

Uma análise comparativa sobre as estratégias de inicialização da população em algoritmos genéticos para o problema de eficiência energética em trens urbanos.

Augusto Cesar de Brito Pereira Guimarães



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2017

Augusto Cesar de Brito Pereira Guimarães

Uma análise comparativa sobre as estratégias de inicialização da população em algoritmos genéticos para o problema de eficiência energética em trens urbanos.

Monografia apresentada ao curso Ciência da Computação do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientadora: Natasha Correia Queiroz Lino

Junho de 2017

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G963a Guimarães, Augusto Cesar de Brito Pereira.

Uma análise comparativa sobre as estratégias de inicialização da população em algoritmos genéticos para o problema de eficiência energética em trens urbanos / Augusto Cesar de Brito Pereira Guimarães. - João Pessoa, 2018.

46 f. : il.

Orientação: Natasha Correia Queiroz Lino.
Monografia (Graduação) - UFPB/CI.

1. Desenvolvimento Sustentável. 2. Cidades Inteligentes. 3. Eficiência Energética. 4. Algoritmos Genéticos. 5. Mobilidade Urbana. 6. Meio Ambiente. I. Lino, Natasha Correia Queiroz. II. Título.

UFPB/BC



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso de Ciência da Computação intitulado *Uma análise comparativa sobre as estratégias de inicialização da população em algoritmos genéticos desenvolvido para o problema de eficiência energética em trens urbanos.* de autoria de Augusto Cesar de Brito Pereira Guimarães, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Claurton de Albuquerque Siebra
Centro de informática - UFPB

Prof. Dr. Gustavo Henrique Matos Bezerra Motta
Centro de informática - UFPB

Prof. Dra. Natasha Correia Queiroz Lino
Centro de informática - UFPB

Prof. M.Sc Marcelle Batista Martins
Centro de informática - UFPB

Coordenador(a) do Departamento de Informática
Daniela Coelho Batista Guedes Pereira
CI/UFPB

João Pessoa, 13 de junho de 2017

“Pra tudo se dá um jeito”

Yoh Asakura - Shaman King

DEDICATÓRIA

A minha esposa Ingrid Guimarães, a meu pai Alexandre Guimarães e minha mãe Sandra Guimarães.

AGRADECIMENTOS

A Deus meu criador, que me deu forças e coragem durante esta caminhada, pelas oportunidades e experiências de vida que me foram dadas.

A minha esposa Ingrid Guimarães por estar sempre ao meu lado, me apoiar, me dar inspiração e força para seguir adiante, por todo o seu amor e por me fazer acreditar que eu posso ser alguém melhor.

Ao meu pai Alexandre Guimarães que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e que para mim foi muito importante, a minha mãe Sandra Guimarães, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. E por todo amor dado e suporte necessário que sempre me deram para que eu pudesse chegar aonde cheguei.

Aos meus irmãos, familiares e amigos mais próximos, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo superior, sempre fizeram entender das necessidades e importância da dedicação aos estudos.

A minha Orientadora Natasha Queiroz por sempre estar disponível para ajudar, e pelos seus ensinamentos.

A meu amigo Mayrton Dias que foi de grande importância, além de sua amizade, esteve sempre me incentivando, ajudando e ensinando durante esta jornada. e a todos os amigos que pude conhecer, e passar bons momentos juntos durante a minha formação e que vão continuar presentes em minha vida, como Johann Hakkinen, Ruan Palmeira, Igor Nóbrega, Arthur Cantalice, Felipe Crispim, Felipe Melo, Carlos Magno, Hozanna Lima, Vitor Soares, Ryan Saymon, César Perdigão, Kallyl Lacerda, Gleydson Moraes, Mateus Santos, Mário Júnior, Everaldo Andrade, Afonso Maia e aos que por ventura me falhe a memória, mas que fizeram parte desta história.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida e me ensinaram além do conteúdo acadêmico sobre lições de vida, dentre os quais gostaria de destacar, Hamilton Soares, Daniela Coelho, Danielle Rousy, Lucídio Cabral, Thaís Gaudencio, Claurton Siebra, Edson de Figueiredo, Raimundo Nobrega e Alexandre Duarte.

A todos que colaboraram de forma direta ou indireta para que isso fosse possível, o meu muito obrigado.

RESUMO

Com o passar do tempo o homem vem ocasionando grandes impactos ao meio ambiente. Nos últimos anos houve um grande crescimento populacional mundial, o que vem agravando estes impactos. A partir disto gerou-se uma preocupação mundial com o meio ambiente e a necessidade de se prover um desenvolvimento sustentável. Com uma rápida urbanização prevista faz-se necessário tornar as cidades sustentáveis, e um fator importante para isto é a mobilidade urbana. A utilização de transportes públicos elétricos é uma alternativa para diminuir o uso de combustíveis fósseis e reduzir os gases poluentes. A energia elétrica também tem impactos negativos, partindo disto vários trabalhos foram realizados buscando formas de encontrar a eficiência energética de trens elétricos provendo melhores soluções para os perfis de condução através do uso de Algoritmos Genéticos. Este trabalho tem como foco implementar e fazer uma análise comparativa de estratégias de inicialização da população para o problema em questão, e dessa forma foi integrado às implementações com a última versão do software GeneticBee a fim de que seja apresentado o comportamento de cada inicialização e o impacto gerado no Algoritmo Genético. Com o presente trabalho foi possível identificar quais das inicializações da população obtiveram melhor desempenho, e ao serem integradas ao software existente é possível fazer alterações de configuração e verificar qual o impacto na solução final.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável, Cidades Inteligentes, Eficiência Energética, Algoritmos Genéticos, Mobilidade Urbana, Meio Ambiente.

ABSTRACT

Over time mankind has been causing great impacts to the environment. In the last few years there has been a great world population growth, which has aggravated these impacts. From this situation, a worldwide concern about the environment was generated and the need to provide Sustainable Development arose. With rapid urbanization it is necessary to make cities sustainable, and an important factor for this demand is urban mobility. The use of electric public transport is an alternative to reduce the use of fossil fuels and reduce polluting gases. However, electrical energy also has negative impacts. In this context, several studies were carried out in order to find ways to enable energy efficiency of electric trains, providing better solutions for the driving profiles through the use of Genetic Algorithms. This work aims to implement and make a comparative analysis of the population initiation strategies for the studied problem, and then was integrated with the implementations with the latest version of GeneticBee software in order to show the behavior of each type of initialization and the impact generated in the Genetic Algorithm. With the present work it was possible to identify which of the initializations of the population obtained better performance, and when being integrated to the existing software it is possible to make configuration changes and verify the impact in the final solution.

Key-words: Sustainable Development, Smart Cities, Energy Efficiency, Genetic Algorithms, Urban Mobility, Environment.

LISTA DE FIGURAS

1	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável Fonte: ONUBR	19
2	Previsão da Porcentagem da População Mundial nos Centros Urbanos Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do relatório da ONU “World Ur- banization Prospects: The 2014 Revision”	23
3	Exemplo de Algoritmo Genético Fonte: Elaborado pelo autor	25
4	Representação cromossomial e Inicialização. Fonte: Elaborado pelo autor .	26
5	Representação do método da roleta. Fonte: Elaborado pelo autor	27
6	Representação do crossover. Fonte: Elaborado pelo autor	27
7	Representação da mutação. Fonte: Elaborado pelo autor	27
8	Resultado da Questão de Pesquisa 1 do Mapeamento Sistemático Fonte: Elaborado pelo autor	30
9	Resultado da Questão de Pesquisa 2 do Mapeamento Sistemático Fonte: Elaborado pelo autor	30
10	Aba de Entradas de Dados do Software GeneticBee Fonte: Imagem elabo- rada pelo autor	32
11	Aba para Análise dos Dados de Entrada do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor	32
12	Aba para Configurações do Domínio do Software GeneticBee Fonte: Ima- gem elaborada pelo autor	33
13	Aba para as Configurações dos Operadores do AG do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor	33
14	Aba de Exibição dos Resultados Obtidos do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor	34
15	Representação dos Intervalos de Inicialização Fonte: Elaborado pelo autor .	34
16	Representação do Algoritmo de Suavização Fonte: Elaborado pelo autor . .	35
17	Representação cromossomial adotada nesse trabalho Fonte: Elaborado pelo autor	37
18	Comparação dos Experimentos pela Avaliação Fonte: Elaborado pelo Autor	39
19	Comparação dos Experimentos pela Energia Gasta Fonte: Elaborado pelo Autor	39

20	Comparação dos Experimentos pela Energia Gasta sem o Experimento da Inicialização Aleatória Fonte: Elaborado pelo Autor	40
21	Comparação dos Experimentos pela Avaliação a cada Geração Fonte: Elaborado pelo Autor	40

LISTA DE TABELAS

1	Principais Fatos dos ODS Adaptado de ONUBR (2017)	20
2	Principais Metas dos ODS Adaptado de AGENDA 2030 (2015)	21

LISTA DE ABREVIATURAS

SIGLA – NOME COMPLETO

ONU – Organização das Nações Unidas

ONUBR - Organização das Nações Unidas no Brasil

ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ODM - Objetivos do Milênio

AG - Algoritmo Genético

AGs - Algoritmos Genéticos

METROREC - Metrô de Recife

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo geral	22
1.2	Objetivos específicos	22
1.3	Estrutura da monografia	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Cidades Inteligentes	23
2.2	Algoritmos Genéticos	24
3	TRABALHOS RELACIONADOS	29
3.1	Mapeamento Sistemático	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	GeneticBee	31
4.2	Estratégias de Inicialização da População	32
4.2.1	Inicialização Aleatória	33
4.2.2	Inicialização com Base em Dados Reais	34
4.3	Algoritmo de Suavização	35
4.4	Experimento	35
5	RESULTADOS	39
6	DISCUSSÃO	42
7	CONCLUSÕES	43
7.1	Contribuições	43
7.2	Trabalhos Futuros	43
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Segundo Olívio (2010), a partir da revolução industrial originou-se a cultura do consumo baseada na exploração de espaços e recursos finitos, onde o homem com sua necessidade infinita de consumir tem ocasionado grandes impactos ao meio ambiente, como a influência nas mudanças climáticas que tem como principal causa a emissão dos gases do efeito estufa. Os impactos ambientais tem sua origem real no próprio indivíduo e é fundamental a criação de uma nova cultura de vida sustentável, que respeite as pessoas e o meio ambiente.

A Organização das Nações Unidas(ONU) vem realizando conferências sobre mudanças climáticas, buscando discutir e encontrar soluções para esses e outros problemas. De acordo com a ONUBR (2017), numa das conferências mais recentes, durante a cúpula de desenvolvimento sustentável, realizada em Nova York entre 25 e 27 de setembro de 2015, foi adotada a nova agenda que guiará um caminho rumo ao desenvolvimento sustentável para a geração de hoje e para as gerações futuras, com um plano de ação até 2030.

Esta agenda teve como base o relatório do secretário-geral da ONU, Ban Ki-moon, feito em 2014 e veio para suceder os Objetivos do Milênio (ODM) e reafirmar todas as grandes conferências e cúpulas da ONU que estabeleceram uma base sólida para o desenvolvimento sustentável. Ban, disse que “nunca antes uma consulta tão ampla e profunda tinha sido feita sobre a questão do desenvolvimento”. Essa pesquisa durou mais de dois anos.

A Agenda 2030 (2015) traz 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) com 169 metas, que são integráveis e indivisíveis, e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. Os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável podem ser vistos a seguir na Figura 1.



Figura 1: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável Fonte: ONUBR

Diante dos ODS apresentados, este trabalho dará ênfase ao ODS 7: assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos, e ao ODS 11: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. A seguir a Tabela 1, mostra-se alguns dos principais fatos que originaram estes objetivos e na Tabela 2 pode ser observado algumas das principais metas dos ODS em questão:

Tabela 1: Principais Fatos dos ODS Adaptado de ONUBR (2017)

Fato ODS 7: A energia é o principal contribuinte para as mudanças climáticas, sendo responsável por cerca de 60% das emissões globais totais de gases do efeito estufa.

Fatos ODS 11: Metade da humanidade – 3,5 bilhões de pessoas – vive nas cidades atualmente. Em 2030, quase 60% da população mundial viverá em áreas urbanas.

As cidades no mundo ocupam somente 2% de espaço da Terra, mas usam 60% a 80% do consumo de energia e provocam 75% da emissão de carbono. A rápida urbanização está exercendo pressão sobre a oferta de água potável, de esgoto, do ambiente de vida e saúde pública. Mas a alta densidade dessas cidades pode gerar ganhos de eficiência e inovação tecnológica enquanto reduzem recursos e consumo de energia.

Cidades têm potencial de dissipar a distribuição de energia ou de otimizar sua eficiência por meio da redução do consumo e adoção de sistemas energéticos verdes. Rizhao, na China, por exemplo, transformou-se em uma cidade abastecida por energia solar. Em seus distritos centrais, 99% das famílias já usam aquecedores de água com energia solar.

Assim, de acordo com Costa (2008) a mobilidade urbana é de grande importância para a qualidade de vida da população e é essencial para o desenvolvimento sustentável nas cidades. Cidades sustentáveis precisam dar suporte a mobilidade urbana cumprindo com as funções sociais e proporcionando crescimento econômico, limitando seus impactos negativos. A exploração do uso de automóveis privados tem ocasionado altos níveis de congestionamento e poluição, trazendo a necessidade de transportes públicos adequados.

Douglas (2015) fala que o transporte ferroviário é o mais eficiente para a questão dos transportes públicos. A pesquisa feita por ele mostra uma análise geral dos tipos de transportes ferroviários e as formas de diminuir seus gastos. Os trens elétricos se mostram uma boa alternativa para diminuir o uso de combustíveis fósseis e reduzir os gases poluentes, apesar do uso de energia elétrica também ter impactos negativos. O

Tabela 2: Principais Metas dos ODS Adaptado de AGENDA 2030 (2015)

Metas ODS 7: Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética.

Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa.

Metas ODS 11: Até 2030, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com especial atenção para as necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos.

Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros.

autor traz uma análise geral de como reduzir esses gastos, e como o consumo da energia de tração representa entre 60% e 80% do gasto energético, ele mostra que técnicas de condução eficiente tem um potencial enorme para a economia do gasto energético.

Martins (2016) propõe uma abordagem para melhorar a eficiência energética dos TUE's (Trem Unidade Elétrico) da CBTU (Companhia Brasileira de Trens Urbanos) - Recife, através da implementação de um Algoritmo Genético (AG), que é uma metaheurística de busca para percorrer o espaço de soluções viáveis, a fim de encontrar as melhores soluções para os perfis de condução a serem utilizados pelos maquinistas.

Segundo Daida (1999) a qualidade da população inicial é um fator de grande importância para o processo evolutivo do AG. Este trabalho tem como foco implementar e fazer uma análise comparativa de estratégias de inicialização da população. Desta forma, será abordado neste trabalho uma estratégia de inicialização aleatória e uma de inicialização baseada em dados reais, além disso foi desenvolvido um algoritmo de suavização para moldar as soluções ao problema. As implementações deste trabalho foram integradas com a última versão do software GeneticBee a fim de que seja apresentada o comportamento de cada inicialização e o impacto gerado no AG.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste em fazer um comparativo entre as estratégias de inicialização da população no AG abordado, com o intuito de apresentar o comportamento de cada inicialização e o impacto gerado no AG, permitindo observar qual estratégia obteve o melhor desempenho para o problema abordado.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre “Cidades Inteligentes” e “Algoritmos Genéticos”
- Revisar trabalhos na literatura sobre as estratégias de inicialização da população.
- Implementar as inicializações da população no Geneticbee.
- Desenvolver e validar o algoritmo de conforto nos perfis de velocidade.
- Apresentar de forma gráfica o comportamento das inicializações.
- Fazer um comparativo entre as estratégias de inicialização implementadas.

1.3 Estrutura da monografia

Este trabalho está constituído da seguinte divisão, inicialmente fora realizada uma introdução e definição dos objetivos, no Capítulo 2 é abordado a fundamentação teórica, no Capítulo 3 fala sobre trabalhos relacionados com o problema, no Capítulo 4 são detalhados os métodos e materiais que foram utilizados para a realização, no Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos, no Capítulo 6 segue uma discussão sobre os resultados encontrados e no Capítulo 7 para conclusão é apresentado as contribuições e os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada uma síntese dos conceitos de Cidades Inteligentes e Algoritmos Genéticos, que são os referenciais teóricos deste trabalho.

2.1 Cidades Inteligentes

Podemos observar um grande crescimento das cidades durante os últimos anos, segundo a ONU (2017) a população mundial em 2015 era cerca de 7,3 bilhões de pessoas com uma estimativa de chegar a 8,5 bilhões em 2030 e a 9,7 bilhões em 2050. Dessa população mais da metade hoje vive em centros urbanos e esse percentual deve chegar a 60% em 2030 e quase 70% em 2050, como ilustrado na Figura 2.

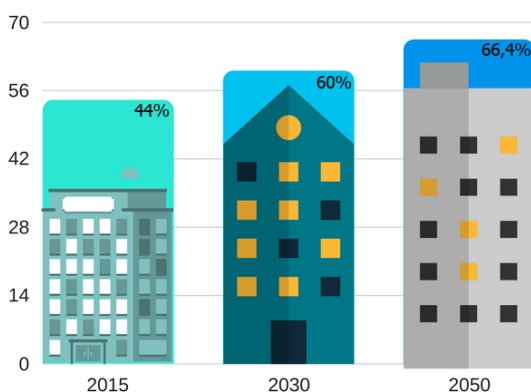


Figura 2: Previsão da Porcentagem da População Mundial nos Centros Urbanos Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do relatório da ONU “World Urbanization Prospects: The 2014 Revision”

Devido ao aumento dos centros urbanos torna-se necessário a evolução destes seguindo as primícias de um desenvolvimento sustentável e inteligente, que atendam e promovam a qualidade de vida de seus habitantes. Dado que a população seja o centro das discussões e propostas, estas mudanças precisam ser adaptáveis à realidade de cada cidade levando em consideração os conhecimentos da população e a sua disposição em cooperar para que se possa implementar essas melhorias nas cidades de forma inteligente (Câmara, 2016).

De acordo com Aquino (2015), o aumento da população mundial aliada à crescente migração de áreas rurais para centros urbanos e uma preocupação com a escassez de recursos naturais traz a necessidade da implantação do conceito de Cidades Inteligentes que sejam capazes de gerir a infraestrutura e os serviços de forma eficiente ao mesmo tempo que atendam a maior parte das necessidades da cidade e de seus habitantes.

Segundo Tonon (2013), Cidades Inteligentes são aquelas que usufruem das tecnologias para melhorar suas infraestruturas, se tornarem mais eficientes, proporcionando uma

qualidade de vida melhor. Elas têm como principais áreas: o meio ambiente, a mobilidade, a interação cidadão-governo, qualidade de vida e economia.

De acordo com o exposto por Câmara (2016), a cidade é a invenção mais complexa que o homem já fez, sendo tudo artificial e exclusivo para ele, dessa forma ele mostra que as cidades inteligentes devem ter como objetivo servir a seus habitantes. É de extrema importância encontrar soluções para mobilidade urbana, saúde, educação, energia e qualidade de vida.

2.2 Algoritmos Genéticos

De acordo com Linden (2012), a história dos Algoritmos Genéticos (AGs) se iniciava na década de 40, quando os cientistas começaram a se inspirar na natureza para criar o ramo da Inteligência Artificial. Inicialmente vieram os Algoritmos Evolucionários, os quais eram baseados na evolução das espécies para simular modelos computacionais, através dos operadores genéticos que consistem em inspirações computacionais dos fenômenos da natureza. Os AGs são um ramo dos Algoritmos Evolucionários baseados no processo biológico de evolução natural e são uma boa técnica para problemas complexos e com grande espaço de busca para soluções.

Norvig (2014) fala que, os primeiros exemplos de AGs argumentaram que era possível gerar um programa com bom desempenho a partir de um programa em código de máquina realizando uma série de pequenas mutações apropriadas. A ideia era experimentar várias mutações aleatórias tendo um processo de seleção para preservar as boas mutações. O autor diz que AGs são um tipo de busca estocástica, onde é mantida uma grande população de soluções a qual novos indivíduos (soluções) são gerados por mutação e cruzamento vindo da combinação de duas soluções pais e tendem a convergir para uma melhoria das soluções.

Segundo Frederick (2013), AGs são metaheurísticas de busca bastante eficientes para percorrer o espaço de soluções viáveis e que evoluem gradualmente para as melhores delas. Os AGs são uma analogia da teoria da evolução, onde através da seleção natural a tendência levaria a sobrevivência dos mais aptos. As soluções viáveis ao problema correspondem aos indivíduos de uma espécie, na qual a adaptação destes é medida por uma função objetivo. Os melhores pais teriam mais chance de se reproduzirem e gerarem filhos mais adaptados, tendendo a uma população melhorada ao longo do tempo. Para explorar novas áreas do espaço de soluções podem ocorrer, com uma pequena chance, mutações que irão poder trazer aos filhos características que nenhum pai tenha, podendo elas não fazer diferença, serem ruins ou no melhor caso boas, trazendo benefícios para os indivíduos (Friederick, 2013).

Linden (2012) fala que um ponto crucial dentro dos AGs seria a codificação do

cromossomo e também a função de avaliação que é o que liga os AGs ao problema a ser resolvido. Uma boa codificação dos cromossomos e da função de avaliação permite que através do método de seleção e da recombinação a população evolua, e a mutação traz mais diversidade para os indivíduos. Os indivíduos menos aptos não devem ser descartados pois, apesar da sua avaliação, podem conter características muito boas a serem passadas para as futuras gerações.

A seguir pode-se observar um pseudocódigo do funcionamento de um Algoritmo Genético básico:

1. Inicializa a população de cromossomos;
2. Avalia cada indivíduo da população;
3. Realiza a seleção dos pais para a reprodução da população;
4. Realiza as operações de Crossover e Mutação para gerar os novos indivíduos;
5. Descarta todos os indivíduos antigos da população;
6. Avalia os novos indivíduos e inserem na população;
7. Se um limite de gerações foi atingido ou se o melhor indivíduo satisfaz as condições de parada, retorne o melhor indivíduo, caso contrário volte para o 3 passo.

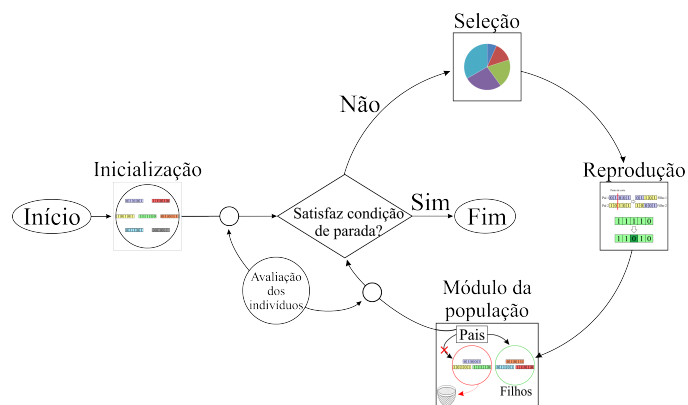


Figura 3: Exemplo de Algoritmo Genético Fonte: Elaborado pelo autor

As soluções para um problema são representadas como um cromossomo composto por um conjunto de genes que representam as possíveis configurações das soluções. Os cromossomos podem ser tidos como indivíduos da população.

A inicialização da população é o processo onde a população inicial é criada. Ela gera cada cromossomo compondo cada um de seus genes satisfazendo as restrições do problema. Uma inicialização com qualidade poderá influenciar bastante no funcionamento do AG.

Uma boa inicialização deve prover uma boa distribuição no espaço de soluções e em alguns casos permitir uma convergência mais rápida para as soluções finais. A Figura 4 mostra um exemplo de representação cromossomial e inicialização. A seguir estão alguns tipos de inicialização:

- **Inicialização Aleatória:** O método de inicialização mais simples é a inicialização aleatória, a qual tem a composição dos genes dos cromossomos gerados aleatoriamente, esta é uma das mais utilizadas pois possibilita uma boa distribuição no espaço de busca, e com a aplicação de um operador de mutação pode ocasionar uma boa exploração.
- **Inicialização por K-Partes:** Como a inicialização aleatória de uma população de tamanho finito não garante que se tenha uma boa distribuição no espaço de soluções, há também a inicialização por K partes que garante que os indivíduos estejam espalhados por todo o espaço de busca. O espaço de busca é dividido em K partes iguais e N indivíduos são criados aleatoriamente dentro de cada K parte.
- **Inicialização Baseada em Dados Reais:** A inicialização ainda pode ser feita baseando-se em dados reais, trazendo uma proximidade maior da realidade para a população inicial, onde cada indivíduo seria aleatoriamente criado a partir de um ou mais indivíduos criados a partir de dados reais. Considerando-se que os dados utilizados estejam próximos de uma boa solução, a população teria uma convergência mais rápida para melhores soluções.

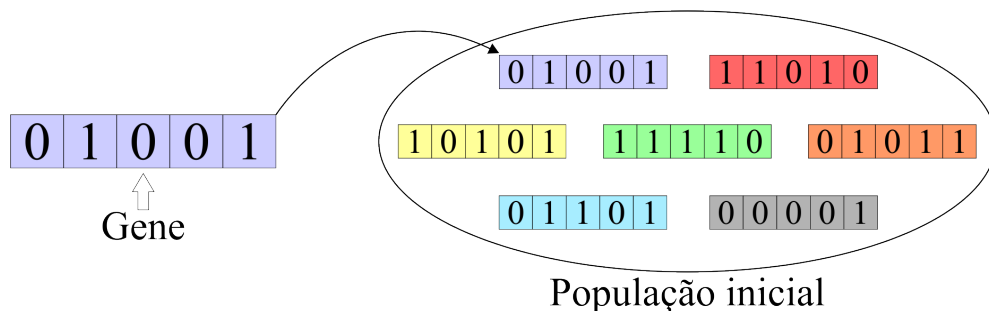


Figura 4: Representação cromossomial e Inicialização. Fonte: Elaborado pelo autor

A função de avaliação representa o objetivo a ser resolvido pelo problema. Ela é utilizada pelo AG para determinar a qualidade do indivíduo da população.

O método de seleção serve para simular o mecanismo de seleção natural onde os indivíduos mais aptos tendem a ter uma maior reprodução e passar seus genes para as próximas gerações, sem excluírem os indivíduos menos aptos para poder manter a diversidade das soluções e possibilitar a propagação de bons genes contidos neste indivíduo. Um

dos métodos básicos é o método da roleta, onde todos os indivíduos serão distribuídos de acordo com suas avaliações em uma roleta de escala proporcional a soma da avaliação de cada indivíduo da população, como mostrado na Figura 5.

Método da Roleta

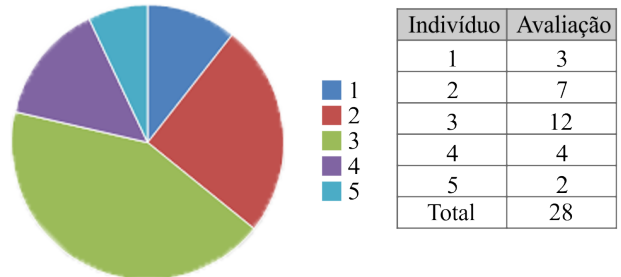


Figura 5: Representação do método da roleta. Fonte: Elaborado pelo autor

O crossover é realizado a cada dois indivíduos pais selecionados, combinando seus genes para gerar um novo indivíduo filho. O mais simples e usado na literatura é o crossover de um ponto, onde um ponto de corte é escolhido aleatoriamente no cromossomo e os novos indivíduos são gerados como mostrado na Figura 6.

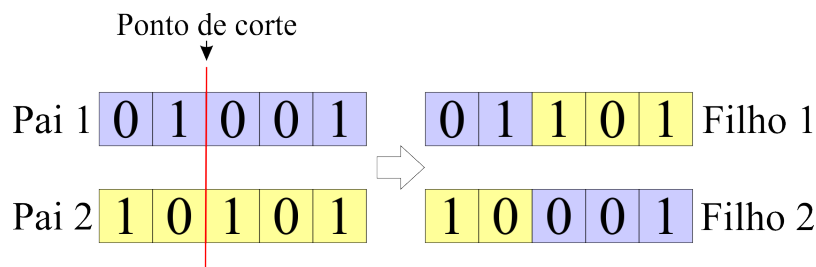


Figura 6: Representação do crossover. Fonte: Elaborado pelo autor

Após o crossover um operador de mutação poderá ser aplicado, com uma pequena taxa de ocorrência, para cada cromossomo da população e uma para cada gene dos cromossomos, onde o gene selecionado será modificado por um valor aleatório dentro das restrições. A mutação permite uma possibilidade de melhoria das soluções e uma saída para máximos locais da área de busca das soluções. A Figura 7 representa a ocorrência da mutação.

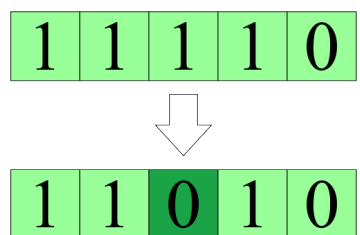


Figura 7: Representação da mutação. Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim temos o módulo da população que será o responsável pelo controle da população. Geralmente em um modelo básico de AG a população de pais é totalmente descartada, e uma nova população constituída pelos filhos gerados. Em caso de filhos que sejam soluções inviáveis, poderia-se simplesmente deixar a cargo da “natureza” eliminá-los, aplicando uma alta penalidade das inviabilidades em suas avaliações, ou garantir que uma quantidade necessária de filhos viáveis sejam produzidos para a nova população, ou ainda substituí-los pelos os melhores pais da população geradora.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Yang (2016) apresenta um levantamento sobre as operações energeticamente eficiente para os transportes ferroviários urbano. Ele cita 14 trabalhos com foco na otimização da tabela de horários dos trens, dos quais quatro utilizaram AG para resolver o problema. Outro comparativo apresentado pelo autor foi com relação a 25 trabalhos com o foco na aplicação de estratégias de condução energeticamente eficientes, das quais cinco utilizaram AG para resolver o problema.

Por fim Yang (2016) apresenta as comparações entre a estratégia de operação original na Linha Yizhuang e as estratégias de otimização da tabela de horário, estratégias de condução eficiente e a união das estratégias de otimização abordadas, para mostrar as taxas de economia de energia, onde ele mostra uma economia de energia de 6.93% gerada pela otimização da tabela de horário, 21.63% aplicando estratégias de condução eficientes e 26,63% com as duas estratégias em conjunto.

Huang (2015) fez um levantamento sobre 18 artigos alinhados ao problema de eficiência energética destacando o objetivo principal e as estratégias adotadas. O autor apresenta um comparativo onde é possível identificar que o AG é a estratégia mais adotada. De posse dessa informação o autor propõem um algoritmo genético com múltiplas populações aplicado no metrô de Beijing em um trecho de 21 km.

3.1 Mapeamento Sistemático

Segundo Mota (2013), o Mapeamento Sistemático é uma metodologia de pesquisa baseada em evidências, pois seu principal objetivo é identificar todas as pesquisas relacionadas a um tópico específico. Desse modo, tem-se uma visão geral da evolução de uma determinada área de pesquisa até o momento do mapeamento.

Foi realizado um mapeamento sistemático sobre o problema de eficiência energética dos transportes ferroviários, com foco nas estratégias de condução eficiente utilizando AG para solucionar o problema em questão. A string de busca adotada no mapeamento foi: (**"Genetic Algorithm"**) AND (**"Energy Efficiency"**) AND (**Subway OR Train**) AND (**"speed profile"**). Após feito um levantamento sobre os principais engenhos de busca, foi possível identificar 8 engenhos que se alinharam ao estudo. Para cada engenho selecionado, a string de busca foi configurada a fim de que a mesma atendesse as especificações de cada engenho. Segue abaixo a lista dos engenhos de busca utilizados neste trabalho: ACM, Arxiv, EBSCOhos, IEEE, Science Direct (Elsevier), Scopus, Springer, Wiley Online Library.

É possível identificar três momentos principais relacionados ao mapeamento, onde em cada momento foi possível contabilizar a quantidade de artigos em cada engenho de

busca. Num primeiro momento foram retornados 118 artigos após a busca nos engenhos, num segundo momento 115 artigos estavam disponíveis para download e no terceiro momento, destes artigos, 18 conseguiram passar pelos critérios de inclusão e exclusão.

Dos 18 artigos que passaram pelas fases iniciais do mapeamento, todos abordavam estratégias de condução eficiente como forma de economizar energia, seis deles utilizaram uma abordagem em conjunto com a otimização da tabela de horários, onde três trabalhavam com a questão da energia regenerativa, como pode ser visto na Figura 8.

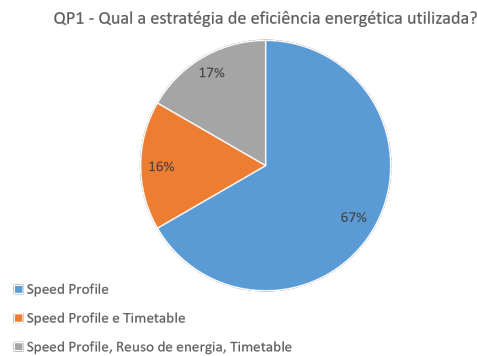


Figura 8: Resultado da Questão de Pesquisa 1 do Mapeamento Sistemático
Fonte: Elaborado pelo autor

Uma das questões de pesquisa imposta aos 18 artigos incluídos no mapeamento, foi a Questão de Pesquisa 2 - Quais questões ou operadores da abordagem evolucionária são relatados no artigo?, sobre a abordagem dos operadores genético pode ser observada na Figura 9. Dentre estes artigos 15 citaram a inicialização da população, porém a maior parte não detalhou como foi realizada, os 15 artigos estão referenciados em: Brenna (2016), Carvajal-Carreño (2014), Carvajal-Carreño (2015), Chevrier (2013), Cucala (2012), Fernández-Rodríguez (2015), Hamid (2016), Huang (2015), Keskin (2015), Li (2014), Lu (2013), Sicre (2014), Xu (2016), Yang (2015), Yong (2011).

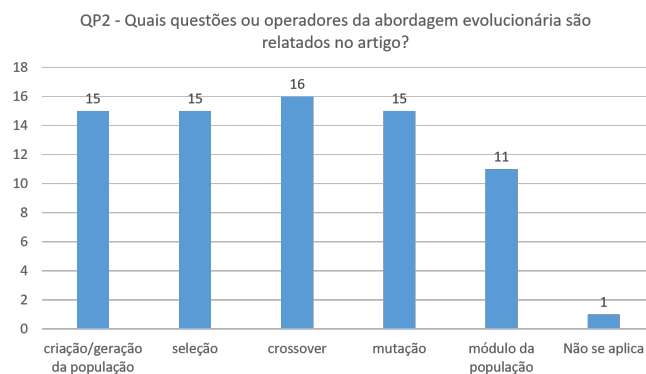


Figura 9: Resultado da Questão de Pesquisa 2 do Mapeamento Sistemático
Fonte: Elaborado pelo autor

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Aqui conterão os métodos e procedimentos adotados no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente será dada uma contextualização do software GeneticBee, em seguida serão detalhadas as estratégias que foram implementadas e integradas ao software, por fim todas as configurações e dados que foram utilizados para a realização dos experimentos.

4.1 GeneticBee

O GeneticBee é um software que tem como proposta gerar estratégias de controle de tráfego energeticamente eficiente, através da implementação de um AG desenvolvido para encontrar o melhor perfil de condução que um maquinista de trem deve seguir. Este software pode ser utilizado como uma ferramenta de simulação para que se possa testar e analisar as estratégias a serem utilizadas pelo AG para a busca do melhor perfil de condução (MARTINS 2016).

O GeneticBee foi desenvolvido usando linguagem de programação Java para a implementação do AG, o qual possui diversas opções de configuração. Para facilitar na apresentação dos resultados graficamente foi adotada a biblioteca JFreeChart, que é bastante robusta e flexível para manipular gráficos em 2D e 3D, e tem fácil integração com Java (QUEIROZ 2016).

Este software conta com uma interface gráfica que pode ser dividida basicamente em: uma aba para entrada de dados a serem usados nos experimentos (Figura 10), uma aba a qual poderá ser feita uma análise dos dados iniciais de entrada (Figura 11), uma aba para as configurações do domínio (Figura 12), uma aba para as configurações dos operadores do AG (Figura 13), e uma aba para exibição e análise dos resultados finais (Figura 14).

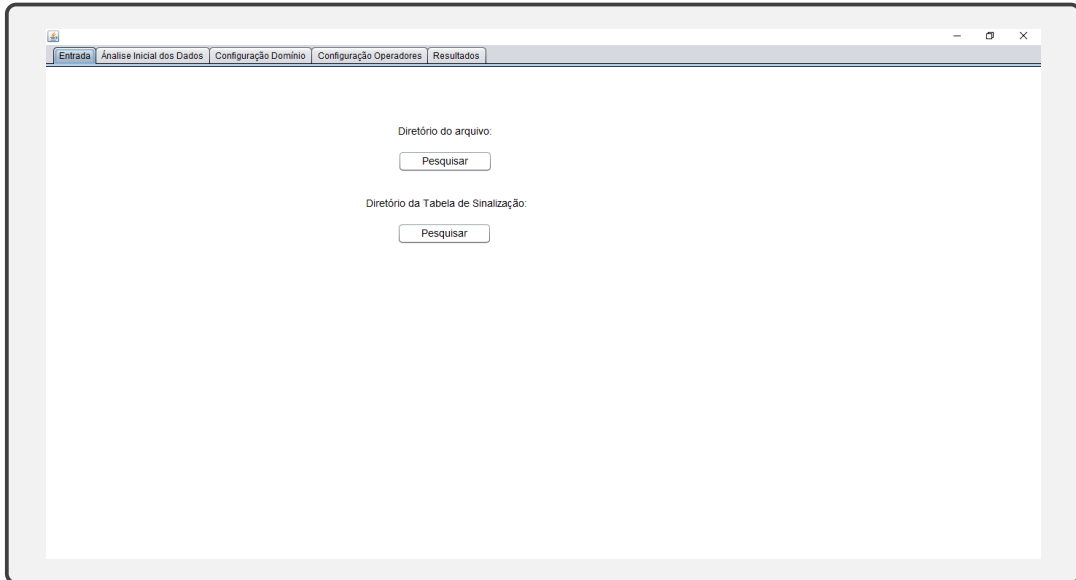


Figura 10: Aba de Entradas de Dados do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor

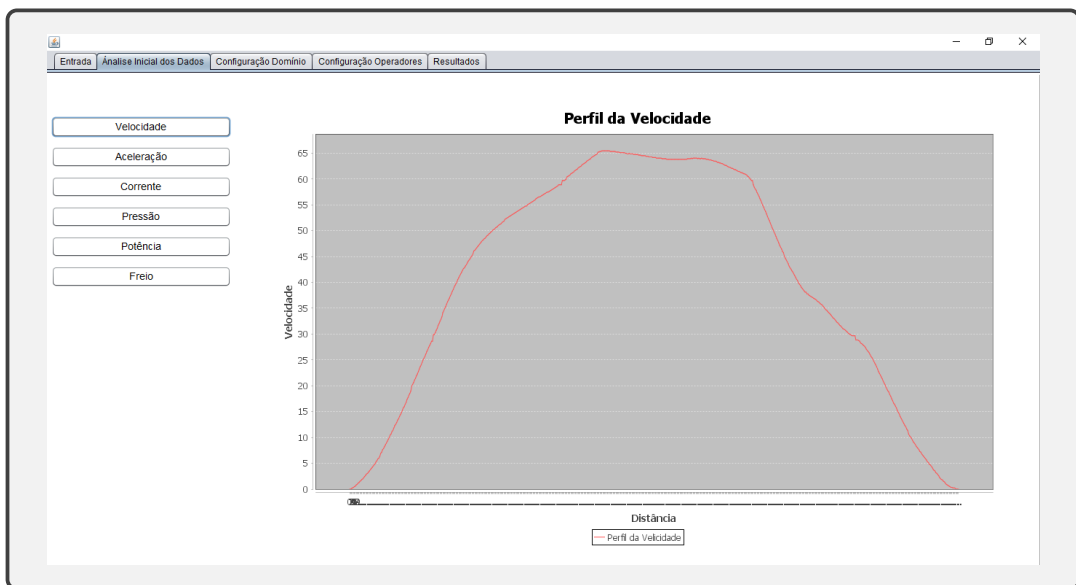


Figura 11: Aba para Análise dos Dados de Entrada do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor

4.2 Estratégias de Inicialização da População

Dentre as estratégias de inicialização existentes será abordado neste trabalho a Inicialização Aleatória e a Inicialização Baseada em Dados Reais, a fim de que possa ser comparado o impacto que as formas de inicialização tem na evolução do AG para o problema em questão, e possa contribuir com o AG do software utilizado.

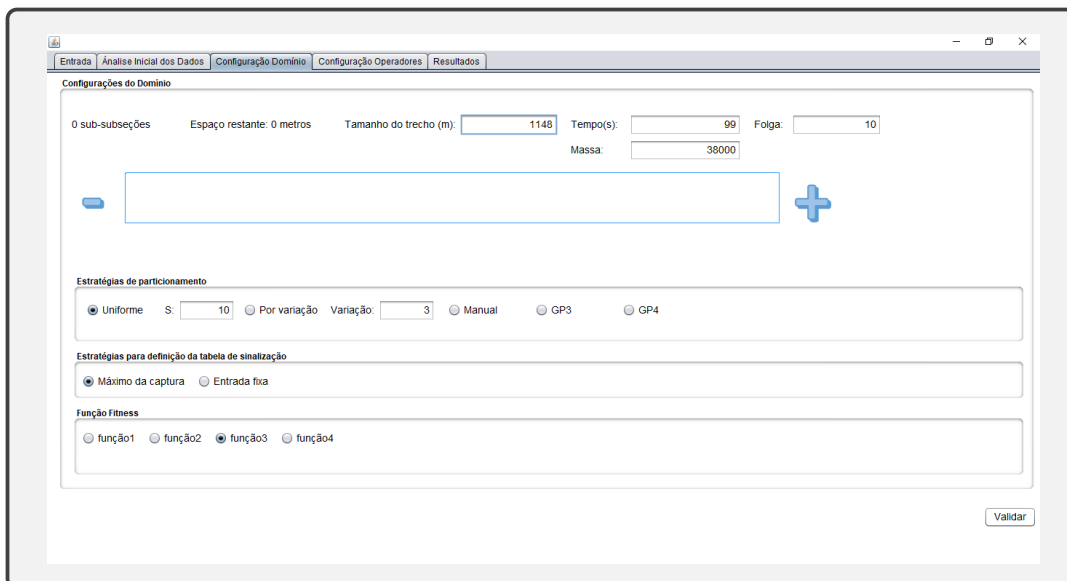


Figura 12: Aba para Configurações do Domínio do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor

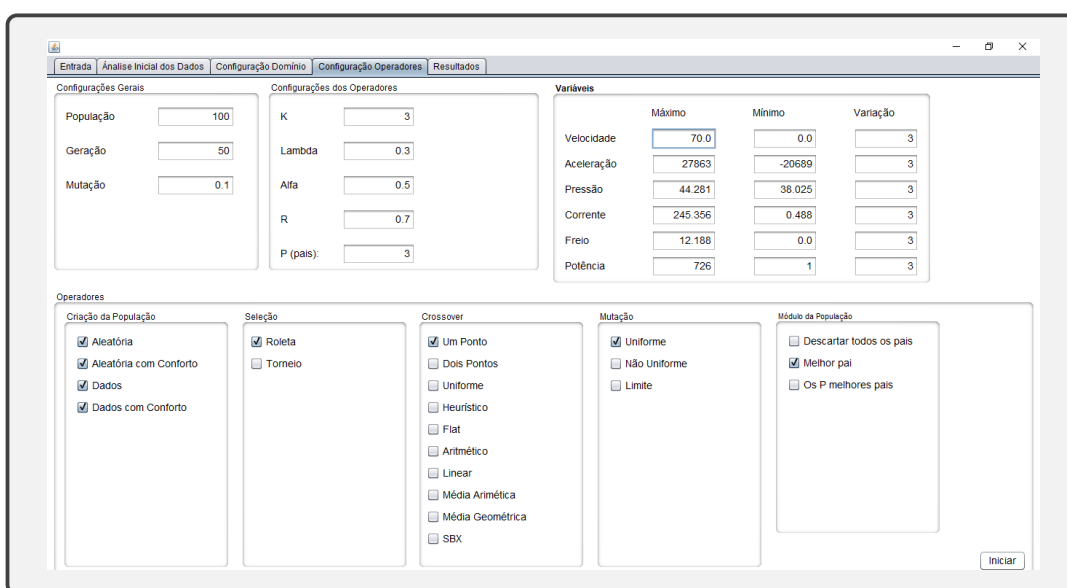


Figura 13: Aba para as Configurações dos Operadores do AG do Software GeneticBee Fonte: Imagem elaborada pelo autor

4.2.1 Inicialização Aleatória

Como foi dito anteriormente na Seção 2.2 uma inicialização aleatória permite uma boa distribuição no espaço de busca, então por este motivo foi desenvolvido um método de inicialização onde os genes de cada cromossomo serão criados aleatoriamente obedecendo aos limites de velocidade definidos pelo usuário. Pelo fato de ser aleatório os perfis gerados inicialmente não condizem com um perfil de velocidade viável, muito menos poderiam ser utilizados, existe a necessidade da aplicação de uma estratégia de suavização, considerando o aspecto de conforto na condução do trem.

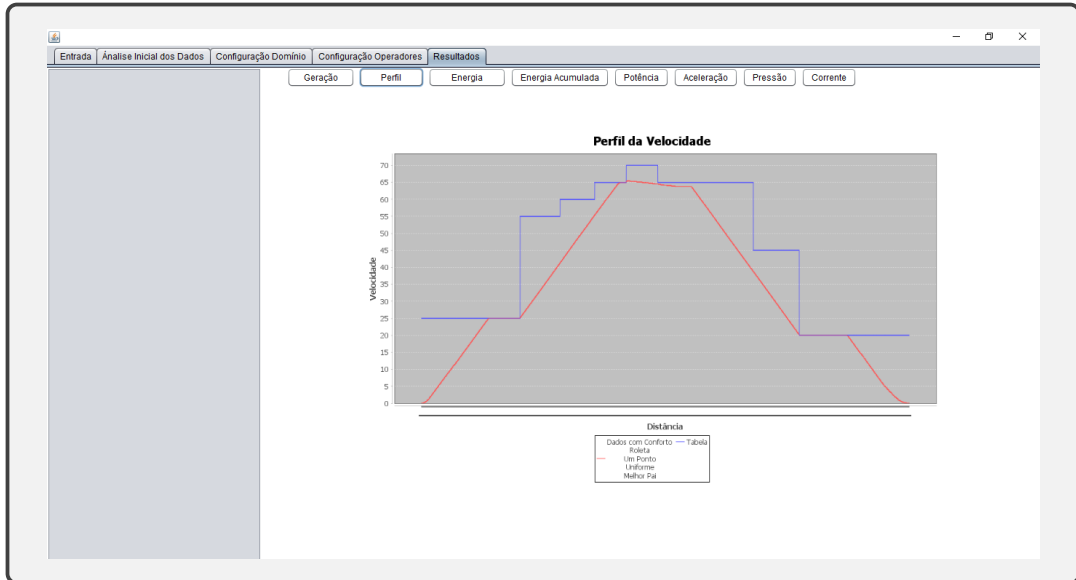


Figura 14: Aba de Exibição dos Resultados Obtidos do Software GeneticBee
 Fonte: Imagem elaborada pelo autor

4.2.2 Inicialização com Base em Dados Reais

Tendo um perfil de condução real (obtido por meio de sensores) sendo utilizado como base para entrada de dados configuradas pelo usuário, neste trabalho foi desenvolvido um método de inicialização em que cada indivíduo gerado terá aleatoriamente seus genes criados com valores dentro de um intervalo relacionado com os genes do perfil de dados reais. O valor da variação a ser usada para encontrar o intervalo pode ser configurada pelo usuário na aba de configuração dos operadores, no campo variação, correspondente a variável velocidade. Cada indivíduo será então uma modificação do perfil definido como entrada de dados do programa. A Figura 15 dá uma ideia de como seria este intervalo.

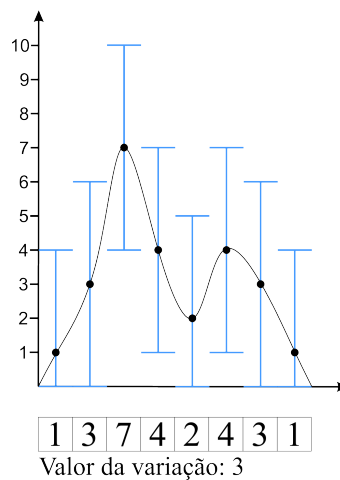


Figura 15: Representação dos Intervalos de Inicialização Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Algoritmo de Suavização

Durante o desenvolvimento dos métodos de inicialização, ainda na fase de testes, foi verificada a necessidade de um algoritmo de suavização para promover o conforto e a viabilidade dos perfis de velocidade. Tanto na inicialização aleatória como na baseada em dados reais alguns genes dos cromossomos tem adquirido uma diferença elevada entre os genes vizinhos e isto não seria viável para um condutor utilizar na prática, pois o mesmo traria um desconforto para os passageiros. Além disso, quando realizado os operadores de crossover e o de mutação este mesmo problema poderia acontecer, precisando então da realização de uma suavização.

O algoritmo de suavização percorre todo o cromossomo enquanto houver falhas e testa a diferença entre cada genes adjacentes. Caso haja uma diferença maior que o valor definido como uma falha, estes genes e seus vizinhos serão modificados de modo que seja suavizada estas diferenças em cada gene do perfil. A Figura 16 ilustra como esta estratégia é realizada. No Algoritmo 1 está representado um pseudocódigo do processo de como a suavização é realizada:

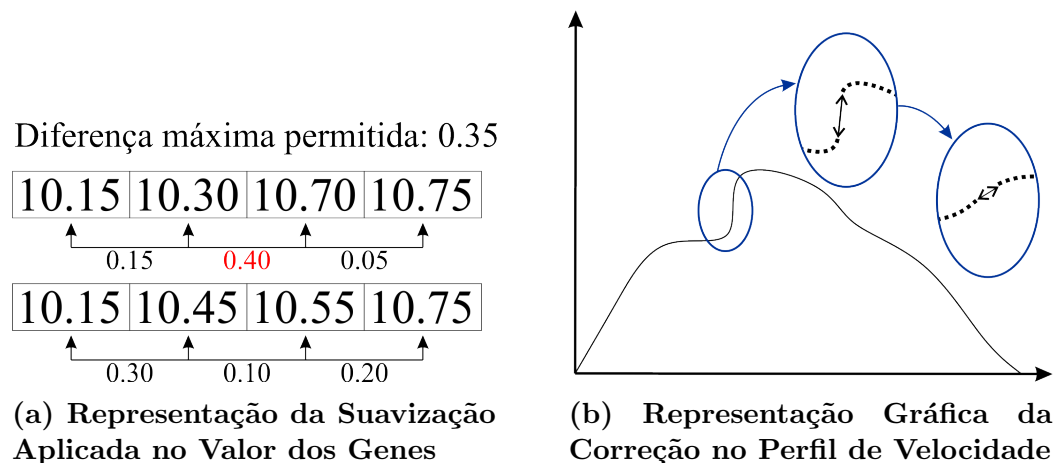


Figura 16: Representação do Algoritmo de Suavização Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Experimento

Para a realização da análise comparativa das estratégias de inicialização, o experimento fora realizado com os operadores de Inicialização Aleatória, de Inicialização Aleatória com Suavização Aplicada, de Inicialização Baseada em Dados Reais e Inicialização Baseada em Dados Reais com Suavização Aplicada.

As realizações feitas neste experimento tomaram como base a Linha Sul do Sistema de Trens Urbanos do Recife. Este sistema é operado em 3 linhas férreas, sendo 2 eletrificadas e 1 operada por composições diesel com extensão total de 71 km, abrangendo

Algorithm 1 Algoritmo de Suavização

```
1: function SUAVIZA(*elementos, i, falha)
2:   diferenca  $\leftarrow$  abs(elementos[i + 1] - elementos[i])
3:   if diferenca  $\geq$  0.35 then
4:     correcao  $\leftarrow$  diferenca * 0.3
5:     falha  $\leftarrow$  verdadeiro
6:     if elementos[i]  $\leq$  elementos[i + 1] then
7:       elementos[i]  $\leftarrow$  elementos[i] + correcao
8:       elementos[i + 1]  $\leftarrow$  elementos[i + 1] - correcao
9:     else
10:      elementos[i]  $\leftarrow$  elementos[i] - correcao
11:      elementos[i + 1]  $\leftarrow$  elementos[i + 1] + correcao
12:    end if
13:    SUAVIZA(*elementos,i-1,falha)
14:  end if
15:  return falha
16: end function
```

4 municípios, Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Cabo de Santo Agostinho. Possui 37 estações, transportando cerca de 400 mil passageiros/dia. A Linha Sul é uma das linhas eletrificadas a qual abrange 2 municípios, Recife e Jaboatão dos Guararapes, com 10 estações em operação, no trecho Recife/Cajueiro Seco (CBTU, 2017). Através dos dados de um perfil de condução obtido por meio de sensores, da Linha Sul do Metrô de Recife (METROREC), para a realização dos experimentos, tomamos como base o subtrecho entre as estações de Coqueiral a Alto do Céu, a qual tem uma extensão de 1148 metros. No perfil de condução que utilizado para este trabalho o tempo de viagem entre as estações foi de 99 segundos, que será considerado nos experimentos como o tempo de viagem que deve ser cumprido. Para a massa do trem foi tomado como base o trabalho realizado por Queiroz (2016) o qual considera a massa do trem fixa em 38000 kg.

A representação cromossomial adotada neste trabalho é baseada no exemplo ilustrado na Figura 17, onde E1 e E2 são as estações, inicial e final respectivamente. O cromossomo representa o perfil de condução, onde a quantidade de genes é definida pela quantidade de capturas. Então o cromossomo foi definido através da utilização dos dados do subtrecho utilizado nos experimentos. Cada gene pode ter diferentes configurações de velocidade, tempo, distância, aceleração, pressão, corrente, potência, energia e freio.

A função de avaliação utilizada neste trabalho foi baseada na função da Energia Cinética e como os AGs podem ser vistos como métodos de maximização e o objetivo é minimizar o gasto energético, a função de avaliação será o inverso da energia cinética. Na Equação 1 está representado o gasto energético calculado para cada gene y do cromossomo x , a Equação 2 representa a soma total da energia gasta em cada gene y do cromossomo x , a Equação 3 é o inverso da Equação 2, e será a função de avaliação utilizada para

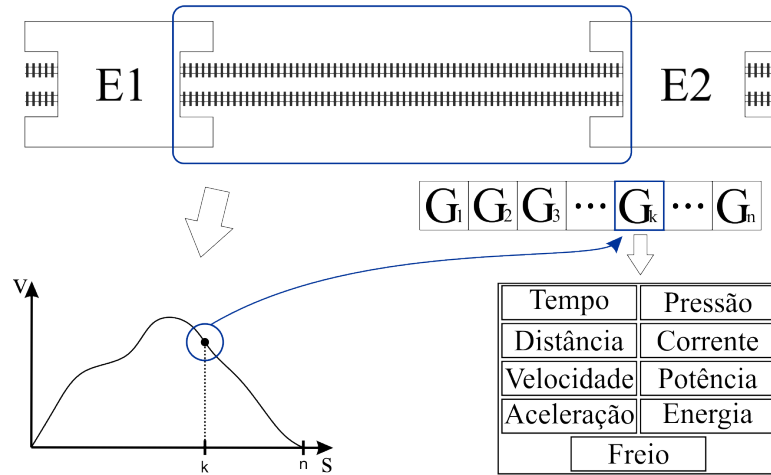


Figura 17: Representação cromossomal adotada nesse trabalho Fonte: Elaborado pelo autor

minimizar de forma inversa a eficiência energética, sendo está então maximizada.

$$E_c(x, y) = \frac{m * v_{x,y}^2}{2} \quad (1)$$

$$E_t(x) = \sum_{y=1}^G E_c(x, y) \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{E_t(x)} \quad (3)$$

m = é a massa do trem.

$v_{x,y}$ = velocidade do do trem no gene y .

x = número do cromossomo da população.

y = posição do gene em um cromossomo y .

G = número total da quantidade de genes de um cromossomo.

O operador de seleção utilizado foi o método da roleta relatado na Seção 2.2 deste trabalho. O crossover utilizado foi o crossover de um ponto, e a mutação foi a uniforme com a taxa definida em 10%. O módulo da população escolhido mantém o melhor pai da geração anterior e descarta todo o resto dos pais. A população foi composta por 100 indivíduos e o AG foi configurado para realizar 50 gerações. A escolha destes operadores foi baseada no trabalho de Queiroz (2016), que demonstra um melhor funcionamento no contexto do GenticBee.

Uma tabela de sinalização é uma tabela que contém as velocidades máximas permitidas durante o percurso. Para a Inicialização Baseada em Dados Reais, o perfil inicial

utilizado como base da tabela de sinalização foi o perfil real utilizado para os experimentos, já para a Inicialização Aleatória um perfil inicial aleatório é gerado e este é tomado como base para a tabela.

Neste trabalho o subtrecho analisado foi dividido em dez partes iguais e a velocidade máxima foi definida pela maior velocidade encontrada no perfil inicial para cada uma das dez partes, arredondando este valor para um múltiplo de 5. Algumas restrições são aplicadas pelo AG para garantir que os perfis gerado cumpram a distância necessária, cumprindo também com o tempo determinado com um adicional de dez segundos de folga.

Para a inicialização baseada nos dados reais o valor configurado para o intervalo de variação é 3, ou seja a faixa a ser escolhida pode variar entre $[v_{x,y} - 3, v_{x,y} + 3]$.

Analisando o perfil de entrada foi visto em média uma diferença de 0.15m/s para cada gene, e em 10% dos casos as diferenças tinham valores maiores que 0.35m/s, o algoritmo de suavização teve seu conforto ajustado para minimizar as diferenças de velocidade de cada gene para ser menor do que 0.35m/s.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com a utilização das configurações detalhadas na seção anterior. O resultados estão apresentados nas Figuras 18, 19, 20 e 21.



5

Figura 18: Comparação dos Experimentos pela Avaliação Fonte: Elaborado pelo Autor

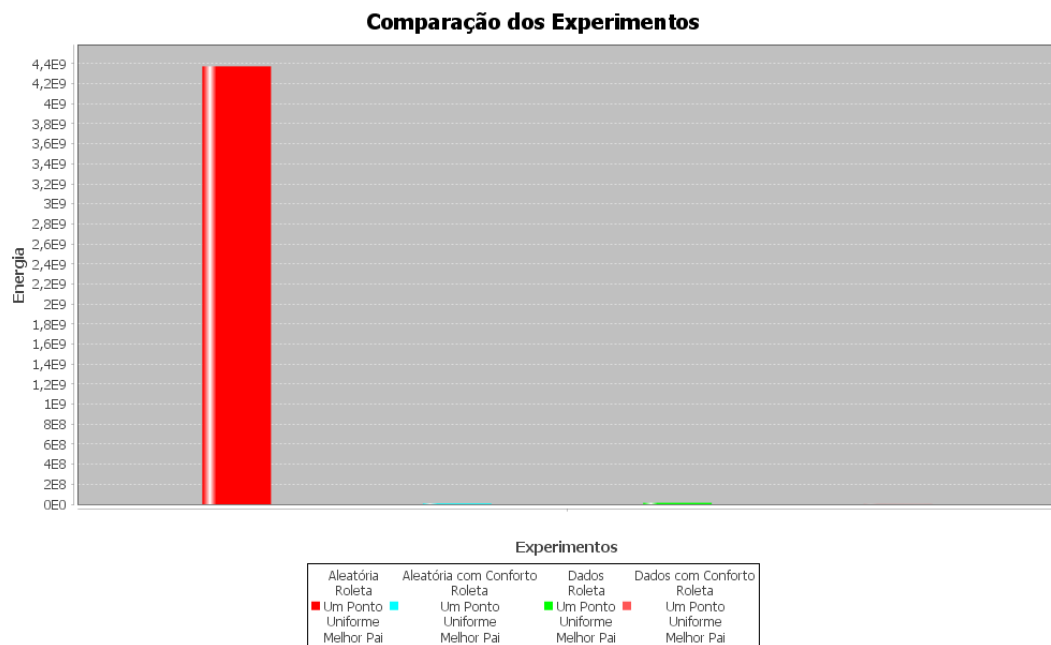


Figura 19: Comparação dos Experimentos pela Energia Gasta Fonte: Elaborado pelo Autor

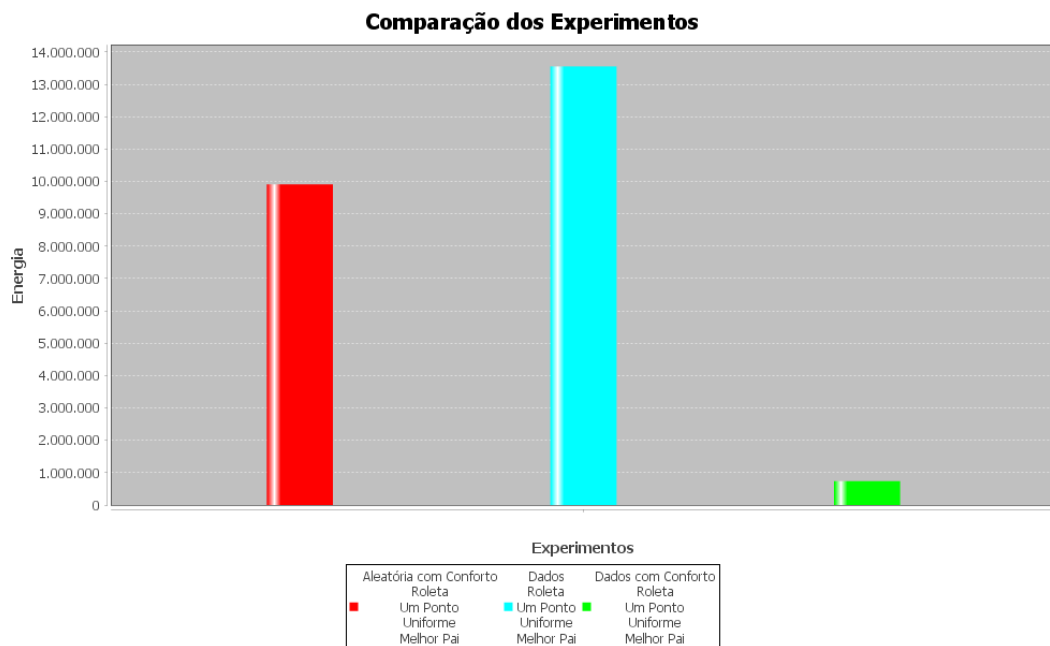


Figura 20: Comparação dos Experimentos pela Energia Gasta sem o Experimento da Inicialização Aleatória Fonte: Elaborado pelo Autor

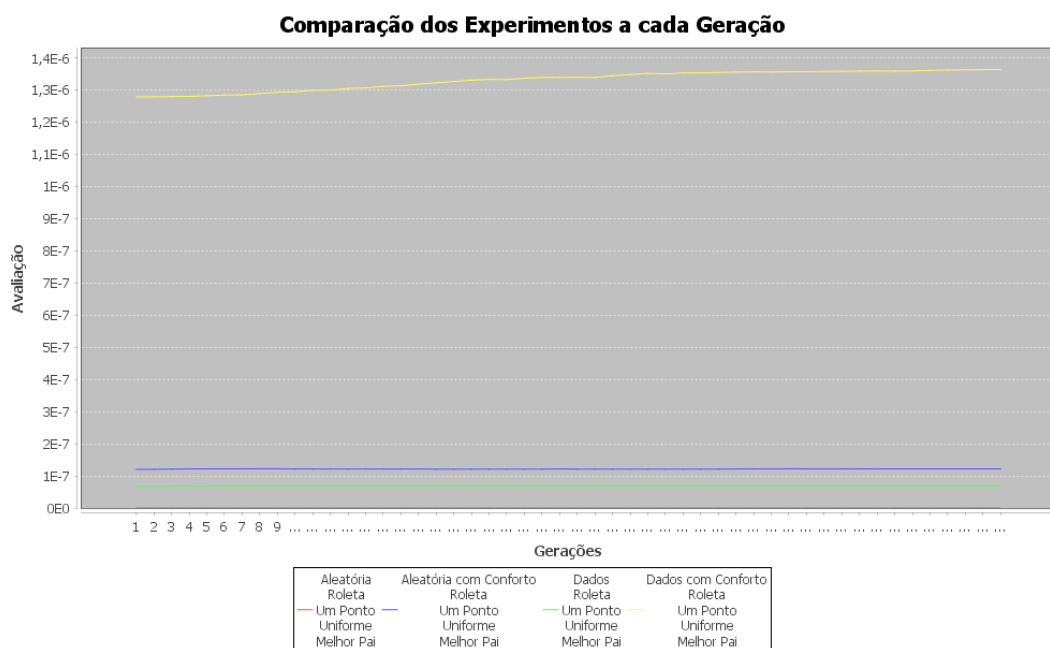


Figura 21: Comparação dos Experimentos pela Avaliação a cada Geração Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 18 mostra a avaliação do melhor indivíduo da última geração resultante dos perfis de condução finais obtidos para cada uma dos experimentos abordados.

Já Figura 19 mostra o gasto energético que fora obtido em cada perfil final.

Na Figura 20 foi excluído o experimento Inicialização Aleatória para permitir que fosse observado o gasto energético dos outros experimentos.

Finalmente na Figura 21 pode ser observada a evolução das avaliações para cada geração do AG, de cada um dos experimentos realizados.

6 DISCUSSÃO

De acordo com os resultados expostos na Figura 21 o experimento realizado com a inicialização da população aleatória obteve o pior resultado, quase não podendo ser visto no gráfico, o qual trouxe a questão da necessidade de uma possível melhoria das escalas para uma melhor visualização gráfica. O experimento que utilizou como base os dados do perfil real do trecho entre Coqueira e Alto do Céu, sem a utilização do algoritmo de suavização, obteve uma influência positiva significativa na avaliação do resultado final do AG em relação a Inicialização Aleatória.

O algoritmo de suavização eliminou a maior parte dos distúrbios encontrados nas soluções e pelo gráfico exposto pode ser observado um grande aumento nas avaliações dos experimentos com a Inicialização Aleatória e a Inicialização Baseada em Dados Reais quando utilizado o algoritmo de suavização em relação a quando não fora utilizado. Em específico o experimento que utilizou a Inicialização Baseada em Dados Reais com Suavização Aplicada apresentou uma diferença enorme em relação aos outros experimentos em cada uma das execuções.

Como a avaliação é o inverso do gasto de energia, a que teve o maior gasto energético foi o experimento com a Inicialização Aleatória e seu gasto energético foi tão alto que tornou imperceptível a visualização dos outros experimentos no gráfico da Figura 19. Na Figura 20 pode ser melhor analisado o gasto energético dos outros experimentos que tiveram este gasto proporcionalmente inversos a sua avaliação.

Observando a Figura 21 dá para observar bem as influências obtidas por cada um dos experimentos realizados e o quão importante é uma boa inicialização para a evolução do AG.

O algoritmo de suavização mostrou ser bastante eficiente para trazer conforto aos perfis analisados e na melhora das soluções para as configurações utilizadas nos experimentos.

Como pode ser vista tanto na Figura 18, que mostra a avaliação do melhor indivíduo da última geração, e na Figura 21, que mostra a evolução das avaliações por geração, a inicialização que obteve os melhores resultados foi a Inicialização Baseada em Dados Reais com Suavização Aplicada.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado e apresentado o comportamento de cada estratégia de inicialização e o impacto que foi gerado no AG utilizado. A estratégia de inicialização que obteve o melhor desempenho foi a Inicialização Baseada em Dados Reais utilizando o algoritmo de suavização. Como os operadores estão diretamente ligados ao problema, aprimoramentos que possam ser realizados no AG podem trazer outros comportamentos para estas estratégias.

7.1 Contribuições

Foram definidas algumas estratégias para inicialização da população para o problema em questão, além de um algoritmo de suavização para prover conforto as soluções, e estas foram analisadas para indicar as de melhor desempenho.

As estratégias de inicialização junto com o algoritmo de suavização foram integrados ao software utilizado, tornando possível fazer alterações de configuração e verificar qual o impacto na solução final.

7.2 Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas melhorias que podem ser realizadas em trabalhos futuros:

- Inserir novas restrições ou funções que possam fazer com que os perfis gerados sigam os padrões de um perfil de velocidade viável.
- Melhorar a função de avaliação do AG, acrescentando novos dados a serem analisados.
- Melhorar a representação gráfica dos resultados, com uma melhoria da escala das avaliações obtidas, ou a melhoria da função de avaliação utilizada.
- Melhorar a representação cromossomial, com a inserção de novos dados.
- Fazer uma comparação dos resultados com vários perfis reais para verificar a eficiência gerada.
- Inserir uma tabela de sinalização das velocidades máximas retiradas das estações que forem analisadas.

REFERÊNCIAS

- [1] Agenda 2030. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio), 2015.
- [2] AQUINO, Andre L.L.; RAMOS, Heitor S.; PEREIRA, Leonardo V.; FRERY, Alejandro C.; **Cidades Inteligentes, um Novo Paradigma da Sociedade do Conhecimento**, p. 165-178 . In: São Paulo: Blucher, 2015.
- [3] BRENNAN, Morris; FOIADELLI, Federica; LONGO, Michela. **Application of genetic algorithms for driverless subway train energy optimization**. *International Journal of Vehicular Technology*, 2016.
- [4] 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*, 2014, 36: 164-177.
- [5] 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.
- [6] 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*, 2013, 37: 20-41.
- [7] COSTA, Marcela da S.; **Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável**. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [8] 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*, 2012, 25.8: 1548-1557.
- [9] CÂMARA, Samuel F.; CARVALHO, Hermano J. B.; SILVA, Francisca A. A. S.; SOUZA, Lucas L. F.; SOUZA, Elnivan M.; **Cidades Inteligentes no Nordeste Brasileiro: Análise das Dimensões de Trajetória e a Contribuição da População**. *Cadernos Gestão Pública e Cidadania* , v. 21, n. 69, p. 137-157, maio-agosto, 2016.

- [10] DAIDA, J. M.; AMPY, Derrick S.; RATANASAVETAVADHANA, Michael; LI, Hsi-aoei; CHAUDHRI, Omar A. **Challenges with verification, repeatability and meaningful comparisons: Gibson's magic**. In: Proceedings of the 1st Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation-Volume 2. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999. p. 1851-1858.
- [11] DOUGLAS, Heather; ROBERTS, Clive; HILLMANSEN, Stuart; SCHMID, Felix. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. **Energy Conversion and Management**, v. 106, p.1149-1165, Dezembro, 2015.
- [12] 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.
- [13] HAMID, Hassan A.; NICHOLSON, Gemma L.; DOUGLAS, Heather; ZHAO, Ning; ROBERTS, Clive. **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.
- [14] HILLIER, Frederick S., GERALD J. Lieberman. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2013.
- [15] HUANG, Youneng, et al. **Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm**. *Energies*, 2015, 8.12: 14311-14329.
- [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.
- [17] LI, Xiang; LO, Hong K. **An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations**. *Transportation Research Part B : Methodological*, 2014, 64: 73-89.
- [18] LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos - 3ª Edição**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2012.
- [19] LU, Shaofeng; HILLMANSEN, Stuart; KIN, Tin H.; ROBERTS, Clive. **Single-train trajectory optimization**.

- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14.2: 743-750.
- [20] MARTINS, Marcelle B.; LINO, Natasha C.Q.; LIMA FILHO, Abel C. **GeneticBee: A theoretic and evolutionary formulation for the energy efficiency problem of urban trains**. In: ANDESCON, 2016 IEEE. IEEE, 2016. p. 1-4.
- [21] MOTA, Moises R. de A. **Mapeamento sistemático sobre o uso de ontologias em informática médica**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.
- [22] NORVIG, Peter; RUSSELL, Stuart. **Inteligência artificial**, 3a Edição. Elsevier, 2014.
- [23] OLÍVIO, Dennis H. V.; CARVALHO, João L. de; BIANCARDI, Luciane; GALLO, Zildo. A ética do consumo. **Scientia FAER**, v. 2, n. 2, p. 16-27, 1º Semestre, 2010.
- [24] ONU. Disponível em: <<http://www.un.org>>. Acesso em: 13 Mai 2017.
- [25] ONUBR. Disponível em: <<http://nacoesunidas.org/pos2015>>. Acesso em: 2 Mai 2017.
- [26] QUEIROZ, Mayrton D. de; MARTINS, Marcelle B.; DANIEL, Rodrigo G.; LINO, Natasha C. Q. **Um estudo exploratório sobre o uso de algoritmos genéticos para o problema de eficiência energética em trens urbanos**. In: Anais do IX ENUCOMP 2016, Teresina, PI, 08 a 11 de novembro de 2016: Organização de Eyder Franco Sousa Rios e Rodrigo Augusto R. S. Baluz. – Parnaíba: FUESPI, 2016.
- [27] 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*, 2014, 29: 79-92.
- [28] TONON, Rafael. Cidades inteligentes. **Revista Galileu**, maio, 2013.
- [29] XU, Xiaoming; KEPING, Li; XIANG, Li. **A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption**. *Journal of Advanced Transportation*, 50.1, 2016, p.69-95.
- [30] YANG, Xin; CHEN, Anthony; LI, Xiang; NING, Bin; TANG, Tao. **An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems**. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 2015, 57: 13-29.

- [31] YANG, Xin; LI, Xiang; NING, Bin; TANG, Tao. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 1, p. 2-13, JAN, 2016.
- [32] YONG, Ding; LIU, Haidong; BAI, Yun; ZHOU, Fangming. **A two-level optimization model and algorithm for energy-efficient urban train operation.** *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11.1: 96-101.