que o tempo necessário para realizar todo o trajeto deve obedecer ao intervalo determinado pela tabela de horário.

Figura 2.7: Exemplo de perfis de velocidade entre duas estações.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As três abordagens citadas anteriormente são importantes para a eficiência energética, no entanto para esse trabalho foi dada ênfase ao perfil de velocidade, visto que ele busca encontrar o perfil com menor gasto energético em um trecho do sistema metroferroviário.

2.2 Algoritmos Genéticos

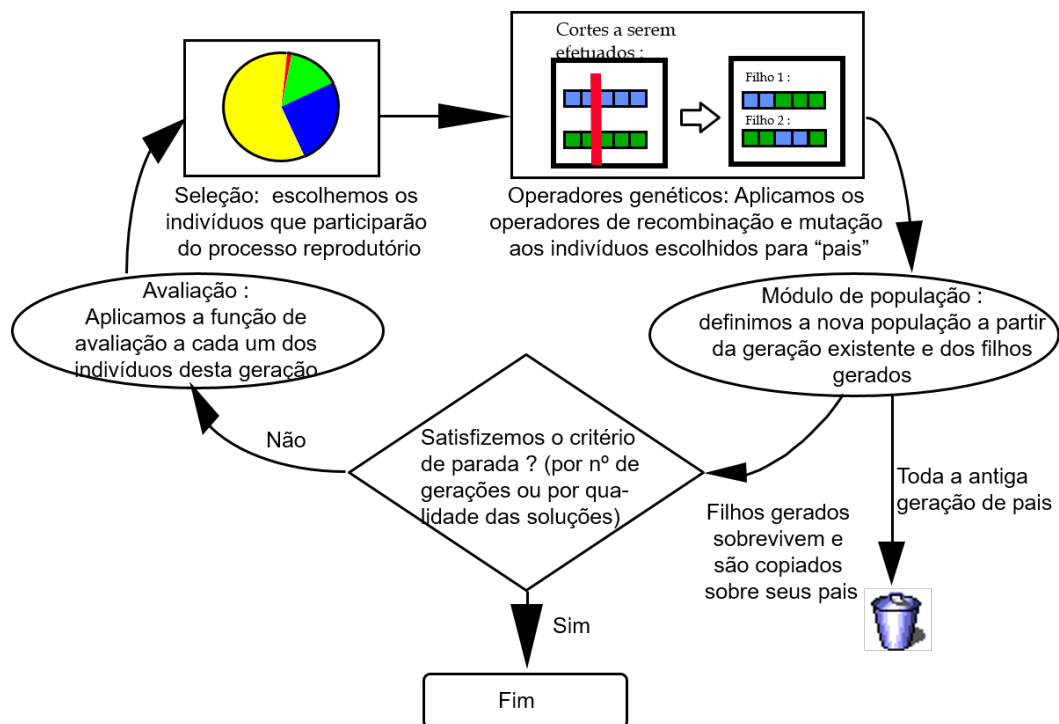
No trabalho de Mitchell (1998), o autor relata sobre o surgimento dos computadores eletrônicos e seus impactos na comunidade científica. Por volta dos anos 80, os computadores não se limitavam a realizar cálculos de trajetórias de mísseis ou decifrar códigos militares. Eles eram utilizados por pesquisadores que realizavam estudos com o objetivo de modelar um cérebro para imitar a aprendizagem humana e simular a evolução biológica. Surgem então alguns campos como as redes neurais, aprendizagem de máquina e computação evolucionária, sendo essa última o campo onde está situado os Algoritmos Genéticos.

Os Algoritmos Genéticos (do inglês, *Genetic Algorithms*) – AGs, foram criados por John Holland. Os AGs tinham como objetivo inicial estudar formalmente o fenômeno de adaptação natural, tal como ocorre na natureza e para desenvolver maneiras pelas quais os mecanismos de adaptação natural podem ser importados para sistemas informáticos. No entanto, pesquisadores identificaram que os AGs poderiam ser adotados para solucionar problemas que possuíam um grau de combinação elevado, caracterizando assim os AGs como uma técnica de otimização.

Os AGs podem ser definidos como uma técnica de busca baseada numa metáfora do processo biológico de evolução natural (LINDEN, 2012). Os AGs são técnicas de otimização global, possuindo a característica de explorar o espaço de busca através dos operadores.

Para solucionar um problema com AGs, tem-se a necessidade de analisar os passos básicos do algoritmo a fim de identificar quais são as adaptações necessárias para que o mesmo atenda de maneira efetiva ao problema. Dessa forma, pode-se notar na Figura 2.8 o algoritmo básico proposto por Linden (2012) que segue os passos listados em seguida.

Figura 2.8: Exemplo de Algoritmo Genético.



Fonte: Linden (2012).

1. Inicialização da população de cromossomos;
2. Avaliação individual de cada cromossomo da população gerada;
3. Seleção dos pais da população;
4. Aplicação dos operadores de *crossover* e de mutação no pais selecionados para obtenção de novos cromossomos da próxima geração;
5. Exclusão dos pais da população atual;

6. Avaliação dos filhos e inserção na nova população;
7. Verificação se já atende ao número de gerações, ou se o melhor indivíduo já satisfaz os requerimentos de desempenho. Caso positivo, será retornado o melhor indivíduo, caso contrário deve-se seguir para o passo 3.

2.2.1 Representação Cromossomial

A representação cromossomial é fundamental para o algoritmo genético, sendo a maneira básica de traduzir as informações de um determinado problema para que essas possuam um tratamento viável no computador (LINDEN, 2012). Em outras palavras, a representação cromossomial é a forma de conectar as propriedades relevantes do mundo real ao algoritmo genético, com a finalidade de se obter o melhor resultado possível.

Existem vários tipos de representação cromossomial, como a binária, a de números reais, permutação de elementos para AG baseado em ordem, lista de regras, ou qualquer estrutura de dados necessária (LINDEN, 2012). Na Figura 2.9 é possível identificar os dois principais tipos de representação, ou seja a representação binária e a representação real.

Figura 2.9: Detalhes da Representação Binária e Representação Real.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Representação Binária os genes são representados por dois valores, 0 e 1. No entanto, ao observar a figura é possível identificar dois cromossomos na região delimitada pela Re-

apresentação Binária, onde o cromossomo identificado por A pode ser adotado para auxiliar na solução, por exemplo, do Problema da Mochila, onde cada G_i representa a ausência ou presença de um item na mochila, nesse caso cada G_i está associado a um item.

Já no cromossomo B identifica-se que possui mesmo tamanho e composição de valores binários se comparado ao cromossomo A , no entanto é importante destacar que, nesse caso, o valor de uma variável é composto por uma quantidade de bits do cromossomo. Um exemplo de problema para esse tipo de representação seria encontrar o valor máximo, ou mínimo, de uma função de duas variáveis $z = f(x, y)$, então nesse exemplo, os cinco primeiros *bits* representam a variável x , que transformando de binário para decimal possui o valor 19, e a variável y é composta por 3 *bits*, resultando no valor 5 em decimal.

Fazendo um comparativo entre esses dois tipos de cromossomos representados na forma binária, é válido destacar que, para extrair as informações do cromossomo B , é necessário realizar um cálculo adicional para fazer as devidas conversões de binário para real, seja inteiro ou decimal, porém a adoção do cromossomo B torna-se uma alternativa para armazenar um ou vários valores reais e com precisão distinta, pois o tamanho de *bits* para cada variável é definido conforme a necessidade do problema.

A Representação Real, apresentada na Figura 4.3, tem a capacidade de armazenar valores inteiros e valores reais, como mostrado na figura através do Cromossomo C e Cromossomo D , respectivamente. A vantagem da adoção desse tipo de representação, quando comparada à representação binária, é que nesse tipo não necessita-se de um cálculo adicional para extrair os valores das variáveis. Com relação à precisão entre o Cromossomo B e os de representação real, é possível notar que no primeiro a quantidade de bits é definida inicialmente, já no segundo, é definida pela quantidade de *bits* que a linguagem de programação utilizada especifica para os tipos inteiro e ponto flutuante.

2.2.2 Criação da População Inicial

A criação da população inicial P_0 de um algoritmo genético básico pode ser vista como a geração de indivíduos que irão compor a população inicial. Uma estratégia adotada na literatura é a inicialização aleatória, que através de funções aleatórias, gera os indivíduos, "sendo este um recurso simples que visa fornecer maior biodiversidade, fundamental para garantir uma boa abrangência do espaço de busca" (TIMÓTEO, 2002). Em linhas gerais, ela

gera uma boa distribuição e, juntamente com os operadores de mutação, devolvem uma boa exploração do espaço de busca.

2.2.3 Método de Avaliação

Conforme afirma Linden (2012), a método de avaliação é a maneira utilizada pelos AGs para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. Pode-se entendê-la mais facilmente tratando a método de avaliação como uma nota dada ao indivíduo na resolução do problema. Essa nota será usada para a escolha dos indivíduos pelo operador de seleção de pais.

2.2.4 Seleção dos Pais

O método dos seleção de pais se inspira no mecanismo de seleção natural, a qual atua sobre as espécies biológicas, em que os pais mais capazes geram mais filhos. Ao mesmo tempo ela permite que os pais menos aptos também gerem descendentes (LINDEN, 2012).

Nesta etapa, os operadores de seleção devem priorizar os indivíduos que possuem as melhores avaliações, todavia, sem desprezar os indivíduos com baixa avaliação. Pois desse modo, caso sejam selecionados só os melhores, nas gerações seguintes, os indivíduos começará a ficar muito semelhantes e faltará diversidade para que a população possa progredir de forma satisfatória, causando o efeito chamado de **convergência genética**.

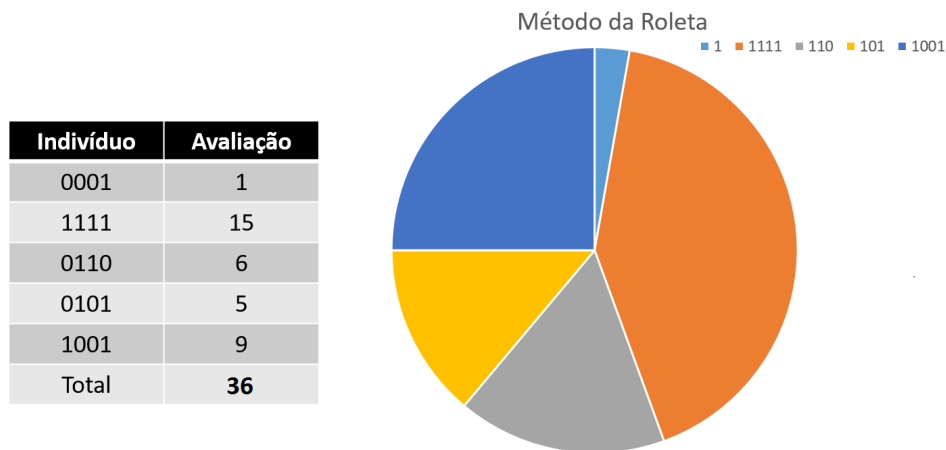
Método da Roleta

Para melhor entendimento do método da roleta pode-se observar a Figura 2.10, que possui uma tabela com cinco indivíduos e suas respectivas avaliações. No entanto, vale destacar que, na prática, dificilmente será criada uma população com cinco indivíduos, mas esse exemplo vale para fins didáticos. Então, como foi citado anteriormente, é preciso prover a chance para cada indivíduo. Como descreve Linden (2012), nesse método é criado uma roleta (virtual), na qual cada cromossomo recebe um pedaço proporcional à sua avaliação.

De posse do valor da soma total das avaliações dos indivíduos, pode-se verificar a proporção de cada indivíduo na roleta, como mostrado na Figura 2.10. No passo seguinte, é sorteado um valor aleatoriamente de 1 até o valor da soma total das avaliações, a fim de

que verifique-se em qual porção da roleta ficou o número sorteado e assim descobrir qual o indivíduo que corresponde ao número sorteado.

Figura 2.10: Tabela de indivíduos com suas avaliações e a roleta representando os indivíduos de forma proporcional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.5 Crossover

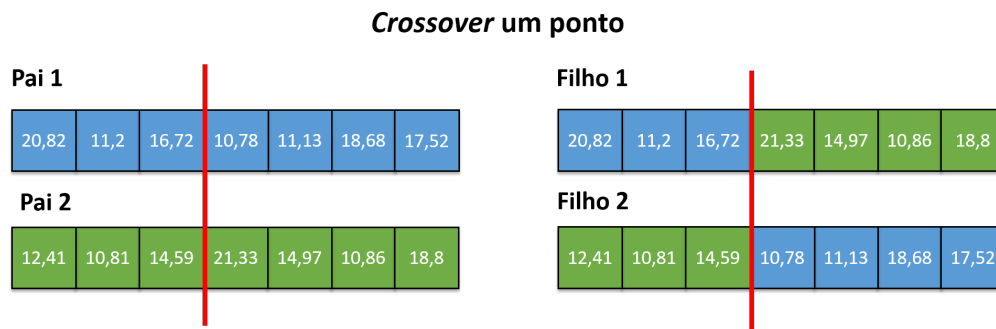
O método *crossover*, ou cruzamento, é inspirado no processo de recombinação das cadeias de DNA necessário na reprodução dos indivíduos biológicos, onde os filhos são resultado da combinação do material genético dos pais, herdando assim suas características (SIMON, 2013). Já Souza (2014) complementa que os algoritmos genéticos contínuos possuem vários modos para realizar o cruzamento, mas sua escolha está relacionada ao tipo de representação adotada. A seguir é detalhado um desses métodos de *crossover*.

Crossover de um Ponto

O operador *crossover* de um ponto é aplicado em dois cromossomos de mesmo comprimento, seguindo as seguintes etapas:

- Selecionar um ponto aleatório para o cruzamento;
- Separar cada cromossomo em duas partes, dividindo-o no ponto de cruzamento;

- Recombinar os cromossomos separados, combinando a parte inicial de um com a parte final do outro e vice-versa, para produzir dois novos cromossomos (COPPIN, 2015), como mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: *Crossover* de um Ponto.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.6 Mutação

Após a reprodução inicia-se a etapa de mutação. A mutação na biologia é relativamente rara, pelo menos na medida em que afeta sensivelmente a prole (LINDEN, 2012). Na maioria das implementações de AGs a mutação também é rara (na ordem de 2%). A escolha da taxa de mutação está relacionada ao problema, o tamanho da população, codificação, entre outros fatores. Independentemente da sua frequência, a mutação é importante porque permite que o processo evolutivo explore novas soluções potenciais para o problema.

Se alguma informação genética está em falta, a partir da população, a mutação fornece a possibilidade de injetar essa informação para a população (SIMON, 2013). Logo, pode-se dizer que o operador de mutação é uma heurística exploratória, injetando novos cromossomos na população e permitindo que o AG busque soluções fora dos limites definidos pela população (VOSE, 1999). A seguir é detalhado um desses métodos de mutação.

Mutação Uniforme

Em Souza (2014), o autor afirma que na mutação uniforme ocorre a troca do valor de um gene por um número aleatório uniforme no intervalo $[a_i, b_i]$ aceito pelo gene. Caso seja

preciso fazer a mutação em um determinado k – *esimo* gene p do cromossomo, então o filho c será calculado conforme:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i) & i = k \\ p_i & i \neq k \end{cases}$$

Onde:

c_i : gene localizado na posição i do cromossomo gerado pelo operador de mutação

a_i e b_i : corresponde aos valores do intervalo

U : função que devolve um valor dentro de um intervalo com distribuição uniforme

p_i : gene localizado na posição i do cromossomo sem as alterações do operador de mutação

Na Figura 2.12, é possível identificar como funciona o operador de mutação uniforme. De posse de um filho da nova geração o operador de mutação percorre cada gene p_i do cromossomo, de forma que a cada iteração que corresponde a um determinado gene p_i é gerado um valor aleatoriamente dentro do intervalo $[0, 1)$. Logo em seguida é feita uma verificação se o valor gerado é menor que a taxa de mutação previamente definida, então será aplicada a mutação no gene c_i , caso contrário o gene c_i recebe o conteúdo do gene p_i permanecendo inalterado. Sabendo que a mutação será aplicada em um gene, quando satisfaz a condição, considerando o operador de mutação uniforme, então será gerado aleatoriamente um valor no intervalo $[a_i, b_i]$ de forma que esse será o novo conteúdo do gene c_i .

Figura 2.12: Mutação uniforme.

Mutação Uniforme

Filho

20,82	11,2	16,72	10,78	11,13	18,68	17,52
-------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Filho'

20,82	11,2	16,72	10,78	21,33	18,68	17,52
-------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 Sistemas Colaborativos

No trabalho de Mills (2003), o autor informa que o termo "trabalho cooperativo auxiliado por computador" (do inglês, "*Computer Supported Cooperative Work*" - CSCW) apareceu pela primeira vez em 1984 em um *workshop* realizado no *Massachusetts Institute of Technology*. O Autor destaca que o CSCW é uma área relativamente nova e ainda existem algumas divergências em relação ao termo, no entanto, a maioria dos pesquisadores parece concordar que a CSCW, é um campo interdisciplinar emergente, que combina informática e ciências sociais.

O CSCW é uma área interdisciplinar que engloba inteligência artificial, ciência da computação, psicologia, sociologia, teoria organizacional, antropologia, comunicação em rede, sistemas distribuídos, *design* de interface de usuário e usabilidade (DOURISH, 1999). Mills (2003) observou dois perfis de pesquisadores nessa área, sendo um centrado na tecnologia, dando ênfase em projetar sistemas computacionais para apoiar o trabalho em grupos, e outro centrado no trabalho, dando ênfase à compreensão dos processos de trabalho em grupo.

Um termo *groupware* geralmente é utilizado como sinônimo de CSCW, que segundo Mills (2003) pode ser visto como um software e a sua relação com as redes de computadores que permitem grupos de pessoas trabalharem cooperativamente. O *groupware* pode incluir programas de compartilhamento de aplicativos, software de videoconferência, software para acompanhamento de alterações de documentos, correio eletrônico, entre outros.

Em Vivacqua e Garcia (2012), as autoras se questionam sobre o porquê de se colaborar, onde elas informam que "A equipe, trabalhando em sinergia, atinge resultados melhores do que uma pessoa trabalhando individualmente". As mesmas destacam que atualmente as pessoas tornam-se mais especialistas visto a quantidade de informações e multiplicidades de domínios. Assim, ao se depararem com problemas complexos, geralmente é necessária a combinação de habilidades distintas que são obtidas em grupo.

Dessa forma, o conhecimento coletivo se torna essencial para a identificar soluções de problemas reais, onde geralmente se faz necessário um conhecimento mais profundo e especializado (BORGES, 2012). Ainda segundo esse autor, ao combinar conhecimento em grupos de trabalho, o conhecimento coletivo final é desconhecido, destacando a importância de preservar esse conhecimento através de documentação, a fim de ele possa ser passado

para outras pessoas. Na Figura 2.13 são apresentadas três etapas para a documentação do conhecimento coletivo, que são: registrar, organizar e recuperar.

Figura 2.13: Etapas para a documentação do conhecimento coletivo.



Fonte: Borges (2012).

Conforme a imagem, é preciso que sejam ouvidos os relatos dos participantes do grupo. Nesse momento pode haver divergência ou ausência na descrição dos fatos. Em seguida, vem a etapa de organização de todos os relatos apurados, onde será descrito, documentado e preferencialmente validado por todos os integrantes do grupo. Depois da fase de organização, é possível recuperar o conhecimento coletivo armazenado para futuros membros a serem inseridos nesse grupo.

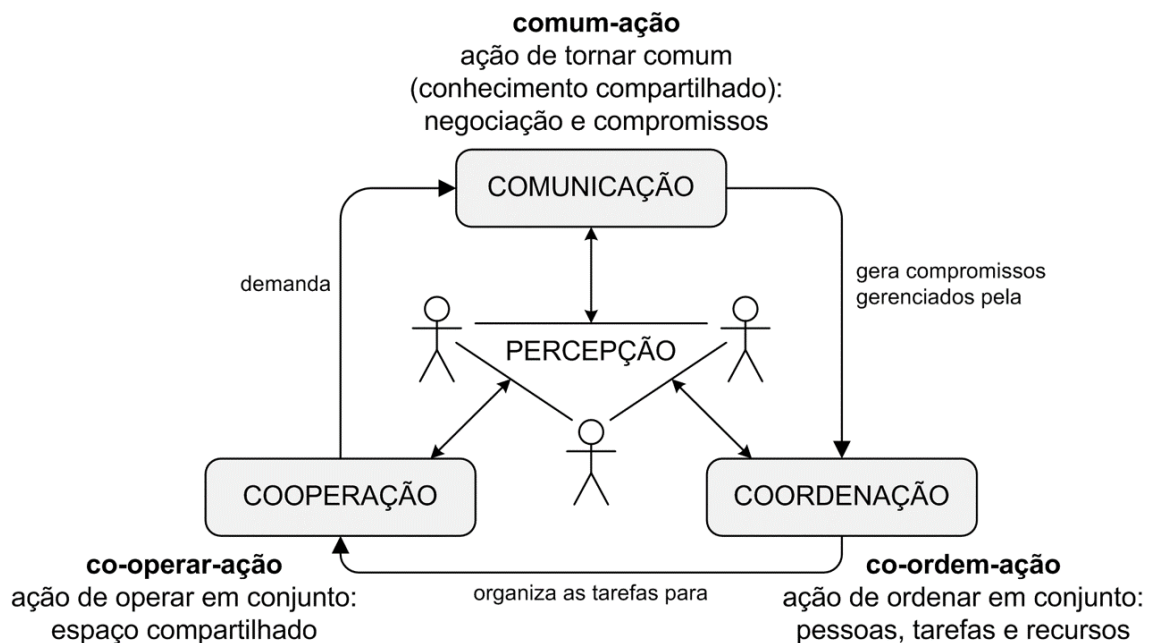
2.3.1 Modelo 3C de Colaboração

Para entender o funcionamento dos sistemas colaborativos, se faz necessário identificar como é realizada a colaboração. O trabalho pioneiro nesse contexto foi realizado por Ellis, Gibbs e Rein (1991) onde foi realizada uma classificação identificando que a comunicação, coordenação e colaboração são as dimensões base para auxiliar o trabalho em grupo. Com essa classificação inicial foi possível realizar algumas modificações, chegando ao modelo 3C de colaboração

A luz da primeira classificação, Fuks et al. (2012) realizaram algumas atualizações onde eles analisaram três dimensões para sistemas colaborativos como sendo a comunicação, coordenação e cooperação, constituindo atualmente a base para o modelo 3C de colaboração. "Comunicação se realiza através da troca de mensagens; coordenação se realiza através do gerenciamento de pessoas, atividades e recursos; e cooperação se realiza através de operações num espaço compartilhado para a execução das tarefas"(PIMENTEL et al., 2006). Na

Figura 2.14 é possível identificar os relacionamentos entre as três dimensões.

Figura 2.14: Relação entre as três dimensões do modelo 3C de colaboração.



Fonte: Fuks et al. (2012).

2.4 Considerações Finais

Os tópicos abordados na fundamentação teórica têm como objetivo nortear o leitor sobre os principais temas que envolvem este trabalho. O tópico sobre cidades inteligentes, mostra sobre a preocupação atual com o meio ambiente devido ao crescimento populacional, necessitando de uma ação em conjunto entre organizações governamentais e sociedade. No tocante da mobilidade urbana é importante que cada cidade crie seu plano de mobilidade, prezando por veículos não motorizado para pequenas distâncias e veículos coletivos para longas distâncias.

Em abordagens sobre transportes elétricos, por exemplo trens elétricos, a atenção se volta para a diminuição do consumo elétrico, sendo adotadas técnicas de otimização como Algoritmos Genéticos. Analisar cada etapa dos AGs, a fim de que o mesmo integre a maior quantidade de características do domínio do problema para que seja obtido os melhores resultados. No entanto, os sistemas colaborativos veem para auxiliar especialistas na inserção de informações do domínio, onde cada especialista possa contribuir conforme suas compe-

tências.

Cientistas e Engenheiros da Computação podem contribuir no que diz respeito as técnicas de otimização, Engenheiros Elétricos sobre o consumo de energia, verificando se o experimento está condizente, Engenheiros Mecânicos em relação ao trem, a capacidade de pessoas, Engenheiro de Transportes para verificar as normas com relação a velocidade e conforto dos passageiros, Engenheiro Civil validando com relação aos impactos causados na infraestrutura em volta da malha metroferroviária, Matemáticos e Físicos para modelagem matemática que representam os fenômenos a serem analisados.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Nesse capítulo será apresentada a revisão da literatura alinhada a esse trabalho e a descrição das principais fases envolvidas.

3.1 Revisão da Literatura

A revisão da literatura descrita nas próximas seções foi inspirada no mapeamento sistemático desenvolvido, em paralelo a esse trabalho, pelos integrantes do Laboratório de Inteligência Artificial Aplicada. A motivação do desenvolvimento desse mapeamento sistemático foi identificar os principais estudos que abordam o gasto energético dos perfis de condução.

Um mapeamento sistemático é uma revisão que engloba os estudos primários existentes em um tópico de pesquisa específico (BRERETON et al., 2007). Os autores também informam que o processo para realização de um mapeamento sistemático envolve três fases principais: Planejamento da Revisão, Condução da Revisão e Publicação dos Resultados. Essas fases serão descritas a seguir:

3.1.1 Planejamento

Essa fase do planejamento se faz necessária para verificar a necessidade do mapeamento sistemático. Ao iniciar, é importante realizar um levantamento dos estudos na literatura para analisar se existe algum mapeamento sistemático realizado que contemple a mesma área. Nessa fase, são definidas as questões de pesquisa (QPs) que serão respondidas durante a

fase de condução. Nesse mapeamento foram definidas 9 QPs como relatado no trabalho de Martins (2018), no entanto, para que esse capítulo não fique extenso, foram selecionadas as 4 QPs seguintes:

- QP1 - Qual a abordagem de eficiência energética utilizada?
 - perfil de velocidade (*speed profile*)
 - reuso de energia (*regenerative energy*)
 - tabela de horário (*timetable*)
- QP2 - Quais questões ou operadores da abordagem evolucionária são relatados no artigo?
 - criação/geração da população
 - seleção
 - *crossover*
 - mutação
 - módulo da população
 - outros
 - não se aplica
- QP3 - Qual o tipo de representação cromossômica utilizada na modelagem do problema com algoritmo genético?
 - binária
 - real
 - árvore
 - lista
 - grafo
 - outra estrutura de dados
 - não se aplica

- QP4 - O trabalho possui interface gráfica para a modelagem do domínio?
 - sim
 - não

Após a definição das QPs, foi definida a seguinte *string* de busca: *("Genetic Algorithm") AND ("Energy Efficiency") AND (Subway OR Train) AND ("Speed Profile")*. Após um levantamento sobre os principais engines de busca, foi possível identificar 8 engines alinhados ao problema. Na Tabela 3.1 é possível identificar os engines selecionados. Para cada engine selecionado, a *string* de busca foi configurada a fim de que a mesma atendesse as especificações de cada engine.

Tabela 3.1: Engines de Busca adotados no Mapeamento Sistemático

Engine de Busca	Endereço Web
ACM	< https://dl.acm.org/ >
Arxiv	< https://arxiv.org/ >
EBSCOhost	< https://www.ebsco.com/ >
IEEE	< https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp >
Science Direct (Elsevier)	< https://www.sciencedirect.com/ >
Scopus	< https://www.scopus.com/ >
Springer	< https://link.springer.com/ >
Wiley Online Library	< https://onlinelibrary.wiley.com/ >

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para concluir essa fase do planejamento, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão na qual todos os artigos deverão satisfazer. Os critérios definidos são apresentados a seguir:

- Critérios de inclusão
 - Estudos completos publicados em revistas ou conferências sobre a Eficiência Energética em malhas metro-ferroviárias;
 - Estudos teóricos ou experimentais com o objetivo de apresentar conceitos para o entendimento da área;
 - O artigo precisa ser posterior a 2011;
 - Acessível eletronicamente¹;

¹Esse critério foi necessário, pois a universidade não tinha convênio com algumas bases no qual o artigo estava hospedado.

- Critérios de exclusão
 - Estudos que não estejam claramente relacionados à área de Eficiência Energética em malhas metroferroviárias;
 - Estudos que não respondem a nenhuma das questões de pesquisa;
 - Artigos duplicados, ou seja, aqueles encontrados em mais de um engenho de busca;
 - Artigos convidados, tutoriais, relatórios técnicos que não passam pelo critério de avaliação das conferências ou revistas;
 - Estudos não disponíveis para *download* eletronicamente.

3.1.2 Condução

Na fase de condução foi colocado em prática o planejamento da fase anterior, dessa forma a *string* de busca foi inserida em cada engenho de busca, respeitando as especificações de cada engenho. De posse dos resultados, foi realizado o *download* dos estudos disponíveis. Em seguida cada um dos trabalhos passaram pelos critérios de inclusão e exclusão. Na Tabela 3.2 é possível identificar a quantidade de trabalhos por cada engenho de busca durante a busca, realização do *download* e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.

Tabela 3.2: Quantidade de artigos em cada engenho de busca.

Sites da Busca	Resultados	Download	Inclusão/Exclusão
ACM	1	1	0
Arxiv	2	2	0
EBSCOhost	6	5	1
IEEE	24	24	2
Science Direct (Elsevier)	41	41	3
Scopus	38	36	11
Springer	2	2	0
Wiley Online Library	4	4	1
Total	118	115	18

Fonte: Elaborada pelo autor.

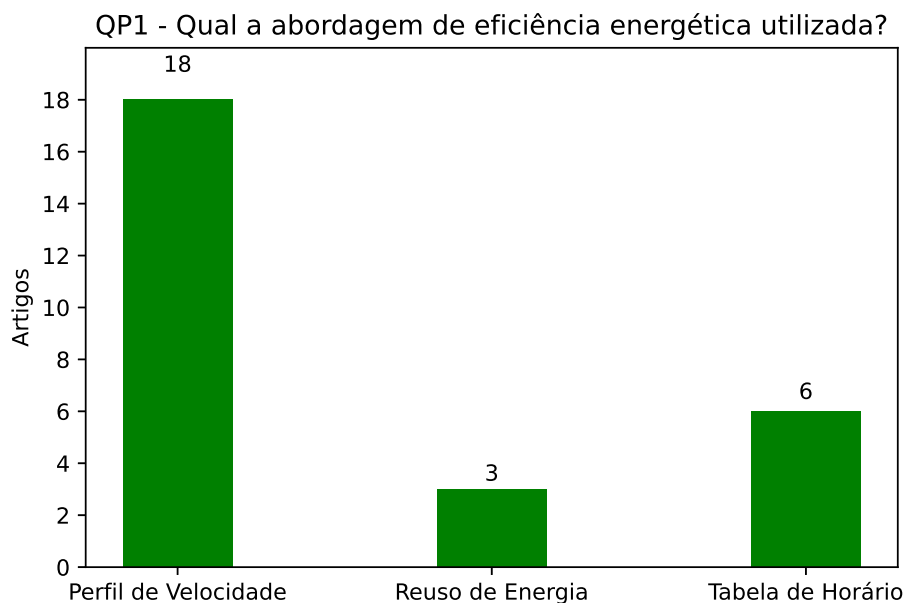
Após os critérios de inclusão e exclusão, foram identificados 18 artigos que podem ser observados no Apêndice B. De posse desses 18 artigos, iniciou-se a leitura de forma que cada artigo foi lido por três integrantes do grupo, onde cada pessoa respondeu as 9 questões

de pesquisa. Ao finalizar a leitura, foi verificado se existia divergência entre as respostas. Como a quantidade de integrantes por artigo era ímpar, então a resposta considerada foi a informada pela maioria, ou seja, por pelo menos dois integrantes.

3.1.3 Publicação dos Resultados

Nessa última fase, serão apresentados os resultados obtidos das respostas das questões de pesquisa. Como foi relatado anteriormente, serão detalhadas as 4 QPs dentre as 9 QPs. Na Figura 3.1, é possível observar um gráfico de barras correspondente a QP1, que se refere à abordagem de eficiência energética adotada. Ao analisar o gráfico de barras da QP1, nota-se que a abordagem de perfil de velocidade aparece em todos os trabalhos, o que já era esperado, visto que é um dos termos que compõe a *string* de busca.

Figura 3.1: Resultado da Questão de Pesquisa 1.

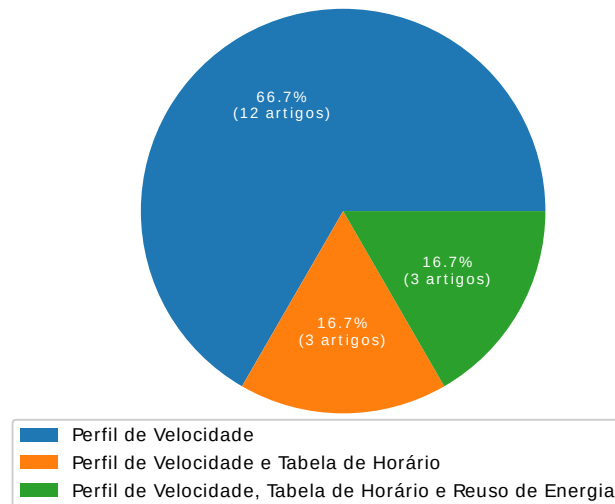


Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro detalhe importante é a combinação de abordagens utilizada nos estudos. Essa combinação fica mais clara no gráfico de pizza apresentado na Figura 3.2. Nesse gráfico, nota-se a predominância dos estudos iniciarem pela abordagem de perfil de velocidade. No que diz respeito à abordagem de reuso de energia, em todos os estudos analisados, essa abordagem está sempre junta com a tabela de horário.

Figura 3.2: Resultados em forma de gráfico e pizza da Questão de Pesquisa 1.

QP1 - Qual a abordagem de eficiência energética utilizada?

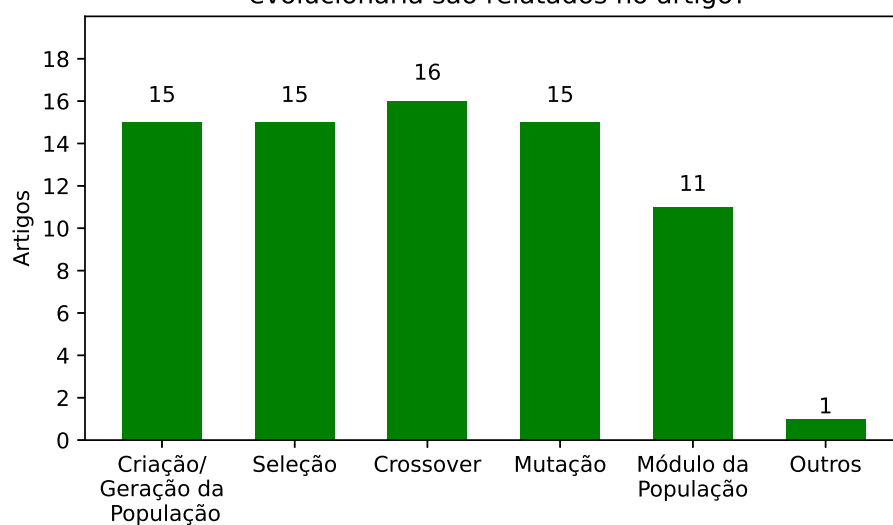


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 3.3, ilustra os resultados obtidos através das respostas da QP2, que trata sobre os operadores genéticos. O critério acordado pelo grupo de pesquisa foi contabilizar um operador, caso os autores dos trabalhos primários falassem que tinham utilizado os operadores, ou o que aconteceu com menor frequência, detalhar o funcionamento do operador.

Figura 3.3: Resultado da Questão de Pesquisa 2.

QP2 - Quais questões ou operadores da abordagem evolucionária são relatados no artigo?

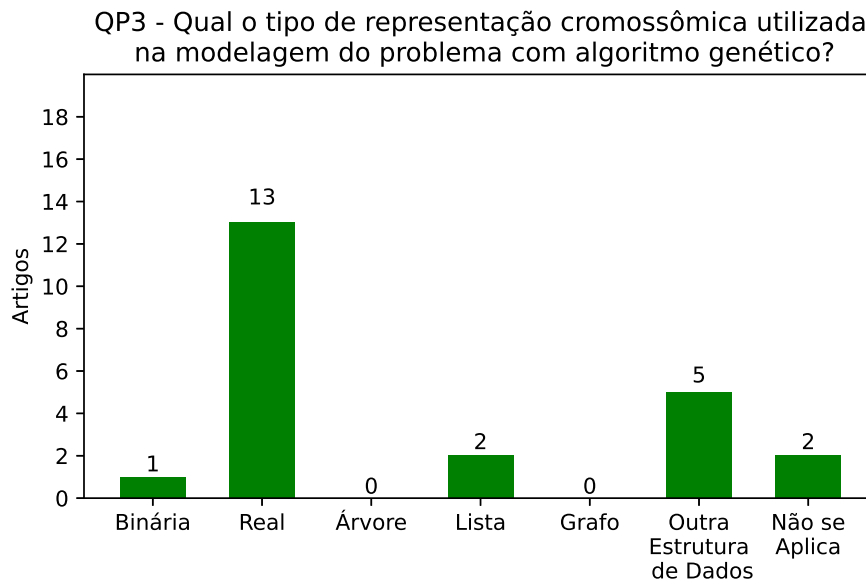


Fonte: Elaborada pelo autor.

Sabe-se que o termo Algoritmo Genético está presente na *string* de busca. Dos 18 artigos selecionados, 3 artigos utilizavam algoritmos híbridos, ou seja, combinavam os algoritmos genéticos com a técnica Lógica *Fuzzy*, dessa forma, alguns trabalhos não deixaram explícito quais os operadores foram utilizados.

A Figura 3.4 exibe os resultados da QP3, na qual trata sobre os tipos de representação utilizado nos trabalhos. Dentre os trabalhos, a representação real foi a que revelou-se com maior frequência, pois no geral, as funções de avaliação utilizavam variáveis como velocidade, massa, corrente elétrica, energia, entre outras, tornando assim a representação real mais adequada. Os dois trabalhos que utilizaram a representação por lista possuíam em seu conteúdo valores reais. Em Outra estrutura de dados, foram identificados trabalhos que adotaram matrizes que possuíam valores reais. Na Tabela 3.3, é possível identificar cada trabalho selecionado e o tipo de representação adotada.

Figura 3.4: Resultado da Questão de Pesquisa 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já a QP4 aborda sobre a presença de interface gráfica para auxiliar na modelagem do domínio. Na Figura 3.5 é possível observar que, dos 18 artigos analisados, nenhum possuía interface gráfica.

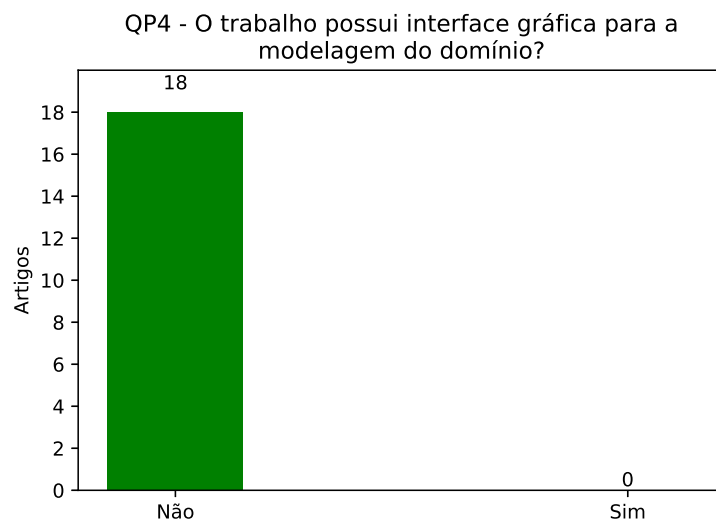
Tabela 3.3: Questão de Pesquisa 3

Artigo	Binária	Real	Árvore	Lista	Grafo	Outra*	N/A [◇]
Xu, Li e Li (2016)		x		x			
Fernández-Rodríguez, Fernández-Cardador e Cucala (2015)		x				x	
Hamid et al. (2016)		x					
Yong et al. (2011)		x					
Li e Lo (2014)		x				x	
Chevrier, Pellegrini e Rodriguez (2013)		x		x			
Cucala et al. (2012)		x					
Sicre, Cucala e Fernández-Cardador (2014)						x	
Carvajal-Carreño, Cucala e Fernández-Cardador (2014)						x	
Carvajal-Carreño et al. (2015)		x				x	
Corapi et al. (2014)							x
Huang et al. (2015)		x					
Yang et al. (2015)		x					
Brenna, Foiadelli e Longo (2016)	x						
Gong et al. (2014)		x					
Keskin e Karamancioglu (2015)		x					
Lu et al. (2013)		x					
Sicre et al. (2012)							x
Total	1	13	0	2	0	5	2

★ = Outra Estrutura de Dados

◇ = Não se Aplica

Figura 3.5: Resultado da Questão de Pesquisa 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Considerações Finais

A realização desse mapeamento sistemático foi relevante, pois foi possível identificar os principais trabalhos que tratam sobre o problema de eficiência energética em trem elétricos. Com as Questões de Pesquisa, foi possível observar como os estudos são realizados, ou seja, quais as abordagens utilizadas, aplicação da técnica de otimização, operadores genéticos, tipo da representação, entre outros.

Ao mesmo tempo que se observa como os estudos são realizados, também nota-se as possíveis lacunas, surgindo assim novas pesquisas. Com relação a esse trabalho, esse mapeamento sistemático ajudou a nortear tanto em relação à abordagem adotada pelo trabalhos, como também apresentando a ausência em características dos estudos, como por exemplo a ausência de interfaces gráficas na inserção da configuração do domínio.

Capítulo 4

SmartSubway

Nesse capítulo será descrito o sistema SmartSubway, bem como as etapas da metodologia necessárias para a construção do sistema.

4.1 Descrição

Diante do que já foi discutido durante esse trabalho, atualmente os pesquisadores estão investigando estratégias para solucionar problemas encontrados no ambiente urbano. Dentre esses problemas é possível destacar o consumo energético em transportes urbanos, mais especificamente os trens elétricos. Perante as soluções encontradas na literatura, nota-se que as abordagens adotadas foram as técnicas de otimização, de forma que as modelagens matemáticas e as variáveis utilizadas são distintas, ou seja, diante de um cenário de uma malha metroferroviária particular, podem ser realizadas simulações onde as variáveis são adquiridas de forma aleatória ou através de distribuições estatísticas, outra alternativa é por intermédio de sensores que capturam os dados para que sejam inseridos nos experimentos.

Diante das possibilidades de configuração do domínio, ou seja, velocidade durante o trajeto, tempo gasto, quantidade de passageiros, entre outras, acerca do problema do gasto energético dos trens, se faz necessária uma alternativa que auxilie os especialistas na busca por soluções, onde os mesmos possam contribuir com as suas competências referentes ao problema. Frente a problemática citada anteriormente, o SmartSubway surgiu da necessidade de encontrar uma alternativa capaz de auxiliar os especialistas na criação e manutenção de experimentos que necessitam das informações do domínio do problema. Adicionalmente

esses experimentos podem ser construídos de forma colaborativa, onde cada especialista poderá contribuir conforme suas competências.

4.1.1 Passos para Realização dos Experimentos

Ao utilizar o sistema, o especialista poderá criar um experimento inserindo as informações do domínio. Dessa forma, se faz necessário a identificação dos passos a serem realizados para que seja possível criar um experimento. Com base nas etapas do Algoritmo Genético apresentados na Figura 2.8, foram definidos 5 passos básicos que podem ser observados na Figura 4.1.

Figura 4.1: Passos para realização de um experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Figura 4.1, será detalhado cada passo apresentado:

1. **Definição das Variáveis** - Esse passo consiste em definir quais as variáveis serão combinadas pelo algoritmo genético, onde o desafio do especialista é identificar quais as variáveis que tem um maior impacto no resultado.
2. **Definição da Função de Avaliação** – Nesse passo o especialista irá inserir a função de avaliação no sistema, onde ele poderá incluir números e funções pré-definidas, como seno, cosseno, tangente, exponencial, entre outras, bem como fazer uso das variáveis previamente definidas no passo 1.
3. **Definição da Criação da População Inicial** – Aqui será definida a estratégia a ser adotada para a geração da população inicial, podendo ser aleatória ou por dados reais, sendo que nos dois casos se faz necessário definir qual o valor mínimo, máximo e a variação de cada variável definida no passo 1.
4. **Definição dos Parâmetros** – Para execução, do algoritmo, é necessário a definição

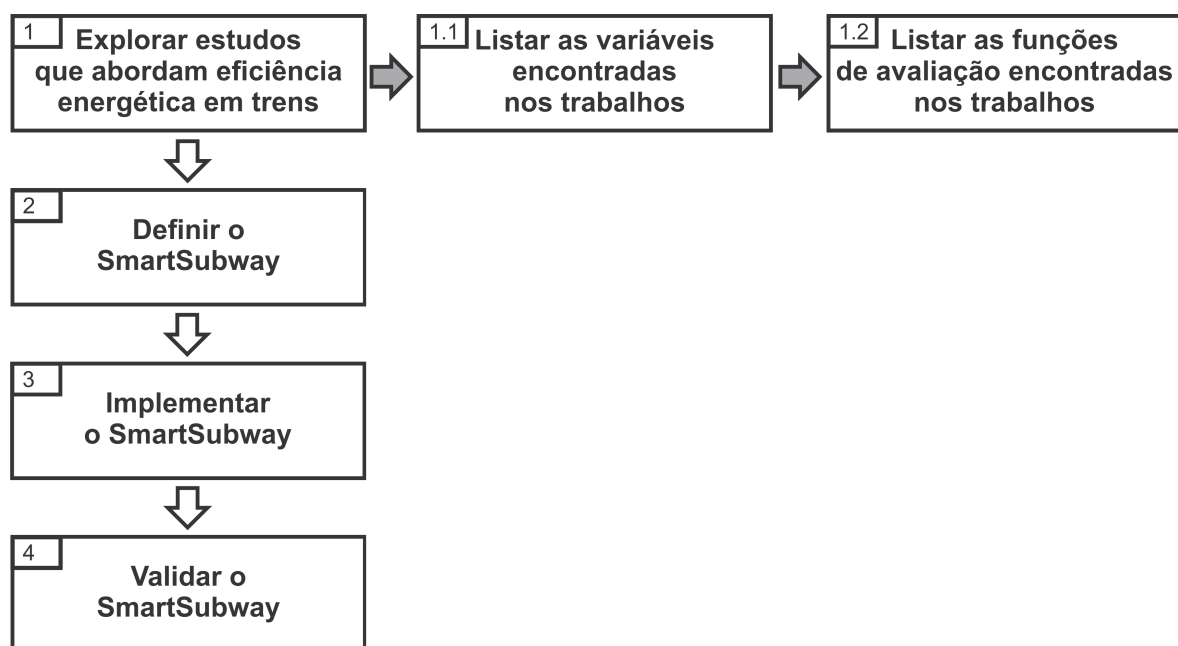
de parâmetros gerais, tais como tamanho da população, número de gerações e taxa de mutação, dessa forma esse passo é responsável pela definição desses parâmetros.

5. **Definição dos Operadores** – Diante a quantidade de operadores disponíveis, nessa etapa o especialista irá determinar os operadores de seleção, *crossover* e mutação que serão adotados para o experimento.

4.2 Etapas da Metodologia

Para que o objetivo seja atingido, se faz necessária a implementação do sistema como prova do conceito. Sendo assim, foram definidas as etapas realizadas nesta pesquisa, que são mostradas na Figura 4.2 e detalhadas posteriormente.

Figura 4.2: Etapas da metodologia da pesquisa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Etapa 1. Explorar estudos que abordam eficiência energética em trens

Sabendo que o SmartSubway vem como uma alternativa para facilitar o desenvolvimento dos experimentos, nessa primeira etapa foi necessário investigar os trabalhos que abordam

eficiência energética a fim de que fosse possível compreender como estão sendo organizados os trabalhos, e em seguida planejar um sistema genérico que possa atender os especialistas. O mapeamento sistemático foi importante para indicar os estudos relevantes e atuais. Paralelamente a realização deste passo, foi possível realizar os passos 1.1 e 1.2, descritos a seguir:

Etapa 1.1. Listar as variáveis encontradas nos trabalhos

Conforme o que foi descrito na Seção 2.2.1 a representação cromossomial é uma forma de interligar as informações do domínio com o algoritmo genético, e nesse passo surgiu a oportunidade para identificar quais são as variáveis adotadas nos trabalhos, a fim de que elas pudessem ser incorporadas ao sistema facilitando a criação de novas variáveis. No Apêndice C é possível identificar as variáveis adotadas nos trabalhos do mapeamento.

Etapa 1.2. Listar as funções de avaliação encontradas nos trabalhos

Na Seção 2.2.3, foi descrita a função de avaliação que se faz necessária para identificar, entre dois indivíduos, qual é mais adaptável. Então nesta etapa foram observadas as funções de avaliação utilizadas nos trabalhos, pois o sistema deve ser capaz de aceitar a maior quantidade de função de avaliação, visto que o especialista precisa realizar o passo 2 descrito na Subseção 4.1.1, definir a função de avaliação, para concluir um experimento. De maneira análoga, as funções analisadas, encontram-se no Apêndice C juntamente com as variáveis.

4.2.2 Etapa 2. Definir o SmartSubway

Nessa etapa será detalhada a descrição conceitual do SmartSubway.

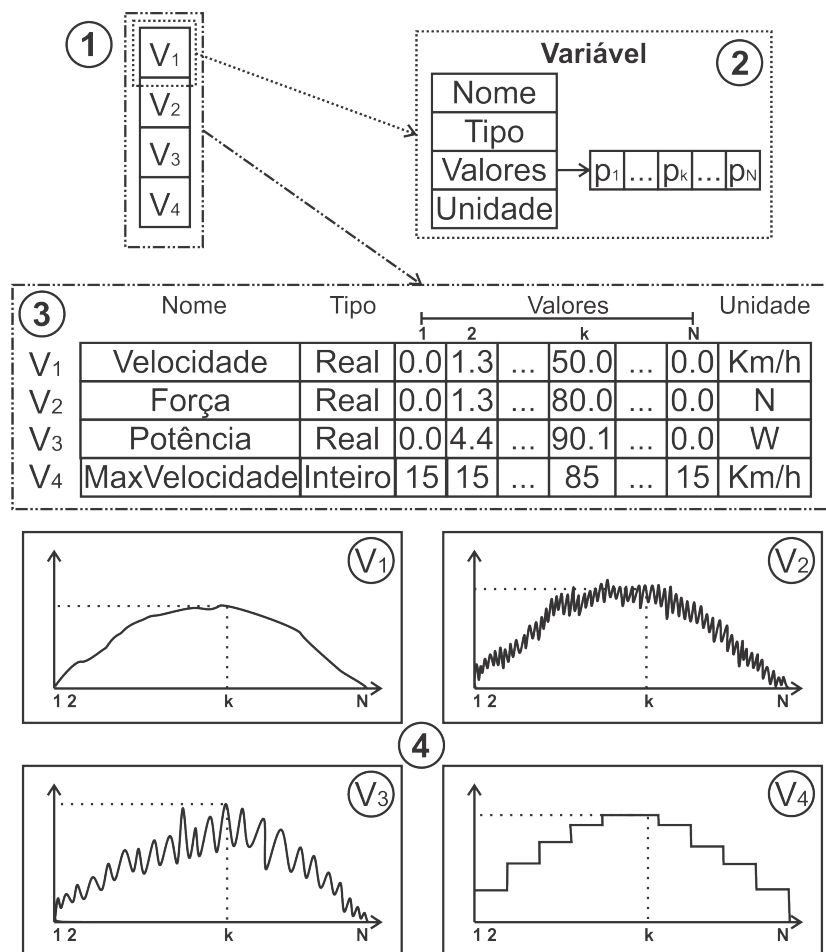
Descrição Conceitual

Visto a aceitação dos Algoritmos Genéticos para solucionar o problema em questão, este trabalho irá priorizar essa técnica de busca, de forma que as configurações serão inspiradas nas etapas do AG, conforme descrito na Seção 2.2.

Representação Cromossomial

Sabendo que o intuito do trabalho é identificar uma estratégia genérica para inserção dos dados referente à configuração do domínio do problema. Dessa forma a representação do cromossomo a ser adotada para este trabalho deve atender essa especificação. Na Figura 4.3 é possível observar a representação do cromossomo, e em seguida será apresentado a descrição dos 4 marcadores que estão na figura.

Figura 4.3: Representação cromossomial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1. Representação de um vetor de objetos, de tamanho k , do tipo Variável.
2. Representação dos atributos do tipo Variável. Que são Nome, Tipo, Valores e Unidade. No caso do atributo Valores, o mesmo possui uma referência para um vetor de tamanho N que irá possuir os valores correspondente da variável, inserida pelo especialista, durante o trajeto do trem.

3. Representação na forma de uma tabela, nesse caso para melhor entendimento foram representadas 4 variáveis, sendo elas a velocidade, a força, a potência e a velocidade máxima. Onde cada linha corresponde uma variável e uma coluna um atributo do tipo Variável, no caso do atributo Valores cada coluna corresponde a uma determinada configuração no trajeto entre duas estações, de forma que a quantidade de colunas de valores depende da quantidade de capturas, ou seja, terá o tamanho de 1 a N , por exemplo, a coluna K representa uma configuração das variáveis no momento K .
4. Apresenta os gráficos de cada variável representada, em especial é possível observar o ponto K para cada uma das variáveis.

Essa representação foi definida com o intuito de facilitar a inserção, edição e remoção das variáveis do especialista. Durante o processo de construção dos experimentos, o profissional poderá realizar edições nas variáveis da representação, de forma que ele irá obter os resultados em menor tempo. A representação cromossomial está diretamente ligada aos operadores e em implementações básicas de AGs, a alteração da representação pode afetar diretamente todo o algoritmo, logo essa representação tenta evitar esse problema com relação a modificação na representação.

Função de Avaliação

Conforme foi visto na representação cromossomial, o sistema permite que o especialista realize edições nas variáveis da representação. Dessa forma, é necessário identificar uma estratégia que possibilite realizar essa adaptação. A solução encontrada para este trabalho foi validar a função de avaliação, a ser inserida pelo especialista, por meio de dois analisadores, que são, o analisador léxico e o analisador sintático.

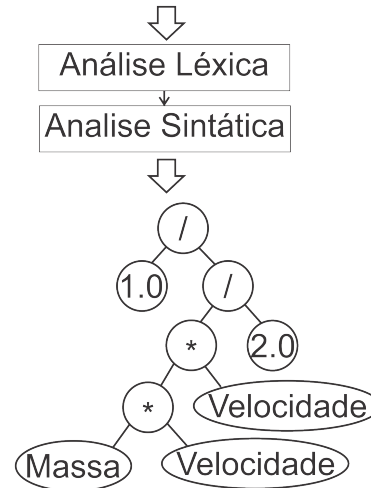
Na Figura 4.4, é exibido um exemplo de função de avaliação. Após a inserção da função, a mesma passará por um analisador léxico que irá dividi-la em *tokens* e classifica-los gerando assim uma tabela com todos os *tokens*. Em seguida será aplicado o analisador sintático que verificará se a ordem dos termos inseridos está de acordo com a gramática definida (ver em Apêndice D).

Ao passar pelos analisadores, sem que nenhum deles identifique erros na função, será criada uma árvore sintática conforme apresentado na Figura 4.4. De posse da árvore gra-

matical, o passo de avaliação dos indivíduos poderá fazer uso da mesma avaliando toda a população.

Figura 4.4: Processo para validar a função de avaliação.

$$(1.0)/((\text{Massa}*\text{Velocidade}*\text{Velocidade})/2.0)$$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Etapas do Algoritmo

Com a representação cromossomial e a árvore gramatical definidas, pode-se iniciar os passos do Algoritmo Genético. No Pseudocódigo 4.1, é possível observar os passos realizados pelo algoritmo.

Código Fonte 4.1: Pseudocódigo do SmartSubway

```

1  AlgoritmoGenetico(tamanho , geracoes , mutacao){
2      cont <- 0
3      populacao <- CriarPopulacao(tamanho)
4      while
5      Enquanto(cont < geracoes){
6          Suavizar(populacao)
7          Avaliar(populacao)
8          Para i de 0 ate tamanho faca{
9              pai1 <- Selecionar()
10             pai2 <- Selecionar()
11             filho <- Reproduzir(pai1 , pai2)
12             novoFilho <- Mutar(filho , taxa)
13             novaPopulacao[i] <- novoFilho
14         }
15         cont <- cont + 1
16         ModuloPopulacao(populacao , novaPopulacao)

```

```

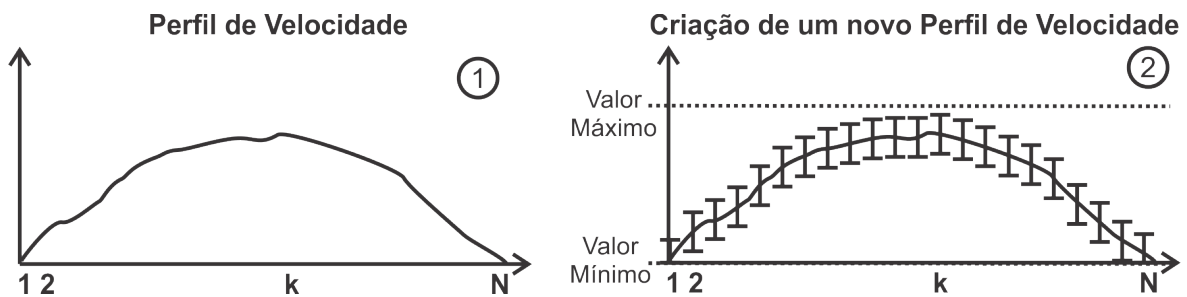
17     melhorSolucao <- SeleccionarMelhor(populacao)
18   }
19   Retorne melhorSolucao
20 }

```

Criação da População Inicial

Ao iniciar o algoritmo, o primeiro passo refere-se a criação da população. Neste passo o usuário poderá optar por duas estratégias: sendo a primeira recebendo os dados obtidos de sensores situados nos veículos, e a segunda de forma aleatória. Na Figura 4.5, é ilustrado o processo para a criação de um novo indivíduo da população. Considere que o especialista conseguiu realizar a captura da variável Velocidade, dessa forma o atributo `Valores` possui os N valores da velocidade entre as duas estações, como identificado em 1, o processo de criação da população irá se inspirar nesse perfil inicial, visto que trata-se de um perfil viável.

Figura 4.5: Criação da População.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Sabendo que essa variável possui N valores, será criado um novo perfil de mesmo tamanho, mas para não perder a diversidade genética da população, com indivíduos distintos que não violem as restrições do problema. Dessa forma, o especialista deverá definir um valor de um parâmetro denominado `variação` que indica ao algoritmo o intervalo de variação. Por exemplo, se o valor de `variação` for igual a 3, e o valor na posição k for igual a 65, então o novo valor nesta posição será entre $[62, 68]$, ou seja, $[k - \text{variacao}, k + \text{variacao}]$.

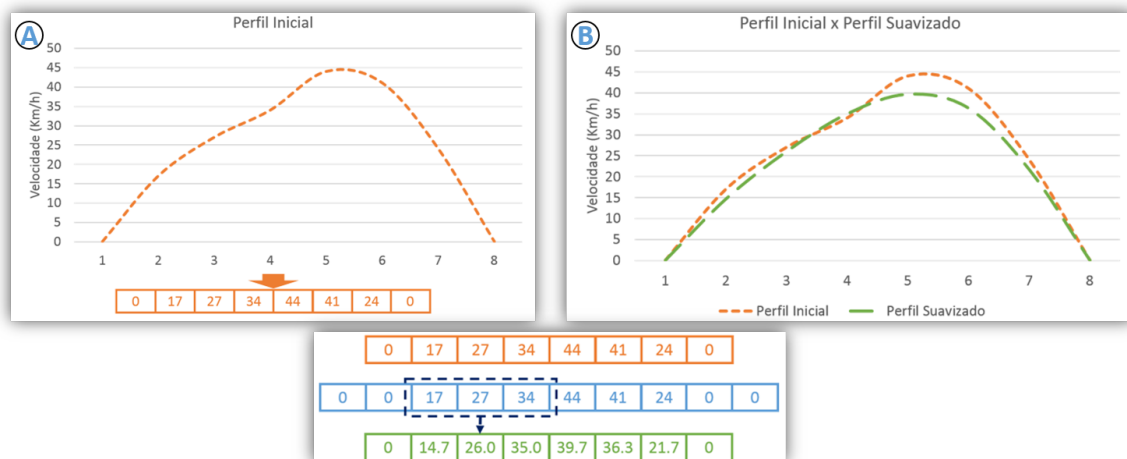
Ao determinar o intervalo de variação, será gerado um número aleatório para determinar o novo valor dentro desse intervalo. É importante destacar que em alguns casos, o valor selecionado pode não ser viável, pois caso o valor de k seja 1, então o intervalo será $[-2, 4]$, e ao gerar um número aleatório dentro deste intervalo, o mesmo pode ser negativo, tornando o indivíduo inviável. Logo para evitar esse problema é preciso verificar as restrições de

velocidade máxima e mínima. Ainda na mesma figura, no perfil de velocidade do lado direito nota-se a definição dos intervalos e as restrições de máximo e mínimo.

Suavização

O passo seguinte é o da suavização do perfil de velocidade, visto que ao gerar a população ou após a aplicação dos operadores de *crossover* e mutação nos indivíduos, o perfil de velocidade gerado pode conter variações altas de velocidade, o que traria desconforto para os passageiros. Dessa forma, nesta etapa o usuário poderá aplicar a suavização da média que realiza a média aritmética nos m valores vizinhos de cada uma das N velocidades contidas no vetor *Valores* da variável *Velocidade*. Na Figura 4.6, é ilustrado o processo para a realização da suavização.

Figura 4.6: Processo para suavização de um perfil de velocidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar a Figura 4.6, nota-se que é possível representar o perfil inicial na forma de um vetor de tamanho N , onde é armazenado cada valor da velocidade. Para aplicar a suavização se faz necessário definir o valor de m , preferencialmente um valor ímpar. No exemplo da figura o valor definido foi $m = 3$, então nesse momento será criado um vetor auxiliar com tamanho maior do que o primeiro vetor criado para evitar erros quanto ao tamanho no momento da programação. O tamanho do vetor auxiliar pode ser obtido pelo seguinte cálculo $N' = N + 2 * (m/2)$.

Em seguida os valores do vetor inicial são copiados para o vetor auxiliar, e adicionado

zero às extremidades. Por fim é necessário retornar um vetor do mesmo tamanho do original, no entanto, os valores do vetor resultante serão definidos pela média aritmética dos m vizinhos. Por exemplo, na Figura 4.6 é possível observar que o valor 26.0 foi definido pela média aritmética dos valores que estão na região delimitada, que possui exatamente m valores. Esse processo se repete para cada um dos valores do vetor resultante.

Avaliação da População

Neste passo cada indivíduo da população será avaliado conforme a função definida pelo usuário, dessa forma, será utilizada a árvore sintática gerada inicialmente, visto que a mesma possui as operações da função inserida pelo especialista.

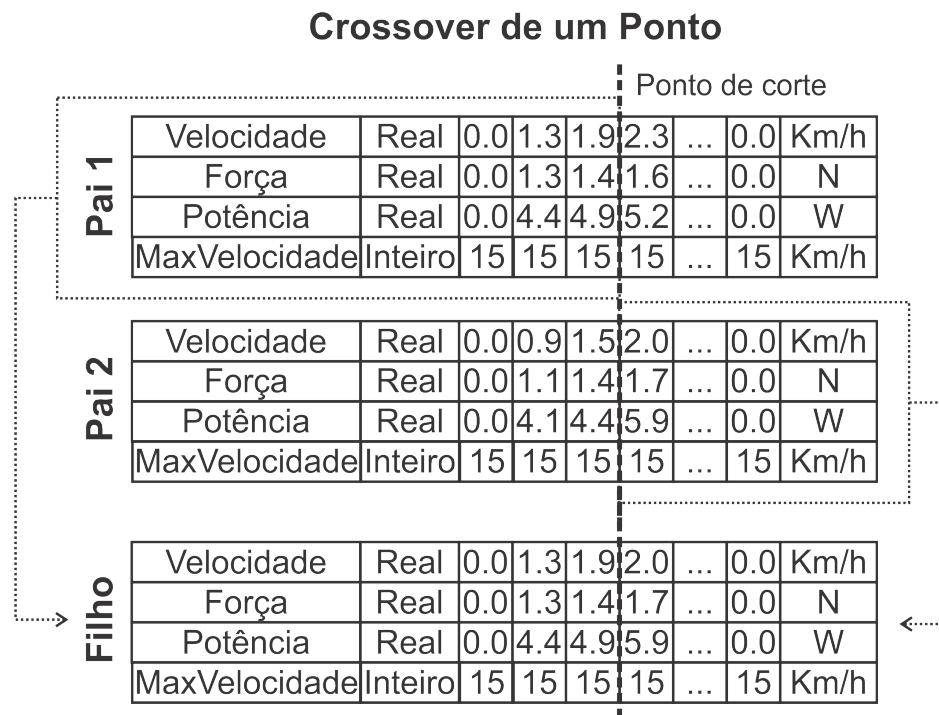
Seleção dos Pais

Antes de seguir para o passo dos operadores, a condição do laço de repetição é verificada, se a quantidade de gerações ainda não atingiu o valor definido, serão aplicados os operadores. O operador de seleção será responsável por escolher um indivíduo na população. Como os operadores de seleção utilizam os valores definidos na avaliação, então nessa etapa podem ser adotados o método da Roleta ou do Torneio (QUEIROZ et al., 2016).

Reprodução dos Pais

Depois que o operador de seleção escolher dois indivíduos da população, inicia-se a reprodução, também conhecido como *crossover*, conforme ilustra a Figura 4.7. Nesta figura é possível observar o *crossover* de um ponto aplicado ao cromossomo adotado neste trabalho. De forma análoga ao *crossover* de um ponto descrito na Seção 2.2.5, será escolhido aleatoriamente um valor entre 1 e N , que representa o tamanho do vetor `Valores`, para ser o ponto de corte. O conteúdo do filho gerado será composto pela primeira parte do primeiro pai indo da posição 1 até o ponto de corte e a segunda parte do filho será o final do segundo pai, ou seja, do *(ponto de corte + 1)* até N .

Figura 4.7: Operador de um ponto do SmartSubway.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Mutação

Após a criação de um novo indivíduo pelo operador de reprodução, em seguida será aplicado o operador de mutação. A aplicação do operador de mutação poderá ser a Mutação Uniforme como descrito na Seção 2.2.6, ou os que se encontram no Apêndice B. No entanto é válido ressaltar que a perturbação gerada por esse operador deverá atender as restrições do problema, como no caso da velocidade a mutação não deve gerar valores negativos ou valores maiores que a velocidade máxima.

Módulo da População

A cada nova iteração do algoritmo, uma nova população é gerada. O módulo da população é o operador responsável pelo controle da população, ou seja, como a nova população formada pelos pais será descartada. Pode-se utilizar o módulo da população que descarta todos os pais, ou o operador que mantém os p melhores pais e o restante da população será formado pelo filhos.

4.2.3 Etapa 3. Implementar o SmartSubway

Visto que o SmartSubway é um sistema para apoiar os especialistas, então foi definido que o mesmo seria desenvolvido para a plataforma Web. As tecnologias utilizadas foram: Java para Web, HTML, CSS, JavaScript e MySQL. Para a geração dos gráficos foi utilizada a biblioteca JFreeChart. Para o desenvolvimento foi utilizada a IDE NetBeans. O sistema será apresentado juntamente com o estudo de caso, onde será possível observar sua aplicação, com a finalidade de esclarecer como será a inserção de informações do domínio.

4.2.4 Etapa 4. Validar o SmartSubway

Para a validação do SmartSubway foi realizado um estudo de caso no estado da Paraíba, onde através de sensores foram captados dados entre as cidades de João Pessoa e Cabedelo. Em seguida as informações do domínio foram inseridas no sistema identificando assim os perfis gerados pelo sistema. Os detalhes sobre a avaliação serão apresentados no Capítulo 5.

Capítulo 5

Avaliação Experimental

Com o intuito de validar o sistema e de apresentar o seu funcionamento, foi realizado um experimento que será descrito nesse capítulo.

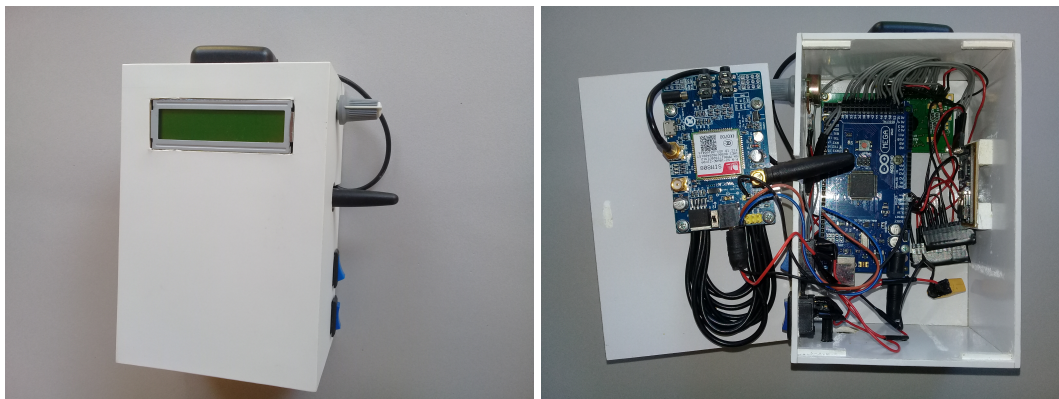
5.1 Aquisição dos dados

Como foi visto no capítulo 4, para a realização de um experimento se faz necessária a criação da população do algoritmo genético, que pode ser de forma aleatória ou através de dados reais. Logo para esse experimento optou-se pela criação da população inicial por dados reais, visto que o algoritmo já inicia com uma solução viável buscando melhorar a cada geração.

Dessa forma foi desenvolvido um sistema embarcado denominado SmartSubwaySensor, que captura os dados do trem durante seu percurso. A Figura 5.1 ilustra o SmartSubwaySensor, que é composto por uma placa Arduino Mega e sensores como acelerômetro, giroscópio e magnetômetro.

De posse dos sensores, foi realizada a captura dos dados na Companhia Brasileira de Trens Urbanos - CBTU da Paraíba. A CBTU-PB possui 12 estações nas cidades de Santa Rita, João Pessoa e Cabedelo como ilustrado na Figura 5.2. A captura foi realizada entre as estações de João Pessoa a Cabedelo. No entanto, para o experimento, foi escolhido o trecho entre as estações de Renascer e Jacaré.

Figura 5.1: Imagens do SmartSubwaySensor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.2: Estações da CBTU Paraíba.



Fonte: CBTU¹.

5.2 Configuração do Domínio

Nessa seção será descrita a configuração do domínio a ser inserida no sistema.

5.2.1 Função de Avaliação

A função de avaliação adotada para esse experimento pode ser observada na função $f(x)$ na Equação 5.3 a seguir.

$$h(x) = \frac{m * v_x^2}{2} \quad (5.1)$$

$$E_t = \sum_{x=1}^N h(x) \quad (5.2)$$

$$f(x) = \frac{1}{E_t} \quad (5.3)$$

m = é a massa do trem.

x = posição atual do trem.

v_x = velocidade do trem na posição x .

N = total de capturas entre as estações.

$h(x)$ = energia na posição x .

E_t = Energia total.

$f(x)$ = valor da avaliação do indivíduo.

5.2.2 Parâmetros de Entrada

Os parâmetros de entrada utilizados são:

Tamanho da População: 100

Quantidade de Gerações: 30

Taxa de Mutação: 0.1

Quantidade de repetição do algoritmo: 30

Massa: 100 toneladas

k (Método do Torneio): 3

5.2.3 Operadores Seleccionados

Serão realizados 6 experimentos com configurações distintas de operadores conforme mostra o Quadro 5.1.

Tabela 5.1: Identificação dos operadores de seleção, *crossover* e mutação dos seis experimentos

Experimentos	Seleção	Crossover	Mutação
1	Roleta	Um Ponto	Uniforme
2	Roleta	Dois Pontos	Uniforme
3	Roleta	Uniforme	Uniforme
4	Torneio	Um Ponto	Uniforme
5	Torneio	Dois Pontos	Uniforme
6	Torneio	Uniforme	Uniforme

5.3 Inserção da Configuração do Domínio no Sistema

Nessa seção será apresentada a criação dos experimentos e inserção das configurações do domínio.

Na Figura 5.3 é possível observar a página inicial do SmartSubway, onde o especialista poderá realizar o cadastro, verificar informações sobre a equipe responsável pela implementação e acessar o sistema após o cadastro.

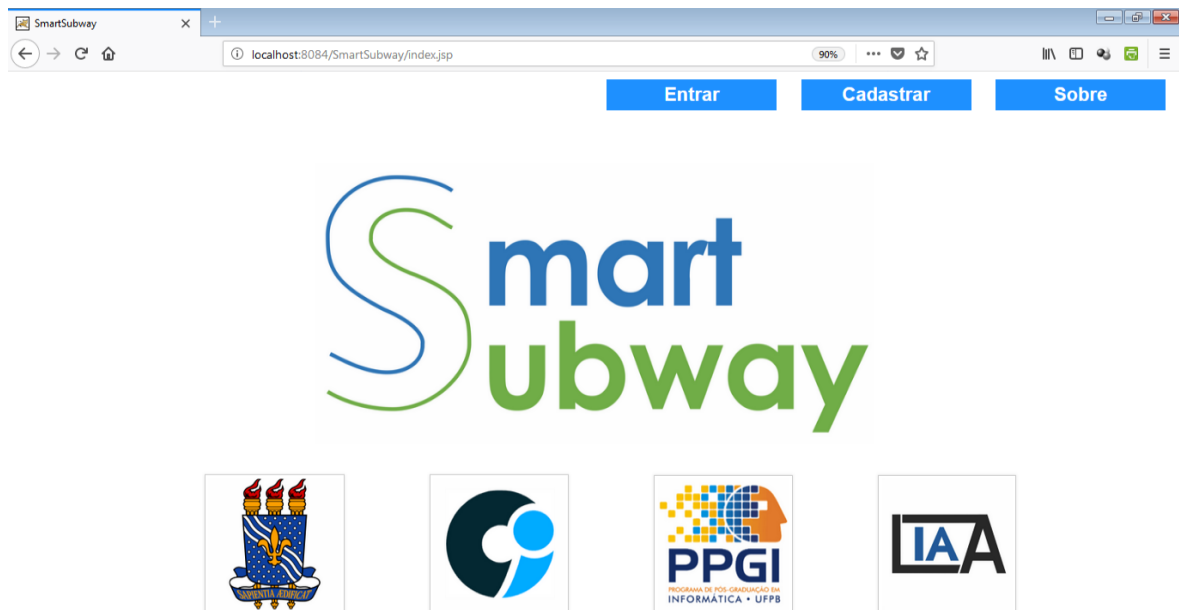
Ao acessar o sistema, o especialista terá acesso aos experimentos criados, sejam eles de forma privada ou compartilhados. Conforme mostra a Figura 5.4, ele poderá clicar em qualquer experimento ou criar um novo experimento.

Para a criação de um novo experimento, como mostrado na Figura 5.5, o especialista necessita inserir o nome do experimento, opcionalmente uma descrição, e o tipo, ou seja, um experimento privado ou compartilhado.

Após a criação, o especialista será direcionado para página (Figura 5.6) que possui o histórico das edições dos experimentos. Nessa página ele poderá excluir o experimento ou criar uma nova configuração.

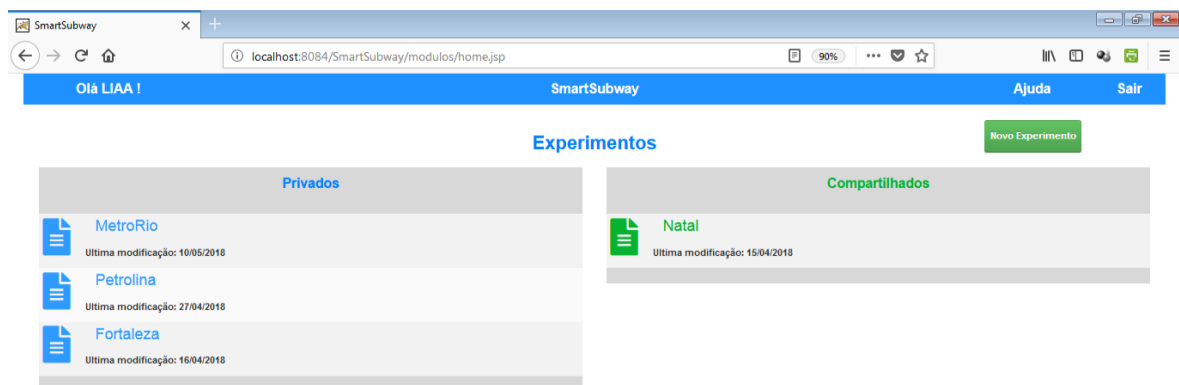
Quando o especialista clicar em nova configuração, ele será direcionado para a página de definição da representação, como mostra a Figura 5.7. Nessa página será possível iniciar a inserção de informações do domínio que foram previamente definidas. Especificamente

Figura 5.3: Página Inicial do SmartSubway



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.4: Página com a área de experimentos



Fonte: Elaborada pelo autor.

nessa página, ele irá inserir as variáveis e constantes. Conforme a função de avaliação definida, a variável que se faz necessária ser inserida, é a da velocidade. Ao inserir essa variável, o especialista poderá verificar se a mesma se encontra na seção de variáveis predefinidas.

Caso o especialista não encontre a variável desejada, ele poderá ir na seção Adicionar

Figura 5.5: Criação de um novo experimento

SmartSubway

Ola LIAA ! SmartSubway Ajuda Sair

Novo Experimento

Nome: CBTU PB

Descrição: Esse experimento foi realizado na CBTU da Paraíba. Os dados capturados foram entre as estações de João Pessoa a Cabedelo

Tipo: ☒ Privado ☐ Compartilhado

[Criar](#)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.6: Página com o histórico das edições de um experimento

SmartSubway

Ola LIAA ! SmartSubway Ajuda Sair

CBTU PB

Descrição: Esse experimento foi realizado na CBTU da Paraíba. Os dados capturados foram entre as estações de João Pessoa a Cabedelo

Data criação: 28/07/2018 Última modificação: 28/07/2018

[Últimas Configurações](#) [+ Nova Configuração](#) [Excluir](#)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nova Variável, nesse caso ele precisará informar o nome da variável, o tipo, ou seja, booleano, inteiro, real ou *string* e a unidade, por exemplo, Km/h . Caso a variável seja um inteiro ou real é preciso informar os valores de máximo, mínimo e o valor da variação desejada para essa variável.

É importante destacar que essas informações se fazem necessárias para o funcionamento do algoritmo, como descrito no Capítulo 4, o especialista poderá modificar as variáveis da representação, sendo assim é nesse momento que ele define a representação. Conforme suas

edições são realizadas, o sistema já armazena no banco de dados para que o algoritmo utilize as mesmas. Os valores de máximo, mínimo e variação serão utilizados na etapa de criação da população inicial como foi detalhado no capítulo anterior.

Figura 5.7: Página da definição da representação

SmartSubway

Olá LIAA ! SmartSubway Ajuda Sair

Definição da Representação

Definição da Função

Criação da População

Definição dos Parâmetros

Definição dos Operadores

Resultados

Definição das Variáveis

Representação Atual

✗ ✎ Velocidade

Adicionar Nova Variável

Nome

Nome

Tipo

☐ Booleano

☐ Inteiro

☐ Real

☐ String

Unidade

Unidade

Valor máximo

Valor máximo

Valor mínimo

Valor mínimo

Variação

Variação

Adicionar

Variáveis Pré-definidas

✎ Longitude

✎ Latitude

✎ Energia

✎ Potência

✎ Corrente

✎ Altitude

✎ Inclinação

Definição das Constantes

Representação Atual

✗ ✎ Massa

Adicionar Nova Constante

Nome

Nome

Unidade

Unidade

Valor

Valor

Adicionar

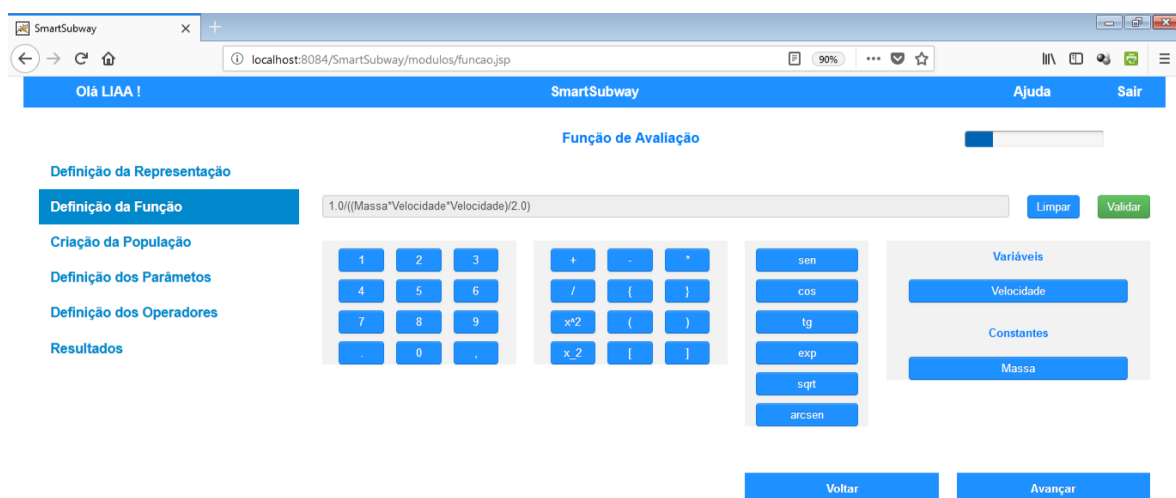
Voltar Avançar

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda na Definição da Representação, o especialista poderá adicionar as constantes. Para esse experimento, é possível observar que a modelagem utiliza a massa, que nesse caso trata-se da abordagem Perfil de Velocidade (*Speed Profile*), a qual permanece constante visto que durante duas estações não haverá mudança no peso do veículo, pois não ocorrerá alterações na quantidade de passageiros e na carga.

Com a representação concluída, inicia-se a inserção da função de avaliação. Na Figura 5.8 é possível observar a página onde o especialista poderá inserir a função de avaliação. No entanto para adicionar a função, o especialista deverá fazer uso dos botões, visto que o campo para inserir a função está desabilitado para evitar problemas com relação à digitação do nome das variáveis. Sendo assim o especialista poderá inserir números, operadores aritméticos, funções predefinidas, variáveis e constantes que foram definidas na página anterior. Conforme ele clica nos botões, o algoritmo inicia o processo da análise léxica, construindo a tabela de *tokens*, assim que ele clica em Validar, a análise sintática é iniciada e caso não tenha problema, a função será armazenada no banco de dados.

Figura 5.8: Página da definição da função de avaliação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, o especialista poderá definir a inicialização da população, e inserir os dados, caso ele deseje a opção de dados reais como mostrada na Figura 5.9. Nesse momento, foram inseridos os dados referentes à velocidade, capturados pelo SmartSubwaySensor.

Na próxima página, como mostrada na Figura 5.10, o especialista poderá inserir o tamanho da população, o número de gerações, a taxa de mutação e quantidade de repetição do

Figura 5.9: Página da Criação da População Inicial

SmartSubway

Ola LIAA ! SmartSubway Ajuda Sair

Geração da População Inicial

Definição da Representação

Definição da Função

Criação da População

Definição dos Parâmetros

Definição dos Operadores

Resultados

Tipo

☐ Aleatória

☒ Dados Reais

Dados:

0.00000000
0.125728086
0.798231753
1.675478273
2.025612557
2.137975161
2.714774270
3.308290234
4.105220629
4.706493200
5.283512633
6.016120334
6.628265690

Enviar

Voltar Avançar

Fonte: Elaborada pelo autor.

algoritmo.

Figura 5.10: Página da Definição dos Parâmetros

SmartSubway

Ola LIAA ! SmartSubway Ajuda Sair

Definição dos Parâmetros

Definição da Representação

Definição da Função

Criação da População

Definição dos Parâmetros

Definição dos Operadores

Resultados

Parâmetros do Algoritmo Genético

Tamanho da População 100

Número de Gerações 30

Taxa de Mutação 0.1

Quantidade de Execuções do Experimento

Quantidade

☐ 1

☐ 10

☒ 30

☐ 50

☐ 100

☐ 200

Enviar

Voltar Avançar

Fonte: Elaborada pelo autor.

Já na página seguinte, como mostrado na Figura 5.11, o especialista poderá definir os operadores genéticos, ou seja, o operador de seleção, de *crossover*, mutação, módulo da população e o tipo de suavização. Ao escolher os operadores, alguns necessitam de parâmetros de entrada, como por exemplo, o operador do torneio, que requer o valor de k . Ao concluir

a definição, a execução do algoritmo poderá ser iniciada.

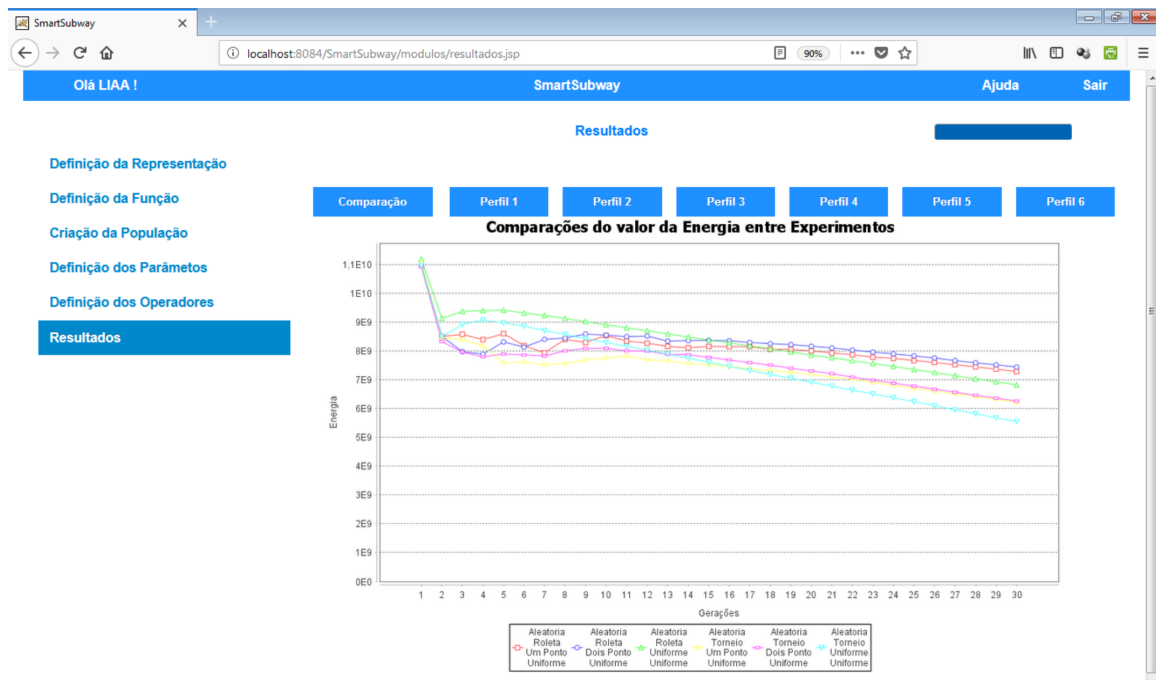
Figura 5.11: Página da Definição dos Operadores

The screenshot shows the 'SmartSubway' web application interface. The browser address bar indicates the URL is `localhost:8084/SmartSubway/modulos/operadores.jsp`. The page title is 'Definição dos Operadores'. The sidebar on the left contains the following links: 'Definição da Representação', 'Definição da Função', 'Criação da População', 'Definição dos Parâmetros', 'Definição dos Operadores' (highlighted in blue), and 'Resultados'. The main content area is divided into two sections: 'Parâmetros dos Operadores' and 'Operadores'. The 'Parâmetros dos Operadores' section contains four input fields: 'Alfa' (0.2), 'Beta' (0.3), 'K' (3), and 'Lambda' (0.4). Below these are two more input fields: 'P' (1) and 'R' (0.7). The 'Operadores' section contains four columns of checkboxes: 'Seleção' (with 'Roleta' and 'Torneio' checked), 'Crossover' (with 'Aritmético', 'Dois Pontos', 'Flat', 'Heurístico', 'Linear', 'Média', 'Média Geométrica', 'Uniforme', 'Um Ponto', and 'SBX' checked), 'Mutação' (with 'Limite', 'Não Uniforme', and 'Uniforme' checked), and 'Módulo' (with 'Descarta todos', 'Melhor Pai', and 'P Melhores' checked). There is also a 'Suavização' section with 'Média' checked and 'Sem Suavização' unchecked. At the bottom right, there is a blue button labeled 'Executar o Algoritmo'. At the bottom center, there are two blue buttons: 'Voltar' and 'Avançar'.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após todas as configurações definidas, o algoritmo executa e gera os resultados. A Figura 5.12 exibe a página de resultados, onde poderá ser visto a comparação entre os experimentos e o perfil de velocidade indicado pelo algoritmo.

Figura 5.12: Página dos Resultados



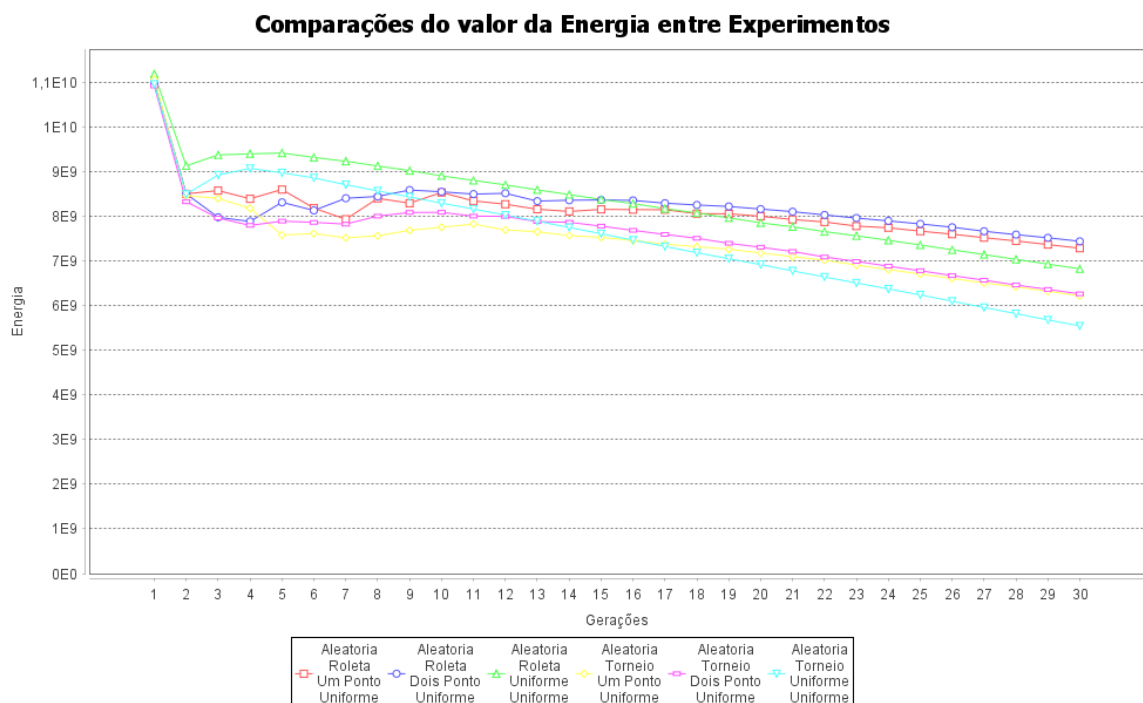
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 Resultados dos Experimentos

Com a inserção das informações do domínio no sistema SmartSubway, o mesmo apresentou uma comparação entre os seis experimentos e o melhor perfil encontrado. Com relação à comparação apresentada na Figura 5.13, é possível observar que o Experimento 6, composto pelos operadores de seleção do torneio, *crossover* uniforme e mutação uniforme, obteve melhor resultado quando comparado com os demais.

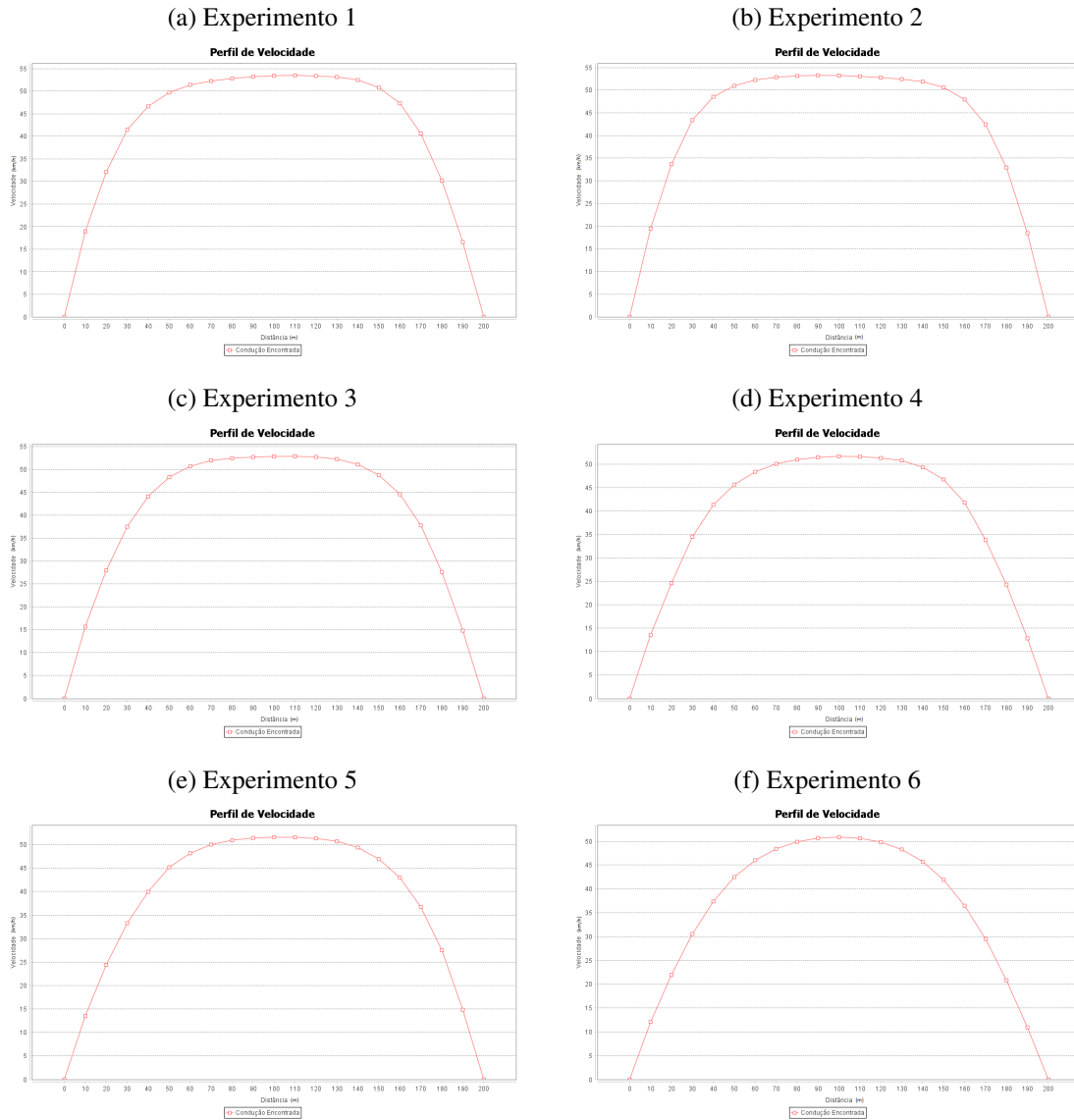
Após o Experimento 1, os que obtiveram melhores resultados foram os Experimentos 4 e 5, ou seja, os experimentos que usaram o operador de seleção do torneio tiveram melhor resultado quando comparado com método da roleta. Por fim, os Experimentos 1, 2 e 3 foram os que gastaram mais energia. Outra observação, é com relação aos operadores de *crossover* quando foi utilizado o mesmo operador de seleção, nos dois casos o operador de *crossover* uniforme obteve melhor resultado quando comparado ao *crossover* de um ponto e dois pontos. Na Figura 5.14, é ilustrado cada um dos seis perfis de velocidade gerados pelo algoritmo.

Figura 5.13: Comparação entre os experimentos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.14: Perfil de Velocidade resultante gerado pelo algoritmo para cada experimento



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5 Considerações Finais

Durante esse trabalho, foi possível observar que todas as etapas foram planejadas para que o sistema seja o mais genérico possível, tanto para facilitar a manipulação do especialista como também para dar suporte à colaboração dos experimentos. No entanto, devido às restrições de tempo, não foi possível concluir o sistema conforme planejado.

Uma das etapas planejadas é descrita na Figura E.3 do Apêndice E, onde os especialistas iriam se comunicar, conforme relatado na parte do modelo 3C de colaboração. Dessa forma não foi possível realizar a validação com relação à colaboração com especialistas. Com

relação aos experimentos apresentados, alguns operadores ainda precisam ser validados, bem como a inicialização da população de forma aleatória.

Capítulo 6

Conclusão

Com a realização deste trabalho foi, possível identificar uma estratégia para auxiliar os especialistas na inserção de informações do domínio, na solução do problema do gasto energético em trens. Com relação a técnica de otimização, os algoritmos genéticos foram capazes de encontrar boas soluções.

As contribuições esperadas com a implantação do sistema são:

- A empresa responsável pelos veículos economizará energia, que além de diminuir o consumo, permitirá que a mesma insira mais veículos na sua frota atual, pois em alguns estados brasileiros as companhias de fornecimento de energia elétrica limitam o fornecimento e caso ultrapassem esse limite a empresa é multada;
- A adição de mais veículos nos horários de maior uso irá impactar no nível de conforto dos passageiros, visto que a quantidade de passageiros por veículo será menor;
- Com a posse do histórico dos experimentos, a adaptação à mudanças no sistema metroferroviário será facilitada, como na inserção ou remoção de uma estação, ou numa alteração significativa do número de passageiros.

Como citado no capítulo anterior, até a conclusão deste documento, não foi possível concluir todas as funcionalidades planejadas, dessa forma algumas funcionalidades ficarão como trabalhos futuros e são descritas a seguir:

- Implementação e validação dos experimentos compartilhados;

- Aumentar o número de dados reais, inserindo variáveis como corrente, altitude, inclinação, entre outras;
- Validação através da experiência do usuário após a conclusão da parte colaborativa;
- Adicionar outras técnicas de otimização, bem como um método exato como programação linear;
- Adicionar uma opção para a tabela de horário.
- Inserir correlação entre as variáveis.
- Modificar a visualização de dados, usando bibliotecas como D3.

Bibliografia

ACM. *Association for Computing Machinery*. 2017. Disponível em: <<https://dl-acm-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/>>.

AFONSO, R. A. et al. Smartcluster: Utilizando dados publicos para agrupar cidades inteligentes por dominios. In: *XI Simposio Brasileiro de Sistemas de Informacao (SBSI)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 691–694.

AFONSO, R. A. et al. Br-scomm: Modelo brasileiro de maturidade para cidades inteligentes. *Simpósio Brasileiro De Sistemas De Informação*, 2013.

ÁLVARES, P. M. F.; COELHO, P. P.; SOUZA, H. A. d. Os desafios da mobilidade urbana nas cidades históricas: O contexto da elaboração do plano de mobilidade urbana da cidade de ouro preto - mg. *Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável : Pluris : contrastes, contradições, complexidades: desafios urbanos no Século XXI, VII*, 2016.

AQUINO, A. L. et al. Cidades inteligentes, um novo paradigma da sociedade do conhecimento. *Blucher Education Proceedings*, v. 1, n. 1, p. 165–178, 2015.

BORGES, M. R. Capítulo 12 - conhecimento coletivo. In: PIMENTEL, M.; FUKS, H. (Ed.). *Sistemas Colaborativos*. Elsevier Editora Ltda., 2012. p. 186 – 205. ISBN 978-85-352-4669-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535246698500127>>.

BORTOLAZZO, S. S. A.; CAVALLAZZI, J. E.; VALENTE, A. M. Otimização no transporte urbano: uma simulação intermodal com ênfase na eficiência energética. *Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável : Pluris : contrastes, contradições, complexidades: desafios urbanos no Século XXI, VII*, 2016.

BRASIL, U. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012, que institui as diretrizes da política nacional de mobilidade urbana. *Diário oficial da União*, v. 4, 2012.

BRENNNA, M.; FOIADELLI, F.; LONGO, M. Application of genetic algorithms for driverless subway train energy optimization. *International Journal of Vehicular Technology*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2016, 2016.

BRERETON, P. et al. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of systems and software*, Elsevier, v. 80, n. 4, p. 571–583, 2007.

CARAGLIU, A.; BO, C. D.; NIJKAMP, P. Smart cities in europe. *Journal of urban technology*, Taylor & Francis, v. 18, n. 2, p. 65–82, 2011.

CARVAJAL-CARREÑO, W.; CUCALA, A. P.; FERNÁNDEZ-CARDADOR, A. Optimal design of energy-efficient ato cbtc driving for metro lines based on nsga-ii with fuzzy parameters. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 36, p. 164–177, 2014.

CARVAJAL-CARREÑO, W. et al. Efficient driving algorithms for non-disturbed and disturbed trains with the cbtc signalling system. In: IEEE. *Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 2015 International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 418–425.

CASTRO, C. M. S. et al. Análise do potencial de integração da bicicleta com o transporte coletivo em belo horizonte. *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 2, p. 146–170, 2012.

CHEVRIER, R.; PELLEGRINI, P.; RODRIGUEZ, J. Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, v. 37, p. 20–41, 2013.

CONCEIÇÃO, E. S. F.; GUIMARÃES, R. M. d. S. Mobilidade urbana sustentável, a bicicleta como um meio de transporte - o caso do projeto cidade bicicleta - savador/ba. *Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável : Pluris : contrastes, contradições, complexidades: desafios urbanos no Século XXI*, VII, 2016.

COPPIN, B. *Inteligência artificial*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2015.

CORAPI, G. et al. Impacts of energy saving strategies (esss) on rail services and related effects on travel demand. *WIT Transactions on the Built Environment*, WIT Press, v. 135, p. 709–720, 2014.

COSTA, C. A. Cidades inteligentes e big data. *Cidades inteligentes e mobilidade urbana. Cadernos FGV Projetos. Ano*, v. 9, p. 66–73, 2014.

CUCALA, A. et al. Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 25, n. 8, p. 1548–1557, 2012.

DEPINÉ, A. Como se faz uma cidade inteligente. *Smart Cities como cidades inteligentes geram cidades sustentáveis. VIA Revista. Ano 1*, v. 1, p. 05–07, 2016.

DOURISH, P. Software infrastructures. *Computer Supported Cooperative Work*, John Wiley & Sons, p. 195–219, 1999.

ELLIS, C. A.; GIBBS, S. J.; REIN, G. Groupware: some issues and experiences. *Communications of the ACM*, ACM, v. 34, n. 1, p. 39–58, 1991.

ESA. *Department of Economic and Social Affairs*. 2017. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/Country-Profiles/>>.

FALCÃO, A. G. R.; BAPTISTA, C. d. S.; MENEZES, L. d. Crowd4city: utilizando sensores humanos como fonte de dados em cidades inteligentes. In: *Proceedings of the 8th Brazilian Symposium on Information Systems*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 144–149.

FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, A.; FERNÁNDEZ-CARDADOR, A.; CUCALA, A. P. Energy efficiency in high speed railway traffic operation: a real-time ecodriving algorithm. In: IEEE. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 325–330.

FRARE, I. O papel do planejamento estratégico na construção de cidades. *Cidades inteligentes e mobilidade urbana. Cadernos FGV Projetos*. Ano, v. 9, p. 158–177, 2014.

FUKS, H. et al. Capítulo 2 - teorias e modelos de colaboração. In: PIMENTEL, M.; FUKS, H. (Ed.). *Sistemas Colaborativos*. Elsevier Editora Ltda., 2012. p. 16 – 33. ISBN 978-85-352-4669-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535246698500024>>.

GALVÃO, C. d. O. *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. [S.l.]: UFRGS: ABRH, 1999.

GAMA, K.; ALVARO, A.; PEIXOTO, E. Em direção a um modelo de maturidade tecnológica para cidades inteligentes. *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, VIII*, 2012.

GIZ. *Deutsche Gesellschaft für internationalen Zusammenarbeit*. 2017. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/Factsheet_EEMU_Portugues_December2016.pdf>.

GONG, C. et al. An integrated energy-efficient operation methodology for metro systems based on a real case of shanghai metro line one. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 7, n. 11, p. 7305–7329, 2014.

GREENWADE, G. D. The Comprehensive Tex Archive Network (CTAN). *TUGBoat*, v. 14, n. 3, p. 342–351, 1993.

HAMID, H. A. et al. Investigation into train positioning systems for saving energy with optimised train trajectories. In: IEEE. *Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2016 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 460–468.

HUANG, Y. et al. Optimization of train operation in multiple interstations with multi-population genetic algorithm. *Energies, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 8, n. 12, p. 14311–14329, 2015.

KESKIN, K.; KARAMANCIOGLU, A. A hybrid optimization algorithm for energy efficient train operation. In: IEEE. *Innovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), 2015 International Symposium on*. [S.l.], 2015. p. 1–6.

LI, X.; LO, H. K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 64, p. 73–89, 2014.

LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (3a edição)*. [S.l.]: Brasport, 2012.

- LU, S. et al. Single-train trajectory optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 743–750, 2013.
- MARTINS, M. B. *GENETICBEE - Um Modelo Computacional Para A Otimização Da Eficiência Energética De Um Sistema Metroferroviário Utilizando Algoritmos Genéticos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2018.
- MILLS, K. L. Computer-supported cooperative work (cscw). Citeseer, 2003.
- MITCHELL, M. *An introduction to genetic algorithms*. [S.l.]: MIT press, 1998.
- MONZONI, M.; NICOLLETTI, M. A cidade para os cidadãos: Mobilidade, energia e agricultura urbana. *Cidades inteligentes e mobilidade urbana. Cadernos FGV Projetos*. Ano, v. 9, p. 90–107, 2014.
- ONU. *Organização das Nações Unidas*. 2017. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wpp/>>.
- PIMENTEL, M. et al. Modelo 3c de colaboração para o desenvolvimento de sistemas colaborativos. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Sistemas Colaborativos*, p. 58–67, 2006.
- QUEIROZ, M. et al. Um estudo exploratório sobre o uso de algoritmos genéticos para o problema de eficiência energética em trens urbanos. *Anais do IX ENUCOMP*, 2016.
- QUEIROZ, M. D. de et al. A framework to support experts in the study of energy efficiency in urban trains. In: *Proceedings of the XV Brazilian Symposium on Information Systems*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–8.
- QUEIROZ, M. D. de et al. Um framework para apoiar especialistas no estudo da eficiência energética em trens urbanos/a framework to support experts in the study of energy efficiency in urban trains. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 6, p. 34227–34250, 2020.
- SATOR. *Connected Smart Cities*. 2017. Disponível em: <<http://www.connectedsmartcities.com.br/resultado-2017/>>.
- SICRE, C.; CUCALA, A.; FERNÁNDEZ-CARDADOR, A. Real time regulation of efficient driving of high speed trains based on a genetic algorithm and a fuzzy model of manual driving. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 29, p. 79–92, 2014.
- SICRE, C. et al. Modeling and optimizing energy-efficient manual driving on high-speed lines. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Wiley Online Library, v. 7, n. 6, p. 633–640, 2012.
- SILVA, A. K. d. *Cidades inteligentes e sua relação com a mobilidade inteligente*. 2017. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2971350/modfolder/content/0/Artigo%20%20Mobilidade%20Inteligente.pdf?forcedownload=1>>.
- SIMON, D. *Evolutionary optimization algorithms*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- SOARES, D. J. Cidades inteligentes: um novo arranjo para o desenvolvimento. *Anais do II Encontro das Faculdades de Gestão e Negócios-13 a*, v. 15, 2012.

SOUZA, G. *Otimização de funções reais multidimensionais utilizando algoritmo genético contínuo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SU, S. et al. A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 883–893, 2013.

TEIXEIRA, C. S.; CATAPAN, A. H. As dez cidades mais inteligentes do brasil segundo o ranking connected smart cities. *Smart Cities como cidades inteligentes geram cidades sustentáveis. VIA Revista. Ano 1*, v. 1, p. 05–07, 2016.

TIMÓTEO, G. T. S. Desenvolvimento de um algoritmo genético para a resolução do timetabling. 2002.

VECHI, S. A cidade inteligente produz inovações continuamente. *Smart Cities como cidades inteligentes geram cidades sustentáveis. VIA Revista. Ano 1*, v. 1, p. 11–13, 2016.

VIVACQUA, A. S.; GARCIA, A. C. B. Capítulo 3 - ontologia de colaboração. In: PIMENTEL, M.; FUKS, H. (Ed.). *Sistemas Colaborativos*. Elsevier Editora Ltda., 2012. p. 34 – 49. ISBN 978-85-352-4669-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535246698500036>>.

VOSE, M. D. *The simple genetic algorithm: foundations and theory*. [S.l.]: MIT press, 1999.

XU, X.; LI, K.; LI, X. A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption. *Journal of Advanced Transportation*, Wiley Online Library, v. 50, n. 1, p. 69–95, 2016.

YANG, X. et al. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, v. 57, p. 13–29, 2015.

YONG, D. et al. A two-level optimization model and algorithm for energy-efficient urban train operation. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Elsevier, v. 11, n. 1, p. 96–101, 2011.

Apêndice A

Outros Operadores

Neste Apêndice serão descritos os demais operadores.

A.1 Operador de Seleção

A.1.1 Método do Torneio

O método do torneio como relata Linden (2012), consiste em selecionar uma série de indivíduos da população e fazer com que eles entrem em competição direta pelo direito de ser pai, usando para competir a sua avaliação.

Para selecionar o pai por esse método é necessário determinar o valor do parâmetro k , que define a quantidade de indivíduos a serem escolhidos aleatoriamente dentro da população para competir, na Figura A.1 é possível identificar duas tabelas onde a primeira possui os indivíduos e suas respectivas avaliações, e a segunda tabela mostra quais k indivíduos escolhidos aleatoriamente. Nesse exemplo foram selecionados 3 indivíduos, pois o k determinado foi o valor 3, e entre eles será escolhido o de maior avaliação. Na primeira linha da tabela do lado direito, pode-se observar que os indivíduos escolhidos foram o X2, X1 e X4, logo ao consultar a tabela do lado esquerdo a fim de encontrar cada um dos três indivíduos, nota-se que o indivíduo selecionado será o indivíduo X2 por possuir a avaliação 15, superando a avaliação de X1 e X4, com valores de avaliação 1 e 5 respectivamente.

Figura A.1: Método do torneio.

Método do Torneio para k = 3

Indivíduo	Avaliação	1	2	3	
x1	1	x2	x1	x4	x2
x2	15	x4	x3	x1	x3
x3	6	x5	x3	x3	x5
x4	5	x1	x3	x4	x3
x5	9	x4	x4	x4	x4

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2 Operador Crossover

A.2.1 Crossover Aritmético

Como relata Linden (2012) o *crossover* aritmético, define-se um parâmetro $\lambda \in [0, 1]$, e calcula-se cada posição do primeiro filho através da fórmula A.1, onde p é o índice da posição que varia de 1 a quantidade de genes dos pais.

$$c_p^{filho1} = \lambda c_p^1 + (1 - \lambda) c_p^2 \quad (A.1)$$

Figura A.2: *Crossover* Aritmético.**Crossover aritmético****Pai 1**

20,82	11,2	16,72	10,78	11,13	18,68	17,52
-------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Pai 2

12,41	10,81	14,59	21,33	14,97	10,86	18,8
-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

Filho 1 **$\lambda = 0.3$**

14,93	10,93	15,23	18,16	13,82	13,20	18,42
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

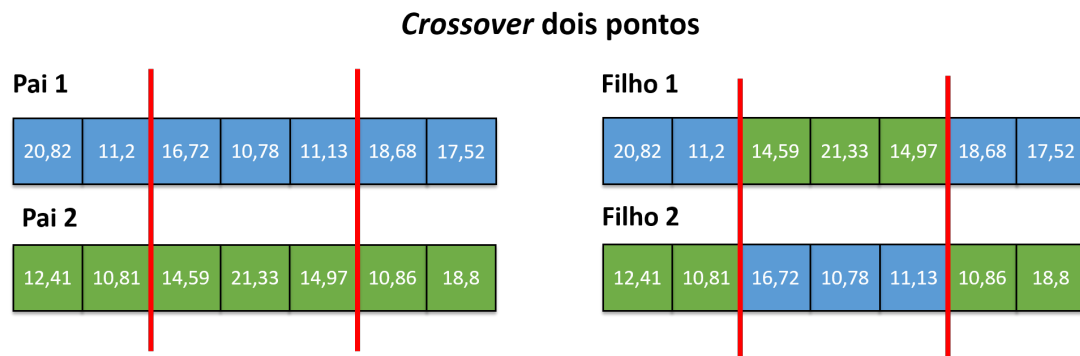
Filho 2

18,30	11,09	16,08	13,95	12,28	16,33	17,91
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.2 Crossover Dois Pontos

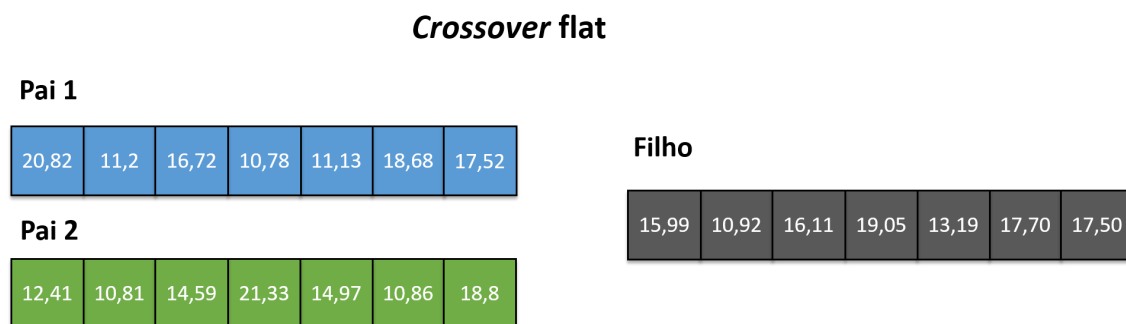
Segundo Coppin (2015), nesse *crossover* dois pontos são escolhidos aleatoriamente para dividir os cromossomos em duas seções, com as seções externas juntando-se para transformar o cromossomo em um anel. As duas seções são trocadas como mostrado na Figura A.3.

Figura A.3: *Crossover* Dois Pontos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.3 Crossover Flat

O *crossover* flat, segundo Linden (2012), consiste em estabelecer um intervalo fechado para cada par de valores no cromossomo, do menor valor armazenado até o maior e escolher um valor aleatório pertencente a este intervalo. Pode-se observar o funcionamento desse na Figura A.4.

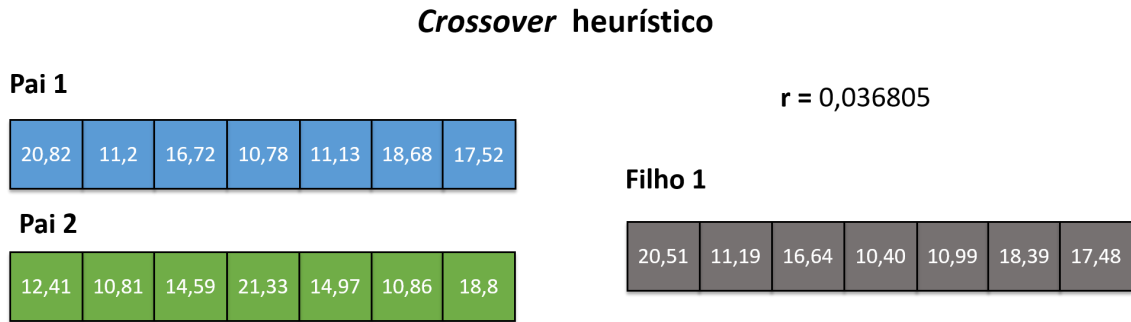
Figura A.4: *Crossover* Flat.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.4 Crossover Heurístico

O *crossover* heurístico, como descrito por Souza (2014) é um *crossover* baseado em direção, onde faz uso da informação da função de avaliação ou do gradiente para determinar a direção da busca. Por exemplo, se temos uma $f(x)$ que é a função de avaliação que desejamos minimizar, o filho é gerado conforme a equação.

$$c = \begin{cases} p_1 + r(p_1 - p_2) & \text{se } f(p_1 \leq p_2) \\ p_1 + r(p_2 - p_1) & \text{se } f(p_1 \geq p_2) \end{cases}$$

Figura A.5: *Crossover* Heurístico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

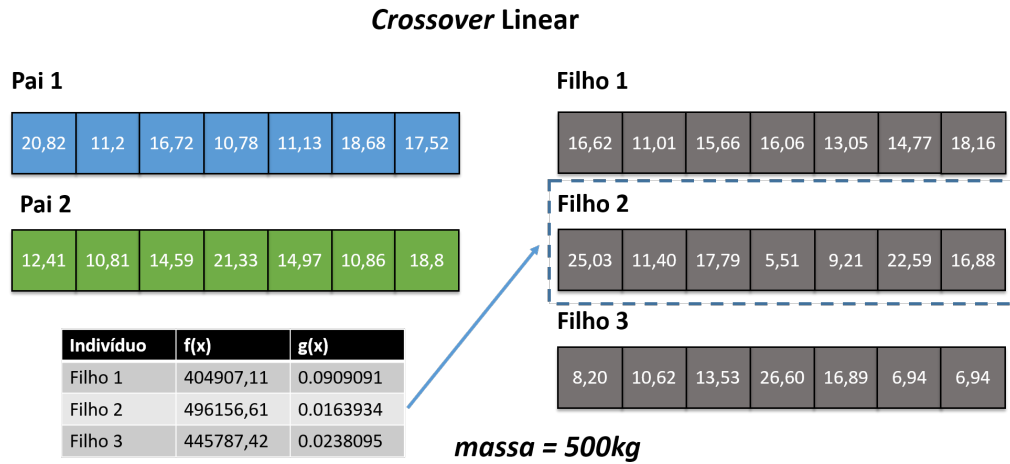
A.2.5 Crossover Linear

O operador de *crossover* linear conforme apresenta Linden (2012) evita a reprodução de filhos iguais em uma reprodução, de forma que ele gera três filhos com base nas fórmulas A.2, A.3 e A.4. Para manter o tamanho da população, cada filho gerado é avaliado a fim de que seja verificado qual dos três filhos possui pior avaliação para que ele seja excluído. Como pode ser visto na Figura A.6 a tabela que possui o valor da avaliação dos três filhos, sendo que o Filho 2 obteve a menor avaliação como mostrado na coluna $g(x)$, logo esse filho será excluído, restando apenas dois filhos.

$$c_l^{filho1} = \frac{c_l^1}{2} + \frac{c_l^2}{2} \quad (\text{A.2})$$

$$c_l^{filho2} = \frac{3 * c_l^1}{2} - \frac{c_l^2}{2} \quad (\text{A.3})$$

$$c_l^{filho3} = \frac{-c_l^1}{2} + \frac{3 * c_l^2}{2} \quad (\text{A.4})$$

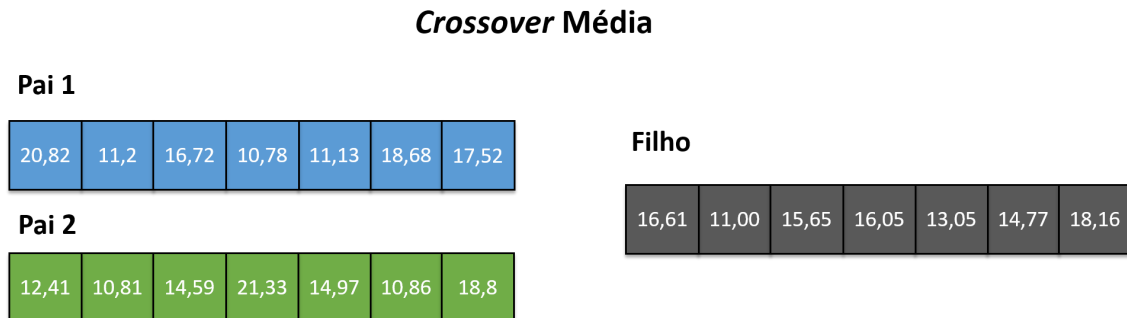
Figura A.6: *Crossover Linear*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.6 Crossover Média

Nesse *crossover* é realizado a média entre os valores dos genes de cada pai, ou seja, será feita a média com o primeiro gene do primeiro pai e o primeiro gene do segundo pai, esse processo continua até que seja feita a média entre o último gene do primeiro pai com o último gene do segundo pai, gerando assim um novo valor, caso os genes não sejam os mesmos, para o filho como mostrado na Figura A.7. Assim sendo p_i^1 e p_i^2 são os cromossomos pais, c o cromossomo filho e i um gene do cromossomo. Para a média aritmética é expressa na equação A.5 (SOUZA, 2014).

$$c_i = \frac{(p_i^1 + p_i^2)}{2} \quad (\text{A.5})$$

Figura A.7: *Crossover Média*.

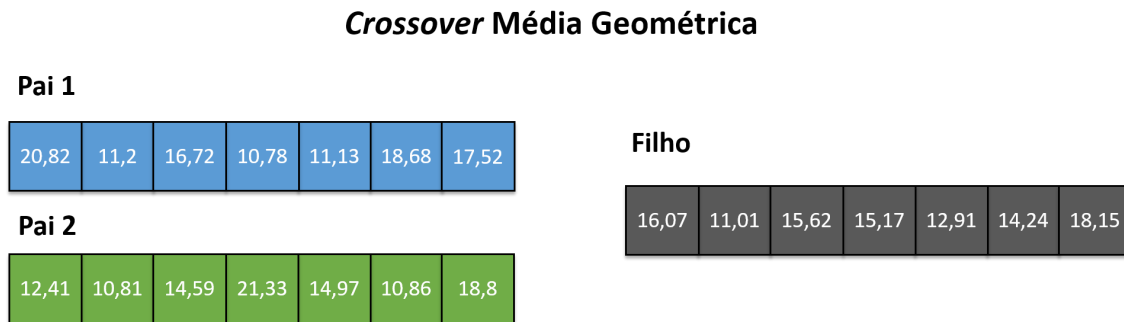
Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.7 Crossover Média Geométrica

O *crossover* média geométrica, consiste em aplicar a equação descrita em A.6, onde p_i^1 é a informação do gene i do pai n , sendo i a quantidade de genes do cromossomo, e n representa o valor do pai, logo os valores podem ser 1 ou 2. O cromossomo média induz os genes para o meio do intervalo entre os genes, acarretando perda de diversidade (GALVÃO, 1999).

$$c_i = \sqrt[p_i^1 * p_i^2]{p_i^1 * p_i^2} \quad (\text{A.6})$$

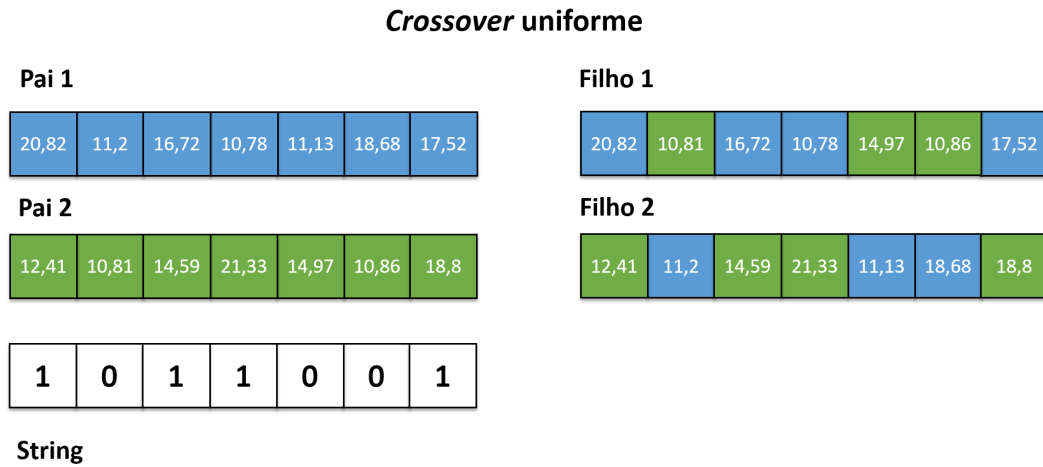
Figura A.8: *Crossover Média Geométrica*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.8 Crossover Uniforme

Segundo Linden (2012), no *crossover* uniforme ou *crossover* discreto, faz-se um sorteio para escolher em cada posição l um elemento pertencente ao conjunto dado por $\{c_l^1, c_l^2\}$ e o segundo filho recebe o elemento não sorteado para o primeiro. Um exemplo do funcionamento deste operador pode ser visto na Figura A.9.

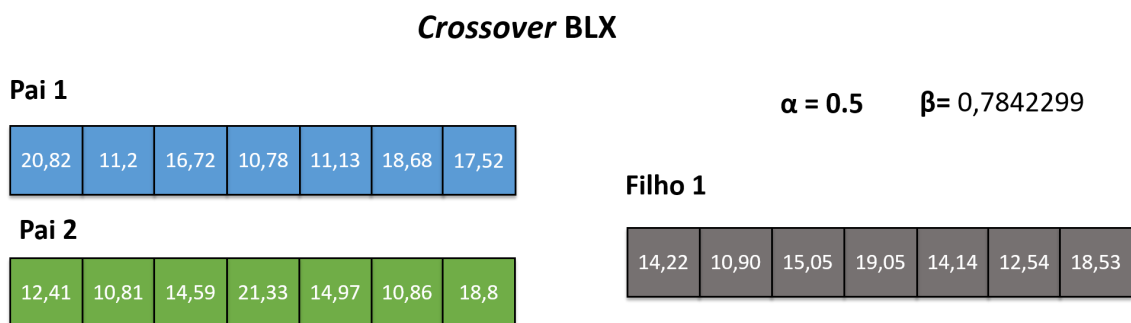
Figura A.9: *Crossover Uniforme*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2.9 Simulated Binary Crossover

Segundo Souza (2014) no *Simulated Binary Crossover* (SBX - α) os filhos são criados apartir da fórmula descrita em (A.7), de forma que o β será um número entre $(-\alpha, 1 + \alpha)$. Na Figura A.10 é mostrado um exemplo, com $\alpha = 0.5$ e $\beta = 0.7842299$.

$$c = p_1 + \beta(p_2 - p_1) \quad (\text{A.7})$$

Figura A.10: *Simulated Binary Crossover*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apêndice B

Artigos do Mapeamento Sistemático

Artigo 01 XU, Xiaoming; LI, Keping; LI, Xiang. A multiobjective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption. *Journal of Advanced Transportation*, v. 50, n. 1, p. 69-95, 2016.

Artigo 02 FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, Adrián; FERNÁNDEZ-CARDADOR, Antonio; CUCALA, Asunción P. Energy efficiency in high speed railway traffic operation: a real-time ecodriving algorithm. In: *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015 IEEE 15th International Conference on. IEEE, 2015. p. 325-330.

Artigo 03 HAMID, Hassan Abdulsalam et al. Investigation into train positioning systems for saving energy with optimised train trajectories. In: *Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 2016 IEEE International Conference on. IEEE, 2016. p. 460-468.

Artigo 04 YONG, D. I. N. G. et al. A two-level optimization model and algorithm for energy-efficient urban train operation. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, v. 11, n. 1, p. 96-101, 2011.

Artigo 05 LI, Xiang; LO, Hong K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 64, p. 73-89, 2014.

Artigo 06 CHEVRIER, Rémy; PELLEGRINI, Paola; RODRIGUEZ, Joaquin. Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 37, p. 20-41, 2013.

Artigo 07 CUCALA, A. P. et al. Fuzzy optimal schedule of high speed train operation

to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 25, n. 8, p. 1548-1557, 2012.

Artigo 08 SICRE, C.; CUCALA, A. P.; FERNÁNDEZ-CARDADOR, Antonio. Real time regulation of efficient driving of high speed trains based on a genetic algorithm and a fuzzy model of manual driving. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 29, p. 79-92, 2014.

Artigo 09 CARVAJAL-CARREÑO, William; CUCALA, Asunción P.; FERNÁNDEZ-CARDADOR, Antonio. Optimal design of energy-efficient ATO CBTC driving for metro lines based on NSGA-II with fuzzy parameters. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 36, p. 164-177, 2014.

Artigo 10 CARVAJAL-CARREÑO, William et al. Efficient driving algorithms for non-disturbed and disturbed trains with the CBTC signalling system. In: *Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2015 International Conference on. IEEE, 2015. p. 418-425.

Artigo 11 CORAPI, G. et al. Impacts of energy saving strategies (ESSs) on rail services and related effects on travel demand. *WIT Transactions on the Built Environment*, v. 135, p. 709-720, 2014.

Artigo 12 HUANG, Youneng et al. Optimization of train operation in multiple interstations with multi-population genetic algorithm. *Energies*, v. 8, n. 12, p. 14311-14329, 2015.

Artigo 13 YANG, Xin et al. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 57, p. 13-29, 2015.

Artigo 14 BRENNA, Morris; FOIADELLI, Federica; LONGO, Michela. Application of genetic algorithms for driverless subway train energy optimization. *International Journal of Vehicular Technology*, v. 2016, 2016.

Artigo 15 GONG, Cheng et al. An integrated energy-efficient operation methodology for metro systems based on a real case of Shanghai metro line one. *Energies*, v. 7, n. 11, p. 7305-7329, 2014.

Artigo 16 KESKIN, Kemal; KARAMANCIOGLU, Abdurrahman. A hybrid optimization algorithm for energy efficient train operation. In: *Innovations in Intelligent Systems*

and Applications (INISTA), 2015 International Symposium on. IEEE, 2015. p. 1-6.

Artigo 17 LU, Shaofeng et al. Single-train trajectory optimization. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 14, n. 2, p. 743-750, 2013.

Artigo 18 SICRE, Carlos et al. Modeling and optimizing energy [U+2010] efficient manual driving on high [U+2010] speed lines. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, v. 7, n. 6, p. 633-640, 2012.

Apêndice C

Lista com as Variáveis e Funções

Neste Apêndice serão apresentados as variáveis e funções encontradas nos artigos do mapeamento sistemático.

C.1 Artigo 01

Nome: A Multi-Objective Subway Timetable Optimization Approach with Minimum Passenger Time and Energy Consumption.

Autores: Xiaoming Xu a, Keping Li a, Xiang Lib

Citação: (XU; LI; LI, 2016).

Variáveis: O artigo tem como objetivo encontrar estratégias para solucionar o problema de tabelas de horário, saindo um pouco do objetivo inicial do trabalho.

Função de Avaliação: Função do artigo.

C.2 Artigo 02

Nome: Energy efficiency in high speed railway traffic operation: a real-time ecodriving algorithm

Autores: Adrián Fernández-Rodríguez, Antonio Fernández-Cardador, Asunción P. Cucala

Citação: (FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ; FERNÁNDEZ-CARDADOR; CUCALA, 2015).

Variáveis: Esse trabalho divide em três partes distintas: o módulo do trem com a tração

e o efeito máximo do freio nas curvas, variação da eficiência dos motores. Para o módulo linha foi utilizados os limites de velocidade, grades e transições, bends, tuneis e seções neutras. Já o módulo de direção manual controla a tração, demanda de esforço do freio exigido aos motores, dependendo dos comandos de condução, limitações de velocidade e pontos de parada em locais.

Função de Avaliação:

$$M.a = F_m - (F_r + F_\sigma) \quad (C.1)$$

$$F_r = A + B.v + C.v^2 \quad (C.2)$$

$$F_g = g.m.p \quad (C.3)$$

$$HV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NI} [(f_{no}^{max} - f_{no}^i) \prod_{j=1}^{no-1} (f_j^{sup_j} - f_j^i)]}{\prod_{j=1}^{no} (f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (C.4)$$

C.3 Artigo 03

Nome: Investigation into Train Positioning Systems for Saving Energy with Optimised Train Trajectories

Autores: Hassan Abdulsalam Hamid, Gemma L. Nicholson, Heather Douglas, Ning Zhao e Clive Roberts

Citação: (HAMID et al., 2016)

Variaveis:

ω_E e ω_T = weightings associated with energy consumption and running time.

E = energy consumption

T = journey time

F = train traction force.

v = speed

P = power required to realise that speed profile.

t = time required to make this distance step

Função de Avaliação:

$$P = F_{tr} \cdot v \quad (C.5)$$

$$E = Pt \quad (C.6)$$

$$Fitness Function = \mu(E) \cdot \omega_E + \mu(T) \cdot \omega_T \quad (C.7)$$

C.4 Artigo 04

Nome: A Two-level Optimization Model and Algorithm for Energy-Efficient Urban Train Operation

Autores: DING Yong, LIU Haidong, BAI Yun, ZHOU Fangming

Citação: (YONG et al., 2011)

Variáveis:

E_i^q = energy consumption of the train movement on the $i - th$ section

T_i^q = practical run-time on the $i - th$ section

Função de Avaliação:

$$\min E = \sum_{i=1}^n E_i^q(T_i^q) \quad (C.8)$$

C.5 Artigo 05

Nome: An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations.

Autores: Xiang Li e Hong K. Lo

Citação: (LI; LO, 2014).

Variaveis:

t = time index, $t = 1, 2, \dots, T$

k = train index, $k = 1, 2, \dots, K$

i = cycle index, $i = 1, 2, \dots, I$

n = segment index, $n = 1, 2, \dots, N$

j = substation index, $j = 1, 2, \dots, J$

$[]$ = collection of stations, $[] \subseteq \{1, 2, \dots, N\}$

w_n = maximum dwell time at station n

$\underline{w}_n$ = minimum dwell time at station n

L = passenger demand

l = train capacity

j = train capacity utilization rate

h = headway

u_n = speed limit at segment n

p_n = starting position of segment n

A = the maximum tractive force per unit mass for trains

B = the maximum braking force per unit mass for trains

R_n = the running resistance per unit mass for trains at segment n

α_n = acceleration rate for trains at segment n during accelerating phase

β_n = deceleration rate for trains at segment n during coasting phase

γ_n = deceleration rate for trains at segment n during braking phase

h_1 = conversion factor from electricity to kinetic energy

h_2 = conversion factor from kinetic energy to regenerative electricity h_3 = transmission loss

factor of regenerative energy r = turnaround time

M = train mass

$\delta(n, j)$; taking value 1 if segment n is located in substation j ; otherwise, taking value 0

Decision variables

m_n = the maximum speed for trains at segment n

q_n = speed for trains at position pn

a_{kin} = arriving time for train k at the n th segment of cycle i

c_{kin} = switching time from accelerating phase to coasting phase for train k at the n th segment of cycle i

b_{kin} = switching time from coasting phase to braking phase for train k at the n th segment of cycle i

e_{kin} = departing time for train k at the n th segment of cycle i

v_{kin} = speed profile for train k at the n th segment of cycle i

C = cycle time, i.e., the period required to complete one cycle for one train

I = the number of cycles

K = the number of trains

Função de Avaliação:

$$L = l \cdot k \cdot \phi \quad (C.9)$$

$$h = \frac{3600 \cdot l \cdot k}{L} \quad (C.10)$$

$$x = \{a_{kin}, e_{kin}, q_n, m_n | 1 \leq k \leq K, 1 \leq i \leq I, 1 \leq n \leq N\} \quad (C.11)$$

$$v_{kin}(x, t) = 0, \forall a_{kin} \leq t \leq e_{kin} \quad (C.12)$$

$$v_{kin}(x, t) = \begin{cases} q_n + \alpha_n(t - a_{kin}), & \text{if } a_{kin} \leq t < c_{kin}, \\ m_n + \beta_n(t - c_{kin}), & \text{if } c_{kin} \leq t < b_{kin}, \\ q_{n+1} + \gamma_n(e_{kin} - t), & \text{if } b_{kin} \leq t < e_{kin}. \end{cases} \quad (C.13)$$

$$\begin{cases} q_n + \alpha_n(c_{kin} - a_{kin}) = m_n - \beta_n(c_{kin} - c_{kin}), \\ m_n - \beta_n(b_{kin} - c_{kin}) = q_{n+1} + \gamma_n(e_{kin} - b_{kin}) \end{cases} \quad (C.14)$$

$$\begin{cases} c_{kim} = a_{kin} + (m_n - q_n)/\alpha_n \\ b_{kin} = (\gamma_n e_{kin} - m_n + q_{n+1} - \beta_n c_{kin})/(\gamma_n - \beta_n). \end{cases} \quad (C.15)$$

$$f_{kin}(x, t) = \begin{cases} M A v_{kim}(x, t)/\theta_1, & \text{if } a_{kin} \leq t < c_{kin}, \\ 0, & \text{if } c_{kin} \leq t < e_{kin} \end{cases} \quad (C.16)$$

$$F_{ki}(x) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=a_{kin}}^{e_{kin}-1} f_{kin}(x, t) \quad (C.17)$$

$$F_{ki}(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \sum_{t=a_{kin}}^{e_{kin}-1} f_{kin}(x, t) \quad (C.18)$$

$$F(x) = K.I.F_{11}(x) \quad (C.19)$$

$$g_{kin}(x, t) = \begin{cases} 0, & \text{if } a_{kin} \leq t < b_{kin} \\ M B v_{kin}(x, t)\theta_2(1 - \theta_3), & \text{if } b_{kin} \leq t < e_{kin} \end{cases} \quad (C.20)$$

$$n_{kt} = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq t < a_{k11} \\ n, & \text{if } a_{k1n} \leq t < e_{k1n} \end{cases} \quad (C.21)$$

$$G_{1tj}(x) = \min\left\{\sum_{k=1}^K f_{k1n_{kt}}(x, t)\delta(n_{kt}, j), \sum_{k=1}^K g_{k1n_{kt}}(x, t)\delta(n_{kt}, j)\right\} \quad (C.22)$$

$$G_1(x) = \sum_{t=0}^{C-1} \sum_{j=1}^J G_{1tj}(x) \quad (C.23)$$

$$\begin{cases} n_{1t} = n, & \text{if } a_{1(i+1)n} \leq t < e_{1(i+1)n} \\ n_{kt} = n, & \text{if } a_{kin} \leq t < e_{kin} \end{cases} \quad (C.24)$$

$$G_{(i+1)tj}(x) = \min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=2}^K f_{kin_{kt}}(x, t) \delta(n_{kt}, j) + f_{1(i+1)n_{1t}}(x, t) \delta(n_{1t}, j), \\ \sum_{k=2}^K g_{kin_{kt}}(x, t) \delta(n_{kt}, j) + g_{1(i+1)n_{1t}}(x, t) \delta(n_{1t}, j) \end{array} \right. \quad (C.25)$$

$$G_{i+1}(x) = K \cdot \sum_{t=iC}^{iC+h-1} \sum_{j=1}^J G_{(i+1)tj}(x) \quad (C.26)$$

$$n_{kt} = \begin{cases} n, & \text{if } a_{kin} \leq t < e_{kin} \\ 0, & \text{if } e_{kiN} \leq t \leq T \end{cases} \quad (C.27)$$

$$G_{I+1}(x) = \sum_{t=IC}^{T-1} \sum_{j=1}^J \min \left\{ \sum_{k=1}^K f_{k1n_{kt}}(x, t) \delta(n_{kt}, j), \sum_{k=1}^K g_{k1n_{kt}}(x, t) \delta(n_{kt}, j) \right\} \quad (C.28)$$

$$G(x) = G_i(x) + (I - 1) \cdot G_2(x) + G_{I+1}(x) \quad (C.29)$$

$$E(x) = F(x) - G(x) \quad (C.30)$$

$$\min E(x) \quad (C.31)$$

C.6 Artigo 06

Nome: Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times.

Autores: Rémy Chevrier, Paola Pellegrini e Joaquín Rodriguez

Citação: (CHEVRIER; PELLEGRINI; RODRIGUEZ, 2013)

Variaveis:

T = Journey duration (s)

E = Mechanical energy (J)

v = Train speed (m/s)

$P(t)$ = Mechanical power at instant t (W)

$FT(v)$ = Tractive effort, function of speed v (N)

Função de Avaliação:

$$E = \int_0^t P(t)dt \text{ with } P(t) = F(t)v(t) \quad (C.32)$$

$$\phi = (\min T, \min E) \quad (C.33)$$

C.7 Artigo 07

Nome:Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response.

Autores: A. P. Cucala, A. Fernández, C.Sicre e M.Domínguez

Citação: (CUCALA et al., 2012).

Variaveis:

T_{si} = commercial stop time at station i ;

E = holds for energy;

w_E e w_t = weighting factors;

Função de Avaliação:

$$f = w_E \frac{E}{E_{flat-out}} + w_t \frac{T_{target}}{T_{flat-out}} \text{ if } T \leq T_{target} \quad (C.34)$$

$$f = w_E \frac{E}{E_{flat-out}} + w_t \frac{T^2}{T_{flat-out}T_{target}} \text{ if } T > T_{target} \quad (C.35)$$

C.8 Artigo 08

Nome: Real time regulation of efficient driving of high speed trains based on a genetic algorithm and a fuzzy model of manual driving.

Autores: C.Sicre, A. P. Cucala e A. Fernández Cardador

Citação: (SICRE; CUCALA; FERNÁNDEZ-CARDADOR, 2014)

Variáveis: Não se aplica, pois a abordagem adota é híbrida onde foi utilizado Algoritmos Genéticos com Lógica Fuzzy.

Função de Avaliação: -

C.9 Artigo 09

Nome: Optimal design of energy-efficient ATO CBTC driving for metro lines based on NSGA-II with fuzzy parameters.

Autores: William Carvajal Carreno, Asunción P. Cucala Antonio e Fernández-Cardador

Citação: (CARVAJAL-CARREÑO; CUCALA; FERNÁNDEZ-CARDADOR, 2014).

Variáveis: Não se aplica, pois a abordagem adota é híbrida onde foi utilizado Algoritmos Genéticos com Lógica Fuzzy.

Função de Avaliação: -

C.10 Artigo 10

Nome: Efficient driving algorithms for non-disturbed and disturbed trains with the CBTC signalling system.

Autores: William Carvajal-Carreno, Asunción P. Cucala García, Antonio Fernández-Cardador e Lennart Soder

Citação: (CARVAJAL-CARREÑO et al., 2015).

Variáveis: Não se aplica, pois a abordagem adota é híbrida onde foi utilizado Algoritmos Genéticos com Lógica Fuzzy.

Função de Avaliação: -

C.11 Artigo 11

Nome: Impacts of energy saving strategies (ESSs) on rail services and related effects on travel demand.

Autores: G. Corapi, V. de Martinis, A. Placido e G. de Luca

Citação: (CORAPI et al., 2014)

Variáveis:

Z = total generalised cost of the simulated scenario;

$\beta_{waiting}$ = the weight of the waiting time;

$tw_{s,p}^r$ = the average user waiting time at station s on platform p between run $(r-1)$ and run r ;

$fw_{s,p}^r$ = the number of passengers waiting at station s on platform p between run $(r-1)$ and run r ;

$\beta_{on-board}$ = the weight of the on-board time;

tb_l^r = the time spent by the users on board run r for travelling on link l ;

fb_l^r = the number of passengers who travel on board run r along link l .

Função de Avaliação:

$$Z = \beta_{waiting} \cdot \sum_s \sum_p \sum_r c \cdot fw_{s,p}^r + \beta_{on-board} \cdot \sum_l \sum_r tb_l^r \cdot fb_l^r \quad (C.36)$$

C.12 Artigo 12

Nome: Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm.

Autores: Youneng Huang, Xiao Ma, Shuai Su e Tao Tang

Citação: (HUANG et al., 2015).

Variáveis:

Decision Variables

$T_{interstation\ i}$ = trip time for the i -th interstation.

$C_{i,j}$ = driving regime for the $i - th$ section in the $j - th$ interstation.

Intermediate Variables

v = speed of the train.

V_i = final speed for the $i - th$ section.

$v_{i,j}$ = final speed for the $j - th$ subsection in the $i - th$ section.

$a_{i,j}$ = acceleration for the $j - th$ subsection in the $i - th$ section.

a^T = equivalent acceleration for the traction force.

$F_{i,j}$ = traction force for the $j - th$ subsection in the $i - th$ section.

$F_{br_{ij}}$ = basic resistance for the $j - th$ subsection in the $i - th$ section.

F_{gr} = gradient resistance force.

F_{cr} = curve resistance force.

E_s = the optimal energy consumption.

E_i = energy consumption for the $i - th$ section per unit mass.

e_{ij} = energy consumption for the $j - th$ subsection in the $i - th$ section per unit mass.

T_s : the optimal trip time.

T_i : trip time for the $i - th$ section.

t_{ij} : trip time for the $j - th$ subsection in the $i - th$ section.

$T_{interstation\ i}^{min}$ = minimum trip time for the $i - th$ interstation.

$T_{interstation\ i}^{max}$ = maximum trip time for the $i - th$ interstation.

Parameters

k = number of interstations.

p = number of sections in an interstation.

m = number of subsections in a section.

w number of driving regimes in an interstation.

T_p = the practical trip time.

S_i = trip distance for the $i - th$ section.

$S_{interstation\ i}$ = trip distance for the $i - th$ interstation.

M_i = mass of the train for the $i - th$ interstation.

d trip distance for each subsection.

v_{limit} = speed limits.

E_p = the practical energy consumption.

α = penalty coefficient of time in the objective function.

β = penalty coefficient of speed in the objective function.

T_{dwelli} = dwell time for the $i - th$ interstation.

Função de Avaliação:

$$\min obj = E_s + |T_s - T_t|. \alpha + num. \beta \quad (C.37)$$

s.t

$$E_s(C_{i,j}) = \sum_{j=1}^k M_j \left(\sum_{i=1}^p E_i(C_{i,j}) \right) \quad (C.38)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^m a_{i,j}^T d \quad (C.39)$$

$$T_p = T_s = \sum_{i=1}^k T_{interstationi} \quad (C.40)$$

$$T_{interstationi}^{min} \leq T_{interstationi} \leq T_{interstationi}^{max} \quad (C.41)$$

$$v(0) = 0, v(T_{interstationi}) = 0, 0 \leq v_i \leq v_{lim} \quad (C.42)$$

$$w \leq w_{lim}, |C_{i+1,j} - C_{i,j}| \leq 1 \quad (C.43)$$

C.13 Artigo 13

Nome: An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems.

Autores: Xin Yang, Anthony Chen, Xiang Li, Bin Ning e Tao Tang

Citação: (YANG et al., 2015).

Variaveis:

l_n = minimum dwell time at station n

u_n = maximum dwell time at station n

x_n = dwell time at station n

N_c = number of cycles

Função de Avaliação:

$$\min E(x_2, x_3, \dots, x_{N-1}, x_{N+2}, x_{N+3}, \dots, x_{2N-1}) \quad (\text{C.44})$$

$$s.t. l_n \leq x_n \leq u_n; n = 2, 3, \dots, N-1, N+2, \dots, 2N-1 \quad (\text{C.45})$$

$$x_n \in Z; n = 2, 3, \dots, N-1, N+2, \dots, 2N-1 \quad (\text{C.46})$$

C.14 Artigo 14

Nome: Application of Genetic Algorithms for Driverless Subway Train Energy Optimization.

Autores: Morris Brenna, Federica Foiadelli, e Michela Longo

Citação: (BRENNA; FOIADELLI; LONGO, 2016).

Variaveis:

F = the tractive effort [N];

B = the braking effort[N];

V = the velocity [m/s];

A = the power required by the onboard auxiliary services [W];

T_t = the travel time between two stations [s];

η_M = the efficiency during the traction;

η_B = the efficiency during braking.

Função de Avaliação:

$$E = \frac{\int F.v.dt}{\eta_M} + A.T_t.\eta_B \int B.v.dt \quad (C.47)$$

C.15 Artigo 15

Nome: An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One.

Autores: Cheng Gong, Shiwen Zhang, Feng Zhang, Jianguo Jiang e Xinheng Wang

Citação: (GONG et al., 2014).

Variaveis:

E = the total energy consumption of the system;

Q = the number of substations of power supply for the metro system;

t_f = the total travelling time of the system;

U_j = voltage of the j_{th} substation.

I_j = current of the j_{th} substation.

Função de Avaliação:

$$\min E = \sum_{j=1}^2 \int_0^Q U(t, x_1, x_2, \dots, x_{32}) I_j(t, x_1, x_2, \dots, x_{32}) \quad (C.48)$$

$$s.t. 0 \leq x_i \leq 10 \quad i = 1, 2, \dots, 32 \quad (C.49)$$

$$x_i \text{ is interger } i = 1, 2, \dots, 32 \quad (C.50)$$

C.16 Artigo 16

Nome: A Hybrid Optimization Algorithm for Energy Efficient Train Operation.

Autores: Kemal Keskin e Abdurrahman Karamancioglu

Citação: (KESKIN; KARAMANCIOGLU, 2015).

Variaveis:

CR e CO = points that is critical for energy efficient train operation

P = penalty factor

Δt = step size

η = the transformation efficiency converting motor power to traction force

v_k = speed of train at step k

F_k = tractive effort supplies force to move along the rail line

Função de Avaliação:

$$\min E(t_{CR}, t_{CO}) = \sum_{k=0}^N \frac{F_k v_k}{2650 \cdot \eta} \Delta t + P \quad (C.51)$$

C.17 Artigo 17

Nome: Single-Train Trajectory Optimization.

Autores: Shaofeng Lu, Stuart Hillmansen, Tin Kin Ho, and Clive Roberts

Citação: (LU et al., 2013)

Variáveis:

F = the tractive effort or braking effort if applicable within the adhesion limit;

A , B e C = Davis constants;

M' = the effective mass including rotary allowance;

M = the tare mass;

t = the dependent element time;

s = instant distance of the train;

α = the slope angle

Função de Avaliação:

$$M' \frac{d^2.s}{dt^2} = F - (A + B \frac{ds}{dt} + C \frac{d^2.s}{dt^2}) \quad (C.52)$$

C.18 Artigo 18

Nome: Modeling and Optimizing Energy-Efficient Manual Driving on High-Speed Lines.

Autores: Carlos Sicre, Asuncion P. Cucala, Antonio Fernandez and Piotr Lukaszewicz

Citação: (SICRE et al., 2012)

Variáveis:

F_R = second-degree polynomial with respect to the speed

A , B e C = coefficients

P_{mec} = mechanical power

P_e = electric power

v = speed

u = the voltage of the line

i = the total current

θ = the phase between u and i

P_{aux} = being the power of the auxiliary equipment

η_t = the tractive efficiency

Função de Avaliação:

$$F_R = A + B.V + C.V^2 \quad (C.53)$$

$$P_{mec} = F.v \quad (C.54)$$

$$P_e = u.i.\cos(\theta) \quad (C.55)$$

$$\eta_t = \frac{P_{mec}}{P_e - P_{aux}} \quad (C.56)$$

Apêndice D

Gramática

Neste Apêndice será apresentada a gramática utilizada pelo Analisador Sintático.

D.0.1 Gramática

expressao_simples →

termo expressao_simples2

| *sinal termo expressao_simples2*

expressao_simples2 →

operador_aditivo termo expressao_simples2

| ϵ

termo →

fator termo2

termo2 →

operador_multiplicativo fator termo2

| ϵ

fator →

variavel

| *constante*

| *funcao(expressao_simples)*

| *numero_inteiro*

| *numero_real*

| (*expressao_simples*)

operador_aditivo →

+

| −

operador_multiplicativo →

*

| /

senal →

+

| −

Apêndice E

Protótipo Inicial do SmartSubway

Neste Apêndice serão exibidas as telas do protótipo inicial do SmartSubway.

E.1 Tela 1 - Página Inicial do Sistema

Na Figura E.1 é apresentada a Tela Inicial do SmartSubway, onde o usuário poderá realizar o login para ter acesso ao sistema, ou realizar o seu cadastro.

Figura E.1: Tela 1 com a página inicial do sistema.

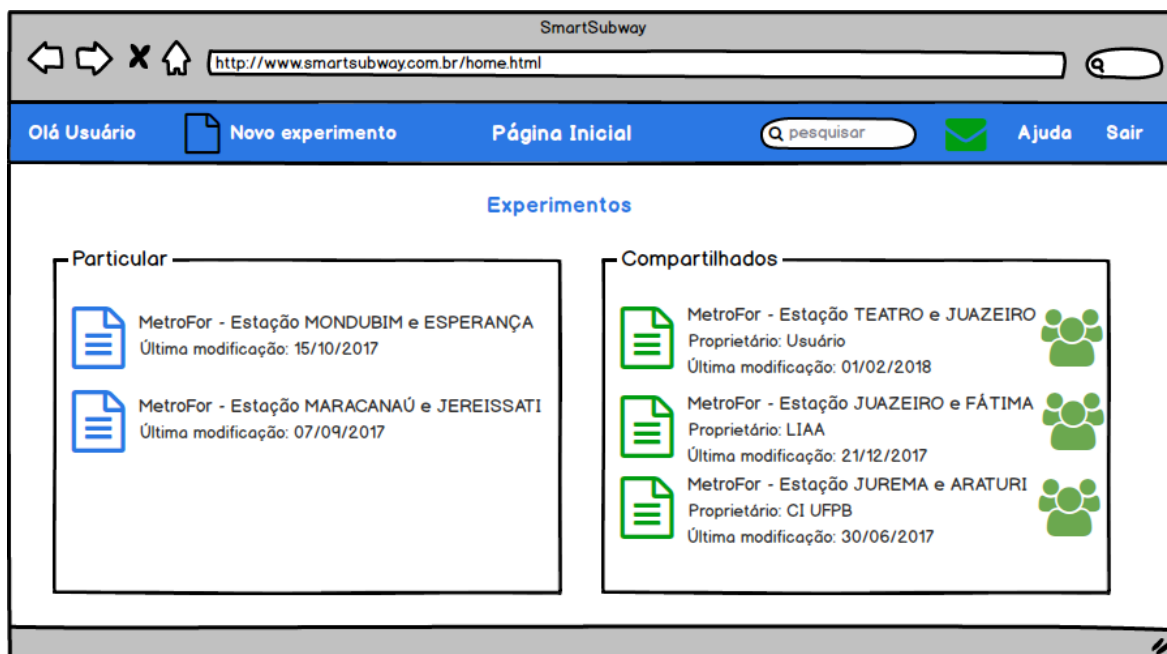


Fonte: Elaborada pelo autor.

E.2 Tela 2 – Página dos Experimentos

A Tela 2, apresentada na Figura E.2, representa a parte responsável pelos experimentos, onde será possível identificar quais os experimentos são realizados de forma individual, e quais experimentos são realizados de forma compartilhada. Nessa tela o usuário poderá também criar um novo experimento. Ao clicar no nome do experimento o usuário irá seguir para a tela 4, onde será possível iniciar o experimento. Caso o experimento seja compartilhado, ele poderá clicar no ícone verde situado no lado direito do nome do arquivo, quando ele irá para a Tela 3 para observar os outros especialistas.

Figura E.2: Tela 2 dos experimentos.

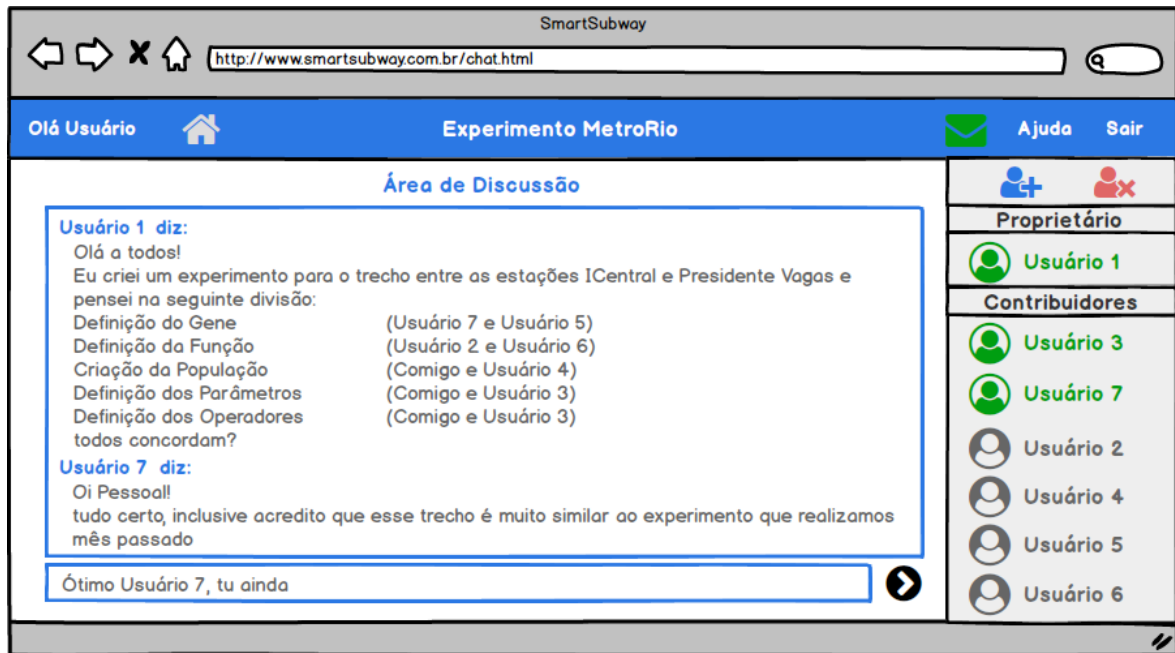


Fonte: Elaborada pelo autor.

E.3 Tela 3 – Página de Discussão

Na Figura E.3 é mostrada a tela onde os usuários podem discutir sobre os experimentos. Nessa tela é possível observar o Modelo 3C de colaboração, sendo o elemento gráfico para digitar as mensagens responsáveis pela comunicação a barra lateral situada no lado direito que contém os usuários responsável pela coordenação, e o histórico das mensagens relacionadas às ações responsável pela cooperação.

Figura E.3: Tela 3 com a página de discussão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

E.4 Tela 4 – Definição da Representação

Ao iniciar o experimento, a primeira tela é a da definição do gene, como mostrado na Figura E.4, responsável por apoiar o usuário na composição do gene inserindo as variáveis. Dessa forma essa tela está dividida em três regiões, sendo a primeira região denominada Gene, pois nesta está contida as variáveis na qual o usuário vai inserindo. Para ocorrer a inserção das variáveis na região Gene é preciso fazer uso das outras regiões sendo elas denominadas Nova Variável e Variáveis Pré-definidas.

A região Variáveis Pré-definidas possui as variáveis que foram previamente identificadas no momento da revisão da literatura desse trabalho, de forma que elas foram definidas para ficar à disposição caso o usuário necessite de alguma. No entanto, o sistema não limitará o usuário a esta lista, pois o mesmo dar suporte para que o usuário possa inserir uma nova variável, utilizando a região Nova Variável onde o usuário precisa inserir o nome, o tipo e a unidade da variável.

Figura E.4: Tela 4 de definição do gene.

Fonte: Elaborada pelo autor.

E.5 Tela 5 – Definição da Função de Avaliação

De posse da representação cromossomial, a próxima fase consiste em inserir a função de avaliação que é responsabilidade da Tela 5, mostrado na Figura E.5, onde o usuário através dos botões irá formar a função. Para construir a função o usuário terá a sua disposição valores numéricos, operadores matemáticos, e funções matemáticas (como as funções trigonométricas, exponencial, raiz quadrada entre outras). Em especial, também estarão disponíveis as variáveis que compõe o gene, visto que as funções fazem uso delas. Para seguir para a próxima etapa, o usuário precisa validar a função clicando no botão validar, onde será realizada uma análise sintática conforme a entrada que ele inseriu.

Figura E.5: Tela 5 com a definição da função de avaliação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

E.6 Tela 6 – Criação da População Inicial

Em seguida vem a Tela 6, que possibilitará o usuário criar a população Inicial, apresentada na Figura E.6, podendo ser utilizadas duas estratégias: a criação aleatória ou a partir de dados reais. Nas duas estratégias se faz necessário informar ao sistema qual o valor mínimo e máximo de cada variável, bem como o seu valor de variação, ou seja ao criar um perfil de velocidade viável sem violar as restrições dos valores de máximo e mínimo. Em seguida serão criados os outros perfis de velocidade, no entanto, para que os perfis não fiquem idênticos, é necessário um valor para fazer com que haja uma variação nos novos indivíduos. No caso da criação com base em dados reais é preciso que seja feito o *upload* do arquivo com os dados capturados, nesse caso deve respeitar a ordem da definição dos genes, separando por um delimitar, por exemplo, o ‘;’.

Figura E.6: Tela 6 de definição da criação da população inicial.

Gene	Valor Mínimo	Valor Máximo	Variação
Velocidade			
Aceleração			
Distância			
Latitude			
Longitude			
Massa			
Energia			

Fonte: Elaborada pelo autor.

E.7 Tela 7 – Definição dos Parâmetros

Na Figura E.7 é exibida a Tela 7, onde o usuário poderá inserir os parâmetros gerais necessários para a execução do algoritmo genéticos, sendo eles o tamanho da população, número de gerações e a taxa de mutação. Nessa Tela é possível selecionar a quantidade de execuções que o algoritmo irá realizar, pois como se trata de uma técnica de otimização combinatória estocástica é interessante que sejam realizadas várias repetições a fim de que seja informado o valor médio encontrado.

E.8 Tela 8 – Definição dos Operadores

A Tela 8 mostrada na figura E.8 possui as opções de operadores disponíveis para os usuários, sendo eles os operadores de seleção, *crossover* e mutação. Nessa tela também será possível inserir os parâmetros específicos dos operadores, por exemplo o valor do parâmetro K do operador de seleção torneio. Após a conclusão o usuário poderá clicar em Executar o Algoritmo para assim ser aplicado todas as configurações inseridas até momento.

Figura E.7: Tela 7 para a definição dos parâmetros.

SmartSubway

http://www.smartsubway.com.br/parametros.html

Olá Usuário Experimento MetroRio Ajuda Sair

Definição do Gene

Definição da Função

Criação da População

Definição dos Parâmetros

Definição dos Operadores

Resultados

Definição dos Parâmetros

Parâmetros do Algoritmo Genético

Tamanho da População:

Número de Gerações:

Taxa de Mutação:

Quantidade de Execuções do Experimento

☐ 1

☐ 10

☐ 30

☐ 50

☐ 100

☐ 200

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura E.8: Tela 8 com a definição dos operadores.

SmartSubway

http://www.smartsubway.com.br/operadores.html

Olá Usuário Experimento MetroRio Ajuda Sair

Definição do Gene

Definição da Função

Criação da População

Definição dos Parâmetros

Definição dos Operadores

Resultados

Definição dos Operadores Executar o Algoritmo

Parâmetros dos Operadores

Alfa: Lambda: K:

Seleção

☐ Roleta

☐ Torneio

Crossover

☐ Um Ponto

☐ Dois Pontos

☐ Uniforme

☐ Linear

☐ Flat

☐ Média

☐ Heurístico

Mutação

☐ Uniforme

☐ Não Uniforme

☐ Limite

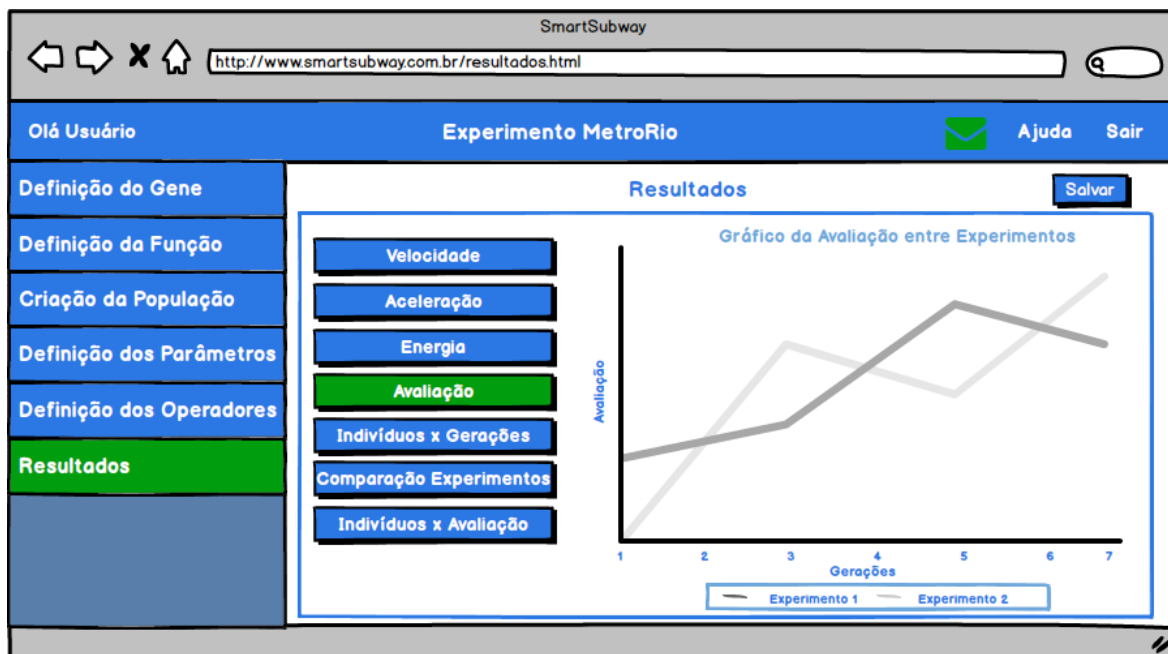
Fonte: Elaborada pelo autor.

E.9 Tela 9 – Apresentação dos Resultados

Por fim a Tela 9, mostrada na Figura E.9, apresentará os resultados referentes à execução do algoritmo genético, bem como o comportamento final das variáveis. Caso o resultado

seja satisfatório o usuário poderá salvar o experimento, senão ele poderá voltar nas abas de configuração e realizar alterações nas configurações até encontrar uma solução satisfatória.

Figura E.9: Tela 9 para a análise dos resultados.



Fonte: Elaborada pelo autor.