

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

GUSTAVO MACHADO DA SILVA

INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE ENERGIA DE TRENS NA ESTIMATIVA DO CUSTO
DE TRAÇADOS FERROVIÁRIOS

Joinville
2017

GUSTAVO MACHADO DA SILVA

INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE ENERGIA DE TRENS NA ESTIMATIVA DO CUSTO
DE TRAÇADOS FERROVIÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, no curso Engenharia de Transportes e Logística da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler

Joinville
2017

RESUMO

A busca por processos mais eficientes é tema de crescente interesse em relação aos diferentes modos de transporte quanto ao consumo energético. No transporte ferroviário, diferentes ferramentas e técnicas de otimização têm sido consideradas no planejamento e gerenciamento das operações, além dos investimentos aplicados em infraestrutura e material rodante para minimização de custos energéticos. Nessa temática, o objetivo deste trabalho é estimar a influência do consumo de energia de trens sobre o custo de implantação de traçados ferroviários pela implementação e aplicação da meta-heurística Simulated Annealing. As características do trem que afetam as estimativas de força de tração e forças de resistência atuantes, e as características da ferrovia, como inclinações, raios de curva e limites de velocidade, são consideradas no modelo. O algoritmo foi implementado na linguagem de programação Java e apresenta como resultado um gráfico de perfil de velocidade do trem e a quantidade de energia consumida no percurso, permitindo estimar o consumo em termos monetários. Nesse sentido, o valor monetário estimado de consumo médio pela aplicação do algoritmo em um traçado hipotético para operação de trens de alta velocidade de passageiros, tracionados por locomotivas a diesel, entre as cidades de Ribeirão Preto e Araraquara, no interior do Estado de São Paulo, foi de $8,79 \text{ kWh/km}$, tendo sido ainda obtido um gráfico que compara o custo de operação de trens mediante diferentes intervalos de viagem e o custo de construção do traçado.

Palavras-chave: Ferrovia. Consumo de Energia. Simulated Annealing.

ABSTRACT

The search for more efficient processes is a topic of growing interest among the different transportation modes regarding energy consumption. Different tools and optimization techniques have been considered in the railway operation planning and management, in addition to the investments in infrastructure and rolling stock to minimize the energy costs. In this sense, the goal of this research is to estimate the relation between the train energy consumption obtained by the metaheuristic Simulated Annealing and the railway construction cost. The train configuration and the railway features are considered in the model, which was implemented in the Java programming language, and the results are the speed profile of the train represented as a chart and the energy consumption in monetary values. The average estimated value of energy consumption of a high speed passenger train, hauled by a diesel locomotive, running on a hypothetical high speed railway between Ribeirão Preto and Araraquara, in the State of São Paulo, was $8,79 \text{ kWh/km}$, and a chart was obtained in order to compare the energy costs and railway construction cost considering different values of frequency during the operational horizon of the system.

Keywords: Railway. Energy Consumption. Simulated Annealing.

AGRADECIMENTOS

Próximo à conclusão de mais uma importante etapa da minha vida, não posso deixar de reconhecer a importância de todos que estiveram presente ao longo da minha caminhada e que me deram apoio e força nos momentos mais críticos e necessários, portanto, quero registrar aqui toda a minha gratidão.

A Deus, por prover a mim capacidade e força para concluir mais esta etapa da minha jornada.

À minha família, que sempre me deu suporte, incentivo e, principalmente, amor, por serem minha base, o exemplo que sempre segui e seguirei e por me moldarem para que eu pudesse ser quem sou hoje.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cassiano Augusto Isler, por aceitar o convite de orientação, me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho e propiciar a oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado e viveram comigo momentos de alegria e de dificuldade, por serem uma poderosa fonte de força e incentivo.

Quando a gente anda sempre
em frente, não pode mesmo ir
longe.

Antoine de Saint-Exupéry

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de força de tração.	14
Figura 2 – Pseudo-código do algoritmo Simulated Annealing	20
Figura 3 – Divisão do traçado em trechos e subtrechos	22
Figura 4 – Fluxograma do algoritmo - Parte 1	24
Figura 5 – Método iterativo para determinação da distância de frenagem	27
Figura 6 – Exemplo de perfil de velocidade	31
Figura 7 – Proposta de traçado para trens de alta velocidade entre Ribeirão Preto e Araraquara (interior de São Paulo).	32
Figura 8 – Declividade do traçado no sentido Araraquara-Ribeirão Preto.	33
Figura 9 – Declividade do traçado no sentido Ribeirão Preto-Araraquara.	33
Figura 10 – Raio de curva do traçado no sentido Araraquara-Ribeirão Preto.	34
Figura 11 – Raio de curva do traçado no sentido Ribeirão Preto-Araraquara.	34
Figura 12 – Locomotiva AC44i	35
Figura 13 – Curvas de nível do erro quadrático médio no trecho entre Santa Fé do Sul e 3 Fronteiras.	38
Figura 14 – Curvas de nível do erro quadrático médio no trecho entre 3 Fronteiras e Pimenta Bueno.	39
Figura 15 – Curvas de nível do erro quadrático médio no trecho entre Pimenta Bueno e Santa Salete.	40
Figura 16 – Curvas de nível da média dos erros quadráticos médios.	41
Figura 17 – Perfil de velocidade na trajetória entre Ribeirão Preto a Araraquara.	43
Figura 18 – Perfil de velocidade na trajetória entre Araraquara a Ribeirão Preto.	44
Figura 19 – Histograma das estimativas de custo de traçados	46
Figura 20 – Comparação entre custos operacionais e de construção dos traçados em um horizonte de 35 anos.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Permissão para permutação de regimes de tração	29
Tabela 2 – Valores de α e β para menor erro quadrático nos trechos.	41
Tabela 3 – Custo de operação dos trens no horizonte de operação de 35 anos.	46
Tabela 4 – Comparação entre custos operacionais e custos de construção do traçado pelo Simulated Annealing.	47
Tabela 5 – Comparação entre custos operacionais e custos de construção do traçado por valores de referência.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo Geral	10
1.2	Objetivos Específicos	10
1.3	Estrutura do texto	11
2	REVISÃO TEÓRICA	12
2.1	Mecânica de locomoção de veículos ferroviários	12
2.2	Métodos para obtenção do perfil de velocidade	15
2.2.1	Simulação	15
2.2.2	Otimização	17
2.3	Simulated Annealing	18
3	MÉTODO	21
3.1	Caracterização da via e do trem	21
3.2	Cálculo das forças atuantes e aceleração	22
3.3	Cálculo da velocidade, tempo de viagem e consumo de energia	23
3.4	Simulated Annealing	23
3.4.1	Leitura de dados e definição de parâmetros	24
3.4.2	Comprimento e quantidade inicial de trechos e sub-trechos	25
3.4.3	Distância de aceleração inicial	25
3.4.4	Distância de frenagem final	25
3.4.5	Solução inicial	27
3.4.6	Função Objetivo	27
3.4.7	Alterações da solução	28
3.4.8	Resultados do algoritmo	30
4	RESULTADOS	32
4.1	Caracterização do traçado	32
4.2	Parâmetros do Simulated Annealing	35
4.2.1	Calibração dos parâmetros da função objetivo	37
4.3	Estimativa do perfil de velocidade	42
4.4	Consumo de energia	45
5	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A busca por processos mais eficientes é tema de crescente interesse em relação aos diferentes modos de transporte. No transporte ferroviário, as possibilidades de minimização de custos abrangem tanto investimentos em infraestrutura, material rodante e seus componentes, quanto o planejamento e gerenciamento das operações através de ferramentas e técnicas de otimização.

Conforme explica Profillidis (2006), a competição intramodal introduzida no transporte ferroviário em diversos países pela separação das companhias responsáveis pelo gerenciamento da infraestrutura e da operação, devido à baixa taxa de retorno dos investimentos em relação ao alto custo de implantação da infraestrutura ferroviária, evidencia ainda mais a necessidade de adequado gerenciamento operacional, pois nesse modelo a utilização da malha ferroviária mediante pagamento de taxas possibilita às companhias obter vantagem competitiva frente aos concorrentes quando as atividades de transporte são bem planejadas e executadas.

Entre as questões operacionais existe a problemática de estimativa da velocidade e consumo de energia com o objetivo de redução de despesas com combustível e dos efeitos negativos da emissão de poluentes. Por exemplo, o relatório do US Energy Information Administration (2017) indica que as sete maiores ferrovias dos Estados Unidos em 2012 consumiram o equivalente a mais de 3,6 bilhões de galões de diesel. No cenário brasileiro, entre 2010 e 2015, houve aumento do consumo de óleo diesel pelas concessionárias de aproximadamente 12,8% (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, 2017).

Nesse sentido, as técnicas de modelagem e resolução de problemas no âmbito da Pesquisa Operacional apresentam-se como ferramentas adequadas para o tratamento de problemas reais e que fornecem suporte para a tomada de decisões através de elementos quantitativos. Para isso, segundo Barbosa (2013), os principais instrumentos para atingir os objetivos em investigações no campo da Pesquisa operacional são oriundos das áreas do Cálculo, Estatística e Informática.

As ferramentas disponíveis nessa área do conhecimento permitem solucionar diversos tipos de problemas como dimensionamento de frota, definição de tabela de horários, alocação de locomotivas, alocação de horários de colaboradores aos equipamentos etc., os quais implicam em modelos matemáticos que podem resultar em problemas de grande porte difíceis de serem resolvidos em tempo de processamento satisfatório pelos equipamentos computacionais disponíveis atualmente.

Nesse caso, os métodos heurísticos são uma alternativa para o tratamento de problemas cuja identificação da solução ótima seja inviável ou requeira muito tempo de processamento computacional, como é o caso da estimativa da velocidade e consumo de energia de trens quando analisados sob a perspectiva da modelagem de otimização. Esses métodos consistem em algoritmos computacionais que realizam buscas direcionados por soluções para o problema abordado que garantem qualidade para o resultado final, mas nem sempre atingem a solução ótima de um problema, resolvendo-o em reduzido tempo de processamento. Alguns métodos utilizados para esse fim são: Algoritmo Genético, Busca Tabu e Simulated Annealing (COLIN, 2007).

Nessas condições, dadas as características geométricas de traçados ferroviários (raios de curva, declividades e limites de velocidade), é de interesse da comunidade científica de operadores de transporte ferroviário estimar o perfil de velocidade de trens com configurações específicas mediante a aplicação de um método baseado nos conceitos de pesquisa operacional com o intuito de identificar a magnitude do consumo de energia dos trens em função dos custos de construção de ferrovias.

Assim, propõe-se neste trabalho a implementação de um modelo previamente descrito na literatura baseado nos conceitos da heurística Simulated Annealing (KIM; CHIEN, 2011) para investigação da influência do consumo de energia sobre o custo total de construção de um traçado ferroviário previamente estabelecido por Isler (2015) para viabilizar a circulação de trens com velocidade limitada a 300 km/h. O estudo delimita-se à análise de um trem de alta velocidade de passageiros movido por uma locomotiva a diesel, a exemplo do “Intercity 125” entre Londres e Newcastle na Inglaterra, que pode atingir velocidade de até 200km/h (VICKERMAN, 1997). Ademais, o escopo do trabalho delimita-se à estimativa de consumo de diesel, desconsiderando-se o consumo energético relacionado a questões térmicas e dinâmicas.

1.1 Objetivo Geral

Estimar a influência do consumo de energia de trens sobre o custo de implantação de traçados ferroviários.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Escolher um método heurístico para determinar o perfil de velocidade e o consumo de energia de trens dado um traçado conhecido;
- b. Implementar e calibrar os parâmetros de um método heurístico para determinação do perfil de velocidade de trens que minimize o consumo de energia;
- c. Aplicar o método heurístico para análise do consumo de energia em um traçado para operação de trens de alta velocidade entre as cidades de Ribeirão Preto e

Araraquara (interior de São Paulo) proposto por Isler (2015).

1.3 Estrutura do texto

O texto está compreendido em 5 capítulos. No capítulo 2 após esta introdução são descritas pesquisas que abordaram problemas similares ao analisado neste trabalho, bem como os métodos considerados para sua resolução. O terceiro capítulo explicita o procedimento que caracteriza a heurística Simulated Annealing para a determinação do perfil de velocidade de trens pela minimização do consumo de energia. O capítulo 4, por sua vez, apresenta as soluções obtidas após a execução do algoritmo e as análises efetuadas através da relação entre os consumos de energia obtidos e os custos de implantação dos traçados ferroviários. Por fim, o quinto capítulo indica considerações sobre os objetivos propostos, as conclusões sobre o consumo de energia comparada ao custo de construção de novos traçados ferroviários e sugestões de continuidade para o trabalho descrito neste texto.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos relativos à mecânica de locomoção de trens, bem como conceitos físicos e formulação matemática necessária ao equacionamento do problema de determinação da velocidade de composições ferroviárias. Na sequência são apresentadas as técnicas de simulação e otimização utilizadas para estimativa da velocidade dos veículos e, por fim, são apresentados os conceitos intrínsecos à meta-heurística Simulated Annealing implementada neste trabalho para alcançar o objetivo geral proposto.

2.1 Mecânica de locomoção de veículos ferroviários

O movimento realizado pelos trens pode ser caracterizado pelas forças que agem sobre ele conforme a segunda Lei de Newton, tal que a aplicação de uma força sobre um objeto ocasiona uma taxa proporcional de alteração do momento linear no mesmo sentido em que a força é aplicada. O momento linear é caracterizado pelo produto entre a massa do objeto e a variação da velocidade quanto ao tempo conforme a Equação 2.1 considerando o Sistema Internacional de Unidades (SI) e o desenvolvimento matemático proposto por Morlok (1978).

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot a \quad (2.1)$$

onde F = força (kN); a = aceleração (m/s^2); e m = massa (kg).

Morlok (1978) define trabalho como o produto entre a força aplicada e a variação da posição do veículo ao longo da sua trajetória. Se a força é constante em um intervalo de tempo e o deslocamento é realizado na mesma direção então:

$$W = F \cdot S \quad (2.2)$$

onde W = trabalho realizado (J); e S = deslocamento (m).

Nessas circunstâncias, a potência é definida como a variação do trabalho realizado ao longo do tempo. Assumindo que a força de propulsão constante é aplicada na mesma direção da trajetória do trem, a potência resume-se ao produto entre a força e a velocidade conforme a Equação 2.3 (MORLOK, 1978) .

$$P = \frac{dW}{dt} = F \cdot \frac{dS}{dt} = F \cdot v \quad (2.3)$$

onde P = potência (*watts*); v = velocidade (*m/s*).

Logo, segundo Morlok (1978), o cálculo da força de tração quando o motor a diesel opera na potência máxima é efetuado segundo a Equação 2.4.

$$F_t = \eta \cdot \frac{P}{v} \quad (2.4)$$

onde F_t = força de tração (*kN*); e η = eficiência do sistema de transmissão.

Considerando eficiência da transmissão $\eta = 0,83$ e convertendo as unidades de velocidade para *km/h* e potência para *kW* obtém-se a equação 2.5.

$$F_t = 2988 \cdot \frac{P}{v} \quad (2.5)$$

A propulsão de locomotivas a diesel é limitada pela força máxima que ela pode prover estabelecida pela equação anterior e também pela aderência entre as rodas e a superfície percorrida. Nesse caso, é imprescindível que o produto entre o peso sobre as rodas das locomotivas e a máxima aderência roda-trilho seja maior ou igual à máxima propulsão possível para que o movimento ocorra (MORLOK, 1978) conforme caracterizado na Equação 2.6.

$$F_t^{lim} = \mu \cdot m \cdot g \quad (2.6)$$

onde μ = coeficiente de aderência (entre 0,22 e 0,1); e g = aceleração da gravidade.

Cabe ressaltar que as questões relacionadas à aderência roda-trilho são aplicadas para ambos os processos de aceleração e de frenagem. Portanto, o produto entre o coeficiente de aderência e o peso sobre as rodas das locomotivas também não pode ser excedido pela força de frenagem exercida sobre o veículo para realizar a desaceleração (MORLOK, 1978).

Além das forças atuantes no veículo para prover aceleração e desaceleração, existem forças de resistência que se opõem ao movimento do veículo e que devem ser transpostas para que o trem atinja uma velocidade de equilíbrio e o veículo permaneça em movimento. Expressões matemáticas elaboradas a partir de testes empíricos foram propostas para estimar os valores do conjunto de resistências que atuam sobre a composição ferroviária.

A fórmula de Davis é comumente utilizada para representar o conjunto de forças inerentes ao movimento que resultam na resistência básica ao movimento, caracterizada por Keskin e Karamancioglu (2017) conforme a Equação 2.7.

$$R_b = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad (2.7)$$

onde R_b = resistência básica; A = coeficiente relacionado à massa do trem; B = coeficiente de atrito mecânico inerente ao atrito do veículo com os trilhos; C = coeficiente relacionado à resistência do ar.

Existe ainda a resistência de rampa decorrente da atuação da força gravitacional quando o veículo trafega em um trecho ascendente ou em um declive. A formulação utilizada para o cálculo da resistência de rampa é apresentada a seguir (KESKIN; KARAMANCIOGLU, 2017).

$$R_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.8)$$

onde R_g = resistência de rampa; α = ângulo do aclave/declive.

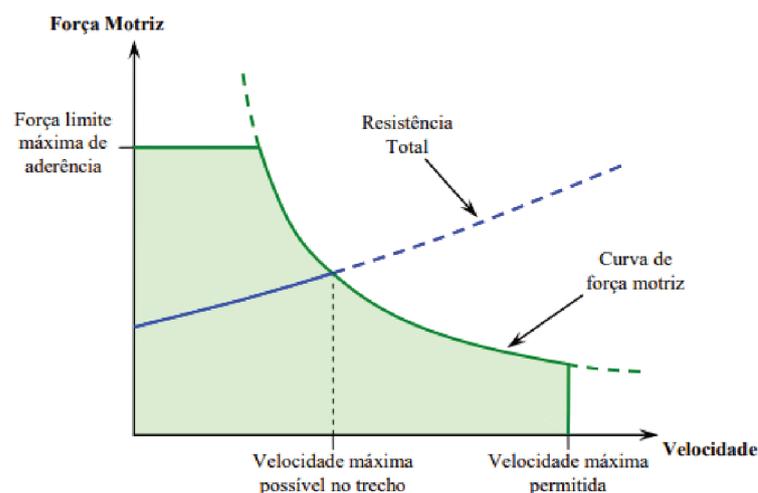
Adicionalmente, considera-se a resistência de curva que atua quando há curvas horizontais no traçado ferroviário. Essa componente de resistência é devido à força centrífuga imposta ao veículo e pode ser calculada segundo a equação 2.9.

$$R_c = 698 \cdot \frac{v^2}{r} \quad (2.9)$$

onde r = raio da curva circular horizontal.

O exemplo de diagrama de força de tração e resistência da Figura 1 representa a relação entre a força de propulsão, as forças de resistência impostas ao veículo e a velocidade exercida mediante um limite de aderência roda-trilho. A partir desta ferramenta gráfica e ou da solução algébrica da igualdade entre forças de tração e de resistência é possível identificar o equilíbrio entre elas que resulta em uma velocidade que pode ser desenvolvida pelo veículo, equivalente à qualquer par “velocidade-força” na envoltória da região fechada sublinhada em verde na figura.

Figura 1 – Diagrama de força de tração.



Fonte: Isler (2010).

O consumo de energia do trem em valores monetários pode ser estimado com base no trabalho realizado pelas locomotivas ao exercer força de tração para manter uma velocidade ou para aumentá-la, e por um coeficiente de consumo específico.

2.2 Métodos para obtenção do perfil de velocidade

O perfil de velocidade desenvolvido por trens ao longo de sua trajetória em um traçado ferroviário é representado visualmente através de um diagrama construído com base na velocidade a cada instante de tempo, ou posição na via, e é amplamente utilizado no âmbito prático e teórico para a avaliação de indicadores de desempenho e elaboração de melhorias operacionais (JONG; CHANG, 2005).

Existem diferentes métodos para obtenção da velocidade de equilíbrio de trens em trechos sucessivos do movimento além do método gráfico ou solução algébrica conforme esclarecido na seção anterior. Neste trabalho são abordadas as pesquisas realizadas quanto à aplicação de métodos de simulação e otimização.

Os artigos oriundos do levantamento bibliográfico realizado, em geral, consideram um dos quatro regimes de movimento para o trem:

- **Aceleração:** a locomotiva impõe uma determinada força de tração que provoca um aumento de velocidade, onde a força varia de acordo com a potência do motor e a velocidade exercida pelo trem;
- **Coasting:** a locomotiva não impõe força de tração para manter a sua velocidade e nenhuma energia é consumida;
- **Cruising:** a locomotiva impõe a força de tração necessária à manutenção da velocidade, que permanece constante ao longo do trecho;
- **Frenagem:** uma força contrária ao movimento é imposta de forma a reduzir a velocidade do trem, seja para respeitar limites de velocidade ou parar o veículo. Nesse regime considera-se que nenhuma energia é consumida.

2.2.1 Simulação

Kim e Chien (2010) destacam a relevância do estudo iniciado pela Administração Federal de Ferrovias dos Estados Unidos em 1978 sobre o desenvolvimento de “Simuladores de Desempenho de Trens” (SDT). O simulador proposto pelos autores possui três módulos e utiliza a variável tempo na realização dos cálculos de força de tração, resistências, taxas de aceleração e desaceleração e velocidade, ou seja, a cada instante de tempo da simulação essas informações são recalculadas, sendo o intervalo de tempo um parâmetro configurável pelo usuário.

O “Módulo de Tração de Trem” determina iterativamente a força de tração necessária para mover o trem para a posição desejada ao longo do tempo. São consideradas pelo simulador as seguintes forças de resistência: atrito; rolamento; e dinâmica. O “Módulo de Alinhamento da Ferrovia” caracteriza a ferrovia segundo as informações da inclinação e das velocidades máximas permitidas. O terceiro módulo define a sequência dos regimes de tração utilizados, buscando sequências factíveis perante as restrições impostas pelas características da via e condições operacionais.

O “Módulo de Alinhamento de Ferrovia” troca informações com o primeiro e terceiro módulos a cada instante de tempo de simulação, fornecendo para cada um deles, respectivamente, os valores de inclinação para o cálculo de resistência e os valores de velocidade máxima permitida para determinação do regime que será adotado. Da mesma forma, o “Módulo de Tração de Trem” comunica-se com o terceiro módulo fornecendo a força de tração disponível baseada no regime de tração selecionado.

Sicre et al. (2010) avaliaram uma linha ferroviária de alta velocidade considerando a existência de apenas um trem na linha com as propriedades de um simulador de desempenho de trens, para obtenção da melhor estratégia para a troca de regimes de tração, formando pares com os dados de energia consumida e tempo de viagem para cada regime adotado em cada passo de simulação.

A estratégia de condução do trem adotada por Sicre et al. (2010), resultante de pesquisa anteriores e ajuste de parâmetros ao longo da simulação, prioriza a utilização de velocidades constantes, sem frenagem, adotando posteriormente o regime “coasting” e, em seguida, frenagem, até atingir a estação de parada.

Isler (2010) utilizou um simulador denominado “Train Energy Model” (TEM), elaborado pela “Association of American Railroads” (AAR). O software é dividido em três módulos: o primeiro é responsável pela representação do trem, suas características e cálculo das forças atuantes; o segundo caracteriza a estratégia de controle adotada para o trem; e o último módulo é a implementação de um algoritmo que utiliza inteligência artificial para atingir os objetivos estabelecidos pelo planejador.

Yun et al. (2009) também abordam o problema do consumo energético utilizando um simulador de trens desenvolvido por Mao, He e Yuan (2000). Aqueles autores consideram o trabalho realizado pelo trem para superar as forças de resistência e a energia cinética perdida ao longo do processo de frenagem, e estimam que cerca de 80% a 90% da energia consumida é utilizada para superar as resistências e o restante é utilizado na recuperação da energia cinética perdida.

A utilização de uma velocidade uniforme ao longo do percurso é testada por Yun et al. (2009) usufruindo da aceleração provida pela gravidade ao transitar em declives em regime de “coasting” e impondo aceleração em determinados pontos que antecedem aclives, assumindo velocidade suficientemente elevada para superar o aclive e evitar uma posterior frenagem. Em virtude da variabilidade de velocidade na operação real os autores assumiram uma faixa de variação e constataram que o desvio padrão dessa variável tem correlação positiva com a variação da força de tração.

Aqueles autores concluíram que manter a velocidade constante ao longo do percurso é uma boa estratégia para redução de consumo (com economia de até 6,8% sem afetar o tempo de viagem), e que utilizar distâncias mais longas de coasting evitando frenagens possibilita uma economia de energia de até 9% com aumento de apenas 0,5% do tempo de viagem.

2.2.2 Otimização

Huang et al. (2015) utilizaram um algoritmo genético multipopulacional para solucionar o problema de minimização do consumo de energia tendo como variáveis o tempo de viagem e a estratégia de tração adotada. O modelo considera o trem como uma partícula e é dividido em dois níveis, o primeiro responsável pela determinação dos tempos de viagem e o segundo pela redução do consumo de energia utilizando os resultados da etapa anterior.

Os autores consideram as resistências básica, de gradiente e de curva, bem como as restrições impostas pelo limite de velocidade máxima permitida pela ferrovia analisada e pelo conforto dos passageiros, limitando o número de trocas de regime de tração em uma determinada distância de viagem. O traçado ferroviário é dividido em trechos (suficientemente pequenos para permitirem apenas um regime de tração) e sub-trechos (para que haja maior precisão dos cálculos). Além disso, há uma penalização na função objetivo para descartar soluções com excessos de velocidade e desvio do tempo de viagem efetivo em relação a um tempo de viagem esperado.

A partir de algoritmos de otimização baseados em comportamentos da natureza, Keskin e Karamancioglu (2017) tiveram como objetivo identificar os pontos mais adequados para o início dos regimes de “cruising” e “coasting”, considerando a caracterização da ferrovia, limites de velocidade, o tempo máximo permitido de viagem entre estações, além da variação da massa do trem de acordo com o número de passageiros. Foram implementados os algoritmos “Genetic Simulated Annealing” (GSA), híbrido entre o Algoritmo Genético e o Simulated Annealing, o “Big Bang-Big Crunch” (BB-BC), inspirado no processo de criação do universo através do Big Bang, e o “Firefly Algorithm” (FA), fundamentado no comportamento dos vaga-lumes.

Ao desenvolver uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão em tempo real, Ozhigin et al. (2016) abordaram a questão da redução do consumo de energia de trens utilizando o Algoritmo Genético como método de otimização, respeitando a programação de viagens, restrições de velocidade e conforto dos passageiros, permitindo que o condutor mantivesse o foco em ações voltadas à segurança. Os autores consideraram na função objetivo o tempo de viagem e um intervalo de aceitação de atrasos através de uma penalização da quantidade e duração das frenagens realizadas, para identificar o equilíbrio entre tempo de viagem, o processo de frenagem e, principalmente, o consumo de energia.

O algoritmo genético desenvolvido por Ozhigin et al. (2016) procura soluções vizinhas alterando o regime de tração e também os pontos de troca de regime de tração permitindo, assim, percorrer todo o espaço de soluções viáveis. Além disso, os autores propuseram um método para ampliar a quantidade de soluções que não violam as restrições do problema, relacionadas a tempo de viagem e limite de velocidade,

adicionando regimes que impõem o aumento ou a redução de velocidade conforme necessário. Os resultados obtidos evitaram regimes “cruising” e indicaram uso de frenagem apenas para respeitar os limites de velocidade impostos pelo traçado ferroviário, com uma economia de energia estimada em aproximadamente 14,5%.

Lu et al. (2013) utilizaram o Algoritmo Genético, Colônia de Formigas e Programação Dinâmica para tratar o problema de consumo de energia de trens ao considerarem as características do trem e da ferrovia, bem como as restrições relacionados à programação de viagens. Para calcular o consumo de energia e o tempo de viagem utilizaram um modelo baseado na distância atingida pelo veículo a cada iteração, identificando a velocidade na posição em questão e calculando as medidas de desempenho do trem.

A comparação entre os três métodos realizadas por Lu et al. (2013) mostra que a Programação Dinâmica apresenta os melhores resultados, em contraste ao algoritmo de Colônia de Formigas que converge mais rapidamente, porém falha na convergência em situações onde o espaço de busca torna-se reduzido, bem como o Algoritmo Genético.

2.3 Simulated Annealing

Segundo Hillier e Lieberman (2013), os métodos exatos de otimização são utilizados para a resolução de modelos cuja complexidade inviabiliza que as ferramentas computacionais atuais sejam capazes de prover uma solução ótima em tempo hábil.

Segundo aqueles autores, no caso de modelos complexos, como a estimativa do consumo de energia de trens, podem ser utilizados os métodos heurísticos que consistem na busca por uma solução local onde apenas soluções melhores são aceitas, há forte dependência da solução inicial e aceita-se a estagnação em uma solução ótima local. Alternativamente, as meta-heurísticas possuem estratégias para diversificação da busca por soluções em vizinhanças de pior qualidade, ampliando a possibilidade de identificação da solução ótima global.

O algoritmo denominado Simulated Annealing (SA) é uma meta-heurística baseada em um processo metalúrgico no qual ocorrem sucessivos aquecimentos e resfriamentos visando-se obter diferentes propriedades inerentes ao material. A velocidade de resfriamento é de extrema importância no processo (COLIN, 2007).

De acordo Colin (2007) o algoritmo percorre diferentes vizinhanças e permite que soluções que pioram o valor da função objetivo sejam aceitas, controladas através da comparação entre um número sorteado aleatoriamente e o resultado de uma fórmula que varia em função da temperatura, reduzindo a probabilidade de aceitação à medida que o parâmetro temperatura diminui.

Hillier e Lieberman (2013) apresentam como formas de exploração da vizinhança a geração de soluções vizinhas aleatórias e busca daquelas que melhoram a função objetivo.

Conforme Hillier e Lieberman (2013), a regra de aceitação de uma determinada solução para um problema de minimização é realizada da seguinte forma:

1. Calcula-se a variação Δ subtraindo o valor da função objetivo atual (F_{atual}) do valor da função objetivo da solução candidata ($F_{candidata}$).

$$\Delta = F_{candidata} - F_{atual} \quad (2.10)$$

2. Se o valor de Δ for positivo a solução candidata é aceita, caso contrário calcula-se o valor da probabilidade de aceitação da nova solução com base na equação abaixo:

$$P(\Delta, temp) = e^{\frac{\Delta}{temp}} \quad (2.11)$$

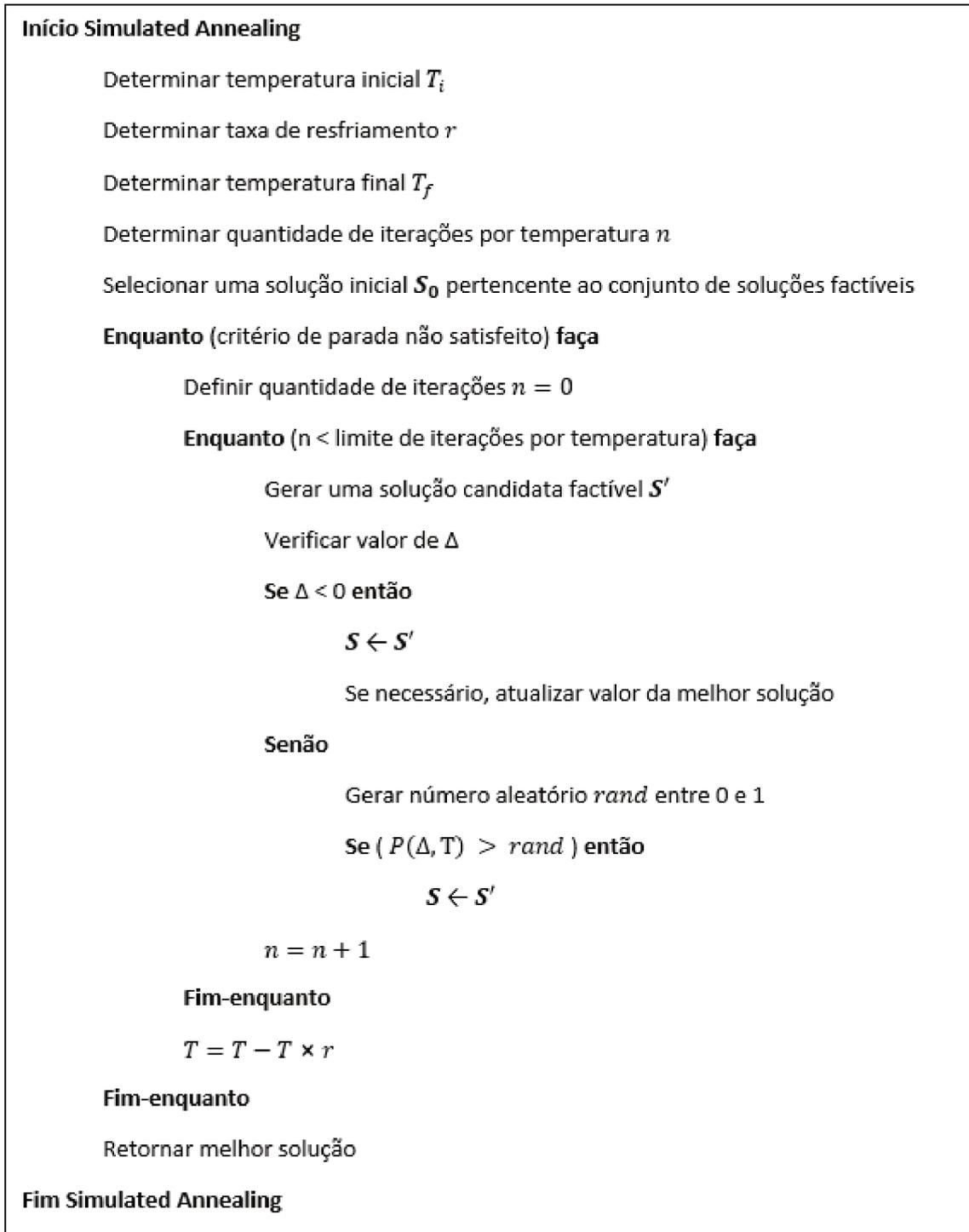
onde $temp$ representa a temperatura da iteração atual;

3. Sorteia-se um número aleatório entre 0 e 1 atribuindo-o à variável $rand$;
4. Compara-se a probabilidade de aceitação P e o número aleatório $rand$ tal que, se $P > rand$ então a solução candidata é aceita e substitui a solução atual. Caso contrário a solução candidata é rejeitada e a corrente permanece inalterada.

Colin (2007) destaca a importância da parametrização da meta-heurística, visto que pode ocasionar a geração de uma solução de má qualidade quanto à função objetivo. É necessário atentar para a duração da simulação, para que não termine prematuramente, e para a busca de uma solução inicial de boa qualidade evitando a demora na busca em temperaturas muito altas, quando o grau de aceitação de soluções de pior qualidade é alto.

Hillier e Lieberman (2013) e Arenales et al. (2015) caracterizam genericamente o procedimento para implementação de um algoritmo Simulated Annealing, o qual foi adaptado para tratamento do problema de estimativa do consumo de energia de trens e pode ser verificado na Figura 2.

Figura 2 – Pseudo-código do algoritmo Simulated Annealing



Fonte: Adaptado de Arenales et al. (2015) e Hillier e Lieberman (2013).

3 MÉTODO

Este capítulo contém a descrição do método utilizado para resolução do problema abordado, com detalhamento das premissas admitidas, das informações referentes ao traçado ferroviário e ao trem, da função objetivo considerada. Além disso, apresenta-se uma descrição detalhada do Simulated Annealing por um fluxograma e a estratégia de perturbação da vizinhança do algoritmo.

O problema abordado refere-se à minimização do consumo de energia de trens conhecendo-se as características dos veículos e do traçado ferroviário. O algoritmo Simulated Annealing utilizado para tal propósito, implementado na linguagem de programação Java, visa encontrar a solução de menor consumo energético que aproxima-se ao máximo de um tempo de viagem estimado entre duas paradas respeitando os limites de velocidade impostos ao longo da ferrovia.

As premissas a seguir são admitidas para adequado tratamento computacional do problema prático abordado neste trabalho.

1. O tamanho do trem é irrelevante em relação ao comprimento do traçado e, portanto, considerado como partícula;
2. O primeiro e último regimes selecionados devem ser obrigatoriamente aceleração e frenagem, respectivamente (HUANG et al., 2015);
3. Cada trecho da ferrovia é suficientemente pequeno para permitir somente um regime de tração (HUANG et al., 2015);
4. A aceleração do trem é sempre a máxima possível pois configura a estratégia mais eficiente do ponto de vista energético (HUANG et al., 2015).
5. São considerados os quatro regimes de movimento do trem: aceleração, cruising, coasting e frenagem.

3.1 Caracterização da via e do trem

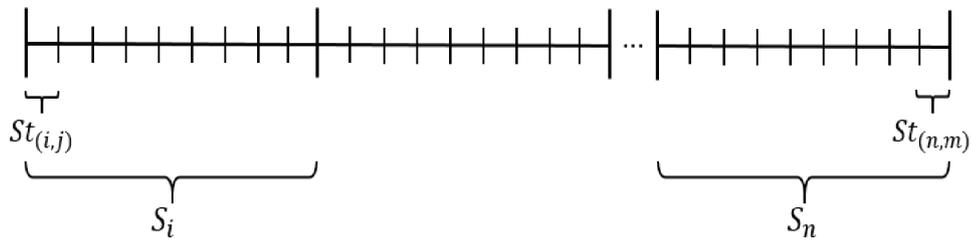
As informações sobre as características do trem (potência do motor e massa total), os coeficientes da fórmula de Davis na Equação 2.7 e as características da ferrovia (raio de curva, inclinação, limites de velocidade e locais onde sofrem alterações) são armazenados em planilhas eletrônicas e estabelecidos como dados de entrada.

Analogamente à proposta de Huang et al. (2015), seja o sub-trecho j uma partição do traçado dado pela divisão do seu comprimento total que contém a informação referente ao regime de tração exercido pelo trem naquele intervalo.

Cada trecho é dividido em sub-trechos para maior precisão dos valores obtidos nas iterações do algoritmo. O j -ésimo sub-trecho contém características de raio de curva (r_{ij}), inclinação (α_{ij}), limite de velocidade ($v_{max_{ij}}$), velocidade inicial ($v_{i_{ij}}$) e final ($v_{f_{ij}}$), forças de resistência atuantes (R_{ij} , $R_{g_{ij}}$ e $R_{c_{ij}}$), consumo energético (e_{ij}) e o tempo de viagem (t_{ij}).

A Figura 3 indica os trechos representados por S_i contidos no conjunto \mathbf{S} de n elementos, onde $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$, e os sub-trechos pertencentes ao trecho i representados por st_{ij} contidas no conjunto \mathbf{St} de m elementos, em que $\mathbf{St} = \{st_{i1}, st_{i2}, st_{i3}, \dots, st_{im}\}$.

Figura 3 – Divisão do traçado em trechos e subtrechos



Fonte: Autor (2017).

3.2 Cálculo das forças atuantes e aceleração

A partir das considerações indicadas no capítulo anterior sobre a mecânica de locomoção ferroviária, a determinação dos valores da força de tração, força de resistência ao movimento, força de resistência de rampa e força de resistência de curva é realizada através das equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$F_{t_{ij}} = 2988 \cdot \frac{P}{v_{i_{ij}}} \quad (3.1)$$

$$R_{b_{ij}} = A + B \cdot v_{i_{ij}} + C \cdot v_{i_{ij}}^2 \quad (3.2)$$

$$R_{g_{ij}} = M \cdot g \cdot \sin(\alpha_{ij}) \quad (3.3)$$

$$R_{c_{ij}} = 698 \cdot \frac{v_{i_{ij}}^2}{r_{ij}} \quad (3.4)$$

A Equação 3.5 é utilizada para cálculo da aceleração resultante da atuação dessas forças ($a_{r_{ij}}$), tal que a soma daquelas componentes é dividida pelo produto entre a massa total do veículo (M) e a aceleração da gravidade (g).

$$a_{r_{ij}} = \frac{F_{t_{ij}} + R_{b_{ij}} + R_{c_{ij}} - R_{g_{ij}}}{M \cdot g} \quad (3.5)$$

3.3 Cálculo da velocidade, tempo de viagem e consumo de energia

No início da trajetória, a velocidade inicial do primeiro sub-trecho é igual a zero ($v_{i_{00}} = 0$) e a velocidade final deste sub-trecho é calculada pela Equação 3.6.

$$v_{f_{ij}} = \sqrt{v_{i_{ij}}^2 + 2 \cdot a_{r_{ij}} \cdot d_{ij}} \quad (3.6)$$

A velocidade inicial do sub-trecho subsequente é admitida igual à velocidade final do sub-trecho anterior, ou seja, $v_{i_{ij}} = v_{f_{i(j-1)}}$. Este procedimento é executado até que a velocidade final do sub-trecho j seja maior ou igual à velocidade máxima indicada nesta seção ($v_{f_{ij}} \geq v_{max_{ij}}$).

A partir disso, a velocidade em cada sub-trecho é calculada em função do regime estabelecido neste seção, o qual é escolhido conforme regras estabelecidas pelo algoritmo Simulated Annealing caracterizado em seção posterior deste capítulo.

Quando o regime de um trecho, e conseqüentemente dos sub-trechos que o compõe, é de aceleração ou cruising, o valor de $a_{r_{ij}}$ é calculado conforme a Equação 3.5 ou assume valor nulo quando o regime for coasting ou frenagem.

Novamente, a velocidade final de um sub-trecho é calculada em função do seu comprimento (d_{ij}) e da velocidade inicial do veículo nesta seção $v_{i_{ij}}$, que é igual à velocidade final no sub-trecho anterior ($v_{i_{i(j-1)}}$).

A energia consumida e o tempo de viagem ao longo do percurso do sub-trecho são calculados pela Equação 3.7 e Equação 3.8, respectivamente, sendo que nos trechos onde o regime de tração utilizado é coasting ou frenagem não há consumo energético e, portanto, $e_{ij} = 0$.

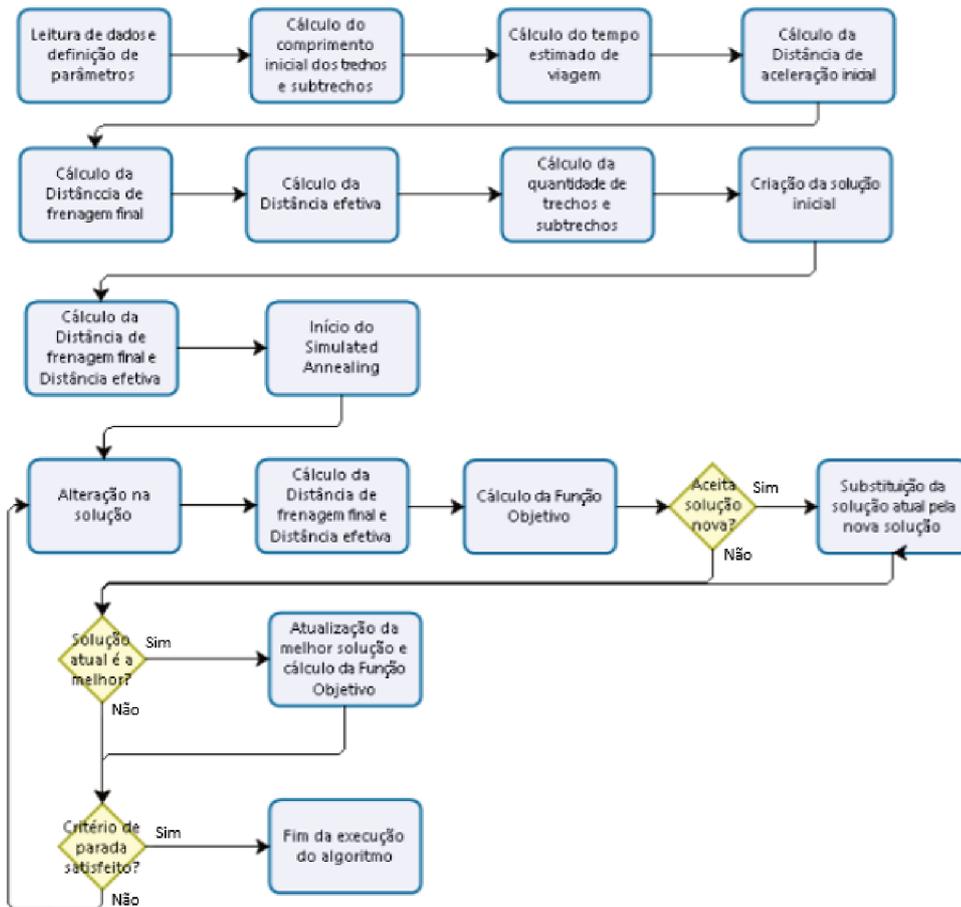
$$e_{ij} = M \cdot a_{r_{ij}} \cdot d_{ij} \quad (3.7)$$

$$t_{ij} = \left| \frac{v_{i_{ij}} - v_{f_{ij}}}{a_{r_{ij}}} \right| \quad (3.8)$$

3.4 Simulated Annealing

O algoritmo Simulated Annealing (Figura 4) utilizado para resolver o problema de estimativa de consumo de energia caracterizado é descrito nas próximas subseções.

Figura 4 – Fluxograma do algoritmo - Parte 1



Fonte: Autor (2017).

3.4.1 Leitura de dados e definição de parâmetros

Após a leitura computacional dos arquivos que contém os dados de entrada referentes às características da ferrovia (declividade, limites de velocidade e raios de curva circulares horizontais) e do trem-tipo considerado (massa, aceleração máxima, frenagem máxima e coeficientes de resistência), os seguintes parâmetros do algoritmo Simulated Annealing são definidos:

- T_i : temperatura inicial;
- T_f : temperatura final;
- r : taxa de resfriamento;
- it : quantidade de iterações realizadas sob a mesma temperatura;
- α : penalidade referente ao tempo de viagem na função objetivo;
- β : penalidade referente aos excessos de velocidade na função objetivo;
- \bar{v} : velocidade média para cálculo de tempo de viagem estimado.

3.4.2 Comprimento e quantidade inicial de trechos e sub-trechos

Conforme Huang et al. (2015), a definição do comprimento dos trechos e sub-trechos depende do equilíbrio entre a precisão requerida para as estimativas de desempenho do trem e o equipamento computacional e tempo de processamento disponíveis. Nesse sentido foram estabelecidos, após testes computacionais, os comprimentos máximos de 30 metros e 3 metros para os trechos e sub-trechos, respectivamente, a fim de obter resultados razoavelmente precisos com o esforço computacional compatível com os equipamentos disponíveis para as análises.

Estabeleceu-se que durante a execução da meta-heurística as quantidades de trechos e sub-trechos devem permanecer inalteradas, os respectivos comprimentos são modificados nas iterações sucessivas do algoritmo.

Dessa maneira, a quantidade inicial de trechos(n) é calculada pela Equação 3.9 e existem $\frac{30 \text{ metros/trecho}}{3 \text{ metros/sub-trecho}} = 10$ sub-trechos por trecho. Portanto, a quantidade total de sub-trechos no traçado é $10 \cdot m$.

$$n = \frac{D_{tracado}}{30} \quad (3.9)$$

onde $D_{tracado}$ = comprimento inicial do traçado;

3.4.3 Distância de aceleração inicial

Considera-se a premissa de que, após a divisão do traçado em trechos e sub-trechos, o trem deixa o estado estacionário inicial e movimenta-se sob máxima aceleração possível até atingir o limite de velocidade de algum sub-trecho st_{ij} .

A etapa de cálculo do comprimento inicial de aceleração (D_{ai}) é executada da seguinte forma:

- Definir o regime de todos os sub-trechos como aceleração;
- Para cada sub-trecho a partir do início da trajetória, verificar se a velocidade final do sub-trecho é maior ou igual à velocidade limite da ferrovia nessa posição;
- Armazenar os valores do comprimento utilizado na aceleração inicial (D_{ai}), velocidade final atingida ($V_{f_{ai}}$), energia consumida (E_{ai}) e tempo de viagem (t_{ai}) referente ao percurso entre o início da ferrovia e a posição do primeiro sub-trecho em que a condição anterior for verificada.

3.4.4 Distância de frenagem final

Para cálculo a distância de frenagem necessária no final da trajetória (D_{ff}) considera-se a Equação 3.10 (KESKIN; KARAMANCIOGLU, 2017).

$$D_{ff} = \frac{v_{f_i}^2}{2 \cdot a_f} \quad (3.10)$$

Um método iterativo foi elaborado para que, dado um valor inicial para a velocidade final antes da frenagem, o método convirja para uma nova distância de frenagem considerando a desaceleração constante e igual a $-0,39m/s^2$.

O método iterativo tem início com o cálculo da velocidade final após a frenagem (v_{ff}) a partir da velocidade final anterior à frenagem (v_{fi}), da desaceleração (a_f) e distância de frenagem atual (D_{ff}), através da equação 3.11. A partir do resultado, existem três possibilidades distintas, conforme apresentado abaixo:

1. $v_{fi}^2 > 2 \cdot a_f \cdot D_{ff}$: a equação 3.12 é utilizada pra calcular a distância faltante (Δ_{dist+}) para que, partindo de v_{ff} , o trem atinja o estado estacionário. Δ_{dist+} é somado a $dist_{ss}$.
2. $v_{fi}^2 < 2 \cdot a_f \cdot D_{ff}$: a equação 3.12 é utilizada pra calcular a distância (Δ_{dist-}) para que partindo de v_{fi} o trem atinja o estado estacionário. D_{ff} assume o valor de Δ_{dist-} .
3. $v_{fi}^2 = 2 \cdot a_f \cdot D_{ff}$: o valor de v_{ff} iguala-se a 0 e a distância de frenagem é D_{ff} .

$$v_{ff} = \sqrt{v_{fi}^2 + 2 \cdot a_f \cdot D_{ff}} \quad (3.11)$$

$$D_{ff} = \frac{v^2}{|2 \cdot a_f|} \quad (3.12)$$

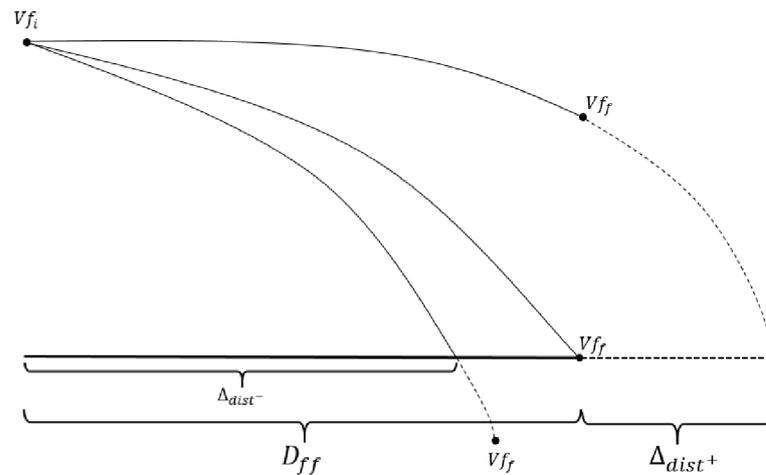
O critério de parada do método iterativo é composto por duas verificações: a primeira referente ao erro do valor aproximado da distância de frenagem; e a segunda referente à factibilidade da velocidade final após a frenagem calculada.

Foi considerado razoável para esta abordagem o erro (ε) inferior ou igual a 1 metro, ou seja, a subtração entre a distância de frenagem das iterações atual e anterior deve ser menor ou igual a 1 metro.

A segunda verificação consiste em checar se $v_{fi}^2 > 2 \cdot a_f \cdot D_{ff}$, resultando assim em um valor para v_{ff} pertencente ao conjunto dos números reais e que atende à segunda parcela do critério de parada.

Cabe ressaltar que as condições aqui apresentadas são não excludentes, ou seja, v_{ff} deve ser, necessariamente, um número real e ε um valor inferior ou igual a 1 metro para que o critério de parada seja satisfeito.

Figura 5 – Método iterativo para determinação da distância de frenagem



Fonte: Autor (2017).

3.4.5 Solução inicial

Dado os resultados de distância inicial de aceleração (D_{ai}) e comprimento necessário à frenagem (D_{ff}), o comprimento efetivo (D_{efet}) é obtido subtraindo-se aqueles valores do comprimento inicial do traçado ($D_{tracado}$). Cada trecho do intervalo compreendido em D_{efet} , e respectivos sub-trechos neles inseridos, pode ter um dos regimes associados: aceleração; coasting; cruising; frenagem.

Entretanto, a fim de obter um resultado mais realista em termos de movimento do trem, a solução inicial de regimes dos trechos é criada segundo alguns critérios. Os trechos que abrangem os 800 metros iniciais imediatamente após o trecho inicial, no qual o trem acelera até atingir o primeiro limite de velocidade, têm seus regimes de tração definidos como coasting. A partir disso, a cada 200 metros, todos os trechos contidos nesse intervalo têm seus regimes de tração definidos a partir do sorteio aleatório de um dos regimes disponíveis.

3.4.6 Função Objetivo

A função objetivo indicada na Equação 3.13 baseia-se em Huang et al. (2015) e considera a energia consumida pelo trem ao longo de todo o percurso, o módulo do desvio entre o tempo efetivo de viagem e o tempo estimado para a viagem adotando-se uma velocidade média previamente estabelecida (\bar{v}) e o número de sub-trechos nos quais o limite de velocidade foi excedido.

Aos dois últimos valores são aplicadas as penalidades α e β , tal que soluções com tempos de viagem distintos do estimado e com elevado número de limites de

velocidade excedidos têm menores chances de serem aceitas como solução final.

$$FO = E + \alpha \cdot |T_{efet} - T_{est}| + \beta \cdot v_{exc} \quad (3.13)$$

onde E = energia consumida no trajeto do trem; T_{efet} = tempo de viagem do trem; T_{est} = tempo de viagem estimado; e v_{exc} = quantidade de sub-trechos nos quais o limite de velocidade foi excedido.

Uma estratégia de calibração dos valores das penalidades α e β foi estabelecida para identificar a combinação desses parâmetros que resulta na melhor solução final possível para o algoritmo.

Essa calibração foi executada comparando-se os resultados do algoritmo com valores de velocidade obtidos pelo simulador Train Energy Model (TEM), utilizado por Isler (2010) para análise do desempenho de trens entre estações de uma linha ferroviária no interior do Estado de São Paulo, Santa Fé do Sul-Três Fronteiras, Três Fronteiras-Pimenta Bueno, e Pimenta Bueno-Santa Salete.

O procedimento consistiu na definição de pares de valores para ambos os parâmetros entre 0,5 e 10,0, em intervalos sucessivos de 0,5 unidades. Os valores de velocidade resultantes de uma simulação com o software TEM foram identificados na posição inicial de cada sub-trecho entre as estações mencionadas anteriores e comparados com os resultados da execução do Simulated Annealing. A comparação deu-se pelo cálculo da diferença quadrática entre a velocidade no início do sub-trecho da simulação e do Simulated Annealing.

A medida de desempenho utilizada na comparação foi a diferença quadrática média entre a simulação e o algoritmo (Equação 3.14), calculada pela soma da diferença quadrática dos sub-trechos dividida pelo número de sub-trechos .

$$\epsilon_{medio} = \frac{\sum_i^m \sum_j^n (v_{ij}^{SA} - v_{ij}^{simula})^2}{m \cdot n} \quad (3.14)$$

onde v_{ij}^{SA} = velocidade inicial no sub-trecho $i - j$ resultante do Simulated Annealing; e v_{ij}^{simula} = velocidade inicial no sub-trecho $i - j$ resultante da simulação de Isler (2010).

3.4.7 Alterações da solução

A cada temperatura estabelecida no Simulated Annealing, a solução é alterada selecionando-se um trecho da ferrovia e atribuindo aleatoriamente um novo regime de tração entre os quatro possíveis: aceleração; cruising; coasting; e frenagem. Porém, devido a restrições relacionadas ao conforto dos passageiros, algumas trocas de regime de tração não são permitidas pois geram desconforto em possíveis trens de passageiros devido às alterações bruscas de aceleração provocadas.

A Tabela 1 (HUANG et al., 2015) esclarece as trocas de regime permitidas através do símbolo ✓ e as proibidas através do símbolo ×.

	Aceleração	Cruising	Coasting	Frenagem
Aceleração	✓	✓	✓	×
Cruising	✓	✓	✓	×
Coasting	✓	✓	✓	✓
Frenagem	×	×	✓	✓

Tabela 1 – Permissão para permutação de regimes de tração

Pela alteração dos regimes dos trechos é possível que ocorra modificação da velocidade em que o trem começa a desaceleração para parada na posição final do trajeto. Conseqüentemente, a distância necessária para frenagem necessita ser recalculada conforme caracterizado na seção 3.4.4.

Após a estimativa dessa nova distância, o comprimento dos trechos e sub-trechos também deve ser recalculado pois a alteração da distância de frenagem altera diretamente a distância efetiva (D_{efet}) em que é possível a modificação dos regimes.

Dado que o número de trechos e sub-trechos é mantido constante conforme exposto na seção 3.4.2, é necessário calcular o comprimento do trecho pela divisão do comprimento efetivo (D_{efet}) pela quantidade de trechos (n) conforme a Equação 3.15.

$$D_i = \frac{D_{efet}}{n} \quad (3.15)$$

O procedimento é análogo para o cálculo do comprimento dos sub-trechos, substituindo-se apenas o comprimento efetivo pelo comprimento do trecho i de acordo com a Equação 3.16.

$$d_{(i,j)} = \frac{D_i}{m} \quad (3.16)$$

É importante salientar que o comprimento dos trechos serão sempre menores ou iguais a 30 metros, uma vez que a menor distância de frenagem é calculada antes do início das iterações do Simulated Annealing. Nessas condições, a menor distância de frenagem resulta no maior número de trechos possíveis e, portanto, qualquer que seja a nova distância de frenagem final a distância efetiva será dividida pelo número de trechos resultantes daquele valor, conseqüentemente menor que o valor limite de 30 metros. Da mesma forma, como o número de sub-trechos em cada trecho é 10, o comprimento desses intervalos será sempre menor que o limite de 3 metros.

Após esse procedimento, a energia consumida e o tempo de viagem ao longo do percurso são calculados pela Equação 3.7 e Equação 3.8. A partir desses valores, calcula-se a diferença do tempo de viagem em relação ao tempo estimado e o número de sub-trechos que a velocidade final ultrapassou a velocidade limite pre-estabelecida. Dados esses resultados, calcula-se o valor da função objetivo da solução alterada.

Se a função objetivo da nova solução for menor que o da solução que a originou, esta é substituída. Caso contrário, conforme apresentado no capítulo de revisão teórica, verifica-se a possibilidade da solução pior ser aceita através da Equação 2.11, cuja probabilidade de aceitação é maior em temperaturas elevadas.

Para o caso de melhora na função objetivo, o valor da nova solução é comparado com a melhor solução do algoritmo entre todas as temperaturas e respectivas iterações anteriores. No caso da função objetivo ser melhor que a melhor solução corrente do algoritmo, esta é substituída.

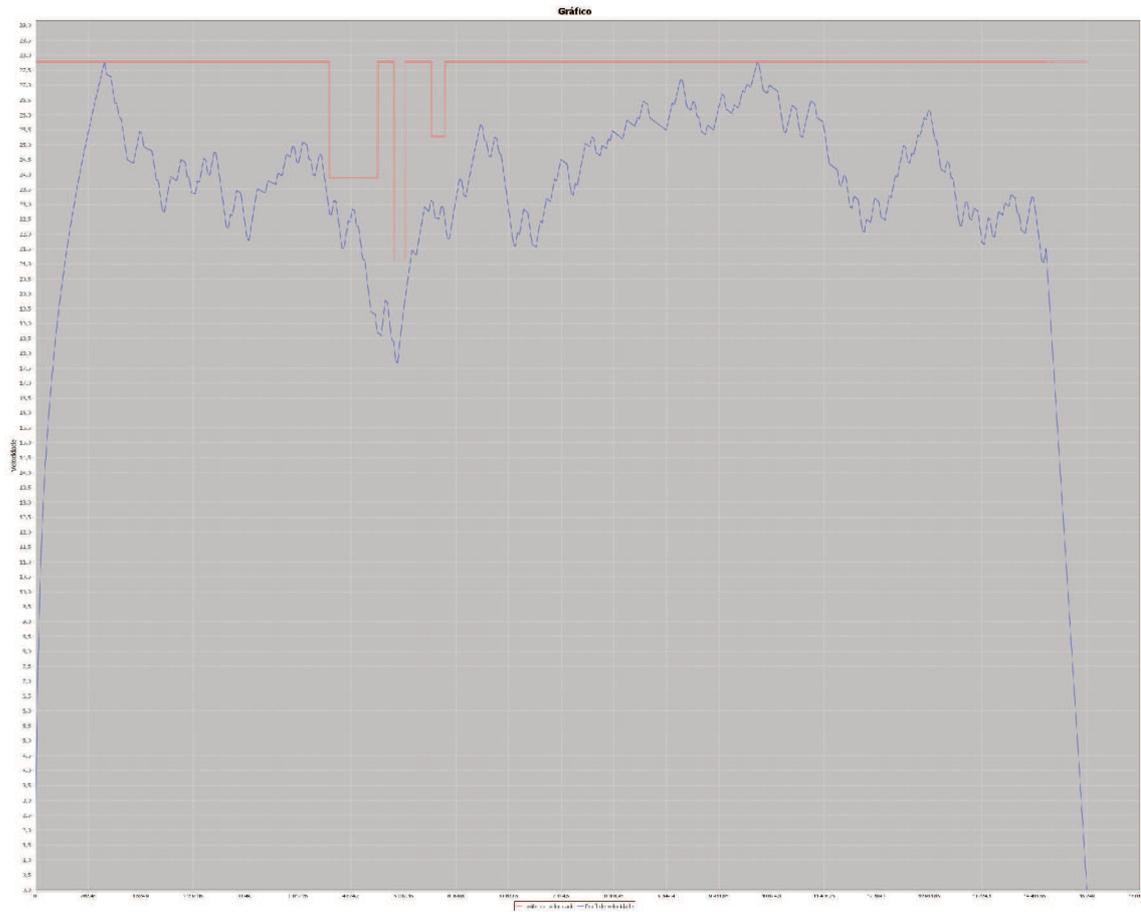
Um contador de iterações por temperatura é atualizado em uma unidade e, caso atinja um número de iterações definido no início da execução do Simulated Annealing, a temperatura é reduzida por um parâmetro previamente estabelecido. Finalmente, o procedimento descrito nesta seção é realizado até que a temperatura final seja atingida.

3.4.8 Resultados do algoritmo

Ao término da execução do algoritmo tem-se a sequência de regimes de tração que minimiza o consumo de energia do trem mediante as penalidades de tempo de viagem e excesso de velocidade. Os resultados numéricos observados por sub-trecho são: regime; quilometragem inicial; quilometragem final; comprimento; velocidade inicial; velocidade final; tempo de percurso; energia consumida ou absorvida; trabalho realizado; e consumo de energia em valores monetários.

Os resultados de velocidade podem ser representados graficamente conforme ilustrado na Figura 6, que representa o perfil de velocidade do trem ao longo do trajeto, em azul, e os limites de velocidade impostos pela ferrovia em vermelho.

Figura 6 – Exemplo de perfil de velocidade



Fonte: Autor (2017).

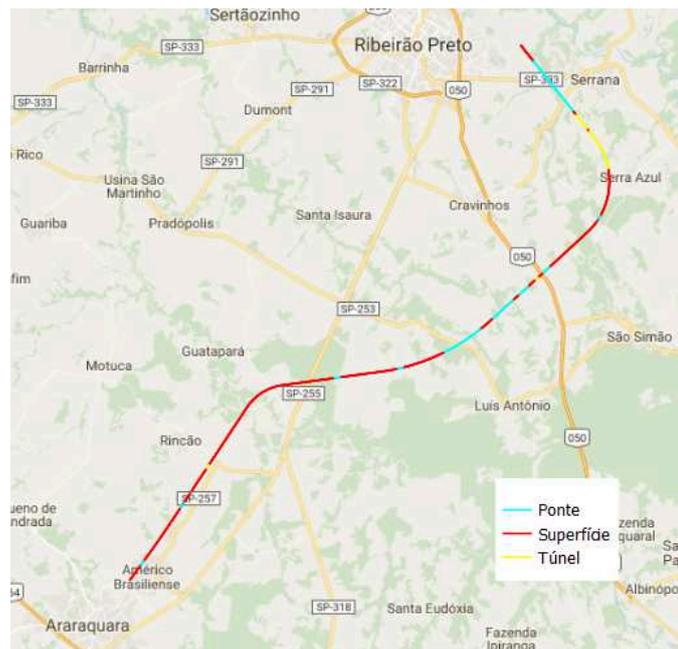
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação do método descrito anteriormente para resolução do problema de estimativa de velocidade e consumo de energia de trens utilizando uma meta-heurística. Após caracterização do cenário e dos parâmetros admitidos, os valores de consumo obtidos são comparados com referências da literatura, e são apresentadas considerações sobre o modelo implementado.

4.1 Caracterização do traçado

O cenário estudado abrange o traçado ferroviário proposto por Isler (2015), obtido como resultado de um Algoritmo Genético para resolução de um problema de estimativa de traçados ferroviários. O traçado ilustrado na Figura 7 tem nós inicial e final nas imediações dos municípios de Ribeirão Preto e Araraquara, no interior do Estado de São Paulo, conectando-as aos traçados ferroviários existentes atualmente. A trajetória com extensão aproximada de 100,7 km em cada sentido foi proposta para a operação de trens de alta velocidade de até 300 km/h.

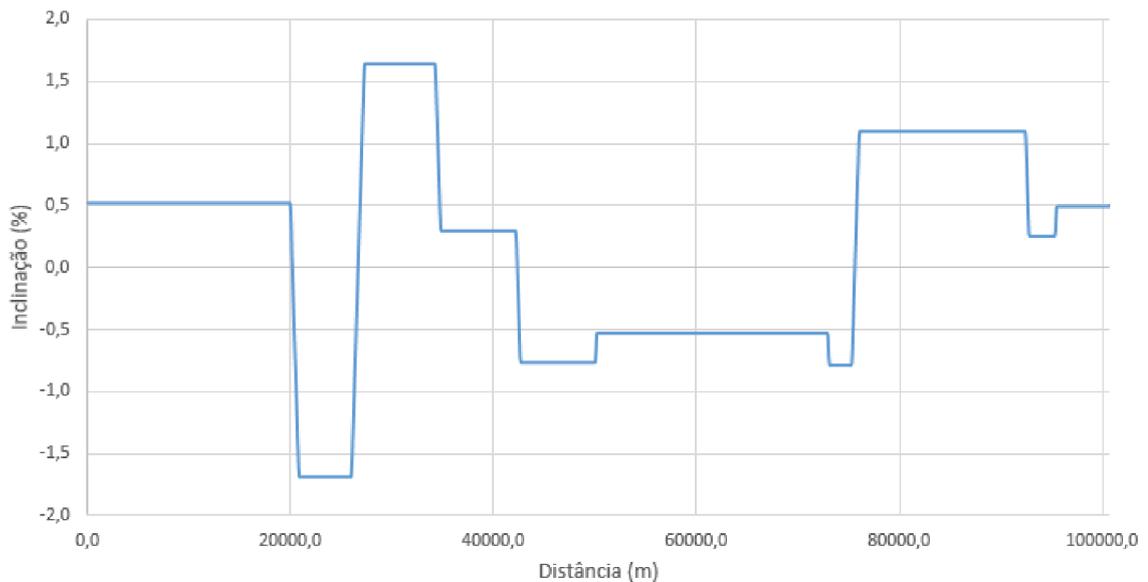
Figura 7 – Proposta de traçado para trens de alta velocidade entre Ribeirão Preto e Araraquara (interior de São Paulo).



Fonte: Isler (2015).

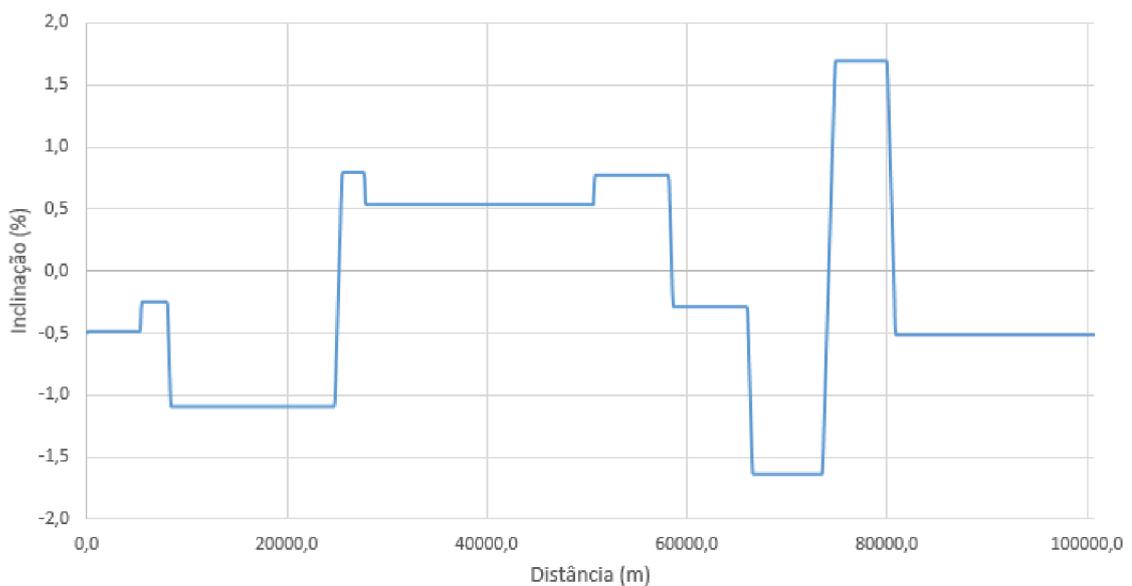
A Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11 representam, respectivamente, as declividades e raios de curva em cada um dos sentidos de movimento de um trem no traçado proposto. No caso de trechos em tangente (retas) os raios das curvas foram admitidos como valores elevados, de modo que a resistência de curva fosse irrelevante no cálculo das forças atuantes no trem em cada instante.

Figura 8 – Declividade do traçado no sentido Araraquara-Ribeirão Preto.



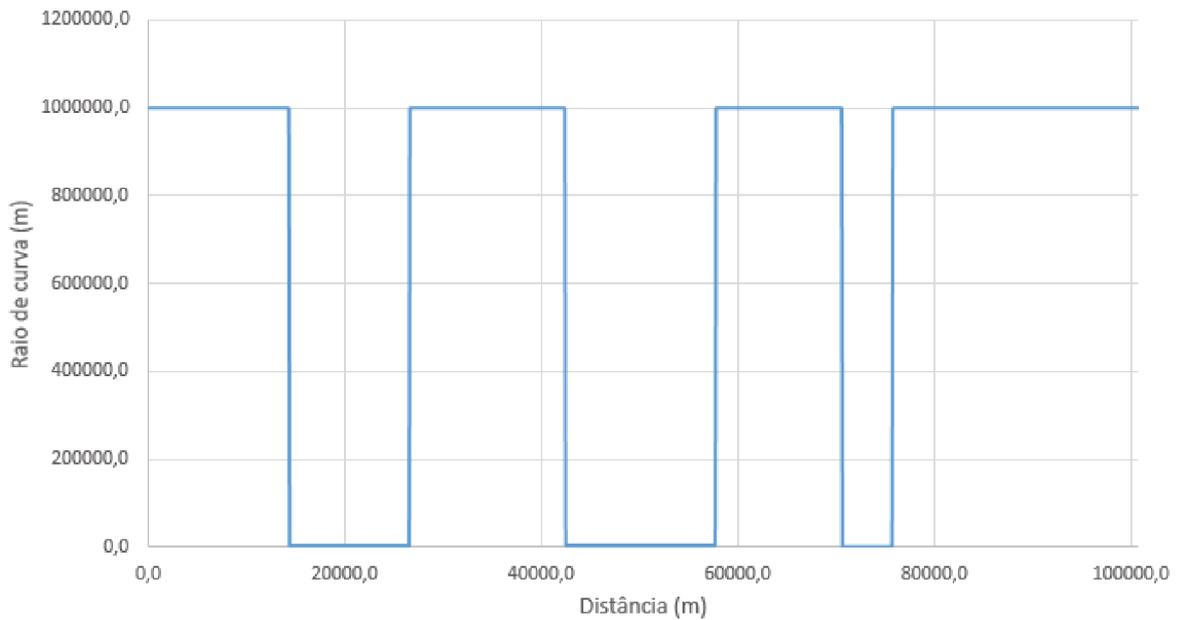
Fonte: Autor (2017).

Figura 9 – Declividade do traçado no sentido Ribeirão Preto-Araraquara.



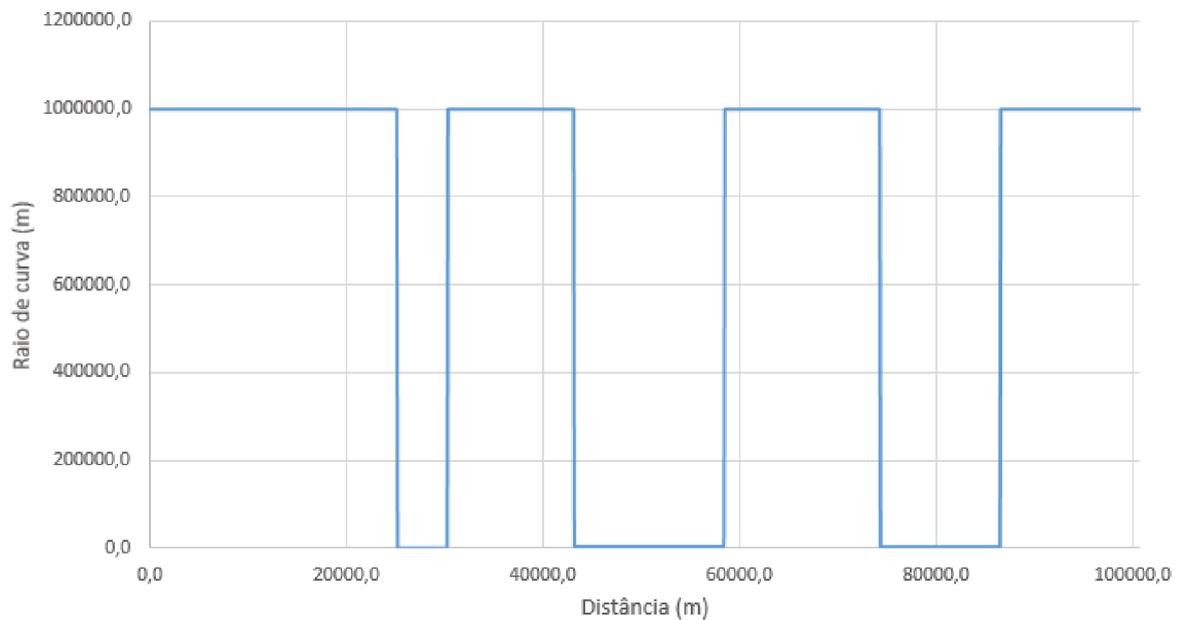
Fonte: Autor (2017).

Figura 10 – Raio de curva do traçado no sentido Araraquara-Ribeirão Preto.



Fonte: Autor (2017).

Figura 11 – Raio de curva do traçado no sentido Ribeirão Preto-Araraquara.



Fonte: Autor (2017).

Apesar do limite máximo de velocidade de 300km/h, as curvas circulares horizontais do traçado não permitem o desenvolvimento dessa velocidade. Nesse caso, com o intuito de evitar o tombamento do trem, a máxima velocidade que o veículo pode desenvolver nessas condições pode ser calculada pela Equação 4.1 (ISLER, 2015).

$$V_{max} = \sqrt{\frac{127 \cdot h \cdot R}{B}} \quad (4.1)$$

onde R = raio de curva; B = bitola, considerada igual a 1,435 metros; V_{max} = velocidade máxima de projeto; h = superelevação de 6 polegadas segundo AREMA (2003).

4.2 Parâmetros do Simulated Annealing

Os parâmetros indicados a seguir, necessários à execução do Simulated Annealing, foram definidos de forma a garantir uma temperatura inicial suficientemente alta que possibilite a aceitação de soluções piores e, conseqüentemente, a varredura de uma região mais ampla no espaço de busca, reduzindo a possibilidade de estagnação em uma solução ótima local.

- Temperatura inicial: 75
- Temperatura final: 15
- Taxa de resfriamento: 0,0003
- Iterações por temperatura: 10

O Simulated Annealing foi executado para estimar o consumo de energia em ambos os sentidos do trajeto entre Ribeirão Preto e Araraquara considerando um trem com massa total de 199 toneladas conforme considerado por Huang et al. (2015), tracionado por uma locomotiva do modelo AC44i com potência máxima de 4.500 HP fabricada pela empresa GE Transportation (Figura 12).

Figura 12 – Locomotiva AC44i



Fonte: GE Transportation (2017).

Para cálculo das resistências atuantes sobre o trem foram consideradas a Equação 2.7, Equação 2.8 e Equação 2.9. A primeira equação representa a resistência básica inerente ao movimento do trem, resultado da soma da resistência de rolamento e aerodinâmica, representadas respectivamente pela Equação 4.2 e Equação 4.3.

$$R_r = c_1 \cdot P + c_2 \cdot x + c_3 \cdot P \cdot v \quad (4.2)$$

onde c_1 é um coeficiente referente à deformação da roda e do trilho; c_2 ao atrito no mancais, c_3 efeito do atrito, x é o número de eixos e P é o peso do trem (kN).

$$R_a = c_a \cdot A \cdot v^2 \quad (4.3)$$

onde c_a é um coeficiente aerodinâmico; e A é a área frontal da locomotiva (m^2).

A soma dessas equações resulta em um modelo de resistência básica que é função quadrática da velocidade do veículo, tal como representado na Equação 4.4.

$$R_b = c_1 \cdot P + c_2 \cdot x + c_3 \cdot P \cdot v + c_a \cdot A \cdot v^2 \quad (4.4)$$

Nessas condições, é possível verificar a relação entre a equação da resistência de rolamento considerada neste trabalho e aquela decorrente da soma da resistência de rolamento e aerodinâmica. Assim, é possível estabelecer as relações entre coeficientes das equações tal que $A = c_1 \cdot P + c_2 \cdot x$, $B = c_3 \cdot P$ e $C = c_a \cdot A$.

Seja $c_1 = 0,65$, $c_2 = 125$, $c_3 = 0,009$, $x = 4$, $c_a = 0,046$ e $A = 11$ (SETTI, 2005), então a equação utilizada para o cálculo da resistência básica imposta ao trem é dada pela Equação 4.5.

$$R_b = 1793,5 + 17,91 \cdot v + 0,506 \cdot v^2 \quad (4.5)$$

4.2.1 Calibração dos parâmetros da função objetivo

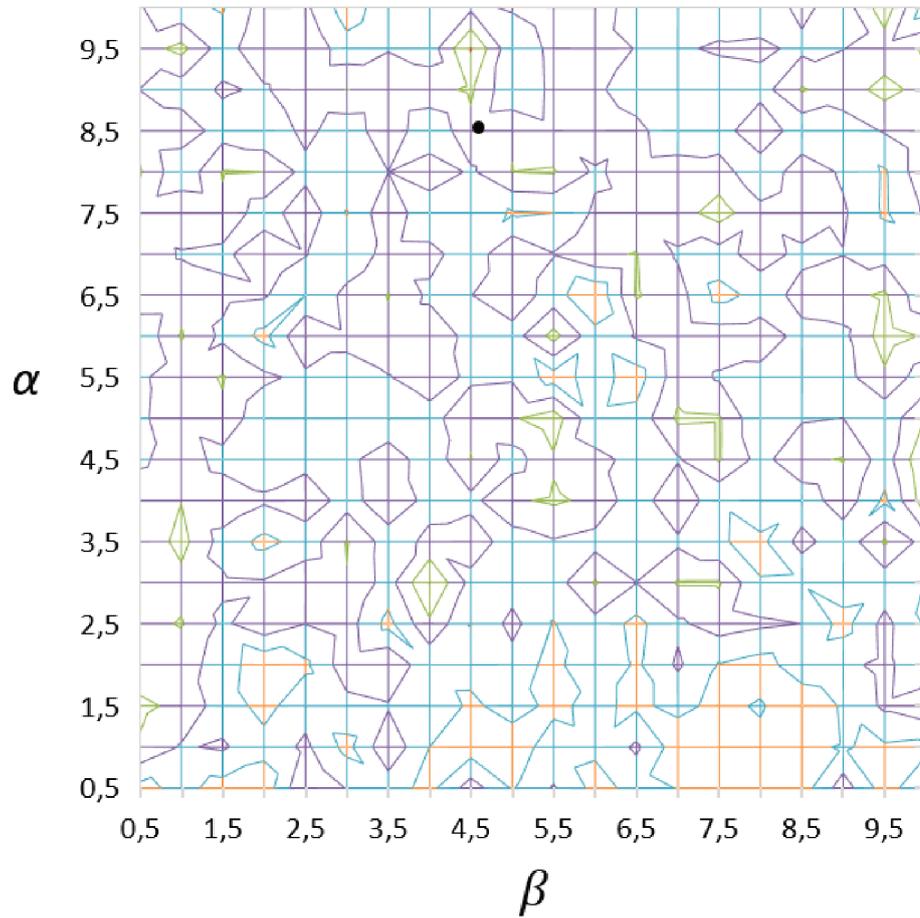
A calibração dos parâmetros α e β de penalidade da função objetivo foi executada conforme explicado na sub-seção 3.4.6 (página 27), resultando em um valor de erro quadrático médio para pares de valores α e β .

Para realizar a calibração dos parâmetros foram escolhidos três trechos simulados na pesquisa de Isler (2010) interligando as estações de Santa Fé do Sul e 3 Fronteiras, 3 Fronteiras e Pimenta Bueno, e Pimenta Bueno e Santa Salete.

A partir da execução do algoritmo para cada trecho mediante valores de α e β entre 0,5 e 10,0 em intervalos sucessivos de 0,5 unidades cada, foram obtidos valores finais de erro quadrático médio entre a velocidade dos sub-trechos nas simulações e resultantes do Simulated Annealing.

Esses resultados são representados nos gráficos bidimensionais da Figura 13, Figura 14 e Figura 15, cujas curvas de nível representam valores de erro quadrático e os pontos de destaque correspondem ao par (α, β) de menor erro estimado.

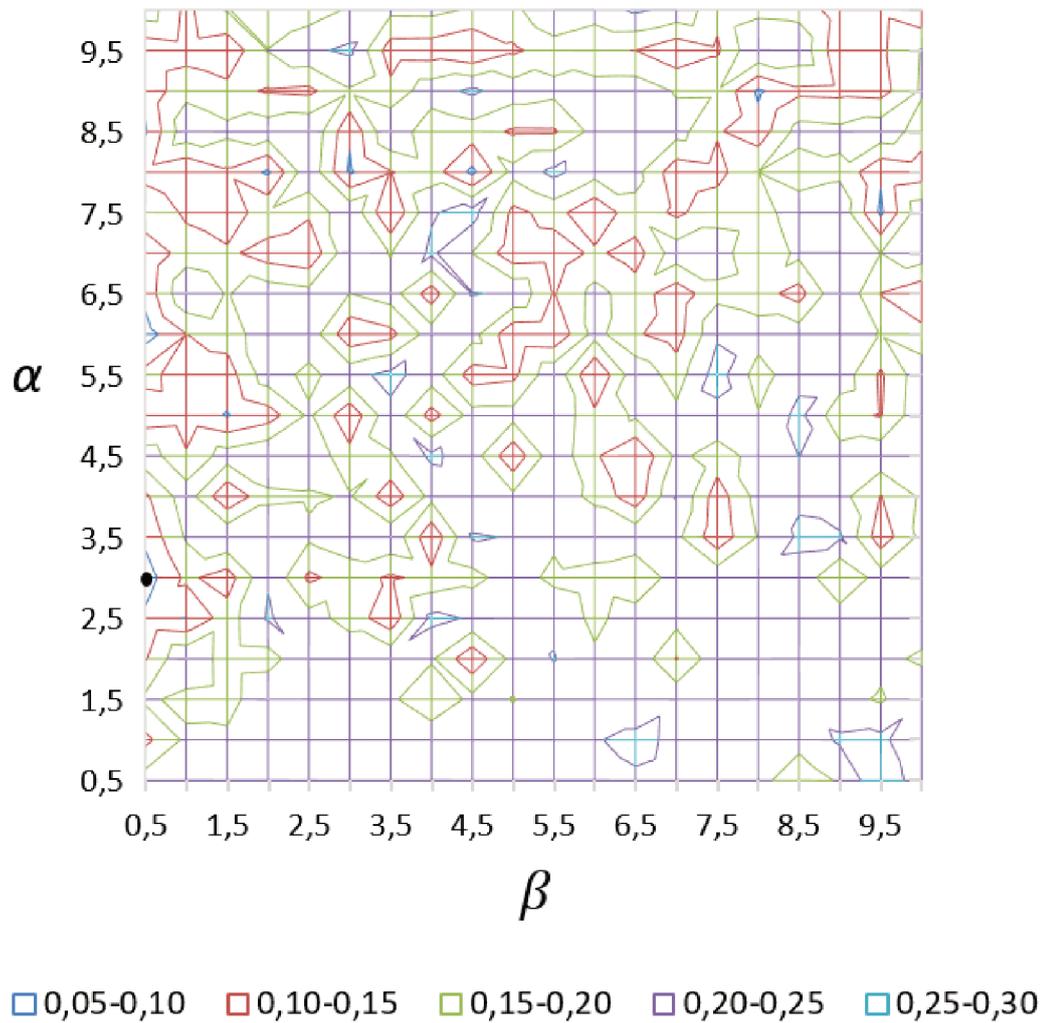
Figura 13 – Curvas de nível do erro quadrático médio no trecho entre Santa Fé do Sul e 3 Fronteiras.



□ 0,00-0,05 □ 0,05-0,10 □ 0,10-0,15 □ 0,15-0,20 □ 0,20-0,25 □ 0,25-0,30

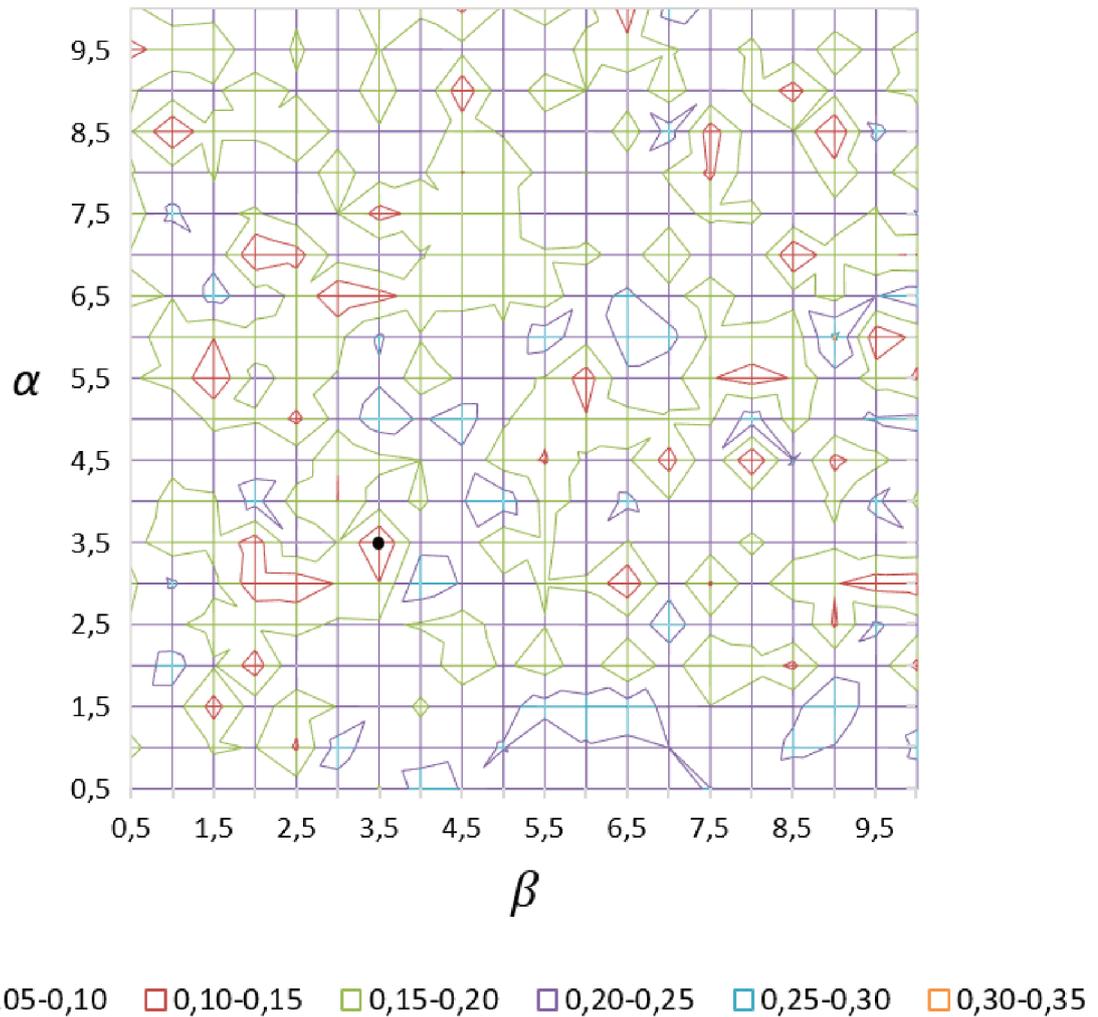
Fonte: Autor (2017).

Figura 14 – Curvas de nível do erro quadrático médio no trecho entre 3 Fronteiras e Pimenta Bueno.



Fonte: Autor (2017).

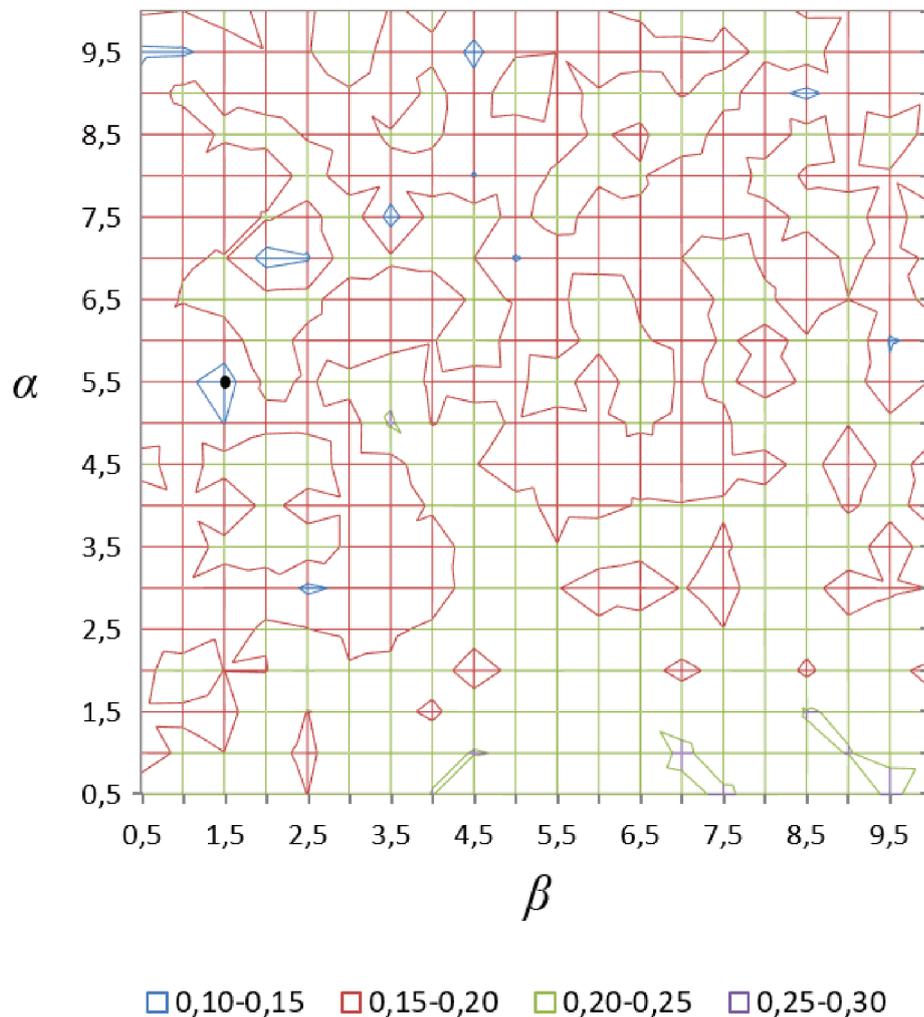
Figura 15 – Curvas de nível do erro quadrático médio no trecho entre Pimenta Bueno e Santa Salete.



Fonte: Autor (2017).

Dados os valores de erro quadrático médio nesses três trechos, foi possível estimar as respectivas médias e representá-las também em um gráfico bidimensional com curvas de nível, análogo aos indicados anteriormente, representado na Figura 16.

Figura 16 – Curvas de nível da média dos erros quadráticos médios.



Fonte: Autor (2017).

Dados esses resultados, a Tabela 2 foi elaborada com os valores de parâmetros que resultaram nos menores erros quadráticos médios em cada trecho, e o valor médio desses parâmetros indicado na figura anterior, os quais foram utilizados na função objetivo como penalidade para a diferença em relação a um tempo de viagem estimado e os excessos de velocidade no trajeto, definidos como α igual a 5,5 e β igual a 1,5.

Tabela 2 – Valores de α e β para menor erro quadrático nos trechos.

Trecho	α	β	ϵ_{medio}
Santa Fé do Sul - 3 Fronteiras	9,5	4,5	0,096
3 Fronteiras - Pimenta Bueno	3,0	0,5	0,076
Pimenta Bueno - Santa Salete	3,5	3,5	0,100
Média	5,5	1,5	0,126

4.3 Estimativa do perfil de velocidade

A execução do Simulated Annealing sob os parâmetros indicados anteriormente no traçado entre Araraquara e Ribeirão Preto tem como primeiro resultado os valores de velocidade no início e final de cada sub-trecho da trajetória em cada um dos sentidos. Esses resultados podem ser observados graficamente na Figura 17 e na Figura 18.

Os resultados representados nas figuras indicam que o movimento do trem foi estimado de maneira satisfatória uma vez que os limites de velocidade foram respeitados na maioria dos sub-trechos e que a locomotiva foi forçada à exercer força de tração para que o movimento ocorresse e o tempo de viagem fosse próximo a um tempo estimado impondo-se velocidade média de 206 km/h no trajeto.

Essas considerações indicam que os valores admitidos para os coeficientes α e β foram eficazes para que a função objetivo do modelo representasse adequadamente a energia consumida, tendo como penalidades o tempo médio de viagem e o número de excessos de velocidade.

A respeito desta última penalidade é importante ressaltar uma condição observada no resultado do movimento entre Ribeirão Preto e Araraquara. Pela Figura 17 é possível notar que a estratégia de acelerar inicialmente até que o limite de velocidade seja atingido é ineficaz em situações onde há uma queda abrupta nesse limitante.

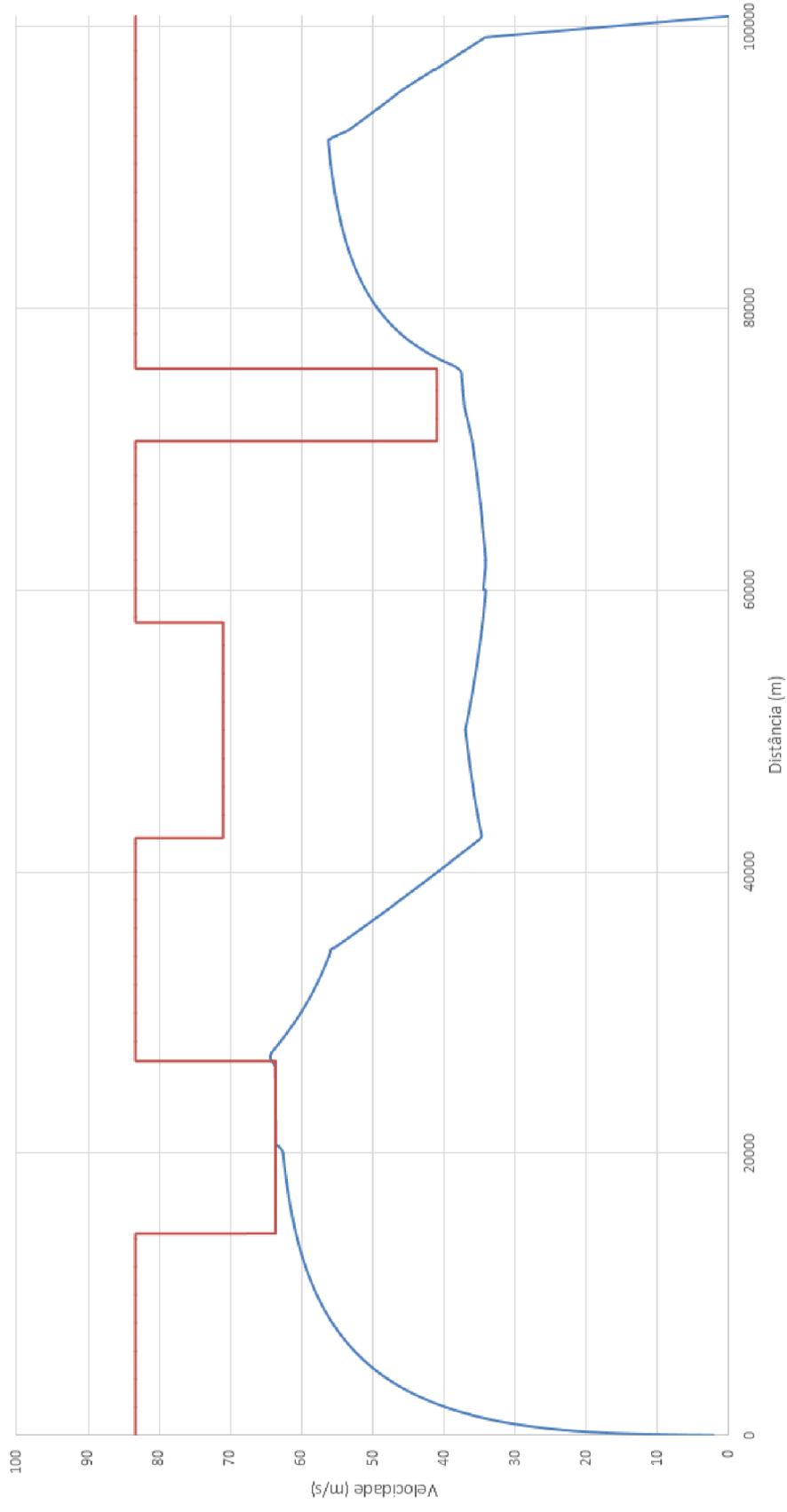
Nesse caso, o limite de velocidade foi desrespeitado em 1.710 subtrechos imediatamente após o término da etapa de aceleração inicial (ou seja em uma extensão de aproximadamente 5 km. Porém, cabe ressaltar que apesar de exceder o limite de velocidade, o algoritmo tenta minimizar o problema impondo desaceleração ao trem nos sub-trechos subsequentes.

Figura 17 – Perfil de velocidade na trajetória entre Ribeirão Preto a Araraquara.



Fonte: Autor (2017).

Figura 18 – Perfil de velocidade na trajetória entre Araraquara a Ribeirão Preto.



Fonte: Autor (2017).

4.4 Consumo de energia

O trabalho realizado em uma viagem entre Ribeirão Preto e Araraquara representada na Figura 17 foi estimado em $3,09 \cdot 10^9 \text{ Joules}$ e em uma viagem entre Araraquara e Ribeirão Preto (Figura 18) foi estimado em $3,29 \cdot 10^9 \text{ Joules}$. Nessas condições, o trabalho total realizado em uma viagem redonda entre as localidades é igual a aproximadamente $6,38 \cdot 10^9 \text{ Joules}$.

Considerando que 1 litro de diesel provê trabalho equivalente a 3 *kWh* (DILLMANN; ORELLANO, 2015) e que uma unidade de *kWh* corresponde a $3,60 \cdot 10^6 \text{ Joules}$, é possível estimar o consumo de energia em litros de diesel entre Ribeirão Preto e Araraquara aproximadamente igual a 285,9 *litros*, e entre Araraquara e Ribeirão Preto de aproximadamente 304,4 *litros*. Nessas condições, o consumo total de combustível de uma viagem redonda é estimado em 590,3 litros.

Seja o preço do diesel a valores correntes estimado em *R\$ 2,93/litro* (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2017), estima-se um consumo de energia em valores monetários atuais iguais a aproximadamente *R\$837.8* e *R\$892.0* para uma viagem de Ribeirão Preto a Araraquara, e entre Araraquara e Ribeirão Preto, respectivamente, resultando em um custo total de *R\$1.729,8* para uma viagem redonda entre essas cidades.

Dado que o custo total de operação dos trens em um período de tempo depende da frequência de realização das viagens entre as localidades, optou-se por realizar uma análise paramétrica da influência do custo de consumo de energia em relação ao custo de construção do traçado. Dado a frequência de operação dos trens, é possível estabelecer o número de viagens redondas realizadas durante um dia de operação e no horizonte operacional da ferrovia e, conseqüentemente, estimar o custo total de operação dos trens neste período.

Considere a frequência de oferta dos serviços em intervalos entre 10 minutos e 60 minutos (ou seja, uma hora), variando esse parâmetro em incrementos de 10 minutos, um horizonte operacional da ferrovia igual a 35 anos e um período de operação diária de 18 horas (por exemplo, entre 6 horas e 24 horas).

Nessas condições, o número de viagens realizadas diariamente, anualmente e no horizonte de operação da ferrovia para comparação com o custo de construção, e o custo total de operação dos trens nesse período podem ser observados na Tabela 3.

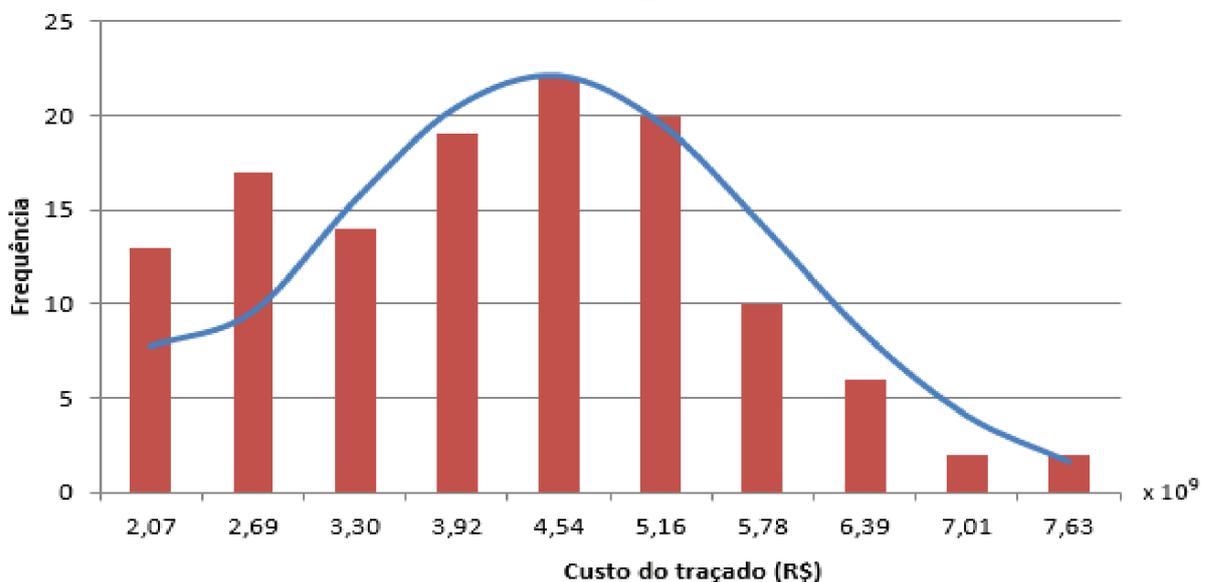
Tabela 3 – Custo de operação dos trens no horizonte de operação de 35 anos.

Frequência (intervalo minutos)	Viagens por dia	Viagens por ano	Viagens em 35 anos (10^3)	Custo em 35 anos ($R\$ \cdot 10^6$)
10	108	39420	1380	2387,00
20	54	19710	690	1193,00
30	36	13140	460	796,00
40	27	9855	345	597,00
50	22	7884	276	477,00
60	18	6570	230	398,00

Para comparar os custos operacionais com o de construção da ferrovia foram considerados os valores estimados para o traçado proposto por (ISLER, 2015), resultantes da execução de um Algoritmo Genético especificamente para este propósito. Como esse algoritmo provê resultados variáveis a cada execução, o autor obteve diferentes valores de custo para implantação do traçado, dado que tratou-se de uma estimativa em nível de planejamento estratégico.

Nessas condições, o histograma da Figura 19 foi construído para análise da variabilidade na estimativa desses custos, para que pudesse ser comparado com aquelas decorrentes da operação dos trens.

Figura 19 – Histograma das estimativas de custo de traçados



Fonte: Autor (2017).

Pela figura anterior, foram estabelecidos três cenários de comparação dos custos operacionais em relação aos de construção do traçado: o “PIOR” cenário em que o custo do traçado é o menor obtido pelo Algoritmo Genético, correspondente a $R\$1,76 \cdot 10^9$; o cenário “MÉDIO”, cujo custo de construção é equivalente à média estimada igual a $R\$4,16 \cdot 10^9$; e o “MELHOR” cenário, em que o custo de construção

equivale ao maior valor estimado de $R\$7,94 \cdot 10^9$.

Nessas condições, é possível comparar o custo operacional dos trens em termos de consumo de combustível com os de construção do traçado ferroviário em função da frequência de oferta dos serviços e dos cenários de estimativa de implantação dos traçados, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre custos operacionais e custos de construção do traçado pelo Simulated Annealing.

Frequência (intervalo minutos)	Pior Cenário (%)	Cenário Médio (%)	Melhor Cenário (%)
10	135,58	57,32	30,06
20	67,79	28,66	15,03
30	45,19	19,11	10,02
40	33,90	14,33	7,52
50	27,12	11,46	6,01
60	22,60	9,55	5,01

Para comparação com valores da literatura, Dillmann e Orellano (2015) indicam que um trem com velocidade máxima de 200km/h e 5 unidades rebocadas tem consumo médio de 9,91 *kWh/km*. Para o traçado estimado com viagem redonda de aproximadamente 201,4 quilômetros, o trabalho total realizado por essa composição é de aproximadamente 1995.9 *kWh*. Sob a premissa de consumo de 1 litro de diesel para cada 3 unidades de trabalho em *kWh*, o consumo de uma viagem redonda é, portanto, estimado em 665,29 *litros*.

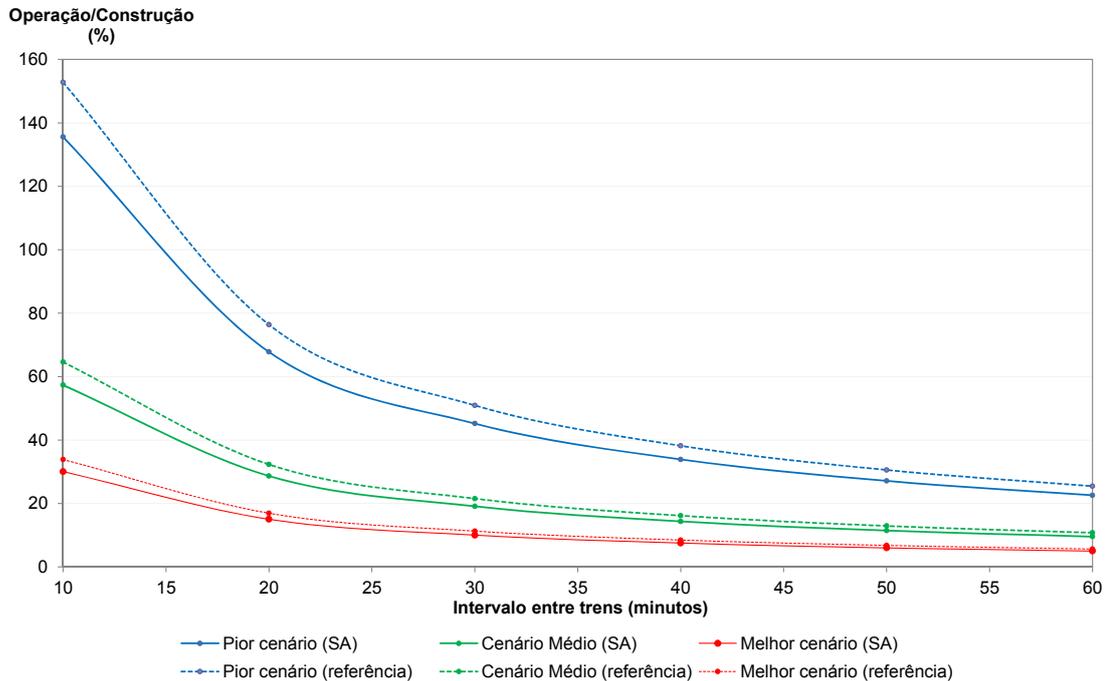
Nessas condições, os custos de operação dos trens em função da frequência dos trens são indicados na Tabela 5, bem como a proporção desses custos em relação aos de construção do traçado sob os diferentes cenários.

Tabela 5 – Comparação entre custos operacionais e custos de construção do traçado por valores de referência.

Frequência (intervalo minutos)	Custo em 35 anos ($R\\$ \cdot 10^6$)	Pior Cenário (%)	Cenário Médio (%)	Melhor Cenário (%)
10	2689,00	152,79	64,59	33,88
20	1345,00	76,39	32,30	16,94
30	896,00	50,93	21,53	11,29
40	672,00	38,20	16,15	8,47
50	538,00	30,56	12,92	6,78
60	448,00	25,46	10,77	5,65

Os valores representados nas tabelas anteriores podem ser melhor analisados sob a forma gráfica na Figura 20 a seguir.

Figura 20 – Comparação entre custos operacionais e de construção dos traçados em um horizonte de 35 anos.



Fonte: Autor (2017).

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que o traçado considerado no “Pior” cenário mostra-se mais sensível ao aumento da frequência das viagens. Portanto, considerando-se apenas o intervalo entre trens, é mais vantajoso operar com o maior intervalo de tempo entre trens por dia no traçado de menor custo, obviamente sob condições que atendam a demanda prevista para o trecho.

Ainda, é possível verificar que o valor obtido através do Simulated Annealing para o custo de uma viagem, sob a geração de 3 kWh para cada litro de diesel consumido, apresenta-se inferior ao custo calculado para o mesmo trajeto utilizando o consumo médio de $9,19 \text{ kWh/km}$ como referência (DILLMANN; ORELLANO, 2015), uma vez que a eficiência da meta-heurística foi de $8,79 \text{ kWh/km}$.

É possível perceber que o quociente entre os custos de consumo de energia e os custos de construção de traçado são menos variáveis para baixa frequência dos trens. No “Melhor” cenário (alto custo de construção), a frequência de trens entre 30 e 60 minutos indica aproximadamente a mesma influência sobre o consumo quanto ao custo de traçado. Essa relação fica pouco mais acentuada no cenário “Médio” (custo médio de construção), sendo que essa relação é aproximadamente a mesma para frequência entre 40 e 60 minutos. No “Pior” cenário (menor custo de construção), a frequência de viagens passa a representar maior influência do consumo de energia em relação ao custo do traçado mesmo quando o intervalo é próximo de 60 minutos. Ressalta-se, por fim, que apesar da dependência, a estimativa de demanda por viagens não faz parte do escopo deste trabalho e, portanto, não foi considerada nas análises.

5 CONCLUSÕES

As estratégias de estimativa de consumo de energia no setor ferroviário têm sido estudadas mediante diferentes abordagens, sendo os métodos de otimização uma ferramenta amplamente aplicada na procura por estados operacionais que proporcionam um transporte eficiente e, simultaneamente, seguro.

Para estimar o consumo energético de trens, este trabalho propõe um método baseado no algoritmo Simulated Annealing capaz de indicar uma sequência de regimes de tração, bem como os pontos de troca de regime, onde o consumo de energia do trem seja o menor possível.

Apesar do traçado considerado na aplicação do algoritmo ser hipotético, este trabalho contribui para possíveis extensões a trechos existentes e permite que sejam estimados valores monetários referentes ao desempenho energético de um trem, possibilitando inclusive investigações mais detalhadas sobre a operação futura, por exemplo, de serviços entre as cidades de Ribeirão Preto e Araraquara.

Nesse sentido, as considerações apresentadas neste trabalho cumprem o objetivo de estimar a influência do consumo de energia de trens em relação ao custo de construção de traçados ferroviários, indicando que depende da frequência de operação do serviço e que pode variar entre aproximadamente 33,9% e 7,5%, dependendo do cenário de custo de construção do traçado considerado, em um horizonte de 35 anos em condições operacionais análogas às observadas em trabalhos anteriores, com despacho de trens a cada 40 minutos aproximadamente.

Assim, foi possível verificar a sensibilidade do custo dos traçados às alterações no custo total de combustível mediante viagens realizadas durante o horizonte de operação considerado para cada um dos intervalos de tempo entre trens.

É importante ressaltar que este trabalho descreve uma primeira versão da implementação do algoritmo Simulated Annealing para resolução do problema de estimativa de consumo de energia, que necessita de adequações e aperfeiçoamento para que possa representar estimativas fiéis de consumo de energia, inclusive pela calibração dos parâmetros da função objetivo (α e β), utilizando dados reais de desempenho de trens ou de modelos reais e/ou simulações com outros softwares.

Nessas circunstâncias, sugere-se o aprimoramento da estratégia de criação da solução inicial através de um método alternativo estabelecido na literatura ou com base em análises que permitam representar de maneira mais adequada o comportamento dos trens mediante os limites de velocidade.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Levantamento de Preços**. 2017. Online. Acesso em 10/11/2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/>>.
- AREMA. Railway track design. In: **Practical Guide to Railway Engineering**. Maryland, USA: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, 2003.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional: Para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- BARBOSA, M. A. **Iniciação à pesquisa operacional no ambiente de gestão**. Curitiba: InterSaberes, 2013.
- COLIN, E. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. São Paulo: Grupo GEN, 2007.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Anuário CNT do Transporte 2017 - Estatísticas Consolidadas**. 2017. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Ferroviano/2-4-2-/Operaç~ao>>.
- DILLMANN, A.; ORELLANO, A. **The Aerodynamics of Heavy Vehicles III: Trucks, Buses and Trains**. [S.l.]: Springer, 2015. (Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics).
- GE Transportation. **Modelo de locomotiva AC44i**. 2017. Online. Acesso em 07/11/2017. Disponível em: <<https://www.getransportation.com/locomotive-and-services/AC4400-and-dash-series>>.
- HILLIER, F.; LIEBERMAN, G. **Introdução à Pesquisa Operacional**. New York: McGraw-Hill, 2013.
- HUANG, Y. et al. Optimization of train operation in multiple interstations with multi-population genetic algorithm. **Energies**, v. 8, n. 12, p. 14311–14329, 2015.
- ISLER, C. A. **Proposta de um modelo de capacidade de processamento de trens cargueiros em redes ferroviárias de linha singela**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- ISLER, C. A. **Avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- JONG, J.-C.; CHANG, S. Algorithms for generating train speed profiles. **Journal of the eastern ASIA society for transportation studies**, Eastern Asia Society for Transportation Studies, v. 6, p. 356–371, 2005.

- KESKIN, K.; KARAMANCIOGLU, A. Energy-efficient train operation using nature-inspired algorithms. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2017, 2017.
- KIM, K.; CHIEN, S. I.-J. Simulation-based analysis of train controls under various track alignments. **Journal of Transportation Engineering**, v. 136, n. 11, p. 937–948, 2010.
- KIM, K.; CHIEN, S. I.-J. Optimal train operation for minimum energy consumption considering track alignment, speed limit, and schedule adherence. **Journal of Transportation Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 137, n. 9, p. 665–674, 2011.
- LU, S. et al. Single-train trajectory optimization. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 14, n. 2, p. 743–750, 2013.
- MAO, B. H.; HE, T. K.; YUAN, Z. Z. A general-purposed simulation system on train movement. **Journal of the China Railway Society**, 2000.
- MORLOK, E. K. **Introduction to transportation engineering and planning**. New York: McGraw-Hill, 1978.
- OZHIGIN, A. et al. Development of an algorithm for energy efficient automated train driving. In: **8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)**. Toulouse, France: [s.n.], 2016.
- PROFILLIDIS, V. A. **Railway management and engineering**. Farnham: Ashgate, 2006. v. 3.
- SETTI, J. R. A. e. **Tecnologia de Transportes**. Não publicado, uso restrito em aulas de graduação e pós-graduação. 2005.
- SICRE, C. et al. A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling. **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 114, p. 549–560, 2010.
- US Energy Information Administration. **Annual Energy Outlook 2014: With Projections to 2040**. 2017. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2014\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2014).pdf)>.
- VICKERMAN, R. High-speed rail in europe: experience and issues for future development. **The annals of regional science**, Springer, v. 31, n. 1, p. 21–38, 1997.
- YUN, B. et al. Energy-efficient driving strategy for freight trains based on power consumption analysis. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, Elsevier, v. 9, n. 3, p. 43–50, 2009.