

Universidade Federal do Maranhão  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**EGGO HENRIQUE FREIRE PINHEIRO**

*EVOLUTIONARY CLUSTERING SEARCH* PARA  
PLANEJAMENTO DE CIRCULAÇÃO DE TRENS DE CARGA

São Luís  
2017

**EGGO HENRIQUE FREIRE PINHEIRO**

*EVOLUTIONARY CLUSTERING SEARCH* PARA  
PLANEJAMENTO DE CIRCULAÇÃO DE TRENS DE CARGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão, **como parte dos requisitos necessários** para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Alexandre César Muniz de Oliveira

São Luís

2017

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Pinheiro, Eggo.

Evolutionary Clustering Search para Planejamento de  
Circulação de Trens de Carga / Eggo Pinheiro. - 2017.  
87 p.

Orientador(a): Alexandre Oliveira.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em  
Ciência da Computação/ccet, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luís, 2017.

1. Busca Evolutiva Guiada por Agrupamentos. 2.  
Metaheurística. 3. Planejamento de Circulação de Trens.  
I. Oliveira, Alexandre. II. Título.

*Dedico esse trabalho a Deus, minha esposa e filhos.*

# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, pois tudo que tenho e tudo que sou vem DEle, a minha amada esposa que esteve sempre presente e me apoiando em toda essa jornada, ao meu orientador Alexandre César Muniz de Oliveira, ao meu amigo Enrico Miranda e aos professores do programa de mestrado em Ciência da Computação da UFMA.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

# Resumo

Ferrovias de trens de carga são os principais meios de transporte de materiais, tais como minério de ferro, da sua origem até o seu destino. Geralmente para ferrovias de transporte pesado, o destino é o porto. Nos últimos anos, a demanda de produção tem aumentado assim como o uso da ferrovia para transportá-la, no entanto, a expansão da sua infraestrutura requer um grande investimento. Assim, um planejamento de circulação de trens mais efetivo que maximize a capacidade de tráfego se faz necessária. No entanto, em algumas situações a sua otimização é bastante complexa para ser executada, um problema NP-Difícil. Embora todo trabalho elaborado nesse tema é geralmente aplicado localmente em uma única ferrovia, este trabalho provê uma base genérica de ferrovias gerado por heurísticas. Além disso, esta dissertação lida com o problema de circulação de trens aplicado a ferrovias mistas envolvendo trens de carga assim como trens de passageiros compartilhando o mesmo recurso e com diferentes prioridades. É proposto um novo modelo matemático estendido de um trabalho existente na literatura que procura evitar conflitos ao invés de permitir soluções inviáveis, sendo necessário reparação delas ou descarte. Este modelo lida com uma quantidade variável de linhas em locais de parada compatível com várias abordagens de sistema de sinalização disponíveis, assim como considera ultrapassagens de forma a evitar *deadlocks*, da mesma forma que trata contextos de trens em circulação como planejados para realizar a otimização. Para encontrar boas soluções, ao planejamento de circulação de trens é aplicado uma abordagem do *Evolutionary Clustering Search* (ECS) com múltiplas heurísticas, e um operador de mutação modificado do Algoritmo Genético como componente do ECS. Os experimentos computacionais mostraram que o ECS superou quase todos os cenários de teste e o operador de mutação modificado melhorou significativamente os resultados finais.

**Palavras-chaves:** Planejamento de Circulação de Trens. Metaheurística. Busca Evolutiva Guiada por Agrupamentos.

# Abstract

Freight railways are the major means of transportation of bulk material, such as iron ore from the origin to the destination. Usually for heavy haul railways, the destination is a port. For the last few years there has been a fast growing demand. However, railway infrastructure capacity increasing is very expensive and require a lot of investment budget. Therefore, an improvement of train scheduling process is needed to ensure the best and efficient use of the current railway. Nevertheless, in some situations it is overwhelmingly complex to solve, an NP-hard problem. Since all the previous work provided on the Train Timetable Problem is usually only applied locally to a single railway, this work provides a public base benchmark of test railways built by heuristics. Moreover, this work deals with the train timetabling problem applied to mixed traffic railways with both cargo trains and passenger trains sharing the same resources with different priorities. It is proposed a new mathematical model extended from literature previous work intended to avoid infeasible solutions instead repairing or discarding on these cases. This model contains additional support for parallel multi-track for several railway's signaling system approaches context as well as overtaking on it without deadlocks possibility. This model considers trains in current position and future departure planned. To achieve an improved train scheduling is applied the Evolutionary Clustering Search (ECS) with multi heuristics approaches and a modified mutation operator of Genetic Algorithm as component of ECS. The experiments shows ECS outperforms almost all tests scenario and the modified mutation operator strongly improve the results.

**Keywords:** Train Scheduling. Evolutionary Clustering Search. Optimization metaheuristics.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Consumo de aço e crescimento populacional . . . . .	14
Figura 2 – Exportação de minério de ferro . . . . .	15
Figura 3 – Gráfico de Trens . . . . .	17
Figura 4 – Componentes básicos de uma ferrovia . . . . .	29
Figura 5 – Representação típica de uma Estação . . . . .	29
Figura 6 – Locais de Parada . . . . .	30
Figura 7 – Funcionamento de detecção de um trem em uma <i>Track</i> . . . . .	31
Figura 8 – Estrutura básica de uma <i>Track</i> . . . . .	31
Figura 9 – Comportamento de AMV . . . . .	32
Figura 10 – AMV usado por 2 trens simultaneamente . . . . .	33
Figura 11 – Verificação de conflito pelo Intertravamento . . . . .	34
Figura 12 – Intertravamento de bloco móvel . . . . .	34
Figura 13 – Curva de frenagem do ATC . . . . .	36
Figura 14 – Arquitetura do ETCS . . . . .	38
Figura 15 – Cenários de espera por partida . . . . .	48
Figura 16 – Espera por partida sem AMVs entre locais de parada . . . . .	49
Figura 17 – Cenários de verificação de <i>deadlock</i> . . . . .	51
Figura 18 – Linha fica indisponível quando há trem no sentido contrário . . . . .	52
Figura 19 – Frenagem e aceleração por motivos de parada do trem . . . . .	53
Figura 20 – Componentes do ECS . . . . .	56
Figura 21 – Mutação . . . . .	61
Figura 22 – Resultados para a ferrovia 112 . . . . .	73
Figura 23 – Resultados para a ferrovia 21 . . . . .	73
Figura 24 – Resultados para a ferrovia 211 . . . . .	74
Figura 25 – Resultados para a ferrovia 351 . . . . .	74
Figura 26 – Resultados para a ferrovia 357 . . . . .	74
Figura 27 – Resultados para a ferrovia 67 . . . . .	75
Figura 28 – Resultados para a ferrovia 303 . . . . .	75
Figura 29 – Resultados para a ferrovia 830 . . . . .	75
Figura 30 – Resultados para a ferrovia 887 . . . . .	76
Figura 31 – Resultados para a ferrovia 979 . . . . .	76

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Codificação de Indivíduo para movimento de 1 trem . . . . .	57
Tabela 2 – Exemplo de um Indivíduo . . . . .	58
Tabela 3 – Representação numérica de um indivíduo em relação a um centro de <i>cluster</i> . . . . .	63
Tabela 4 – <i>Fitness</i> médio para os resultados de teste . . . . .	71
Tabela 5 – Valores p do teste t do ECS comparado a outros algoritmos . . . . .	72
Tabela 6 – <i>Fitness</i> médio para 10 <i>clusters</i> no ECS . . . . .	72
Tabela 7 – Valores p do teste t do ECS comparado a outros algoritmos . . . . .	73
Tabela 8 – Valores p do teste t do EA comparado ao GA . . . . .	76

# Lista de Siglas

ALNS	<i>Adaptive Large Neighborhood Search</i>
ALWABP	<i>Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem</i>
AMV	<i>Aparelho de Mudança de Via</i>
ATC	<i>Automatic Train Control</i>
ATS	<i>Automatic Train Stop</i>
BAP	<i>Berth Allocation Problem</i>
BTS	<i>Base Transceiver Stations</i>
CDR	<i>Composite Dispatching Rule</i>
COP	<i>Constraint Optimisation Problem</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
CS	<i>Clustering Search</i>
CUDA	<i>Compute Unified Device Architecture</i>
DE	<i>Differential Evolution</i>
ECS	<i>Evolucionary Clustering Search</i>
ETCS	<i>European Train Control System</i>
FJSP	<i>Flexible Job Shop Problem</i>
GA	<i>Algoritmo Genético</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>
LIS	<i>Longest Increasing Subsequence</i>
NRGA	<i>Non Ranking Genetic Algorithm</i>
NSGA-II	<i>Non Dominated Sort Genetic Algorithm II</i>
PESP	<i>Periodic Event Scheduling Problem</i>
PMSP	<i>Preventive Maintenance Scheduling Problem</i>

PSO *Particle Swarm Optimization*

RBC *Radio Block Center*

SA *Simulated Annealing*

SALNS *Simple Adaptive Large Neighborhood Search*

SSI *Solid State Interlocking*

TTP *Train Timetabling Problem*

# Sumário

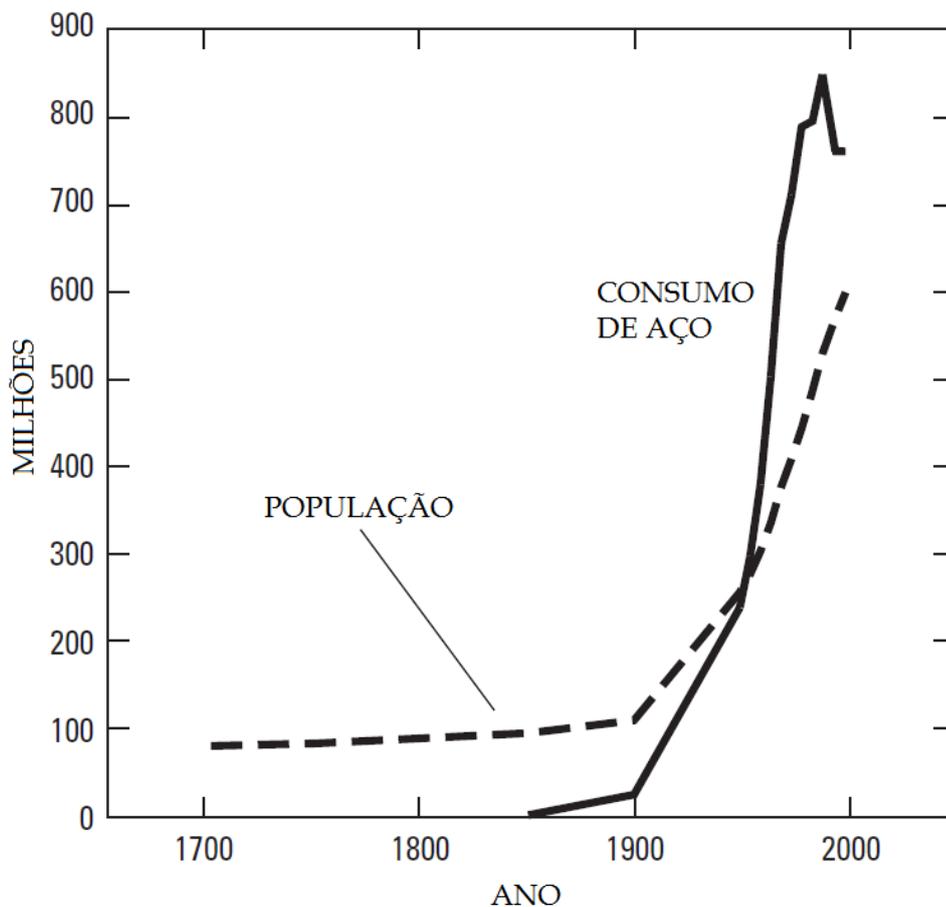
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Planejamento de Circulação de Trens (TTP)	16
1.2	Evolutionary Clustering Search (ECS)	18
1.3	Objetivos e Contribuições	18
1.4	Organização do trabalho	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
2.1	Planejamento de circulação de trens	21
2.1.1	Métodos exatos	21
2.1.2	Métodos aproximados	22
2.2	<i>Evolutionary Clustering Search</i>	25
2.3	Considerações finais	26
<b>3</b>	<b>PLANEJAMENTO DE CIRCULAÇÃO DE TRENS</b>	<b>28</b>
3.1	Requisitos do problema	28
3.2	Elementos físicos de uma ferrovia	28
3.2.1	Estações	29
3.2.2	<i>Track</i>	30
3.2.3	Aparelho de Mudança de Via (AMV)	32
3.3	<b>Intertravamento</b>	<b>32</b>
3.3.1	Sistema de Sinalização	34
3.3.1.1	<i>Automatic Train Stop (ATS)</i>	35
3.3.1.2	<i>Automatic Train Control (ATC)</i>	36
3.3.1.3	Abordagem de bloco móvel virtual	37
3.3.2	Tolerância a Falhas	38
3.4	<b>Sistema de Controle de Tráfego Ferroviário</b>	<b>39</b>
3.5	<b>Manutenção Preventiva de Via</b>	<b>41</b>
3.6	Considerações finais	42
<b>4</b>	<b>MODELAGEM PARA PLANEJAMENTO DE CIRCULAÇÃO DE TRENS</b>	<b>43</b>
4.1	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>43</b>
4.1.1	Dados de entrada	43
4.1.2	Variáveis	45
4.1.3	Restrições	46
4.1.4	Função Objetivo	54

<b>4.2</b>	<b>Modelagem Heurística</b>	<b>55</b>
4.2.1	Modelagem baseada em ECS	56
4.2.2	Algoritmo Evolutivo (EA)	57
4.2.2.1	Codificação do Indivíduo	57
4.2.2.2	População inicial	58
4.2.2.3	Seleção	58
4.2.2.4	<i>Cruzamento</i>	58
4.2.2.5	Mutação	61
4.2.2.6	Processo de Decodificação do Indivíduo	61
4.2.3	Agrupamento Iterativo (IC)	61
4.2.4	Módulo Analisador (AM)	64
4.2.5	Intensificador de Pesquisa (LS)	64
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTOS</b>	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>Geração das instâncias</b>	<b>66</b>
<b>5.2</b>	<b>Heurísticas de otimização</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>79</b>

# 1 Introdução

O rápido crescimento da população mundial e, conseqüentemente, o aumento do consumo de minerais com uma velocidade ainda mais elevada, conforme descreve (KESLER, 2007), tem impulsionado uma maior extração desses minerais. A Figura 1 ilustra essa mudança entre 1970 e 2000. A linha tracejada mostra o crescimento da população mundial (milhões de pessoas dividido por 10) e a linha não tracejada mostra o consumo de aço (milhões de toneladas) que tem sua matéria prima retirada do minério de ferro conforme descreve (YELLISHETTY; RANJITH; THARUMARAJAH, 2010) e que também demonstra esse aumento de demanda pelo aço ao redor do mundo. Como para todos os *commodities* de minerais, o crescimento do consumo do aço tem superado em muito o crescimento populacional, refletindo assim o aumento da demanda per capita de minerais.

Figura 1 – Consumo de aço e crescimento populacional

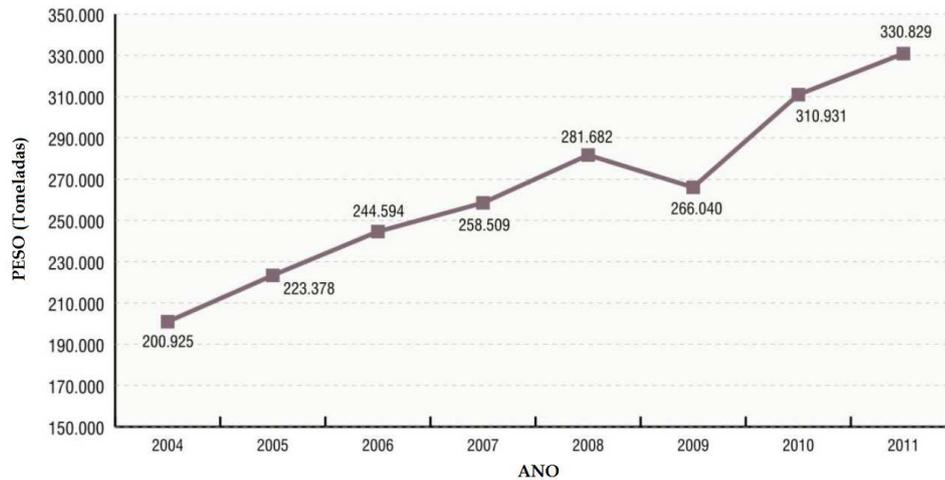


Fonte: (KESLER, 2007)

Um outro exemplo é o minério de ferro brasileiro, analisado entre 2000 e 2008, para

o qual verificou-se que a exportação e produção têm crescido, impulsionado pelo consumo da China (PAIS; GOMES; CORONEL, 2012). A Figura 2 ilustra esse crescimento.

Figura 2 – Exportação de minério de ferro



Fonte: MDIC - 2012

Como consequência, esse aumento de demanda e crescimento populacional têm sobrecarregado a capacidade das ferrovias que transportam esses minerais ampliando, assim, sua importância tanto no caso de cargas, quanto no caso de passageiros. Vários trabalhos têm sido produzidos nas últimas décadas, com o propósito de melhorar sua eficiência devido a maior circulação de trens nelas. Os elementos de infraestrutura e trens que a envolvem requerem um complexo processo de tomada de decisão, conforme é descrito na Seção 2.1.

A melhora da eficiência da circulação de trens está limitada à capacidade física da ferrovia. Entretanto, por mais que (NIJKAMP; VLEUGEL; KREUTZBERGER, 1993) inicialmente defina medida de capacidade como o máximo número de veículos, pessoas ou carga transportada entre origem e destino numa dada infraestrutura em um intervalo de tempo, esse conceito pode ter um outro significado entre um ponto de vista local ou global (que envolva a ferrovia como um todo). Os autores mesmo propuseram essa solução com base em simulações com dados obtidos de uma ferrovia da Holanda, onde uma melhor capacidade poderia ser obtida usando fatores como grau de homogeneidade entre tipo de trens; qualidade e quantidade do sistema de sinalização ferroviário; distância entre locais de ultrapassagem ou cruzamento; qualidade de manutenção na via; velocidade, aceleração e frenagens de trens; capacidade de carga de vagões e locomotivas entre outros fatores. Estes mesmos elementos têm servido para avaliar capacidade em uma ferrovia em outros cenários (ABRIL et al., 2008). De qualquer forma, tanto a adequação da infraestrutura ferroviária quanto o investimento em sua expansão tem um alto custo, além de ser um processo desafiador, já que normalmente é feito pela extensão de uma região adicionando uma linha

paralela a mais. Dependendo do caso, essa expansão pode ter, além do custo financeiro, um tempo elevado de concretização, assim como restrições ambientais e geográficas.

Em (LIU; KOZAN, 2009), conclui-se que melhorando o planejamento de circulação de trens tem como consequência uma melhor taxa de utilização dos recursos da ferrovia e um menor custo de transporte como um todo.

## 1.1 Planejamento de Circulação de Trens (TTP)

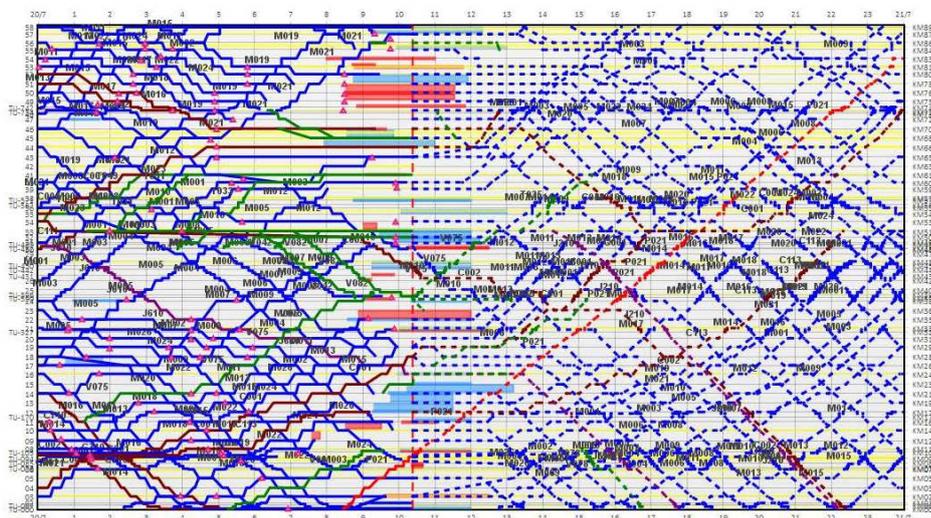
O problema associado ao processo de planejamento é conhecido na literatura como *Train Timetabling Problem - TTP* (Planejamento de Circulação de Trens - PCT) que tem por objetivo, gerar um planejamento de circulação para um conjunto de trens atendendo a capacidade da ferrovia e restrições operacionais, como descreve (CAPRARA; FISCHETTI; TOTH, 2002), que provou que o problema é NP-Difícil e explicou que, para contexto envolvendo linhas únicas, a medida que o tamanho do problema cresce, a sua complexidade para resolvê-lo cresce exponencialmente tornando impraticável sua resolução de forma exata.

De forma geral, existe um contexto mais abrangente de planejamento de transporte ferroviário que é dividido em várias camadas relacionadas umas com as outras que são as seguintes: análise de demanda, planejamento de linha, planejamento de circulação de trens, planejamento de material rodante, planejamento de tripulação e alocação de equipes (GHOSEIRI; SZIDAROVSKY; ASGHARPOUR, 2004). Em resumo, o planejamento de circulação de trens é a camada do planejamento de transporte ferroviário onde é definido os horários de partida e de chegada em cada etapa da jornada de cada trem, considerando seus locais de parada em suas trajetórias e atendendo às restrições da ferrovia.

Essa informação é, geralmente, usada pelo controlador de tráfego ferroviário e visualizada por uma ferramenta denominada de gráfico de trens, que tem uma representação para o deslocamento de cada trem de um local de parada para outro (eixo y) e no tempo (eixo x) como mostrado na Figura 3. Neste desenho é convencionado que trens se deslocando pela representação de linhas no sentido superior da figura são denominados de trens subindo e trens se deslocando no sentido inferior da figura como trens descendo. Assim, cada linha horizontal define um local de parada que tem sua identificação correspondente em seu eixo do gráfico, de modo que, um trem o usa para cruzamento ou ultrapassagem enquanto que o espaço entre estas linhas são regiões na ferrovia de deslocamento entre estes locais de parada. Essa ferramenta é usada tanto para ter uma visão do deslocamento feito pelos trens, quanto para planejar futuros movimentos através do tempo. Em resumo, é uma ferramenta para apoio ao planejamento de circulação de trens e dá suporte ao controlador de tráfego, de forma a definir onde e a prioridade da permissão de movimento para cada trem. Essa permissão de movimento leva em conta vários fatores como características

dos elementos da ferrovia, prioridade de trens, manutenção de via, troca de equipe de trem, disponibilidade do local de parada devido ao tráfego, estratégias de cruzamento e ultrapassagem e outros requisitos operacionais de circulação.

Figura 3 – Gráfico de Trens



Fonte: Acervo do autor

Uma consequência do problema é devido aos recursos ferroviários serem bem limitados e por existir, geralmente, vários elementos de via sendo concorridos em um mesmo intervalo de tempo com diversos trens. Assim, é feita priorizações de um trem em relação a outros e qualquer atraso no planejamento de um ou mais trens pode ser propagado para outros subsequentes ou, mais ainda, parte dessa propagação poderia gerar situações de conflitos não resolvidos na ferrovia. Desta forma, a decisão de qual trem tem prioridade e qual espera na fila na tentativa de encontrar a solução ótima caracteriza um problema de otimização combinatória em ferrovias com linhas simples ou menos linhas paralelas que a demanda de trens na região. Assim, essas linhas precisam ser compartilhadas por todos os trens que passam por ela.

Para ferrovias envolvendo trens de passageiros, o seu planejamento tende a ser relativamente estático e cíclico como propõe (SERAFINI; UKOVICH, 1989) como um *Periodic Event Scheduling Problem* (PESP). Ele descreve, para um dado trem, um evento como sendo a partida ou a chegada em um local de parada específico. Esses eventos são planejados para um ciclo que é repetido como rotina de circulação de um trem. Assim, esses trens têm um horário previsto definido tanto para chegada, quanto para partida de uma estação. No entanto, ferrovias para trens de carga, principalmente as que transportam cargas pesadas, por mais que possam ter um padrão cíclico, os trens são limitados a disponibilidade de recursos de via que são compartilhados entre outros trens, saturação de tráfego e capacidade de carga e descarga dos terminais. Assim, não há periodicidade de

chegada e partida em locais de paradas específicos e as partidas nos terminais acontecem com base na disponibilidade de tráfego.

Comumente, essas ferrovias de carga possuem circulação de suas estações de origem, em muitos casos uma mina, até seus destinos, que pode ser um terminal portuário. Nestes casos trens vazios circulam no sentido da mina para serem carregados e, em seguida, irem em sentido porto com o material produzido para exportação. Neste trabalho, a designação mina e porto são usados para definir direções e, conseqüentemente, características da jornada.

## 1.2 Evolucionary Clustering Search (ECS)

Em (TALBI, 2009), definem-se metaheurísticas como uso de técnicas de otimização por aproximação de forma a prover soluções em um tempo aceitável para problemas complexos. Ao contrário de uma otimização utilizando um método exato, ela não garante soluções ótimas nem estabelece o quão próximas estão dessas soluções. O autor define o problema como a representação da solução obtida pelo algoritmo e a definição da função objetivo que direciona o processo de busca.

No entanto, o uso de metaheurísticas híbridas tem ganhado destaque em trabalhos de pesquisa para problemas de otimização combinatória, como descreve (TALBI, 2002), no qual descreve-se o uso de algoritmos populacionais como busca global, assim como outras abordagens, em conjunto com algoritmos de busca local como instrumento de intensificação da pesquisa pela solução, destacando-se uma melhora de resultados encontrados para problemas clássicos de otimização. Essas abordagens, todavia, podem fazer uso de mecanismos de buscas locais, a partir de soluções candidatas que não tragam ganho efetivo para o processo como um todo, o que tende a causar desperdício de esforço computacional.

Por isso, o uso de *Evolucionary Clustering Search* (ECS) (OLIVEIRA; LORENA, 2004) se mostra adequado a este tipo de problema. já que funciona com base em agrupamentos dinâmico de soluções. de forma a detectar regiões promissoras, para assim direcionar a intensificação de buscas locais nelas. Ele tem sido usado satisfatoriamente em vários trabalhos de pesquisa produzindo bons resultados conforme mostra a Seção 2.2.

## 1.3 Objetivos e Contribuições

Este trabalho foca em ferrovias mistas com trens de carga e de passageiros compartilhando os mesmos recursos, considerando-se especificidades de cada tipo, tais como tempos de chegada e saída de cada estação pré-definidos e, portanto, com diferentes prioridades, conforme descreve (CACCHIANI; TOTH, 2012). Considera-se ainda tipos

diferentes de trens de carga, diferentes como origem, destino, peso, comprimento e tipo de carga.

Muitos dos trabalhos relacionados disponíveis na literatura têm reportado solucionar problemas em instâncias que podem ser consideradas como pequenas e médias em comparação a outras ferrovias e as que serão usadas no Capítulo 5 deste trabalho. Geralmente, esses trabalhos usam modelos de ferrovia do mundo real em seus testes tornando difícil comparações com outras abordagens ou técnicas de solução do problema. Outros são focados em ferrovias com trechos de linhas únicas (singelas) com locais específicos destinados a cruzamento ou ultrapassagem, não sendo um modelo adequado para admitir a possibilidade de crescimento e expansão da ferrovia, o que inclui longos trechos duplicados ou mesmo triplicados.

Especificamente, este trabalho objetiva:

- Apresentar um novo modelo matemático para planejamento de circulação de trens com linhas simples ou multi-linhas, estendendo modelos existentes na literatura. Este modelo considera inércia do trem e prevenção de bloqueio do planejamento por causa de *deadlocks*;
- Propor o uso de uma abordagem de heurística híbrida baseada na metaheurística do *Evolucionary Clustering Search* (ECS), que é capaz de identificar regiões promissoras no espaço de busca pelo processo de agrupamento das soluções geradas pelo processo evolutivo, e intensificar a busca em seus entornos por meio de heurísticas de busca local;
- Propor um novo operador de mutação específico para o problema;
- Prover um gerador de instâncias de testes e, como consequência, uma base de dados de especificações de ferrovias, incluindo o estado inicial de utilização, consistindo-se, portanto, em um conjunto de instâncias, que vai permitir alguma padronização de experimentos com vistas a uma melhor comparação entre diferentes algoritmos de otimização.

## 1.4 Organização do trabalho

Este documento está organizado em seis capítulos, sendo este o primeiro, apresentando uma abordagem introdutória, a motivação e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica envolvendo planejamento de circulação de trens e *Evolucionary Clustering Search* (ECS). No Capítulo 3 é apresentada a descrição do problema, assim como os elementos que o envolvem. No Capítulo 4 são apresentadas as propostas deste trabalho: o novo modelo matemático e a abordagem do

ECS. O Capítulo 5 descreve os resultados dos experimentos nas abordagens propostas. No Capítulo 6 é apresentada a conclusão e trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre planejamento de circulação de trens, e otimização baseada em *Clustering Search*.

### 2.1 Planejamento de circulação de trens

O problema de planejamento de circulação de trens e similares tem sido estudado desde o início dos anos 1970 (SZPIGEL, 1973), com o desenvolvimento dos primeiros modelos de programação em cenários que contemplavam possibilidade de ultrapassagem e cruzamento, a partir dos horários de partida e das velocidades conhecidos (HIGGINS; KOZAN; FERREIRA, 1996).

#### 2.1.1 Métodos exatos

Em (EPSTEIN et al., 2005), propõe-se um modelo matemático para determinar os tempos ótimos para despacho de trens para redes ferroviárias complexas. Nessa abordagem, foram consideradas ferrovias de linha única, dupla e tripla. O modelo é resolvido usando um algoritmo de *branch and bound* com ajuda da transferência do modelo ferroviário para uma abordagem de grafo e aplicando regras de propagação para reduzir seu espaço de busca. Para demonstrar a eficiência do algoritmo proposto, compara-se com o *solver* CPLEX (CPLEX, 2009). Contudo, o procedimento assume que as jornadas de cada trem são inicialmente fornecidas, com dados de uma ferrovia em Los Angeles.

A minimização do custo operacional do planejamento de circulação de trens, que é dependente da escolha de diferentes tipos de trens com várias velocidades diferentes e custos, é considerado em (LINDNER; ZIMMERMANN, 2005). Um modelo matemático é proposto para descrever o planejamento de circulação de trens em ferrovias da Alemanha e da Holanda onde o mesmo foi usado. Embora o modelo possa ser impossível de ser resolvido para problemas do mundo real dentro de um tempo aceitável, uma decomposição do problema pôde ser usada para obter-se um bom desempenho. Em uma primeira parte da decomposição, apenas os tipos relacionados às restrições ficam ativos. Na segunda parte, o restante das restrições são aplicadas usando técnicas de relaxação. Dessa forma, fica viável integrar o algoritmo proposto com abordagens *Branch and Bound*.

Em (SALIDO et al., 2005), descrevem-se ferrovias que podem ter seus planejamentos de circulação de trens modelados como *Constraint Optimisation Problem* (COP). Para essas modelagens, o planejamento é considerado como o problema sujeito às restrições definidas pela infraestrutura da ferrovia, por requisitos de tráfego, assim como a partida e

a chegada nos locais de parada para cada trem. Desenvolveu-se uma técnica de otimização por topologia de restrições para resolver o planejamento de trens periódico em uma ferrovia na Espanha. Essa técnica de otimização divide o modelo proposto em sub-problemas de tal forma que cada padrão de tráfego é gerado por um sub-problema. Dessa forma, esses padrões de tráfego são periodicamente repetidos para compor todo o planejamento de circulação de trens da ferrovia. Os experimentos mostram que essa técnica pode melhorar os resultados obtidos pelos *solvers* LINGO (SCHRAGE, 2006) e CPLEX (CPLEX, 2009).

### 2.1.2 Métodos aproximados

Métodos aproximados muitas vezes buscam por soluções de conflito que na prática significa evitar soluções inviáveis muito mais que escolher decisões ótimas (CAI; GOH, 1994). Algoritmos com essa característica têm sido propostos baseada em um princípio de busca do ótimo local em eventos de conflitos de cruzamentos potenciais. Neste caso, o problema pode ser generalizado para atender a possibilidade de ultrapassagens quando trens viajam em velocidades diferentes. Na prática, esse tipo de problema é frequentemente desejável sua resolução em tempo real. Por isso, é importante uma heurística com execução rápida que permita uma solução sem conflito obtida em um predeterminado e finito número de passos ou, preferencialmente, em tempo polinomial. Experimentos computacionais em dois casos não triviais demonstram a eficiência e efetividade do algoritmo proposto em (CAI; GOH, 1994).

Iniciativas em aplicar técnicas de metaheurísticas para resolver o problema de planejamento de trens em linhas únicas, conhecido como NP-Difícil, relacionado ao número de conflitos têm sido encontradas na literatura (HIGGINS; KOZAN; FERREIRA, 1997): um algoritmo genético, uma busca tabu e dois algoritmos híbridos com uma estrutura de melhoria de soluções vizinhas. Comparações feitas entre cada heurística com e sem restrições no tempo de execução mostrou que o algoritmo genético híbrido estava dentro de 5% da solução ótima para, pelo menos, 95% dos problemas testados (HIGGINS; KOZAN; FERREIRA, 1997).

Em (OLIVEIRA; SMITH, 2000), modelou-se o planejamento de circulação de trens para ferrovias de linha simples entre locais de parada como uma abordagem de *job-shop scheduling*. Isso foi feito considerando a viagem de um trem como sendo uma tarefa que tem seus horários planejados nos locais de paradas considerados como máquinas. Uma viagem de um trem pode ter muitas atividades (operações) que consiste em atravessar de um ponto a outro no local de parada. O objetivo desse modelo é minimizar o atraso total quando conflitos possam ser resolvidos, ou seja, quando dois trens usam o mesmo recurso de linha férrea ao mesmo tempo. Nessa abordagem, os conflitos são resolvidos aplicando a regra definida como *shortest processing time* (SPT) para redefinir as tarefas em todos os seções de recursos ferroviários que um conflito é encontrado. Além disso, algumas

restrições práticas são incorporadas ao modelo.

Um algoritmo de busca tabu para o problema de planejamento de circulação de trens com base em grafos alternativos é apresentado em (PACCIARELLI; PRANZO, 2001). Grafos alternativos é uma extensão de grafos disjuntivos de (ROY; SUSSMANN, 1964) com potencial para representar soluções de planejamento de circulação de trens.

Em planejamento de circulação de trens em linhas simples com estações para cruzamento, cada trem é conectado a duas estações e tem a possibilidade de parar por um tempo mínimo em alguma estação intermediária (CAPRARA; FISCHETTI; TOTH, 2002). Trens podem ultrapassar outros apenas em estações intermediárias com intervalo mínimo especificado. Uma formulação com base em teoria de grafos foi proposta para resolver o problema diretamente por um multi-grafo onde os nós correspondem às partidas e chegadas em certas estações em um dado horário (CAPRARA; FISCHETTI; TOTH, 2002). O problema foi formulado como um modelo matemático que pode ser resolvido por uma relaxação Lagrangiana, cuja variáveis das restrições relaxadas são somente associadas aos nós do grafo, permitindo um considerável aumento de velocidade na obtenção de resultado já que está incorporada a uma heurística do algoritmo. Os autores reportam extensivos experimentos em instâncias de uma ferrovia na Itália (CAPRARA; FISCHETTI; TOTH, 2002).

Algoritmos genéticos têm sido usados para ajustar apenas a ordem de partidas em corredores de linha dupla (PING et al., 2001). Para evitar população com muitas soluções inviáveis, heurísticas de inicialização, tais como a *Regret-Based Biased Random Sampling* (RBRS), foram adotadas (TORMOS et al., 2008; PINHEIRO; MIRANDA; OLIVEIRA, 2016).

Em (LEE; CHEN, 2009), utilizou-se uma heurística para aceitar ou rejeitar soluções gerada após um processo de decomposição em quatro passos derivado de um elemento inicial. Nessa mesma linha, foram propostas estratégias de ajustes de rotas de trens em um esquema de busca tabu, capaz de modificar um planejamento de circulação inicial criado por uma busca por vizinhança (CORMAN et al., 2010).

O TTP usando vários períodos e condição de demanda uniforme é abordado em (NIU; ZHANG, 2012). A capacidade do trem é definida como uma pequena restrição e a função objetivo inclui minimizar o tempo de espera de passageiros e custo de penalidades. Um algoritmo genético híbrido é proposto para resolver um modelo matemático definido.

Em (JAMILI et al., 2012), foi proposta uma heurística híbrida baseada na integração de um algoritmo *Simulated Annealing* (SA) com um de *Particle Swarm Optimization* (PSO) para TTP em um modelo periódico de linha única com locais de parada para cruzamento.

Em (SUN et al., 2013), adotou-se a teoria de dualidade Lagrangiana para otimizar

planejamento de circulação de trens para linhas de metrô levando-se em conta a robustez da solução e aspectos de economia de energia. O modelo de planejamento de circulação de trens proposto foca em minimizar o tempo de espera de passageiros, assim como custos operacionais. No entanto, ele é sujeito a demanda de passageiros, a utilização de recursos de via e as restrições de tempo de permanência nas estações. Nessa mesma linha, em (CACCHIANI; CAPRARA; FISCHETTI, 2012), propõe-se modificações no esquema de otimização Lagrangiana capaz de lidar com robustez no TTP.

Um algoritmo evolutivo diferencial, melhorado com duas populações para minimizar o tempo médio de espera em transferência de linhas em trens de passageiros, é proposto em (ZHONG et al., 2013). A abordagem divide a população com o propósito de utilizar uma para busca global e outra para busca local.

Em (XU et al., 2014), utiliza-se um *improved travel-advance strategy* (TAS) em conjunto com um algoritmo genético para procurar a velocidade ótima de cada trem com uma mínima taxa de atraso usando uma variação de velocidade de trens dentro de limites aceitáveis.

Em (BARRENA et al., 2014), um método *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) é usado para minimizar o tempo médio de espera em estações de trens de passageiros. ALNS também é usado para lidar com reajustes de planejamento de circulação de trens em casos de impactos severos não previstos em uma malha de trens de passageiros (BINDER; MAKNOON; BIERLAIRE, 2015).

Programação dinâmica tem sido proposta para resolver um modelo ferroviário de linha única com estações de cruzamento de forma a minimizar o tempo de espera de trens de passageiros em estações de conexão (NIU; TIAN; ZHOU, 2015). Estendendo o modelo para duas linhas, o autor usa um algoritmo genético assumindo um indivíduo codificado como uma cadeia de valores inteiros. Problemas reais podem ser resolvidos por algoritmos baseados em programação dinâmica com apoio de solver alto desempenho (CACCHIANI; FURINI; KIDD, 2016).

Em (SHI et al., 2016), propõe-se um algoritmo genético para minimizar o tempo médio de espera de passageiros e suas conexões nas estações em seu modelo que ajusta o tempo de permanência nas estações assim como o tempo de deslocamento entre elas em suas respectivas linhas que tem o comportamento cíclico.

(MORADI; GHOMI; ZANDIEH, 2011) generaliza o problema em uma abordagem de *Flexible Job Shop Problem* (FJSP) integrada com manutenção preventiva nas máquinas do modelo em uma otimização bi-objetiva para reduzir o *makespan* e ao mesmo tempo reduzir a indisponibilidade das máquinas devido a manutenção. Os métodos NSGA-II e NPGA e suas variações usando *Composite Dispatching Rule* (CDR), proposto por (HO; TAY; LAI, 2007), são avaliadas de forma a buscar melhores resultados na busca da Fronteira

de Pareto. Experimentos computacionais em nove padrões de problemas de teste e um total de 4860 instâncias demonstram a eficiência desses métodos.

([ABRAMSON; MILLS; PERKINS, 1994](#)) discute o uso de computação paralela para lidar com o problema de circulação de trens por uma Algoritmo Genético simples. Ele verifica que o tempo total de execução do algoritmo diminui com a abordagem proposta. Mais recentemente, ([NICKOLLS et al., 2008](#)) descreve o aumento da quantidade de pesquisa para lidar com o tempo de execução de problemas complexos por meio do CUDA, uma plataforma de computação paralela e modelo de programação que usa recursos de uma ou mais GPUs, para escalar o processo de paralelismo de forma transparente baseado na abstração de seu modelo. *Frameworks* em diferentes linguagens além de C/C++, como Java ([YAN; GROSSMAN; SARKAR, 2009](#)) (JCUDA) e .NET ([BLÄSER et al., 2014](#)) (Alea Reactive Dataflow), tem sido construído para facilitar ainda mais o seu uso. ([RYOO et al., 2008](#)) avalia a performance de uma GPU NVIDIA GeForce 8800 GTX pela criação massiva de *multi-threads* para multiplicação de matrizes tendo um ótimo tempo de execução em seus testes.

([KRÖMER et al., 2011](#)) demonstra a aplicação de um algoritmo *Differential Evolution* (DE) usando CUDA, ele processa cada solução candidata com múltiplas *threads* implementando todas as operações do DE na GPU. Essa implementação foi usada para encontrar o mapeamento de planejamento entre um conjunto independente de atividades em múltiplas máquinas. Com a ajuda da GPU o valor de *fitness* do planejamento foi avaliado de 2,2 a 12,5 mais rápida que em CPU usando código em C e 25,2 a 216,5 mais rápida usando código C++. A implementação usa múltiplas *threads* para processar cada solução candidata e assim obtém uma melhor performance com o uso de uma GPU. Assim, os experimentos mostram que a implementação do algoritmo poderia ser usado em problemas complexos do mundo real.

([PETERSSON, 2015](#)) descreve uma abordagem paralela usando GPU para o problema de re-planejamento de trens devido a ocorrência de imprevistos na circulação. Experimentos computacionais mostram potencial promissor na exploração de mais soluções por unidade de tempo que algoritmos sequenciais executando em CPUs.

## 2.2 *Evolutionary Clustering Search*

O *Evolutionary Clustering Search* (Busca Evolutiva Guiada por Agrupamentos), proposto por ([OLIVEIRA; LORENA, 2004](#)), verifica agrupamentos dinâmicos de soluções candidatas a fim de detectar regiões promissoras no espaço de busca e intensificar a busca nessas regiões usando seus centros como referência. Em sua primeira aplicação, foi usado um algoritmo genético como algoritmo evolutivo e busca direta *Hooke-Jeeves* ([HOOKE; JEEVES, 1961](#)) como busca local em problemas de otimização contínua irrestrita. Os

experimentos computacionais demonstraram a competitividade do ECS (OLIVEIRA; LORENA, 2004).

A versão evolutiva foi aplicada também a problemas de otimização combinatória, como sequenciamento de padrões, para os quais a busca local baseada em 2-Opt mostrou-se bastante promissora (OLIVEIRA; LORENA, 2006).

Pode-se definir ECS como uma metaheurística híbrida que combina um algoritmo genético, responsável pelo processo de exploração global do espaço de busca, a um otimizador local, responsável pelo processo de intensificação em subespaços, mediados por um algoritmo de agrupamento dinâmico e iterativo, capaz de detectar subespaços promissores onde mais se aglomeram soluções candidatas como resultado do processo natural de convergência (OLIVEIRA; LORENA, 2004; OLIVEIRA; CHAVES; LORENA, 2013).

Posteriormente, propôs-se uma generalização da busca guiada por agrupamentos para incluir quaisquer metaheurísticas como gerador de soluções candidatas. Esse framework passou a ser referenciado como *Clustering Search* (CS) (OLIVEIRA; LORENA, 2007; CHAVES; CORREA; LORENA, 2007).

Em (FILHO; NAGANO; LORENA, 2007), ECS foi proposto para resolver o problema de permutação do *Flow Shop scheduling* com o propósito de minimizar o tempo total de execução. Algumas modificações são propostas no algoritmo genético em relação à proposição inicial (OLIVEIRA; LORENA, 2004). As buscas locais são usadas com base em permutação e inserção de genes de forma a gerar um indivíduo modificado como vizinhança. Experimentos computacionais demonstram que a abordagem proposta supera todos os demais envolvidas nos testes.

Nagano e colaboradores (NAGANO; SILVA; LORENA, 2012) aplicaram uma abordagem do ECS semelhante a (FILHO; NAGANO; LORENA, 2007) para um problema de permutação do *Flow Shop scheduling* de forma que as tarefas não pudessem ficar ociosas entre uma máquina e outra. Experimentos computacionais demonstram superioridade total da abordagem proposta em relação ao estado da arte.

## 2.3 Considerações finais

Pode ser observado que muitos modelos matemáticos em trabalhos anteriores são específicos e adequados somente para alguns cenários especiais. Suas técnicas de resolução tiveram que recorrer a vantagens obtidas das propriedades estruturais do modelo proposto. Por outro lado, existe uma grande quantidade de trabalhos usando metaheurísticas e pode também ser percebido que esse tema continua sendo foco de pesquisa em busca da obtenção de melhores resultados e novas abordagens.

Para o contexto do ECS, por mais que tenham existido trabalhos na literatura como descrito neste capítulo, eles usam os componentes principais definidos em (OLIVEIRA; LORENA, 2004) e suas modificações são propostas no componente evolutivo. Em todos os trabalhos citados, são usados algoritmos genéticos. No entanto, outras abordagens provenientes de (OLIVEIRA; LORENA, 2007) foram produzidas como forma de gerar soluções para o algoritmo por um outro tipo de metaheurística,

Uma revisão bibliográfica completa, incluindo todas as propostas envolvendo *Clustering Search* até 2013, pode ser encontrada em (OLIVEIRA; CHAVES; LORENA, 2013). Uma ampla rede de pesquisadores têm proposto metaheurísticas híbridas para problemas de otimização combinatória tais como *Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem* (ALWABP), *Capacitated Centered Clustering Problem*, *Berth Allocation Problem* (BAP), *Workover Rig Routing Problem*, dentre outros. Além disso, várias metaheurísticas têm sido empregadas dando volume a caráter multi-heurístico do *framework CS*, tais como *Simulated Annealing* (OLIVEIRA; MAURI; LORENA, 2012).

Observa-se, todavia, a popularidade da abordagem evolutiva, tanto como metaheurística geradora de regiões promissoras no campo dos algoritmos híbridos baseados no CS, quanto em solução aproximada para planejamento de circulação de trens.

## 3 Planejamento de Circulação de Trens

Neste capítulo, um modelo descritivo de planejamento de circulação de trens é apresentado, apontando requisitos, conceitos, integração e elementos típicos de malha ferroviária. As seções a seguir descrevem cada elemento de forma resumida, com o propósito de permitir a compreensão das abordagens propostas neste trabalho. Especial atenção é destinada à descrição de restrições e regras que surgem desde a malha ferroviária até o sistema de controle de tráfego.

### 3.1 Requisitos do problema

O planejamento ótimo de circulação considera trens que já estão na malha ferroviária e trens que ainda entrarão, dentro do horizonte de interesse do problema, para fins de otimizar critérios de desempenho da malha, obedecendo as restrições que modelam o uso de recursos da infraestrutura e outros requisitos operacionais.

O algoritmo de planejamento deve ser capaz de lidar com diferentes configurações de malha ferroviária e a solução do problema deve descrever cada etapa da jornada de cada trem saindo de sua origem, passando e/ou parando em cada ponto intermediário até o seu destino final, com detalhamento suficiente de como cada trem se movimenta no tempo e no espaço.

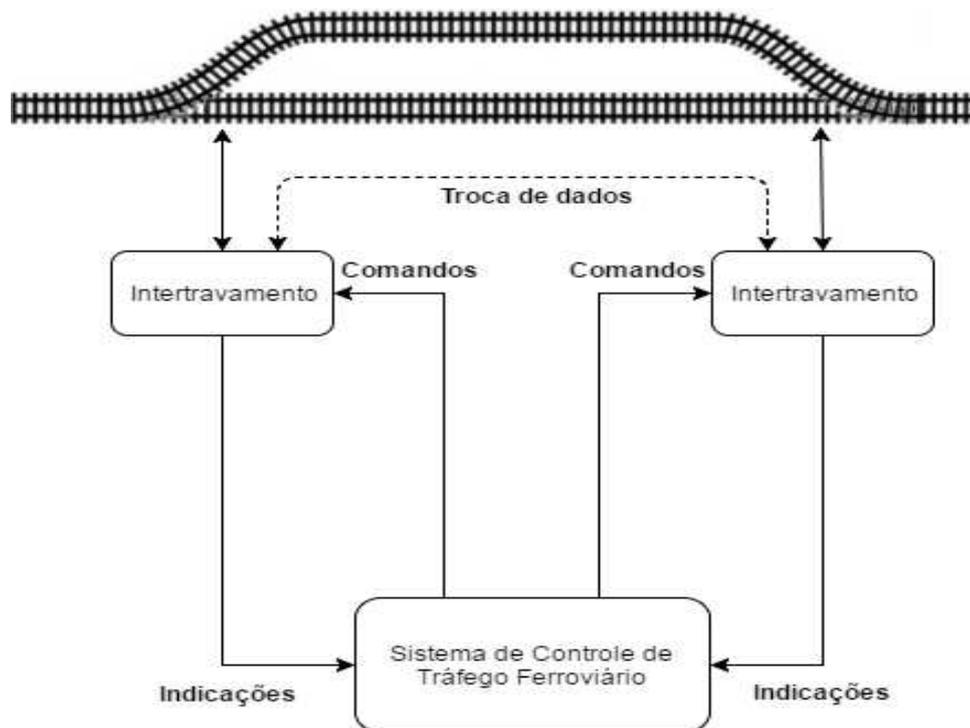
Para que o planejamento ocorra de forma efetiva, torna-se necessário o interligamento dele ao controle de tráfego de uma ferrovia já que a circulação deve refletir o que foi planejado. Por isso, outros elementos devem ser envolvidos no problema e são fundamentais no processo de forma a obter dados de posicionamento dos trens, assim como possibilitar o envio de comandos de permissão de movimento para aderir o planejamento.

A Figura 4 mostra o contexto de um sistema de controle de tráfego ferroviário interligado a elementos da ferrovia por meio de um componente denominado de intertravamento. Em (ŞAHIN, 1999) descreve-se essa interligação de forma abrangente entre um centro de gerenciamento de tráfego, que contém um sistema de controle de tráfego, e elementos da ferrovia no contexto de um gerenciamento de tráfego ferroviário.

### 3.2 Elementos físicos de uma ferrovia

Vários elementos ferroviários têm sido definidos na literatura (RAMOND; MARCOS, 2014). Os principais, de interesse desse trabalho são definidos a seguir.

Figura 4 – Componentes básicos de uma ferrovia



Fonte: Acervo do autor

### 3.2.1 Estações

O conceito de estações é comumente usado como o lugar de embarque e desembarque em trens de passageiros. No entanto, uma definição mais abrangente seria local de parada para um propósito mais genérico que o trem desempenhará, onde tem-se a chegada e saída desse local. Existem várias configurações de estações ou locais de parada, a Figura 5 mostra uma representação típica de uma estação.

Figura 5 – Representação típica de uma Estação

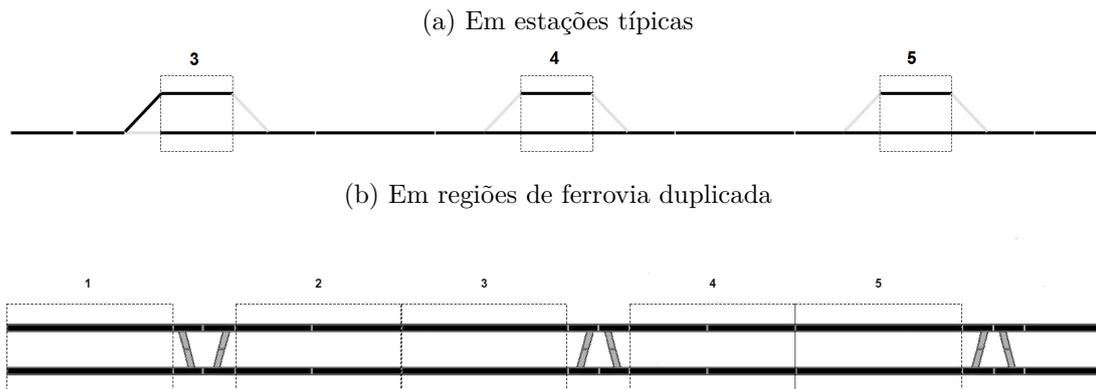


Fonte: Acervo do autor

Entretanto, para o contexto de local de parada, é definido o espaço mínimo de recursos ferroviários onde caiba o tipo de trem desejado. A Figura 6a mostra 3 locais de parada, definidos como quadros tracejados, que pode ser usado para cruzamento, ultrapassagens de trens ou outros propósitos. Cada local de parada tem sua capacidade definida pela quantidade de linhas paralelas que, no contexto deste trabalho, são nomeadas numericamente de baixo para cima. Neste modelo, existem elementos entre locais que são

recursos compartilhados entre os trens para que o deslocamento dos mesmos ocorram em ambos os sentidos (esquerda para direita e direita para esquerda). A linha única entre os locais de parada é denominado de *trecho singelo*. Uma outra abordagem pode ser vista na Figura 6b que corresponde a uma ferrovia de região duplicada e seus respectivos locais de parada, para este caso, uma diferente regra de circulação é adotada e mais tráfego é possível nessa região.

Figura 6 – Locais de Parada



Fonte: Acervo do autor

### 3.2.2 Track

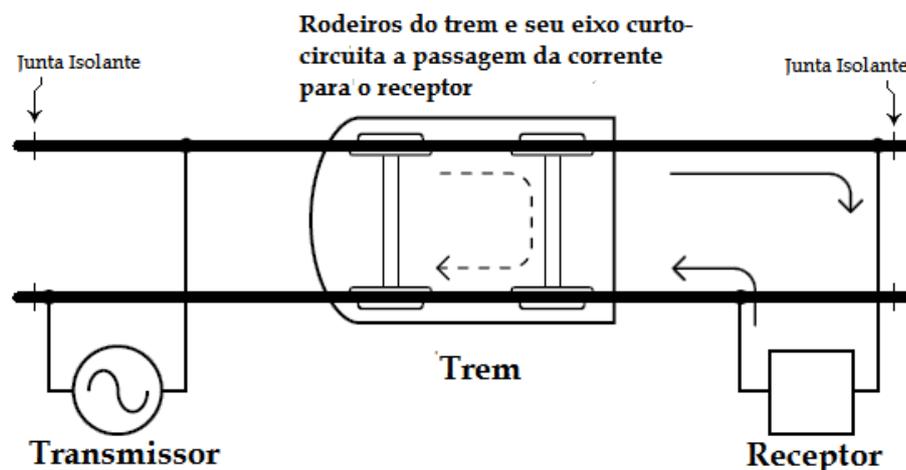
O elemento mais básico de uma ferrovia é denominado de *track*, responsável por compor uma linha quer seja singela ou dentro de um local de parada. Como descrito por (KANSO; MOLLER; SETZER, 2009) e detalhado por (MIURA et al., 1998). Esse dispositivo é um segmento físico separado por juntas isolantes em ambos os lados de forma a detectar a presença de um trem por um circuito de via elétrica ligado a ele.

Uma linha pode ser composta por um ou mais *tracks*. A Figura 7 ilustra seu comportamento, um receptor ligado ao trilho detecta o sinal elétrico recebido de um transmissor também ligado a ele, quando o rodeiro e eixo de trem curto-circuita o sinal no trilho, a corrente é desviada e, conseqüentemente, o sinal não é recebido pelo receptor. Dessa forma, a ausência do sinal elétrico no receptor permite ao intertravamento detectar a presença do trem.

Neste trabalho, a detecção de trem na *track* é representado em vermelho, assim, a Figura 9b ilustra a detecção do trem *T02* na linha 1, do local de parada 5. Da mesma forma, a Figura 10 ilustra a representação dos trens *T01* e *T02* em suas respectivas *tracks* em vermelho.

Do ponto de vista estrutural, *track* consiste essencialmente de trilhos sobrepostos em dormentes e fixados em uma superfície pelo seu lastro. São estruturas longas e grandes

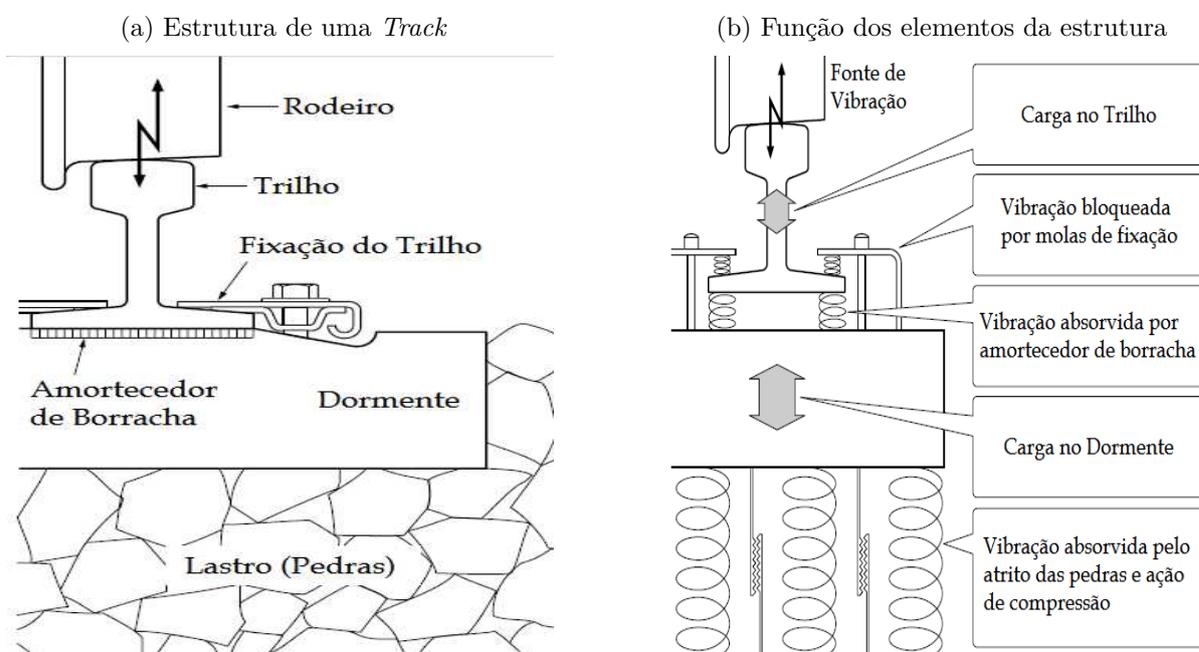
Figura 7 – Funcionamento de detecção de um trem em uma *Track*



Fonte: Adaptado de (TAKASHIGE, 1999)

que se estendem por centenas ou milhares de quilômetros projetadas para aguentar trens rápidos e pesados de forma a ter um bom suporte de seu peso e absorção da vibração causado pelo rodeiro no trilho. As figuras 8a e 8b ilustram essa estrutura e seus componentes.

Figura 8 – Estrutura básica de uma *Track*

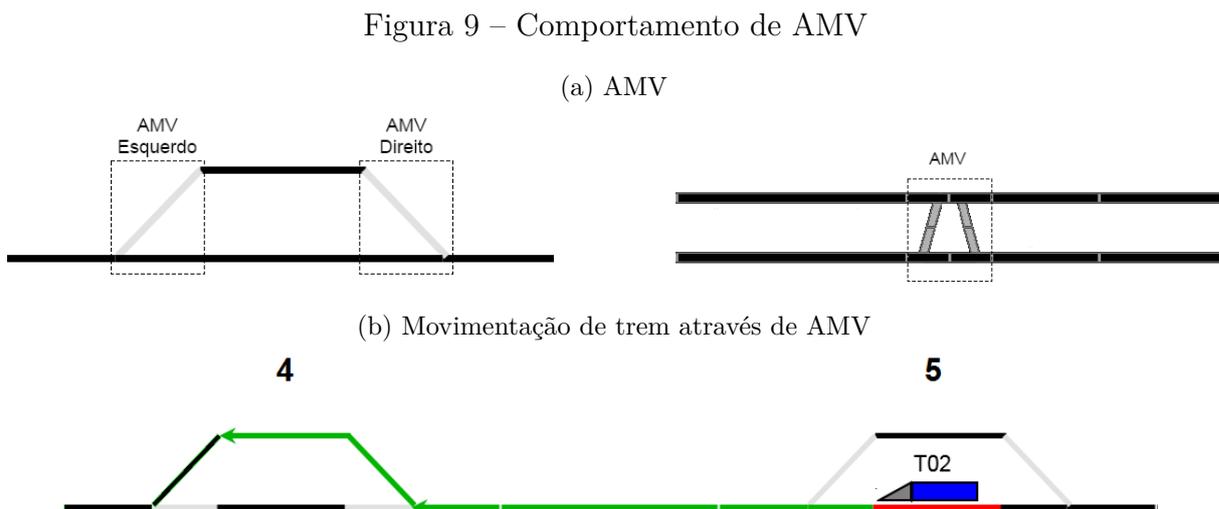


Fonte: (MIURA et al., 1998)

### 3.2.3 Aparelho de Mudança de Via (AMV)

O AMV, também conhecido como circuito de chave ou apenas chave ferroviária, como descrito por (KANSO; MOLLER; SETZER, 2009), é o elemento responsável por permitir um trem mudar de linha. Esses dispositivos são, normalmente, usados como delimitadores entre recursos de local de parada e possibilitam o trânsito de um local de parada para outro, tendo assim, o seu recurso compartilhado no tempo entre vários trens, um por vez. Ele tem as mesmas propriedades que uma *track*, i.e, consegue detectar sem falha a presença de um trem. A Figura 9a mostra AMV para locais de paradas usados para cruzamento e para região duplicada respectivamente.

A Figura 9b ilustra um movimento de um trem do local de parada 5 até o 4. O trem nomeado como *T02* usa o AMV esquerdo do local de parada 5 para ingressar no trecho singelo (sem mudança de linha) e usa o AMV direito do local de parada 4 para ingressar no mesmo com mudança para linha 2. Os segmentos de via em verde definem a autorização do movimento do trem.



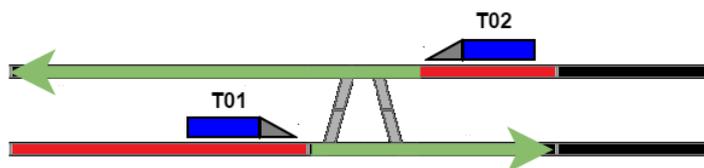
Fonte: Acervo do autor

Por mais que AMV sejam recursos, comumente exclusivos, onde um trem possa usá-lo por vez, como no caso do AMV esquerdo e direito, mostrados na Figura 9a, alguns deles possibilitam o uso simultâneo em contextos de região duplicada. Isso possibilita uso simultâneo de um trem na linha 1 e outro na linha 2 desde que eles não mudem de linha. A Figura 10 ilustra esse comportamento com os trens *T01* e *T02*.

## 3.3 Intertravamento

O intertravamento é o componente diretamente ligado aos elementos físicos da ferrovia, responsável por receber comandos do sistema de controle de tráfego e informações

Figura 10 – AMV usado por 2 trens simultaneamente



Fonte: Acervo do autor

tais como posição dos AMVs, ocupações de *Tracks* (detecção de trens) dentre informações. Sua função vai ainda mais além, uma vez que responde também pela circulação segura de cada trem no tocante a colisões ou danos ao trem e ferrovia. Suas tecnologia e abordagem têm evoluído com o tempo que vão desde componentes eletro-mecânicos construídos com relés até controladores multi-processados denominados de *Solid State Interlocking*. Sua funcionalidade é descrita por (MORLEY, 1994) e (MORLEY, 1997) com mais detalhes.

Normalmente, o SSI é instalado próximos ao AMV, à beira da ferrovia. No contexto da Figura 11, o movimento do trem *T01* é bloqueado pelo intertravamento para não haver colisão com o trem *T02* que já tinha permissão concedida. A sequência de eventos é descrita como:

- inicialmente, o trem *T02* tem a permissão de movimento de saída do local de parada 5 e chegada no local de parada 4. Isso é feito pelo envio de comando de rota do controlador de tráfego via sistema de controle de tráfego ferroviário;
- o controlador de tráfego tenta enviar comando de rota para o trem *T01* para saída do local de parada 4 e chegada de local de parada 5;
- o intertravamento do AMV direito do local de parada obtém informações de seus vizinhos para verificar se é seguro conceder a rota para o trem *T01*;
- o intertravamento do AMV esquerdo do local de parada 5 envia mensagem para o intertravamento do AMV direito do local de parada 4, informando que já existe bloqueio (rota já concedida no sentido contrário para o trem *T02*), e considerando que o trecho entre os 4 e 5 é singelo ocasionando o bloqueio de qualquer movimento;
- o intertravamento do AMV direito do local de parada 4 não concede a rota para o trem *T01*.

O mesmo aconteceria para um comando de rota para o trem *T02* com saída do local de parada 5 e chegada no local de parada 4 pela linha 1. Como *T01* encontra-se nessa linha, o comando de rota de entrada nesse local de parada seria bloqueado. Esse comportamento

Figura 11 – Verificação de conflito pelo Intertravamento



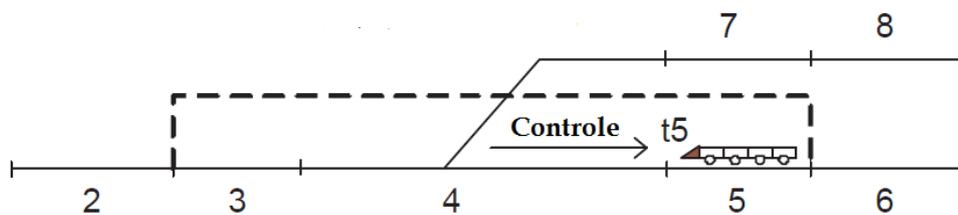
Fonte: Acervo do autor

é denominado de intertravamento de bloco fixo onde o sistema de intertravamento usa as *tracks* da ferrovia e gera dependência de posicionamento entre o conjunto delas.

Uma outra abordagem seria o intertravamento de bloco móvel, também conhecido como *trem frota*, que tem ganhado mais atenção na indústria ferroviária por eliminar algumas dependências de circulação, já que ao invés de cortar a ferrovia em pedaços com suas respectivas dependências, o *bloco móvel* usa um conceito de ocupação em áreas e reserva alguma distância segura a frente do trem de forma que o bloco móvel de um trem não possa ser invadido por outro.

Em (ZAFAR; KHAN; ARAKI, 2012), descrevem-se esses dois tipos de intertravamento. A Figura 12 ilustra esse comportamento para o trem *T05*. A região tracejada é o bloco móvel de controle que se move junto com o trem.

Figura 12 – Intertravamento de bloco móvel



Fonte: (ZAFAR; KHAN; ARAKI, 2012)

### 3.3.1 Sistema de Sinalização

Um outro fator importante no uso de intertravamento referente à segurança dos trens é a inércia. Cada tipo de trem tem suas características de peso, composição, carga e velocidade. Assim eles precisam de uma certa distância percorrida enquanto em frenagem antes de parar totalmente para evitar colisões. Tanto a permissão de movimento (rotas)

quanto a velocidade permitida para trafegar por cada *track* da ferrovia é imposta pelo intertravamento fazendo parte do sistema de sinalização da ferrovia.

A sinalização da ferrovia pode ser descrita como um modelo de três camadas, onde tem-se a camada de comando que pode ser representada pelo sistema de controle de tráfego ferroviário; a camada lógica representada pelo intertravamento e camada física representada pelas *tracks* e AMVs (BANCI; FANTECHI; GNESI, 2004).

O intertravamento tem em sua lógica interna, tanto para o modelo de bloco fixo ou bloco móvel, a configuração de código de velocidade em cada *track*, que é feita com base na característica física dos trens e comprimento das *tracks*. Assim, a existência de uma rota define a velocidade máxima que o trem pode se mover em cada *track* que a compõe. Caso exista uma outra rota no final da primeira, a velocidade é mantida dependendo da configuração do segmento. Caso contrário os sinais nos segmentos são colocados de forma que o trem pare na última *track* que compõe a rota.

O sistema de sinalização define a autorização de movimento seguro de um trem e as velocidades que devem ser obedecidas em cada *track*. Para tanto, precisa-se garantir o cumprimento das velocidades por meio de componentes inseridos dentro dos trens, normalmente conhecidos como *Automatic Train Stop* (ATS) e *Automatic Train Control* (ATC), de forma a aderir as restrições de segurança impostas pelo intertravamento (TAKASHIGE, 1999). Em resumo, eles existem para garantir que uma determinada curva de frenagem seja obedecida pelo trem com base nas informações de elementos de sinalização que são recebidos de forma a possibilitar uma parada segura livre de colisões.

Para os componentes descritos a seguir, obtém-se informações de velocidade máxima permitida do sistema de sinalização por leitura de sinais elétricos analógicos inseridos nos trilhos de cada *track* pelo intertravamento e disponibiliza-se a bordo do trem. Assim, é estabelecido um intervalo para que o condutor se adeque a essa nova velocidade, caso contrário, uma ação automática é tomada.

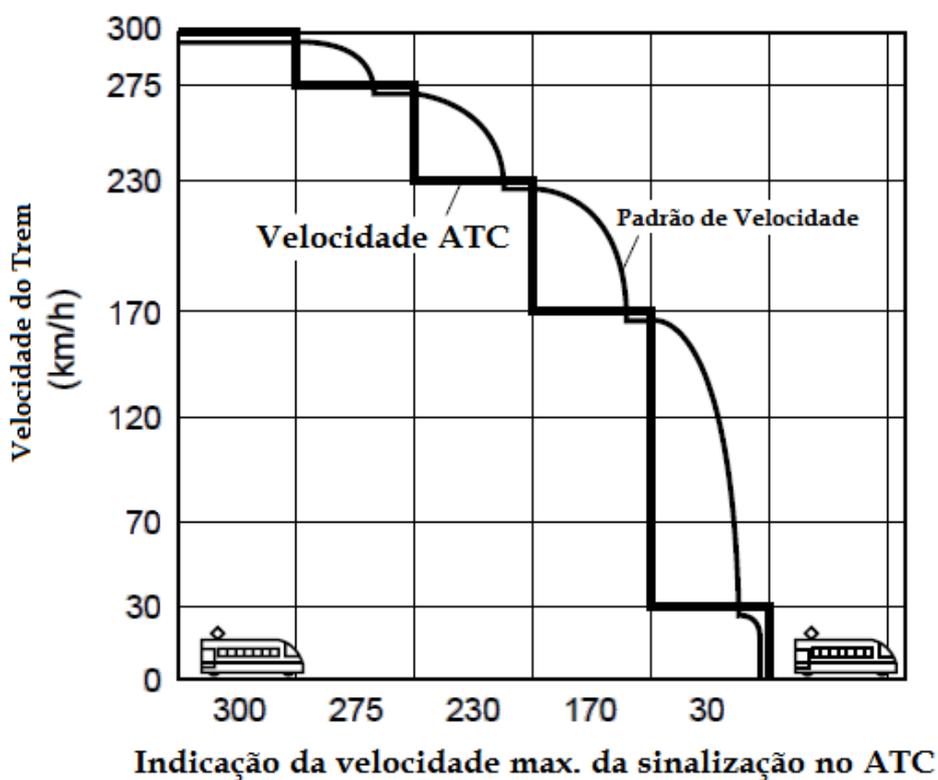
#### 3.3.1.1 *Automatic Train Stop* (ATS)

ATS responde pela emissão de alarme sonoro quando é recebido um sinal de parada, avisando ao condutor do trem para aplicar os freios. Se não for feito, o ATS para o trem de forma automática. Uma outra forma que o faz atuar é quando o trem excede a velocidade máxima permitida dentro da curva de frenagem calculada pelo ATS de forma a conseguir parar dentro da *track* definida como o fim da rota. Neste caso, os freios são automaticamente aplicados para parar o trem.

### 3.3.1.2 Automatic Train Control (ATC)

No ATC, a informação de velocidade máxima é recebida do sistema de sinalização e a velocidade atual do trem é comparada dinamicamente com ela, caso o trem esteja acima do limite, os freios são aplicados automaticamente até que o trem esteja abaixo do limite definido pela sinalização. A Figura 13 ilustra o processo da curva de frenagem monitorada pelo ATC de forma a garantir a parada segura do trem, evitando colisão com o trem posterior. Esse sistema oferece um maior grau de segurança de forma a prevenir colisões que possam ser causadas por erro de condução do trem.

Figura 13 – Curva de frenagem do ATC



Fonte: (TAKASHIGE, 1999)

O ATC, no entanto, tem três desvantagens:

- o tempo de deslocamento entre locais de paradas não pode ser reduzido pela perda provocada pela aplicação de freios em cada etapa da curva de frenagem, já que existe um atraso de leitura da velocidade em sincronia com a aderência a curva de frenagem;
- os freios são aplicados de forma brusca quando o trem atinge a velocidade máxima permitida pela sinalização, gerando uma desaceleração brusca que pode produzir desconforto no caso de trem de passageiros;

- se o requisito for alterado de forma a permitir limites de velocidade maiores pela sinalização, exigirá reconfiguração nos equipamentos do intertravamento envolvido na mudança assim como em equipamentos a bordo da locomotiva.

Por isso, o ATC teve sua evolução para uma versão digital que se utiliza de uma outra abordagem com base no recebimento da informação de detecção do trem a frente do atual e contagem de quantas *tracks* livres existem entre eles. Assim, ele é capaz de calcular vários padrões de frenagem de forma segura, tendo curvas suaves a curvas mais fortes.

A frenagem é aplicada no início de forma mais suave para o conforto maior dos passageiros e em seguida mais forte para uma melhor desaceleração total. Caso o condutor reduza a velocidade gradualmente dentro dos limites da curva de frenagem, o ATC pode aplicar frenagens suaves para compensar erros na aderência da curva.

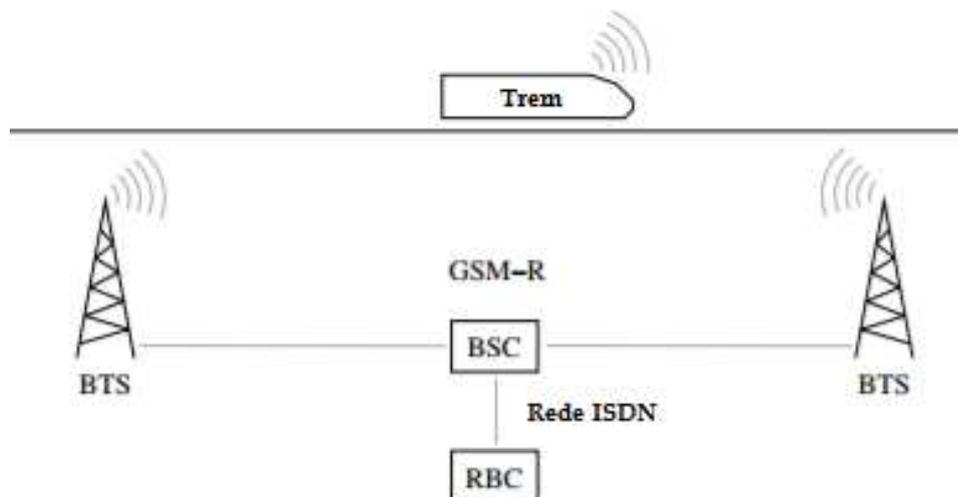
O ATC digital tem algumas vantagens como:

- possui uma leitura melhor de velocidade e assim uma melhor resposta de ação da aderência da curva de frenagem;
- os trens podem andar em velocidades máxima de forma mais efetiva, já que não é necessário desaceleração prévia pois a curva de frenagem se baseia na distância para o próximo trem fazendo com que circulações de vários tipos de trens com configurações diferentes possam ocorrer de forma mais eficiente na malha.

### 3.3.1.3 Abordagem de bloco móvel virtual

(ZIMMERMANN; HOMMEL, 2003) descreve o intertravamento por bloco móvel virtual por meio de comunicação móvel para prover uma melhor produtividade e maior utilização de uma malha ferroviária. Sua arquitetura permite uma circulação com distância mais próxima entre os trens e não baseada no tamanho das *tracks* disponíveis na estrutura da ferrovia. Assim os movimentos dos trens são controlados por troca de mensagens com esse *intertravamento* denominado de *Radio Block Center* (RBC) que foi criado com base na evolução em terceiro nível do modelo *European Train Control System* (ETCS), no qual cada trem verifica, periodicamente, sua integridade e envia informações de integridade e posicionamento do início de sua composição. O autor usa redes de *Petri* estocásticas para modelar e avaliar o comportamento de falha e recuperação do canal de comunicação entre trens e RBC, assim como a troca de informações vitais entre eles. Os resultados numéricos colocaram em perspectiva a especificação da qualidade do serviço de comunicação em comparação a uma melhor utilização da infraestrutura ferroviária. A avaliação do modelo mostrou que o pior caso do cenário de comunicação de dados gera situações de operações de trens inaceitáveis. Assim, essa abordagem é fortemente dependente de uma boa qualidade e disponibilidade de comunicação de dados móveis. A Figura 14 ilustra o ETCS.

Figura 14 – Arquitetura do ETCS



Fonte: (ZIMMERMANN; HOMMEL, 2003)

Posteriormente, várias tecnologias de comunicação de dados móveis foram endereçadas para uso em ferrovias como sistema de sinalização. (SHAFIULLAH; GYASI-AGYEI; WOLFS, 2007) resume a maioria delas e considera o contexto de segurança da circulação usadas nas estratégias de sinalização para definir a distância segura entre trens com base em suas velocidades, reduzindo assim, o intervalo entre a circulação de trens em cada região e, como consequência, aumentando a capacidade de tráfego sem a necessidade de grandes investimentos com ampliação de infra-estrutura.

### 3.3.2 Tolerância a Falhas

Por mais que a integração de um intertravamento que impõe as regras de sinalização aos trens seja usado para garantir a segurança deles, existem situações em que as falhas dos equipamentos ao longo da ferrovia ou a bordo da locomotiva poderiam ser um risco em potencial para a segurança do trens envolvidos. Assim, sistemas de sinalização, como um todo, demandam o uso de um sistema de alta fidelidade e tolerância a falhas, uma vez que informações erradas geradas por falhas entregues aos trens poderiam resultar em perda de vidas humanas ou danos a infraestrutura. Em (CHAKRABORTY, 2009), conceitua-se projetos de sistemas tolerantes a falhas bem como sua aplicação em modelos de sinalização ferroviária em uma ferrovia na Índia.

Em resumo, o objetivo do mecanismo de tolerância a falhas no contexto de segurança de sistemas críticos, como no caso de sistema de sinalização em ferrovias, é localizar os efeitos das falhas de forma que o desempenho do sistema não seja afetado indevidamente por falha de algum componente. Contudo, em casos de falhas críticas, o propósito é o sistema falhar de forma segura.

Falhas, de forma geral, podem acontecer por problemas de alimentação de energia elétrica, por interferência eletromagnética, por um projeto mal concebido ou implantado, bem como por outros fatores. De qualquer forma, mesmo com os melhores esforços, até sistemas eletrônicos modernos são suscetíveis a falhas. Em algumas circunstâncias, devem existir mecanismos contra falhas, de forma a assegurar que sistema continue funcionando mesmo que de forma parcial, priorizando a vida humana, do ambiente, e do próprio sistema.

O princípio básico de projeto de tolerância a falha se baseia em identificar a falha e mascarar seu efeito até que medidas de recuperação do sistema sejam tomadas. Em muitos casos, isso é obtido por meio de sistemas redundantes que precisam ser gerenciados de forma adequada. Assim, para sistemas de missão crítica como o de sinalização ferroviária, os resultados dos elementos redundantes de cada intertravamento são inspirados no problema de gerais *Byzantine*, descrito em (LAMPOR; SHOSTAK; PEASE, 1982).

Além disso, uma característica fundamental do sistema que envolve o intertravamento é sua segurança intrínseca. Para que um trem cumpra uma rota entre dois locais de paradas, o ATC precisa ler a codificação de velocidade colocada no trilho pelo intertravamento como descrito na Seção 3.3.1. A ausência desse sinal faz com que o ATC pare o trem como medida de segurança. Outro exemplo pode ser percebido na Figura 7, como o transmissor alimenta o receptor, a ausência de sinal no transmissor será interpretado pelo receptor como ocupação, impedindo que outros trens sejam enviados para o local pelo intertravamento. Esses dois comportamentos são exemplos de falhas que o sistema naturalmente leva a uma condição de segurança que é a parada total do trem.

### 3.4 Sistema de Controle de Tráfego Ferroviário

O Sistema de Controle de Tráfego Ferroviário tem o propósito de suportar as ações executadas pelo controlador de tráfego de forma a prover a autorização de movimentos de trens (rotas), assim como obter informações da ferrovia provida pelo intertravamento para sua tomada de decisão (ŞAHIN, 1999). No entanto, para poder ter uma visão geral do cenário de circulação e ter um planejamento futuro no tempo, é utilizada uma ferramenta de suporte a decisão denominado de Gráfico de Trens. Por meio dela, pode-se ter informações de forma visual de toda a topologia da ferrovia, do planejamento realizado para circulação assim como informações relacionadas aos tipos de trens (BARBER et al., 2004). A Figura 3 é um exemplo dessa ferramenta.

De acordo com (MISSIKOFF, 1998), as principais responsabilidades do controlador de tráfego são:

- rápida identificação e solução de conflitos de circulação de trens;

- evitar o efeito de *bola de neve*, no qual o atraso de um trem possa gerar atrasos em cascata em trens subsequentes;
- monitoramento contínuo da evolução de tráfego dos trens dentro de sua responsabilidade;
- despachar trens especiais não planejados para satisfazer demandas comerciais ou necessidade de manutenção;
- rápida identificação de anormalidades na operação da rede ferroviária relativos a materiais rodantes, *tracks* e equipamentos acoplados a ferrovia;
- supervisão de períodos de utilização de linhas, *tracks* ou AMVs para o propósito de manutenção;
- monitoramento de trens que tiveram atraso de circulação em comparação a seu planejamento;
- curta projeção da evolução do tráfego e rápida identificação de possíveis conflitos entre os trens;
- análise de impacto de anormalidades detectadas no planejamento de circulação de trens;
- minimizar os efeitos negativos devido a anormalidades utilizando estratégias para prevenir conflitos já identificados;
- modificações em tempo real no planejamento de circulação de trens de forma a atender a estratégia definida para resolução de conflito da ferrovia;
- implementar a estratégia de identificação de conflitos da ferrovia e quando adequado enviar comandos ao intertravamento de forma a modificar jornadas de trens.

Assim, mesmo que a atividade de planejamento de circulação de trens seja realizada por um funcionário dedicado a essa função, existe ainda o esforço de ter que definir os horários de partida e de chegada em cada local de parada no gráfico que sejam livres de conflitos para ter a adesão na execução pelo controlador de tráfego, e ainda ajustá-los quando o atraso de um trem gerar conflitos no planejamento. Para ferrovias grandes, essa atividade se torna ainda mais complexa e a efetividade do planejamento pode não aproveitar bem a sua infraestrutura, já que o problema é NP-Difícil para ferrovias com trechos de linha singela (CAPRARA; FISCHETTI; TOTH, 2002). Mesmo para trechos com mais linhas paralelas, dependendo da sua saturação pode ser tornar uma atividade complexa.

Existem diferentes tipos de ferrovias e com propósitos diferentes. Basicamente são classificadas como dois sub-problemas, de acordo com a periodicidade dos trens, consistindo-se em um problema de planejamento de trens periódico ou não periódico:

**periódicos** - cada jornada de trens acontece em períodos específicos e cada local de parada tem um horário bem definido de chegada e de partida; muitos trens de passageiros operam nesse modo e alguns trens de carga também (PEETERS, 2003).

**não periódicos** - geralmente usado em trens de carga ou ferrovias com um nível de saturação alto, nas quais cada composição não tem um horário fixo de partida e de chegada em cada local de parada, de forma que um trem pronto deve ser colocado no planejamento para iniciar sua jornada, buscando-se minimizar o máximo o tempo entre partidas (CAPRARA; FISCHETTI; TOTH, 2002).

### 3.5 Manutenção Preventiva de Via

Um ponto importante a ser considerado nesse contexto é a frequente passagem de trens sobre os trilhos causar a dispersão e deformação do lastro e algumas vezes em sua superfície inferior. Isso resulta em pequenas irregularidades e distorções em sua estrutura. Além disso, ela faz com que a região em locais de juntas soldadas ceda e aumente a rugosidade da superfície do trilho.

Quando uma locomotiva ou vagão passa por trilhos com essas irregularidades, ocorrem movimentos irregulares com locais mais altos e outros mais baixos, bem como instabilidade causada por movimentos laterais em cima do trilho. Como consequência, em irregularidades em locais muito próximos, pode ocorrer vibração de alta frequência resultando em uma maior peso e níveis de ruído. Em casos de uma considerável irregularidade lateral, isto é, em apenas um lado do trilho em relação a outro, pode ocorrer descarrilhamento devido a desvios de inclinação ou solavancos que ocasionam perda do eixo de alinhamento com a ferrovia (MIURA et al., 1998). Em casos que gerem descarrilhamento, pode-se interromper totalmente ou parcialmente a produção de uma ferrovia tendo uma recuperação demorada.

Em (LIU; SAAT; BARKAN, 2012), foi realizada uma análise estatística para verificar as causas de acidentes por descarrilhamento de trens entre 2001 e 2010 em ferrovias na França e concluiu-se que trilho quebrado e defeitos em sua geometria tem uma das maiores frequências nesses eventos. Isso enfatiza a importância da manutenção preventiva de via para evitar esses problemas. No entanto, a realização da manutenção significa tornar segmentos de via indisponíveis para circulação por um período para que as atividades de diagnóstico e reparo sejam feitas nela.

Se por um lado há a possibilidade de realizar essa manutenção em horários de parada da ferrovia ou pouco tráfego, por outro quando não possível, a realização entre a circulação de um trem e outro pode ser arriscado para a equipe de manutenção na ferrovia. Assim, o uso do intertravamento para bloquear a região de forma segura pode ser usado.

Dessa forma, existem várias pesquisas na tentativa de minimizar o custo operacional pela indisponibilidade para manutenção de segmentos da ferrovia. Esse problema é conhecido como *Preventive Maintenance Scheduling Problem* (PMSP).

Em (BUDAI; HUISMAN; DEKKER, 2006), o PMSP é descrito e formulado matematicamente. Para solução, aplica-se uma abordagem por heurística gulosa. Em (MORADI; GHOMI; ZANDIEH, 2011) o problema é tratado como uma otimização bi-objetiva na tentativa de maximizar a produtividade da ferrovia e minimizar a interrupção da circulação por atividades de manutenção, de forma que todos os diagnósticos e reparos planejados sejam realizados.

### 3.6 Considerações finais

Para problemas de circulação de trens periódicos, o planejamento é feito a longo prazo e definido como rotina na circulação de trens, atrasos de trens não são comuns. Quando ocorrem, busca-se regularizar sua periodicidade. Para circulação de trens não periódicos, o atraso ou desvio do planejamento é inerente ao tipo do problema e ajustes no planejamento são, normalmente, necessários.

Este trabalho busca prover otimização de planejamento de circulação de trens, espelhado no *Gráfico de Trens* (Figura 3), de forma a obter-se um ganho de desempenho com a aderência ao cumprimento desse planejamento pelo controlador de tráfego quer seja para modelos periódicos quanto não periódicos.

## 4 Modelagem para Planejamento de Circulação de Trens

O modelo proposto para o problema descrito neste trabalho prevê um cenário composto por uma ferrovia com circulação de trens de carga não periódicos, compartilhando recursos com trens de passageiros periódicos. Elementos práticos como abastecimento e troca de equipe da tripulação também são considerados.

Utiliza-se o conceito de local de parada para permitir um contexto misto no qual possa ser otimizado alguns trechos permitindo paradas em linhas singelas e outros, que não permite, com múltiplas linhas paralelas, independente da quantidade. Isso característica, um mapeamento dos modelos de intertravamento de bloco fixo e móvel descritos na Seção 3.3 diretamente para os elementos de local de parada.

Para o caso, todavia, de modelos de bloco móvel virtual, ajustes precisariam ser efetuados na definição dos dados de entrada de forma a considerar tamanhos variados de local de parada com base na característica de cada trem.

### 4.1 Modelagem Matemática

A modelagem matemática proposta neste trabalho trata-se de uma extensão do modelo proposto em (TORMOS et al., 2008). Assim, algumas variáveis, parâmetros e restrições foram obtidas daquele modelo, tendo outros elementos modificados e adicionados.

#### 4.1.1 Dados de entrada

Para a representação de uma ferrovia no do problema de planejamento de circulação de Trens, é necessária a definição dos seguintes dados de entrada:

- $\mathbf{T}$ : conjunto de  $k$  trens,  $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ .
- $\mathbf{T}_C \subseteq \mathbf{T}$ : subconjunto do total de trens, representando apenas os trens que já estejam circulando na ferrovia no momento de início do planejamento.
- $\mathbf{T}_{new} \subseteq \mathbf{T}$ : subconjunto de trens que necessitam realizar a partida dos locais de parada de sua origem, mas considerando seu acesso a linha férrea após o momento definido para sua partida.

- $\mathbf{T} = \mathbf{T}_C \cup \mathbf{T}_{new}$  e  $\mathbf{T}_C \cap \mathbf{T}_{new} = \emptyset$ : subconjuntos de trens mutuamente excludentes; ou o trem está atualmente em circulação ou o trem está planejado para circular em um momento posterior.
- $\mathbf{l}_i$ : conjunto de linhas paralelas, representadas por valores inteiros, definidas como local de parada, conforme a Seção 3.2.1, utilizadas para realização de cruzamento ou ultrapassagem, as quais devem ter o tamanho suficiente para realizar a parada completa do trem com maior comprimento em circulação ou circulação planejada.
- $\mathbf{SW} = \{sw_1, sw_2, \dots, sw_s\}$ : conjunto de  $sw$  Aparelhos de Mudança de Via (AMV), a serem considerados no problema de forma a possibilitar que os trens acessem outras linhas, sempre localizados a esquerda ou a direita de um local de parada  $\mathbf{l}_i$ , sem que, necessariamente, todos os locais de parada tenham um AMV associado anteriormente, posteriormente ou ambos.
- $sw_i^l \in \mathbf{SW}$ : define um AMV localizado à esquerda do local de parada  $i \in L$ .
- $sw_i^r \in \mathbf{SW}$ : define um AMV localizado à direita do local de parada  $i \in L$ .
- $\mathbf{L} = \{l_0, l_1, \dots, l_m\}$ : define locais de parada sequenciais que podem ser visitados pelos trens, interligados consecutivamente, i.e.  $\mathbf{l}_i$  e  $\mathbf{l}_{i+1}$ , por um ou mais *tracks*.
- $\mathbf{l}_s^t \in \mathbf{L}$ : define local de parada inicial para o trem  $t$ .
- $\mathbf{l}_e^t \in \mathbf{L}$ : define local de parada final para o trem  $t$ .
- $t \in \mathbf{T}_D \leftrightarrow (\forall \mathbf{l}_i^t : 0 \leq i < n_t, \exists \mathbf{l}_j \in \{\mathbf{L} \setminus \{\mathbf{l}_m\}\} : \mathbf{l}_i^t = \mathbf{l}_j \wedge \mathbf{l}_{i+1}^t = \mathbf{l}_{j+1})$ : subconjunto finito de trens viajando em direção *abaixo*, i.e., sentido porto ou direção exportação para trens de carga ou direção estação inicial (oeste), para contextos de trens de passageiros.
- $t \in \mathbf{T}_U \leftrightarrow (\forall \mathbf{l}_i^t : 0 \leq i < n_t, \exists \mathbf{l}_j \in \{\mathbf{L} \setminus \{\mathbf{l}_0\}\} : \mathbf{l}_i^t = \mathbf{l}_j \wedge \mathbf{l}_{i+1}^t = \mathbf{l}_{j-1})$ : subconjunto finito de trens viajando em direção *acima*, i.e., sentido mina ou direção importação para trens de carga ou direção estação final (leste), para contextos de trens de passageiros.
- $\mathbf{T} = \mathbf{T}_D \cup \mathbf{T}_C$  e  $\mathbf{T}_D \cap \mathbf{T}_C = \emptyset$ : define a impossibilidade de um trem viajar em duas direções diferentes.
- $C_i^t$ : representa a duração de uma parada adicional comercial em  $i \in \mathbf{L}$ , para o trem  $t \in \mathbf{T}$ , a ser considerada no planejamento, o que geralmente tem o propósito de troca de equipe de tripulação, embarque ou desembarque de passageiros, abastecimento, entre outros.

- $\mathbf{H} = \{H1_1^j, H2_1^j, \dots, H1_n^j, H2_n^j\}$ : conjunto finito de interdições, definidos pelo seu início e fim, que devem ser realizadas em locais de paradas da ferrovia, com possibilidade de haver mais de uma manutenção no mesmo local.
- $H1_{1_i}^j \in \mathbf{H}$ : momento de início de interdição da linha ferroviária  $j$  pertencente ao local de parada  $\mathbf{l}_i$  para realização de serviços de manutenção preventiva, com base na definição do problema descrito na Seção 3.5.
- $H2_{1_i}^j \in \mathbf{H}$ : momento de término de interdição da linha ferroviária  $j$  pertencente ao local de parada  $\mathbf{l}_i$  para realização de serviços de manutenção preventiva, com base na definição do problema descrito na Seção 3.5.
- $\mathbf{HS} = \{HS1_i^j, HS1_i^j, \dots, H1_n^m, H2_n^m\}$ : conjunto de interdições, definidos pelo seu início e fim, que devem ser realizadas entre locais de paradas da ferrovia, sendo possível haver mais de uma manutenção no mesmo local.
- $HS1_i^j \in \mathbf{HS}$ : define o momento de início de interdição da linha singela ferroviária entre os locais de parada  $\mathbf{i} \in \mathbf{L}$  e  $\mathbf{j} \in \mathbf{L}$  para realização de serviços de manutenção preventiva, com base na definição do problema descrito na Seção 3.5.
- $HS2_i^j \in \mathbf{HS}$ : define o momento de término de interdição da linha singela ferroviária entre os locais de parada  $\mathbf{i} \in \mathbf{L}$  e  $\mathbf{j} \in \mathbf{L}$  para realização de serviços de manutenção preventiva, com base na definição do problema descrito na Seção 3.5.

#### 4.1.2 Variáveis

Para dar suporte a este modelo as seguintes variáveis de decisão devem ser consideradas:

- $\mathbf{T}_i \subseteq \mathbf{T}_C$ : subconjunto dos trens em circulação que estão atualmente no local de parada  $\mathbf{i} \in \mathbf{L}$ .
- $\mathbf{J}_t = \{\mathbf{l}_0^t, \mathbf{l}_1^t, \dots, \mathbf{l}_{n_t}^t\}$ : conjunto de todas as jornadas de um trem  $t$ , isto é, a lista de locais de parada por onde o trem passou, construído dinamicamente entre os locais de parada inicial  $\mathbf{l}_s^t$  e final  $\mathbf{l}_e^t$ , descrito por meio de uma sequência ordenada de locais de parada visitados por um trem, de forma que  $\forall t \in \mathbf{T}, \exists \mathbf{J}_t : \mathbf{J}_t \subseteq \mathbf{L}$ ; bem como  $\mathbf{l}_i^t$  e  $\mathbf{l}_{n_t}^t$  representam o  $i$ -ésimo e o último local de parada visitados pelo trem  $t$ , respectivamente.
- $s_i^t \in \mathbf{l}_i^t$ : define qual linha ferroviária foi utilizada pelo trem  $t$  no local de parada  $\mathbf{i} \in \mathbf{J}_t$ .
- $R_i^t$ : define o tempo de recepção do trem  $t \in \mathbf{T}_C$  no local de parada  $\mathbf{i} \in \mathbf{L}$  onde  $\mathbf{i} \in \mathbf{J}_t$ , o qual representa o intervalo entre a chegada do trem  $t$  e a liberação de todos

os recursos ferroviários entre o local de parada anterior e  $i$  por  $t$ , considerando a velocidade e inércia de  $t$  em  $i$ .

- $E_i^t$ : define o tempo de expedição do trem  $t \in \mathbf{T}$  no local de parada  $i \in \mathbf{L}$ , onde  $i \in \mathbf{J}_t$ , o qual representa o intervalo entre a partida do trem  $t$  e a liberação total de todos os recursos desse local de parada por esse trem, considerando valores inerciais e de velocidade.
- $dep_i^t$ : define o horário de partida do trem  $t \in \mathbf{T}_C$  do local de parada  $i \in \mathbf{J}_t \setminus \{l_{n_t}^t\}$ .
- $arr_i^t$ : define o horário de chegada do trem  $t \in \mathbf{T}_C$  no local de parada  $i \in \mathbf{J}_t$ .
- $\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t$ : define o tempo de viagem do trem  $t$  entre os locais de parada  $i \in \mathbf{L}$  e  $i+1 \in \mathbf{L}$ , o qual é determinado com base em tempos reais históricos de cada classe de trens, ou utilizando-se  $\Delta S_i / Vm_t$ , onde  $\Delta S_i$  é a distância a ser percorrida entre  $i$  e  $i+1$  e  $Vm_t$  é a velocidade média máxima do trem  $t$  definida pelo usuário, como característica do modelo ferroviário.
- $\Gamma_{l_i^t}$ : define a diferença de tempo de viagem causada pela aceleração do trem  $t$  no local de parada  $l_i^t \in \mathbf{J}_t$ , a qual depende do peso do trem, comprimento do segmento de local de parada e distância entre os locais de parada anterior e atual, sendo utilizado um parâmetro  $\alpha \in \mathbb{R} : 0 < \alpha < 1$  para o tempo de viagem usado, e portanto para cada tipo de trem  $\Gamma_{l_i^t} = \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t * \alpha^t$ .
- $\Gamma'_{l_i^t}$ : define a diferença de tempo de viagem causada pela desaceleração do trem  $t$  no local de parada  $l_i^t \in \mathbf{J}_t$ , a qual depende do peso do trem, comprimento do segmento de local de parada e distância entre os locais de parada anterior e atual, sendo utilizado um parâmetro  $\beta \in \mathbb{R} : 0 < \beta < 1$  para o tempo de viagem usado, de forma que cada tipo de trem  $\Gamma'_{l_i^t} = \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t * \beta^t$ .

### 4.1.3 Restrições

Para o problema de planejamento de circulação de Trens, é necessário que as restrições de programação linear e inteira mista sejam capazes de refletir as regras de tráfego, a utilização da topologia da infra-estrutura física da ferrovia, assim como atender as necessidades do usuário em obter soluções viáveis.

**tempo de viagem:** o tempo necessário para que o trem  $t$  parta do local de parada  $l_i$  e chegue até o local de parada  $l_{i+1}$ , representado por  $\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t$ . Essa restrição garante que haja a consistência nos horários do deslocamento dos trens tendo a chegada posterior a sua partida como demonstrado na Equação 4.1. Dessa forma,

ela é responsável pela garantia da liberação dos recursos ferroviários compartilhados conforme definido nas Seções 3.2.1 e 3.3.

$$arr_{i+1}^t = dep_i^t + \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t \quad (4.1)$$

**parada comercial:** cada trem  $t \in \mathbf{T}$  que possua paradas comerciais deve ter a partida compatível com o tempo necessário para realização das atividades. Esta restrição garante que a saída do trem deverá respeitar a execução das atividades comerciais necessárias, por meio do atraso de no mínimo de  $C_i^t$  no local de parada  $i \in \mathbf{L}$  conforme Equação 4.2.

$$dep_i^t \geq arr_i^t + C_i^t \quad (4.2)$$

**parada para manutenção:** uma linha férrea dentro de um local de parada é bloqueada por um intervalo para realização dos serviços necessários de manutenção preventiva. Dessa forma, neste período nenhum trem pode ser direcionado para essa linha tendo como consequência a redução da capacidade do local de parada neste intervalo como mostrado na Equação 4.3.

$$\forall t \in \mathbf{T}_C : dep_j^t < H1_{1_i}^j \vee arr_j^t > H2_{1_i}^j \quad (4.3)$$

Similarmente, em interdições para manutenção preventiva em linhas singelas fora de um local de parada, todos os elementos de via entre os locais de parada ficam bloqueados de forma que nenhum trem possa ser direcionado a ele durante o período de bloqueio conforme Equações 4.4 e 4.5.

$$\forall t \in \mathbf{T}_U : \exists \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t \rightarrow dep_i^t > HS2_i^{(i+1)} \wedge arr_{(i+1)}^t < HS1_i^{(i+1)} \quad (4.4)$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_D : \exists \Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t \rightarrow dep_i^t > HS2_i^{(i-1)} \wedge arr_{(i-1)}^t < HS1_i^{(i-1)} \quad (4.5)$$

**horário de partida:** Não é permitida partida de mais de um trem de um local de parada quando existir um ou mais AMV antes do próximo local de parada. Este contexto é definido em trechos singelos. No entanto, este comportamento pode ser permitido se o trecho singelo for considerado como local de parada ao definir um ou mais dos seus segmentos como local de parada. Assim, como definido na Equação 4.6, em casos de trechos singelos ou mesmo AMV indisponíveis por trens estarem fazendo seu deslocamento de um local de parada para outro, o horário de partida para o trem  $t$  deve ser posterior ou o mesmo que o fim do deslocamento do último evento entre:

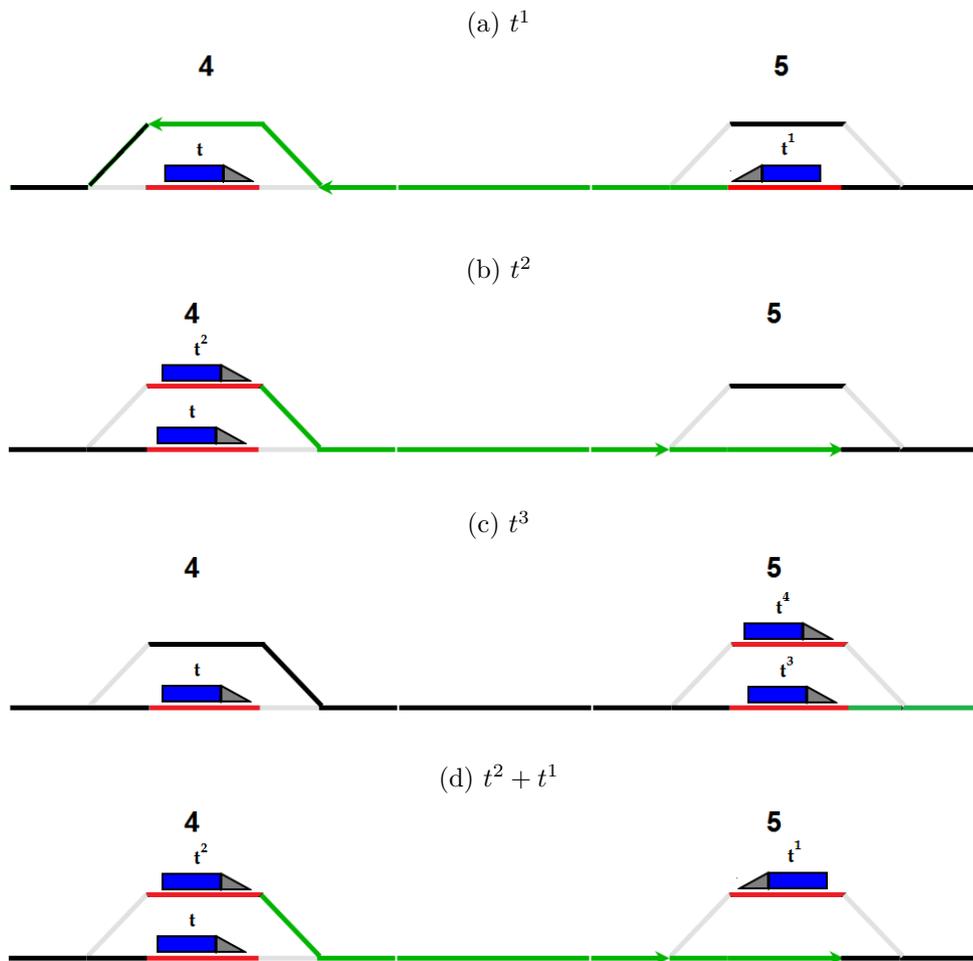
- partida de outro trem  $t^1 \in \mathbf{T}_C$  do mesmo local de parada  $i$  e na mesma direção como mostrado no exemplo da Figura 15a;

- chegada de outro trem  $t^2 \in \mathbf{T}_C$  no mesmo local de parada  $i$  e em direção oposta como mostrado no exemplo da Figura 15b;
- partida de outro trem  $t^3 \in \mathbf{T}_C$  do próximo local de parada  $(i + 1)$  para  $t^3 \in \mathbf{T}_U$  e  $(i - 1)$  for  $t^3 \in \mathbf{T}_D$ . Este evento só deverá ser considerado se o próximo local de parada tinha todas as suas linhas ocupadas antes da partida de  $t^3$  como mostrado no exemplo da Figura 15c onde a prioridade de circulação é do trem  $t^3$  sobre  $t^4$  por escolha pontual do controlador de tráfego.

$$\forall i \in \mathbf{L} : \exists sw_i^r \therefore dep_i^t \geq arr_i^t + \max(\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^{t^1} + R_{i+1}^{t^1}, \Delta_{(i+1) \rightarrow i}^{t^2} + R_i^{t^2}),$$

$$(|\mathbf{T}_{(i+1)}| = |\mathbf{l}_{(i+1)}| \rightarrow \Delta_{(i+1) \rightarrow (i+2)}^{t^3} + E_{i+1}^{t^3}) \wedge (|\mathbf{T}_{(i+1)}| \neq |\mathbf{l}_{(i+1)}| \rightarrow 0) \quad (4.6)$$

Figura 15 – Cenários de espera por partida



Fonte: Acervo do autor

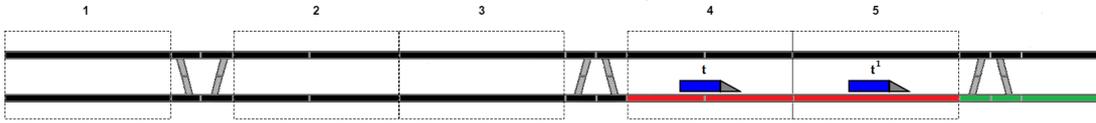
Estes cenários podem acontecer de forma unificada dependendo do planejamento de circulação. No exemplo da Figura 15d, a ordem de prioridade de circulação seria  $t^2$ ,

$t^1$  e em seguida  $t$ . Assim, o horário de partida de  $t$  acontece após chegada completa de  $t^1$  no local de parada 4, isto é, chegada livrando todos os recursos ferroviários ocupados por  $t^1$  fora do local de parada.

Por outro lado, se não houver AMV entre o local de parada atual e o próximo, o horário de partida precisa ser posterior a liberação do próximo local de parada pela última partida de trem na mesma linha ferroviária conforme definido na Equação 4.7 e ilustrado na Figura 16.

$$\forall \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^r \wedge (s_i^t = s_{(i+1)}^t) \therefore dep_i^t \geq dep_i^{t^3} + E_i^t \quad (4.7)$$

Figura 16 – Espera por partida sem AMVs entre locais de parada



Fonte: Acervo do autor

Deve ser considerado a mesma analogia nas equações se o cenário for no sentido contrário de circulação entre locais de parada  $\mathbf{i} \rightarrow (\mathbf{i} - 1)$ .

**parada de trens apenas em locais de parada:** não é permitido um trem parar fora de um dos locais de parada definidos no problema (por exemplo em trechos de linha singela) conforme Equações 4.8 e 4.9.

$$\forall t \in \mathbf{T}_U, \exists dep_i^t \in \mathbb{R} : \mathbf{i} \in \mathbf{L} \rightarrow \exists arr_{(i+1)}^t \in \mathbb{R} : (\mathbf{i} + 1) \in \mathbf{L} \quad (4.8)$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_D, \exists dep_i^t \in \mathbb{R} : \mathbf{i} \in \mathbf{L} \rightarrow \exists arr_{(i-1)}^t \in \mathbb{R} : (\mathbf{i} - 1) \in \mathbf{L} \quad (4.9)$$

**movendo-se para uma linha ferroviária diferente:** só é permitido um trem sair de uma linha férrea para outra nos casos onde tiver um AMV entre a origem e o destino do movimento conforme definido na Equação 4.10 e ilustrado na Figura 15a para o trem  $t^1$ .

$$s_i^t \neq s_{(i+1)}^t \leftrightarrow \forall \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t \in \mathbb{R} : \mathbf{i} \in \mathbf{L}, \exists sw_i^r \in \mathbf{SW} \quad (4.10)$$

**limite de capacidade em local de parada:** só pode haver deslocamento de um trem para um local de parada  $\mathbf{i}$  ( $\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t$ ) se houver linha disponível conforme definido na Equação 4.11.

$$\forall \mathbf{i} \in \mathbf{L}, \forall t \in \mathbf{T}_C, \exists \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t \in \mathbb{R} \leftrightarrow |\mathbf{T}_{(i+1)}| < |(\mathbf{i} + 1)| \quad (4.11)$$

**evitando *deadlock* em ultrapassagens:** é permitido ultrapassagem de trens em qualquer local de parada que tenha mais de uma linha férrea (Capacidade  $> 1$ ). No entanto, este tipo de cenário, proibido em vários modelos matemáticos encontrados na literatura, conhecido como *deadlock*, pode levar ao bloqueio da circulação de toda a ferrovia. Apesar de terem sido descritos mecanismos de prevenção dessas situações, tais como verificações recursivas computacionalmente complexas (FANTI; GIUA; SEATZU, 2006), e listas de regras específicas para procurar por recursões (PACHL, 2011), reservas de linhas férreas dentro de locais de parada, usando estes mecanismos podem, substancialmente, aumentar o tempo de processamento. Assim, essas regras são simplificadas neste modelo, de forma adicionar restrições extras para evitar várias camadas de recursão e, dessa forma, ter-se um desempenho satisfatório mesmo que haja certa perda de precisão. Dessa forma, o modelo fica livre de *deadlock*, Por meio da Equação 4.12, que bloqueia o movimento do trem nestes casos.

$$\forall i \in \mathbf{L}, \forall x \in \mathbf{T}_C : \mathbf{T}_x = \{t \in \mathbf{T}_C : t \neq x, \mathbf{J}_t \cap \mathbf{J}_x \neq \emptyset\} \text{ and}$$

$$Count(t, \mathbf{i}) = \begin{cases} \sum_{x \in \mathbf{T}_U, x \in \mathbf{T}_i} 1 + Count(x, \mathbf{i} + \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge \nexists sw_i^r) \\ \sum_{x \in \mathbf{T}_D, x \in \mathbf{T}_i} 1 + Count(x, \mathbf{i} - \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge \nexists sw_i^l) \\ \sum_{x \in \mathbf{T}_U, x \in \mathbf{T}_i} 1 & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge \exists sw_i^r) \\ \sum_{x \in \mathbf{T}_D, x \in \mathbf{T}_i} 1 & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge \exists sw_i^l) \end{cases}$$

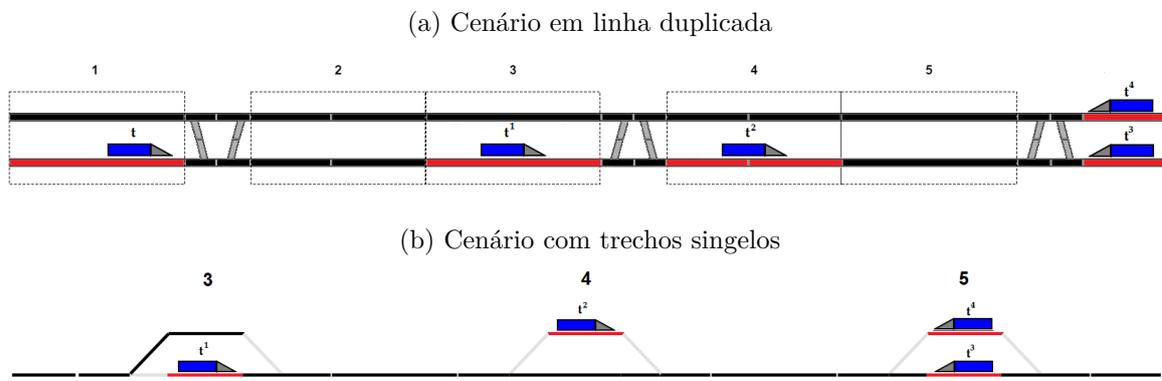
$$AfterSW(t, \mathbf{i}) = \begin{cases} AfterSW(t, \mathbf{i} + \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge \nexists sw_i^r) \\ AfterSW(t, \mathbf{i} - \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge \nexists sw_i^l) \\ \mathbf{i} + \mathbf{1} & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge \exists sw_i^r) \\ \mathbf{i} - \mathbf{1} & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge \exists sw_i^l) \end{cases}$$

$$SumTrains(t, \mathbf{i}) = \begin{cases} |\mathbf{T}_i| + SumTrains(t, \mathbf{i} + \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge \nexists sw_i^r) \\ |\mathbf{T}_i| + SumTrains(t, \mathbf{i} - \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge \nexists sw_i^l) \\ |\mathbf{T}_i| & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge \exists sw_i^r) \\ |\mathbf{T}_i| & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge \exists sw_i^l) \end{cases}$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_C, \forall \mathbf{i} \in \mathbf{L} : Count(t, \mathbf{i} + \mathbf{1}) = (|\mathbf{i} + \mathbf{1}| - 1) \wedge SumTrains(t, AfterSW(t, \mathbf{i} + \mathbf{1})) \geq |AfterSW(t, \mathbf{i} + \mathbf{1})| \rightarrow \nexists \Delta_{\mathbf{i} \rightarrow (\mathbf{i} + \mathbf{1})}^t \in \mathbb{R} \quad (4.12)$$

Como exemplo prático, pode ser considerado o cenário da Figura 17a. Se o planejamento nesse ponto definir a prioridade para o movimento de um dos trens  $t$ ,  $t^3$  ou  $t^4$  não há riscos de *deadlock*. Para o trem  $t^2$ , o seu movimento já encontra-se bloqueado sem ocorrência de *deadlock*, pois a movimentação de  $t^3$  ou  $t^4$  o desbloquearia. Para prioridade do trem  $t^1$  que só tem a opção de ir para o local de parada 4 pela linha 2 causaria *deadlock* uma vez que bloquearia a passagem de  $t^3, t^4$  e dele próprio assim como todos os trens subsequentes que precisariam passar por essa região. Um exemplo mais simples pode ser visto na Figura 17b onde apenas o movimento de  $t^1$  para o local de parada 4 causaria *deadlock*.

Figura 17 – Cenários de verificação de *deadlock*



Fonte: Acervo do autor

**evitar linhas com trens circulando em sentido contrário:** não é permitido que o destino de uma jornada de trem seja uma linha com um outro trem circulando em sentido contrário conforme definido na Equação 4.13. A Figura 18 ilustra este comportamento, onde para o trem  $t^1$  por mais que tenha disponibilidade em seu próximo local de parada em ambas as linhas, a opção pela linha 1 o colocaria de frente com o trem  $t^2$  que está no sentido oposto ao dele e causaria *deadlock* nessa linha. Assim, o trem  $t^2$  é detectado antes da jornada do trem  $t^1$  fazendo, no caso deste exemplo, com que a única opção de destino da jornada seja a linha 2 do local de parada 4.

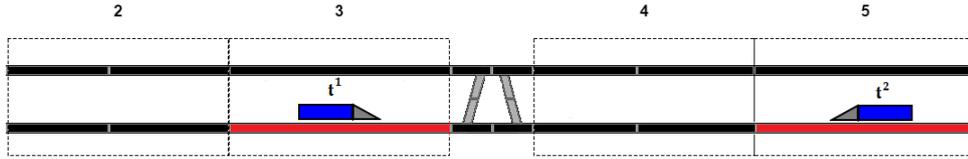
$$\forall \mathbf{i} \in \mathbf{L}, \forall k \in \mathbb{N} : 0 < k \leq |\mathbf{i}|, \forall x \in \mathbf{T}_C : \mathbf{T}_x = \{t \in \mathbf{T}_C : t \neq x, \mathbf{J}_t \cap \mathbf{J}_x \neq \emptyset\}$$

and

$$NoOpp(t, \mathbf{i}) = \begin{cases} NoOpp(t, \mathbf{i} + \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge (\nexists x \in \mathbf{T}_i : s_i^x = s_i^t, x \in \mathbf{T}_D) \wedge \nexists sw_i^r) \\ NoOpp(t, \mathbf{i} - \mathbf{1}) & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge (\nexists x \in \mathbf{T}_i : s_i^x = s_i^t, x \in \mathbf{T}_U) \wedge \nexists sw_i^l) \\ s_i^t & \text{if } (t \in \mathbf{T}_U \wedge (\nexists x \in \mathbf{T}_i : s_i^x = s_i^t, x \in \mathbf{T}_D) \wedge \exists sw_i^r) \\ s_i^t & \text{if } (t \in \mathbf{T}_D \wedge (\nexists x \in \mathbf{T}_i : s_i^x = s_i^t, x \in \mathbf{T}_U) \wedge \exists sw_i^l) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_C, \forall \mathbf{i} \in \mathbf{L}, \exists \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t \in \mathbb{R} \leftrightarrow NoOpp(t, \mathbf{i}) \neq s_{(i+1)}^t \quad (4.13)$$

Figura 18 – Linha fica indisponível quando há trem no sentido contrário



Fonte: Acervo do autor

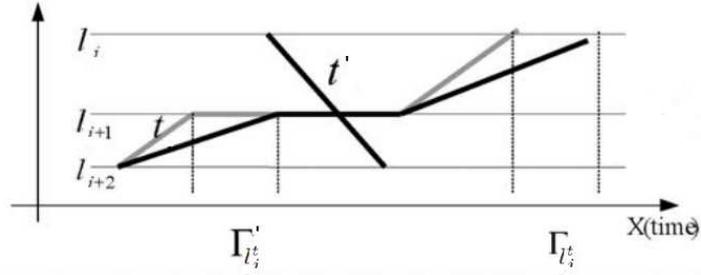
**atrasos devido a paradas:** quando um trem  $t$  precisa aguardar em um local de parada  $i$  quer seja para evitar conflitos ou por menor prioridade na circulação, a desaceleração de sua jornada precisa refletir o processo de frenagem descrito na Seção 3.3.1.2. Assim, para simular este comportamento seu tempo de jornada é aumentado em  $\Gamma_{l_i}^t$ . Da mesma forma, a aceleração na partida precisa refletir a inércia para chegar a sua velocidade máxima, então sua jornada para o próximo local de parada é aumentada em  $\Gamma_{l_i}^t$ . A Figura 19 mostra estes atrasos como uma representação dentro do Gráfico de Trens descrito na Seção 3.4. Assim, as seguintes equações mostram as situações necessárias para frenagem e aceleração em cada caso:

**cruzamento:**

$$\forall t \in \mathbf{T}_U, \forall t' \in \mathbf{T}_D, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^r \therefore (dep_i^t > arr_i^{t'}) \wedge (arr_i^t \leq arr_i^{t'}) \rightarrow (\Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i}^t) \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t + \Gamma_{l_i}^t) \quad (4.14)$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_D, \forall t' \in \mathbf{T}_U, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^l \therefore (dep_i^t > arr_i^{t'}) \wedge (arr_i^t \leq arr_i^{t'}) \rightarrow (\Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i}^t) \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t + \Gamma_{l_i}^t) \quad (4.15)$$

Figura 19 – Frenagem e aceleração por motivos de parada do trem



Fonte: Adaptado de (TORMOS et al., 2008)

**parada para ser ultrapassado:**

$$\forall t \in \mathbf{T}_U, \forall t' \in \mathbf{T}_U, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^r \therefore (dep_i^t > dep_i^{t'}) \wedge (arr_i^t \leq arr_i^{t'}) \rightarrow$$

$$(\Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i^t}') \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t + \Gamma_{l_i^t}) \quad (4.16)$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_D, \forall t' \in \mathbf{T}_D, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^l \therefore (dep_i^t > arr_i^{t'}) \wedge (arr_i^t \leq arr_i^{t'}) \rightarrow$$

$$(\Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i^t}') \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t + \Gamma_{l_i^t}) \quad (4.17)$$

**parada por indisponibilidade do próximo local de parada após AMVs:**

$$\forall t \in \mathbf{T}_U, \forall t' \in \mathbf{T}_U, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^r \therefore (dep_i^t \geq dep_{i+1}^{t'}) \wedge$$

$$(arr_i^t \geq arr_{i+1}^{t'}) \wedge |\mathbf{T}_{(i+1)}| = |\mathbf{i} + \mathbf{1}| - 1 \rightarrow$$

$$(\Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i^t}') \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t + \Gamma_{l_i^t}) \quad (4.18)$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_D, \forall t' \in \mathbf{T}_D, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^l \therefore (dep_i^t \geq dep_{i-1}^{t'}) \wedge$$

$$(arr_i^t \geq arr_{i-1}^{t'}) \wedge |\mathbf{T}_{(i-1)}| = |\mathbf{i} - \mathbf{1}| - 1 \rightarrow$$

$$(\Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i^t}') \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t + \Gamma_{l_i^t}) \quad (4.19)$$

**parada por indisponibilidade do próximo local de parada sem AMVs:**

$$\forall t \in \mathbf{T}_U, \forall t' \in \mathbf{T}_U, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^r \wedge (j_i^t = j_{(i+1)}^{t'}) \therefore (dep_i^t > dep_{i+1}^{t'}) \wedge (arr_i^t \geq arr_{i+1}^{t'}) \rightarrow$$

$$(\Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i-1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i^t}') \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t + \Gamma_{l_i^t}) \quad (4.20)$$

$$\forall t \in \mathbf{T}_D, \forall t' \in \mathbf{T}_D, \mathbf{i} \in \mathbf{L} : \exists sw_i^l \wedge (j_i^t = j_{(i-1)}^{t'}) \therefore (dep_i^t > dep_{i-1}^{t'}) \wedge (arr_i^t \geq arr_{i-1}^{t'}) \rightarrow$$

$$(\Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t = \Delta_{(i+1) \rightarrow i}^t + \Gamma_{l_i^t}') \wedge (\Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t = \Delta_{i \rightarrow (i-1)}^t + \Gamma_{l_i^t}) \quad (4.21)$$

Essas restrições evitam soluções com conflito pelo uso de mecanismo de ajustes dos valores de  $dep_i^t$  e  $arr_i^t$  quando necessário.

#### 4.1.4 Função Objetivo

A medida de qualidade de cada solução é similar a usada em (TORMOS et al., 2008). Contudo, da mesma forma que todos os trens são considerados no planejamento também o são para o cálculo da função objetivo ao invés da abordagem daquele autor que usa apenas os trens planejados para partir  $\mathbf{T}_{new}$ . Assim, trens do conjunto  $\mathbf{T}_{new}$  e  $\mathbf{T}_C$  realizam suas jornadas de seu local de parada inicial verificando todas as restrições definidas no modelo, lidando com ocupações de linhas por outros trens no momento da partida assim como bloqueio por interdição de via.

O processo de otimização do planejamento considera o local de parada inicial onde o trem se encontra até o seu destino. Para compor essa medida de avaliação da qualidade da solução, é usado o menor tempo possível de sua viagem do seu local de parada inicial até o local de chegada com o propósito de estimar a perda de produção para cada trem. Deste modo, a função objetivo é calculada usando um componente que representa o limitante inferior, ou seja, assumindo-se que não exista outro trem ou restrição na malha ferroviária, sem necessidade de paradas, como definido na Equação 4.22.

$$T_{opt}^t = \sum_{i=0}^{n_t-1} \Delta_{i \rightarrow (i+1)}^t + \sum_{i=0}^{n_t-1} C_i^t \quad (4.22)$$

Cada trem tem o seu tempo total de deslocamento considerando todas as suas jornadas em comparação com o seu respectivo tempo mínimo possível. Como podem existir vários tipos de trens com prioridades diferentes, é definido um peso  $w_t$  com propósito de penalizar ou beneficiar a avaliação de um trem com base em seu desempenho em relação a solução total. Assim, trens como pesos mais altos têm mais impacto no resultado final. O ganho obtido deve produzir um melhor resultado comparado a ganhos em trens com menor peso, como definido na Equação 4.23.

$$\eta_t = (arr_{n_t}^t - arr_0^t) \cdot w_t - T_{opt}^t \quad (4.23)$$

Assim, a medida de qualidade da solução é composta pela média dos valores avaliados para cada trem conforme a Equação 4.24 e a função objetivo para este modelo é minimizar este valor, definido como  $\eta$ .

$$\eta = \frac{\sum_{t \in \mathbf{T}} \eta_t}{|\mathbf{T}|} \quad (4.24)$$

## 4.2 Modelagem Heurística

Uma vez que o planejamento de circulação de trens é um problema de otimização combinatória como explicado na Seção 3.4, o espaço de soluções candidatas cresce em função do número de trens e dos locais de parada disponíveis, de forma que o caracteriza como um problema intratável. Considerando a tomada de decisão ter a frenagem e aceleração fatores relevantes no desempenho da circulação, a escolha da priorização de trens em cada rodada caracteriza-se como uma permutação mas a propagação em locais de paradas subsequentes a combinação deles. Dessa forma, tem-se a complexidade  $O(|T|^{L-1})$  para o pior caso, já que trens podem ser considerados para otimização quando já em circulação e por isso suas jornadas consideram apenas os locais de paradas restantes.

Como alternativa, neste trabalho, propõe-se um algoritmo de otimização baseado em *Evolutionary Clustering Search* (ECS), motivado principalmente por sua popularidade, observada em aplicações recentes, conforme apresentado na Seção 2.2.

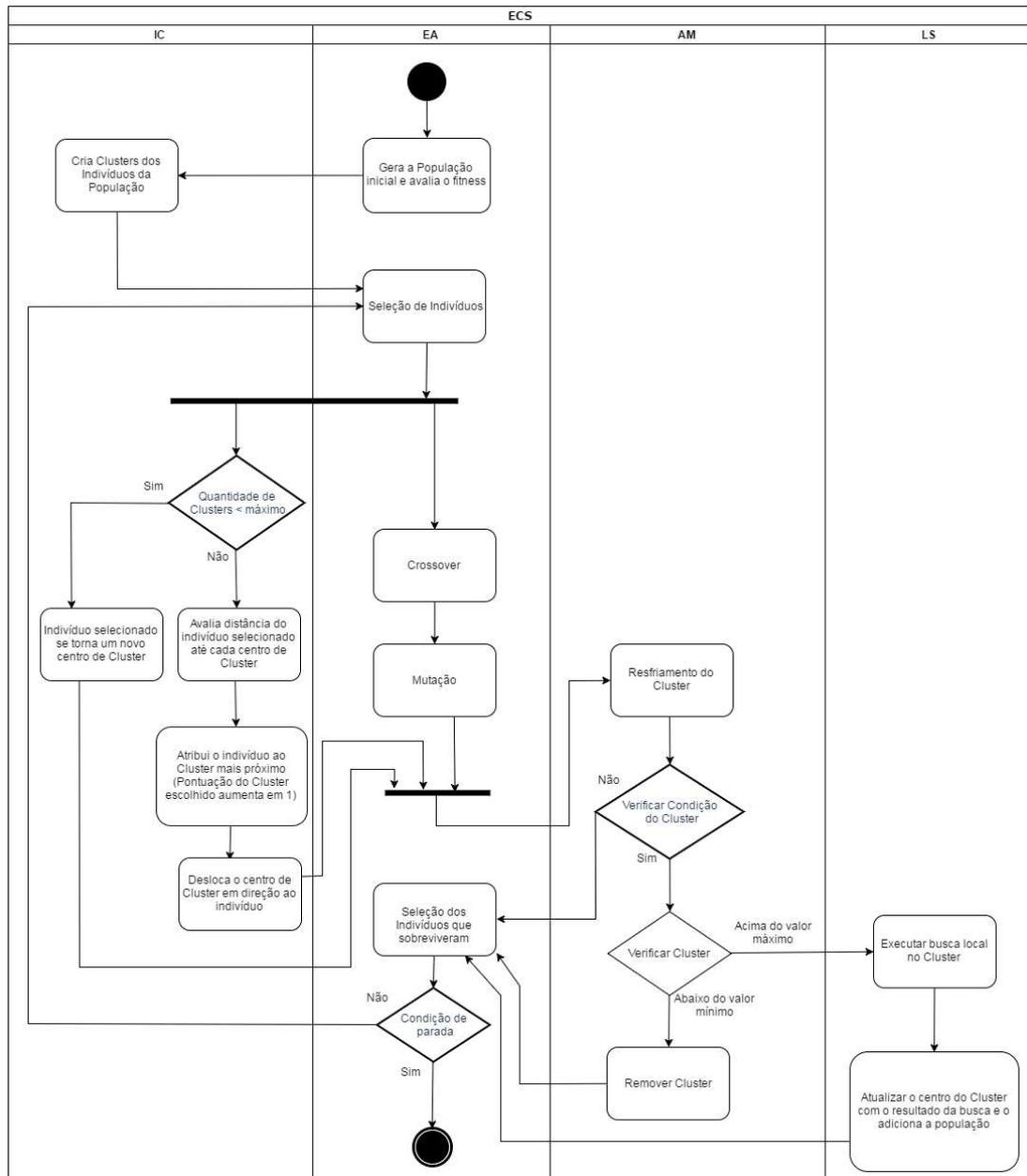
Neste tipo de abordagem, um indivíduo  $s_k$  selecionado para cruzamento também é apresentado ao processo de agrupamento iterativo, produzindo a ativação de um centro de *cluster*  $c_j$ , dependendo da medida de similaridade  $\varphi(s_k, c_j)$  e raio predefinido  $r_j$ . Um *cluster* ativado recebe um voto que acumula-se ao longo das iterações e é usado em intervalos regulares para decidir se o centro de *cluster* deve ser melhor explorado por uma busca local.

O ECS tem sido dividido em 4 componentes funcionais:

- **Algoritmo Evolutivo (EA):** define um algoritmo evolutivo para suportar todo o processo de busca e gerar soluções através dele;
- **Agrupamento Iterativo (IC):** atribui uma solução produzida pelo componente EA a um centro de *cluster*, já existente ou novo, usando uma medida de similaridade específica para a codificação do problema;
- **Módulo Analisador (AM):** verifica cada *cluster* ativo, em intervalos regulares, para decidir, com base na quantidade de ativações, se o mesmo pode ser considerado promissor ou deve ser removido por inatividade (ativações abaixo do mínimo permitido);
- **Intensificador de Busca (LS):** aplica um otimizador local a partir da solução representada pelo centro de *cluster* considerado promissor;

A Figura 20 ilustra a integração entre os 4 componentes por meio de um diagrama de atividades separado em raias que tem seu modelo descrito em (RUMBAUGH; JACOBSON; BOOCH, 2004):

Figura 20 – Componentes do ECS



Fonte: Acervo do autor

Os detalhes da modelagem do ECS para o planejamento de circulação de trens são apresentados a seguir, dentro do escopo de cada componente do ECS, conforme definido na Seção 2.2.

#### 4.2.1 Modelagem baseada em ECS

O *framework Clustering Search (CS)*, independente da metaheurística de suporte, pode ser aplicado por meio de uma estratégia *bottom-up*, partindo-se do desenvolvimento de uma heurística de baixo nível, capaz de construir uma solução candidata de qualidade

ou melhorar uma solução já existente. Um passo seguinte pode ser embutir essa heurística em uma metaheurística buscando por um desempenho mais robusto e independente de inicializações. A metaheurística nestes termos se caracterizaria com uma metaheurística híbrida de baixo-nível do tipo *team-work* (TALBI, 2009).

CS possibilita uma reestruturação da estratégia de busca, aplicando-se a busca local, implementada pela heurística específica, necessariamente a soluções candidatas representativas de subespaços de busca estimados como promissores (OLIVEIRA; LORENA, 2004). Essa estratégia *bottom-up* de construção da metaheurística híbrida baseada em ECS foi experimentada neste trabalho.

## 4.2.2 Algoritmo Evolutivo (EA)

O algoritmo genético é o componente meta-heurístico gerador de soluções candidatas de qualidade segundo a estratégia evolutiva centrada na seleção natural (GOLDBERG, 1989). Cada solução candidata é definida como uma lista ordenada formada por trens e locais de parada. Para sua construção e avaliação, considera-se todas as restrições e função objetivo propostas no modelo, definidas na Seção 4.1.

### 4.2.2.1 Codificação do Indivíduo

O indivíduo é composto de um conjunto de genes. Cada gene é considerado como uma tupla na forma (trem, local de parada) representado por  $(t_x, l_i^k)$  onde  $k$  é um valor binário para indicar se o gene representa a chegada (valor 0) ou saída (valor 1) do trem do local de parada  $l_i$ . Outras informações pertencentes ao problema, tais como local e horário de partida/chegada, coordenada, velocidade, são usados durante a construção e avaliação do indivíduo.

A Tabela 1 ilustra um exemplo onde tem-se a representação do trem  $t_0$  que foi do local de parada  $l_0$  até  $l_2$  passando por  $l_1$ .

Tabela 1 – Codificação de Indivíduo para movimento de 1 trem

$(t_0, l_0^1)$	$(t_0, l_1^0)$	$(t_0, l_1^1)$	$(t_0, l_2^0)$
----------------	----------------	----------------	----------------

Para atender a restrição definida nas Equações 4.8 e 4.9, o movimento de um local de parada para outro não pode ser dividido. Desta forma, para cada partida de um trem existe a chegada dele no próximo local de parada. Este comportamento evita que um trem pare fora de um local de parada.

Como exemplo, um trem não pode parar em uma linha singela que não seja local de parada. Esta restrição é levada em consideração desde a construção inicial do indivíduo, cruzamento até a mutação. O indivíduo é construído como uma lista de todas as jornadas de trens consideradas no problema desde o seu local de parada atual para  $t \in T_C$  ou inicial

para  $t \in T_{new}$  até seus locais de parada de destino. Um indivíduo é representado como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplo de um Indivíduo

$(t_1, l_0^1)$	$(t_1, l_1^0)$	$(t_2, l_4^1)$	$(t_2, l_5^0)$	$(t_3, l_4^1)$	$(t_3, l_3^0)$	$\dots$
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	---------

#### 4.2.2.2 População inicial

A população inicial é construída heurísticamente, usando o algoritmo da roleta (*roulette wheel* ([GOLDBERG, 1989](#))) para dar uma probabilidade de priorização maior para os trens mais atrasados. Apesar da priorização sugerida pelo algoritmo da *roleta*, uma jornada pode ser bloqueada pelas restrições definidas nas equações 4.11, 4.12 e 4.13. Nestes caso, o trem perde o seu turno, ou seja, sua oportunidade de fazer o movimento. Realizando ou não o movimento, o trem é removido da *roleta*. Após esvaziamento da *roleta*, os trens que não chegaram ao seu destino são reinseridos e o processo se repete até que todos os trens cheguem aos seus destinos.

Esta abordagem é baseada na heurística mais efetiva de construção inicial de indivíduos descrita por ([PINHEIRO; MIRANDA; OLIVEIRA, 2016](#)), que verificou que estratégias de construção de indivíduos iniciais melhores podem impulsionar melhores soluções finais no processo do GA.

#### 4.2.2.3 Seleção

Para o operador de seleção é usado um 3-torneio, dentro de uma estratégia do tipo *base e guia* ([OLIVEIRA; LORENA, 2002](#)). o melhor entre três indivíduos escolhidos aleatoriamente dos 20% melhores como base e o melhor entre três indivíduos escolhidos aleatoriamente de toda a população como guia.

Com o propósito de permitir intensificação em boas soluções encontradas sem negar novos indivíduos para futuras explorações do espaço de busca, 20% da elite populacional é diretamente transferida para a nova população. Os outros 80% é tirado do restante da população junto com os indivíduos gerados do cruzamento e mutação. Uma janela de posicionamento aleatório é usada para remover indivíduos excedentes aos 80% que faltam, mantendo-se o tamanho original da população. Assim, assegura-se um alto nível de variedade da população final para próxima geração.

#### 4.2.2.4 Cruzamento

Um operador de cruzamento de ponto único heurístico, similar ao realizado em ([TORMOS et al., 2008](#)), é empregado para gerar descendentes, a partir dos indivíduos base e guia. Para o primeiro descendente, mantém-se a sequência de prioridades do segundo nos

genes seguintes aos copiados do primeiro. Para o segundo, inverte-se a ordem, seguindo as mesmas regras.

O componente heurístico deste operador de cruzamento considerar as restrições durante a composição dos descendentes. Assim, se uma das Equações 4.11, 4.12 ou 4.13 restringir a inserção de genes nos descendente, esses genes são posicionados posteriormente. O Algoritmo 1 detalha este comportamento.

**Algoritmo 1** *Cruzamento***Entrada:** pai e mãe sem conflitos**Saída:** filho e filha gerados sem conflito

---

```

1: função CRUZAMENTO(pai, mãe)
2:   pontoDeCruzamento ← RANDOM(1, pai.tamanho())
3:   fila ← ∅
4:   para  $i \leftarrow 1$  até pontoDeCruzamento faça
5:     filho(i) ← pai(i)
6:   fim para
7:   para  $i \leftarrow \text{pontoDeCruzamento} + 1$  até pai.tamanho() faça
8:     para cada gene em fila faça
9:       se not filho.geraConflito(gene) então
10:        filho(i) ← gene
11:        fila.remove(gene)
12:      fim se
13:    fim para
14:    se not filho.contem(mãe(i)) então
15:      se filho.geraConflito(mãe(i)) então
16:        fila.adicionar(mãe(i))
17:      senão
18:        filho(i) ← mãe(i)
19:      fim se
20:    fim se
21:  fim para
22:  fila ← ∅
23:  para  $i \leftarrow 1$  até pontoDeCruzamento faça
24:    filha(i) ← mãe(i)
25:  fim para
26:  para  $i \leftarrow \text{pontoDeCruzamento} + 1$  até pai.tamanho() faça
27:    para cada gene em fila faça
28:      se not filha.geraConflito(gene) então
29:        filha(i) ← gene
30:        fila.remove(gene)
31:      fim se
32:    fim para
33:    se not filha.contem(pai(i)) então
34:      se filho.geraConflito(pai(i)) então
35:        fila.adicionar(pai(i))
36:      senão
37:        filho(i) ← pai(i)
38:      fim se
39:    fim se
40:  fim para
41:  retorna filho, filha
42: fim função

```

▷ Gerando o filho

▷ Gerando a filha

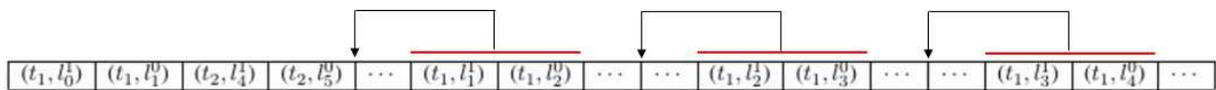
---

#### 4.2.2.5 Mutação

O operador de mutação é usado para manter a diversidade genética e evitar que o processo evolutivo fique estagnado. Em trabalhos anteriores relacionados com o problema usando algoritmo genético, é usado apenas uma atualização de gene em todo o cromossomo como operador de mutação (MU; DESSOUKY, 2011), (XU et al., 2014) e (SHI et al., 2016). No entanto, dependendo do tamanho do problema, essa estratégia pode não ser suficiente atualizar apenas um gene de forma a atender o propósito do operador. Assim, para esta abordagem, a medida que o tamanho do cromossomo aumenta, a operação de mutação sobre ele considera um maior número de genes atualizados também.

Desta forma, uma abordagem similar a (SHAW, 1997) e (TORMOS et al., 2008) é aplicada usando operações de remoção e inserção de genes mas, diferente da aplicação desses autores, os genes são escolhidos, a partir de um trem de referência, visando priorizar as jornadas do trem dentro de uma faixa de  $\mu$  genes de jornadas anteriores. Da mesma maneira que é feito com o operador de cruzamento, se a algum gene que sofra mutação tiver seu movimento bloqueado devido as restrições do modelo, ele será posicionado posteriormente na próxima oportunidade. A Figura 21 ilustra o funcionamento deste operador para o trem  $t_1$  que teve seu gene na posição de referência escolhido aleatoriamente.

Figura 21 – Mutação



Fonte: Acervo do autor

O número de jornadas removidas e inseridas  $\mu$  no trem escolhido é também aleatoriamente definida entre  $\mu_{min}$  and  $\mu_{max}$  proporcionalmente ao tamanho do indivíduo.

#### 4.2.2.6 Processo de Decodificação do Indivíduo

Para a codificação do indivíduo é usada uma representação que descreve o mapeamento direto dele com os pontos do Gráfico de Trens a ser plotado apresentado na Seção 3.4. O processo de decodificação da solução é feito simplesmente lendo o indivíduo definido como solução, de forma sequencial, e gerando pontos no Gráfico que são ligados para cada trem separadamente.

### 4.2.3 Agrupamento Iterativo (IC)

Regiões promissoras do espaço de busca são representadas por centros de *cluster*,  $c$ , e o número máximo deles definido como  $NumCl$ , que pode ser usado para criá-los inicialmente ou a medida que o agrupamento determinar um novo. Uma abordagem de

medida de distância baseada em similaridade é usada para atribuir uma dada solução a um centro de *cluster*.

No início do processo do algoritmo evolutivo, quando os indivíduos são criados, todos os  $\mathcal{NC}$  centros de *cluster*  $c$  são criados também. Assim, cada um dos  $\mathcal{NC}$  indivíduos escolhidos se tornam um centro de *cluster*, mas se um indivíduo escolhido estiver muito próximo a um centro de *cluster* existente um outro indivíduo é escolhido para ser o novo centro de *cluster*.

Toda vez que um indivíduo é selecionado ele é avaliado e atribuído a um centro de *cluster* que tem seu valor de pontuação (ou aquecimento) aumentado em 1 e o centro se aproxima do indivíduo atribuído a ele. Este comportamento é usado para medir o agrupamento de indivíduos ao redor de um *cluster* e reposicionar o centro pela influência do indivíduo sobre ele. Se o número de *cluster* ativos é menor que  $\mathcal{NC}$ , um novo *cluster* é criado tendo o indivíduo escolhido ao acaso como seu centro.

Para atribuir um indivíduo, a distância dele até cada um dos centros de *cluster* deve ser calculada. A distância de um indivíduo até um centro de *cluster* é medida como a quantidade de movimentos de inserção e remoção de genes para que o indivíduo seja idêntico ao centro de *cluster*.

Assumindo que cada indivíduo tem sua própria lista ordenada de genes representada por números sequenciais crescentes e que cada um destes genes estão presentes em todos os indivíduos com outra ordem de sequenciamento em relação ao indivíduo que está fazendo a comparação, então o uso do mecanismo de *Longest Increasing Subsequence* (LIS) é adequado para determinar a distância entre eles, já que usa essas informações para esse propósito. Em (SCHENSTED, 1961), foi proposto o *Young tableaux* para estudar o comprimento do LIS e demonstrar como resolvê-lo.

Como um exemplo, pode ser considerado a sequência de números (1, 3, 4, 10, 9, 6, 2, 5, 8, 7) que produz quatro sub-sequências ordenadas crescente:

- 1, 3, 4, 5, 8
- 1, 3, 4, 5, 7
- 1, 3, 4, 6, 8
- 1, 3, 4, 6, 7

Como resultado, necessita-se reposicionar cinco elementos para ordenar a sequência de forma crescente. Usando a primeira sub-sequência, é necessário colocar na ordem correta os elementos (2, 6, 7, 9, 10) por operações de remoção e inserção.

Da mesma forma, o indivíduo representado na Tabela 2 pode ter uma sequência numérica relativa aos genes ordenados definidos no centro de *cluster*  $c_1$  como mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 – Representação numérica de um indivíduo em relação a um centro de *cluster*

1	2	5	6	3	4	...
---	---	---	---	---	---	-----

O centro de *cluster*  $c_1$  é considerado como uma referência ordenada de genes em sequência. Assim, a distância entre  $c_1$  e o indivíduo é 2, já que é necessário apenas colocar os genes (3, 4) ou (5, 6) na ordem correta da sequência para que o indivíduo fique idêntico a  $c_1$ .

Para esta abordagem, a representação numérica para cada gene no indivíduo é gerada usando um código *hash* calculado. Em seguida, é criada uma estrutura numérica ordenada que traduz sua sequência para o código *hash* possibilitando um mapeamento que é usado na comparação com outro indivíduo.

Quando um indivíduo é similar a algum *cluster* existente, a regra de assimilação é aplicada ao centro dele e este indivíduo produz um deslocamento do *cluster* que terá uma nova posição no espaço de busca, isso acontece pela influência que o indivíduo exerce sobre o *cluster* como definido a seguir:

$$c'_j = c_j \oplus \beta(s_k \ominus c_j) \quad (4.25)$$

onde  $\oplus$  e  $\ominus$  são operações abstratas em  $c_j$  e  $s_k$  significando, respectivamente, adição e subtração de soluções. A operação  $(s_k \ominus c_j)$  significa a verificação da distância entre as soluções  $s_k$  e  $c_j$ , considerando a medida de distância escolhida para o problema. Uma taxa de aprendizado,  $\beta$ , da diferença é usada para atualizar  $c_j$ , resultando em  $c'_j$ . Este processo de assimilação tem um papel importante no processo de agrupamento, já que *clusters* representam regiões do espaço de busca e várias soluções em sua região o indica como promissor para intensificação de sua busca.

Algumas técnicas do processo de assimilação têm sido propostas especificamente para problemas de otimização combinatória (OLIVEIRA; LORENA, 2004), tais como cruzamento e *path relinking*, este último usado originalmente em metaheurísticas populacionais como *Scatter Search* (GLOVER; LAGUNA; MARTÍ, 2000). Considerando o custo computacional, a assimilação neste trabalho é definida como um operador de cruzamento, aplicado sobre o indivíduo agrupado e centro de *cluster* ativado, o que produz dois filhos. O filho com o melhor valor de *fitness* se torna o novo centro de *cluster*.

#### 4.2.4 Módulo Analisador (AM)

O valor de pontuação recebidos pela ativação em cada *cluster* é verificado regularmente em intervalos definidos de gerações indicando qual deles é promissor. Quando determinado o *cluster* como promissor baseado nesse valor, um procedimento de intensificação por busca local é realizado nele.

Um *cluster* que não recebe ativação por um período pode ser removido assim como o mapeamento para a região do espaço de busca associado a ele. Considerando  $\mathcal{G}_j$  ( $j=1,2,\dots$ ) como todos os *clusters* criados e ativos num dado instante, a seguinte regra define quando um novo *cluster* deve ser criado:

$$c_{new} = s_k \text{ if } \varphi(s_k, c_j) > r_j, \forall \mathcal{G}_j \quad (4.26)$$

O Módulo Analisador interage com o módulo EA que solicita, em um intervalo definido de gerações, a avaliação dos centros de *cluster* ativos para determinar qual deve ter sua busca intensificada pelo módulo LS e qual deve ser eliminado por inatividade. Ele é responsável por diminuir o valor de pontuação gradativamente como uma ação de resfriamento do *cluster*. Todas as ações que ele toma acontece no fim de cada geração.

Avaliação de cada *cluster* é realizada verificando o seu valor de pontuação e quando ele está acima do limite definido por ( $\phi_{max}$ ), ele efetua a chamada ao componente LS para intensificar a busca e define o valor de pontuação como zero para que o *cluster* possa ter seu valor incrementado desde o início. Por outro lado, se o número de indivíduos selecionados e atribuídos ao *cluster* levar a um valor de pontuação abaixo do limite  $\phi_{min}$ , então é considerado que intensificações na região deste o *cluster* tendem a não gerar resultados significativos e ele é eliminado.

#### 4.2.5 Intensificador de Pesquisa (LS)

O Intensificador de Pesquisa (LS) é o componente do ECS usado, quando solicitado pelo AM, para realizar uma maior investigação no espaço de busca de um *cluster* para procurar melhores soluções já que a região é considerada como promissora.

Uma abordagem do algoritmo de subida da encosta (*Hill Climbing*) baseado em uma versão simplificada de *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) proposta por (ROPKE; PISINGER, 2006) é usada neste trabalho. Essa simplificação do ALNS consiste em usar apenas mecanismos de operações de remoção e inserção de elementos de forma aleatória, aceitando todos os melhores encontrados, usando assim, uma estratégia gulosa.

Neste ALNS simplificado, um grupo de  $\psi$  indivíduos vizinhos são criados usando o mesmo algoritmo de mutação, descrito na Seção 4.2.2.5, para cada indivíduo. Cada vez que é encontrado um novo indivíduo com *fitness* com diferença  $\rho$  melhor que o atual, o

novo se torna o atual. Este processo se repete  $\sigma$  vezes, desde que seja encontrado um melhor indivíduo com esse critério em cada rodada de geração de vizinhança. No final da execução, o centro de *cluster* se torna o indivíduo resultante gerado na busca. Todo este processo é detalhado no Algoritmo 2.

---

**Algoritmo 2** *Simple Adaptive Large Neighborhood Search*


---

**Entrada:**  $x$  é um indivíduo válido

**Saída:** melhorIndividuo é uma solução válida

```

1: função SALNS( $x$ )
2:   melhorIndividuo  $\leftarrow x$ 
3:   para  $y \leftarrow 0$  até  $\sigma$  faça
4:     encontradoNovaSolucao  $\leftarrow$  false
5:     para  $i \leftarrow 0$  até  $\psi$  faça
6:        $\mu \leftarrow$  RANDOM( $\mu_{min}, \mu_{max}$ )
7:       individuo  $\leftarrow$  MUTATE(melhorIndividuo,  $\mu$ )
8:       se (individuo.Fitness < melhorIndividuo.Fitness) And ( $|\text{individuo.Fitness} -$ 
melhorIndividuo.Fitness  $|\geq \rho$ ) então
9:         melhorIndividuo  $\leftarrow$  individuo
10:        encontradoNovaSolucao  $\leftarrow$  true
11:        break
12:      fim se
13:    fim para
14:    se (not encontradoNovaSolucao) então
15:      break
16:    fim se
17:  fim para
18:  retorna melhorIndividuo
19: fim função

```

---

## 5 Experimentos

Neste capítulo, apresentam-se os resultados dos experimentos do ECS, e compara-se seu resultado com outras heurísticas para resolução. Todo o código fonte foi implantado em C# e testado em um computador com um processador Intel Xeon E5-4610 2.4GHz 32 GB de memória RAM, utilizando o Windows Server 2008 R2 Enterprise.

### 5.1 Geração das instâncias

As instâncias usadas nos experimentos foram geradas por uma aplicação que implementa as regras descritas pelo modelo da Seção 4.1. Para definir o tamanho das instâncias geradas, alguns parâmetros de entradas são usados como:

- (a) tamanho do local de parada
- (b) quantidade máxima de locais de parada
- (c) quantidade mínima de local de parada
- (d) capacidade máxima de locais de parada
- (e) capacidade mínima de locais de parada
- (f) tamanho máximo de trechos singelos
- (g) tamanho mínimo de trechos singelos
- (h) fator mínimo de ocupação inicial da ferrovia
- (i) quantidade máxima de trens planejados
- (j) intervalo de disponibilidade de partida de trens planejados

Para gerar cada instância, é considerado inicialmente o número de locais de parada, que é escolhido de forma aleatória entre os parâmetros de entrada referente a sua quantidade máxima (b) e mínima (c). Após isso, cada um deles tem a sua quantidade de linhas definidas aleatoriamente entre seu parâmetro de capacidade máxima (d) e mínima (e). A quantidade de AMV é definida entre a quantidade escolhida de locais de parada e a sua metade de forma aleatória assim com as posições onde elas são colocadas.

A ocupação inicial da ferrovia com trens circulando,  $t \in T_C$ , é feita pela escolha iniciais destes trens aleatoriamente entre a capacidade física total da ferrovia (quantidade

de local de paradas  $\times$  número de linhas de cada local de parada) e a quantidade definida pelo fator mínimo de ocupação estabelecido como parâmetro de entrada. Cada trem é posicionado em um segmento da ferrovia aleatoriamente, caso exista a tentativa de colocá-lo em um trecho singelo ou em um local de parada que impeça seu movimento por uma das regras definidas no modelo da Seção 4.1, ele é descartado.

Por último, escolhe-se aleatoriamente a quantidade de trens planejados que é usado no modelo entre 1 e o parâmetro de quantidade máxima de trens planejados (i). O intervalo de partida entre eles é definido pelo parâmetro (j).

Para tentar garantir um conjunto de *benchmark* que seja diverso, foram geradas várias ferrovias com parâmetros de entrada diferentes e disponibilizadas em (PINHEIRO, 2016), porém foram escolhidas algumas com características que possibilitem representar de forma bastante diversa o universo possível de topologias, variando-se desde a quantidade de linhas, como a proporção de trechos duplicados e singelos, bem como a quantidade de linhas disponíveis.

Todas as instâncias consideradas possuem tamanhos e topologias que podem representar linhas de ferrovias reais ou até mesmo maiores e não são factíveis a sua solução em tempo hábil por métodos exatos (PINHEIRO; MIRANDA; OLIVEIRA, 2016) já que seu espaço de busca aumenta exponencialmente com o tamanho da instância conforme Seção 4.2. Portanto, após a geração decidiu-se pela utilização de dez instâncias específicas. Estas instâncias são compatíveis com cenários operacionais reais de grandes mineradoras nacionais, tanto em termos de extensão como movimentação de carga e algumas delas são superiores às encontradas na literatura. As escolhidas para os experimentos estão listadas a seguir, com um breve detalhamento de seus parâmetros:

- Ferrovia 21 (arquivo: railway\_21.xml):
  - **topologia:** possui 1.827,281 km de extensão e 155 locais de paradas, sendo 54 com 2 linhas, 43 com 3 linhas e 58 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 1.261,981 km em 77 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de dois trens, sendo um na direção *acima* e um no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 16 horas contempla a partida de mais 20 trens sentido *abaixo* e 20 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 112 (arquivo: railway\_112.xml):
  - **topologia:** possui 881,504 km de extensão e 85 locais de paradas, sendo 27 com 2 linhas, 32 com 3 linhas e 26 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 593,853 km em 38 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.

- **circulação:** a ocupação inicial é de 20 trens, sendo 7 no sentido *acima* e 13 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 22 horas contempla a partida de mais 11 trens sentido *abaixo* e 11 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 211 (arquivo: railway\_211.xml):
  - **topologia:** possui 2.001,530 km de extensão e 194 locais de paradas, sendo 63 com 2 linhas, 64 com 3 linhas e 67 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 1.297,330 km em 82 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 47 trens, sendo 22 no sentido *acima* e 25 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 4 horas contempla a partida de mais 2 trens sentido *abaixo* e 2 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 351 (arquivo: railway\_351.xml):
  - **topologia:** possui 754,311 km de extensão e 64 locais de paradas, sendo 18 com 2 linhas, 22 com 3 linhas e 24 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 539,325 km em 35 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 5 trens, sendo 2 no sentido *acima* e 3 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 16 horas contempla a partida de mais 8 trens sentido *acima* e 8 trens sentido *abaixo*.
- Ferrovia 357 (arquivo: railway\_357.xml):
  - **topologia:** possui 950,556 km de extensão e 85 locais de paradas, sendo 34 com 2 linhas, 28 com 3 linhas e 23 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 657,971 km em 40 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 31 trens, sendo 19 no sentido *acima* e 12 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 44 horas contempla a partida de mais 22 trens sentido *abaixo* e 22 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 67 (arquivo: railway\_67.xml):
  - **topologia:** possui 1.457,094 km de extensão e 160 locais de paradas, sendo 55 com 2 linhas, 53 com 3 linhas e 52 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 878,194 km em 55 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 67 trens, sendo 40 no sentido *acima* e 27 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 84 horas contempla a partida de mais 45 trens sentido *abaixo* e 45 trens sentido *acima*.

- Ferrovia 303 (arquivo: railway\_303\_3.xml):
  - **topologia:** possui 323,457 km de extensão e 28 locais de paradas, sendo todos eles com 2 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 228,957 km em 23 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 7 trens, sendo 4 no sentido *acima* e 3 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 13 horas contempla a partida de mais 10 trens sentido *abaixo* e 10 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 830 (arquivo: railway\_830.xml):
  - **topologia:** possui 896,060 km de extensão e 101 locais de paradas, sendo 30 com 2 linhas, 48 com 3 linhas e 23 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 535,560 km em 33 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 26 trens, sendo 14 no sentido *acima* e 12 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 17 horas contempla a partida de mais 9 trens sentido *abaixo* e 9 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 887 (arquivo: railway\_887.xml):
  - **topologia:** possui 648,529 km de extensão e 67 locais de paradas, sendo 22 com 2 linhas, 26 com 3 linhas e 19 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 417,529 km em 35 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 32 trens, sendo 16 no sentido *acima* e 16 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 50 horas contempla a partida de mais 40 trens sentido *abaixo* e 41 trens sentido *acima*.
- Ferrovia 979 (arquivo: railway\_979.xml):
  - **topologia:** possui 654,384 km de extensão e 77 locais de paradas, sendo 28 com 2 linhas, 23 com 3 linhas e 26 com 4 linhas. Os trechos singelos fazem um total de 392,250 km em 40 trechos, representando uma ferrovia ainda em estágios iniciais de duplicação.
  - **circulação:** a ocupação inicial é de 35 trens, sendo 18 no sentido *acima* e 17 no sentido *abaixo*. O cronograma de partida nas primeiras 6 horas contempla a partida de mais 4 trens sentido *abaixo* e 3 trens sentido *acima*.

## 5.2 Heurísticas de otimização

Para efeitos de comparação, foram selecionadas outras metaheurísticas, detalhadas a seguir. Embora não esteja descrito nesse trabalho, os parâmetros desses algoritmos foram calibrados manualmente e usados os que obtiveram os melhores resultados.

- **Algoritmo Genérico Padrão (GA):** é um algoritmo genético convencional conforme descrito na Seção 4.2.2, com a diferença que nele utiliza-se um operador de *mutação de um ponto* (TALBI, 2009) ao invés do definido na Seção 4.2.2.5, uma população de 100 indivíduos, taxa de cruzamento de 100% e taxa de mutação 10%;
- **Algoritmo Evolutivo (EA):** é um algoritmo genético descrito na Seção 4.2.2, utilizando uma população de 100 indivíduos, taxa de cruzamento de 100% e taxa de mutação 10%;
- **Algoritmo Evolutivo com Busca Local Elitista (EB):** conforme descrito na Seção 4.2.2 e mesmos parâmetros do EA, todavia com emprego de busca local, conforme apresentada na Seção 4.2.5, sempre que for atualizado no melhor indivíduo da população;
- **Simple Adaptive Large Neighborhood Search (SALNS):** a Busca por Vizinhança Larga Adaptativa Simples realiza sucessivas melhorias, conforme descrito na Seção 4.2.5, a partir de uma solução inicial aleatória, até que a condição de parada seja atingida; com parâmetros de desempenho ajustados dessa forma:  $\psi = 50$ ,  $\rho = 0,001$  e  $\sigma = 50$ .
- **Evolutionary Clustering Search (ECS):** a Busca Guiada por Agrupamentos, conforme descrito na Seção 4.2, com parâmetros de desempenho ajustados da seguinte forma:
  - **Algoritmo Evolutivo (EA):** conforme descrito na seção 4.2.2, ajustados para executar com uma população de 100 indivíduos, taxa de mutação de 10% e taxa de cruzamento de 100%; operador de mutação conforme Seção 4.2.2.5, ajustado com os parâmetros  $\mu_{min} = 1\%$  e  $\mu_{max} = 5\%$ .
  - **Agrupamento Iterativo (IC):** número máximo de *clusters*  $\mathcal{NC} = 20$ ;
  - **Módulo Analisador (AM):** limiares de ativação e remoção, respectivamente  $\phi_{max} = 7.5$  e  $\phi_{min} = 2.5$ ;
  - **Busca Local (LS):** conforme proposta em 4.2.5, com parâmetros  $\psi = 50$ ,  $\rho = 0,001$  e  $\sigma = 50$ .

Os testes foram realizados executando 30 replicações de cada algoritmo em cada uma das dez ferrovias com o propósito de assegurar uma distribuição normal de acordo

com o *Central Limit Theorem* (ROSENBLATT, 1956). Como condição de parada, em todos os casos foi fornecido 100.000 chamadas de função objetivo como recursos igual para todos os algoritmos: GA, EA, EB, SALNS e ECS. Os resultados foram analisados por meio de um *teste t* assumindo variâncias distintas, proposto por (STUDENT, 1908). Mesmo se for assumido resultados de um ou mais fora da distribuição normal, isso não afeta a confiabilidade deste método devido a sua robustez, como descrito por (SULLIVAN; D'AGOSTINO, 1992) e (SULLIVAN; D'AGOSTINO, 1992).

Na Tabela 4, encontram-se as médias das 30 replicações, com destaque em negrito para as que apresentaram relevância estatística ( $p \leq 0,05$ ), quando comparadas ao ECS assim como o tempo de execução em minutos definido como t(m).

Tabela 4 – *Fitness* médio para os resultados de teste

Inst.	Algoritmo									
	ECS		GA		EA		EB		SALNS	
	fitness	t(m)	fitness	t(m)	fitness	t(m)	fitness	t(m)	fitness	t(m)
112	<b>5,44</b>	24,75	5,70	11,54	5,62	8,28	5,52	17,02	5,65	7,06
21	<b>6,63</b>	42,13	7,78	26,51	6,97	21,08	6,81	38,00	7,00	15,73
211	5,34	54,78	5,91	24,05	5,49	19,41	5,35	23,62	5,55	14,9
351	<b>2,03</b>	9,61	2,38	4,10	2,29	3,13	2,10	4,82	2,13	3,03
357	<b>6,91</b>	34,53	7,26	20,11	7,17	16,23	7,07	23,90	7,25	11,71
67	<b>13,63</b>	276,80	13,78	82,08	13,76	88,03	13,74	100,16	14,01	168,36
303	1,13	3,02	1,45	1,67	1,37	1,77	1,20	1,63	1,16	3,43
830	<b>6,13</b>	24,25	6,49	13,65	6,25	15,56	6,26	14,71	6,35	24,4
887	<b>6,03</b>	57,52	6,32	29,97	6,20	30,87	6,20	30,76	6,52	49,68
979	4,50	15,36	4,88	7,55	4,58	8,24	4,55	7,99	4,59	16,25

Pode-se observar que o valor da função objetivo atingido pelo ECS apresenta relevância estatística como superior em 7 das 10 ferrovias testadas. Nas ferrovias 211, 303 e 979, não houve diferença significativa entre o ECS e um dos outros algoritmos. No entanto, quando comparado aos demais, houve relevância.

A Tabela 5 mostra os valores obtidos de cada algoritmo com o ECS, para cada ferrovia. Os valores em vermelho denotam ausência de significância estatística.

Pode-se observar também que a abordagem utilizando ECS consumiu mais tempo do que os outros algoritmos. No entanto, foi verificada que esta diferença de desempenho se dá como resultado das operações com *clusters*. Pode-se verificar na Tabela 6 que há um efeito positivo ao se reduzir o número de *clusters* para 10. O valor do resultado do *teste t* pode ser visto na Tabela 7.

Neste caso, pode-se também perceber que para 6 das 10 ferrovias o ECS continua sendo significativamente superior a todos os outros algoritmos testados, mesmo com um número reduzido de *clusters*.

Tabela 5 – Valores p do teste t do ECS comparado a outros algoritmos

Inst.	GA	EA	EB	SALNS
112	1,16675E-17	3,27103E-12	0,000184297	6,46179E-14
21	2,68345E-30	4,13469E-10	0,000706448	4,66741E-10
211	5,45783E-26	1,14989E-05	<b>0,620302941</b>	3,21366E-08
351	2,13281E-25	3,12817E-20	0,000859669	1,65507E-05
357	3,4999E-14	3,06375E-08	0,000556246	2,76915E-08
67	0,00337023	0,005432746	0,039447139	1,02093E-08
303	4,23744E-26	4,13469E-10	0,004973244	<b>0,233280635</b>
830	2,314E-22	5,28737E-06	3,867E-06	3,38027E-09
887	6,30742E-16	1,31903E-08	1,30903E-06	8,39277E-24
979	3,04616E-21	0,002713614	<b>0,110584991</b>	0,006196673

Tabela 6 – *Fitness* médio para 10 *clusters* no ECS

Inst.	Algoritmo									
	ECS		GA		EA		EB		SALNS	
	fitness	t(m)	fitness	t(m)	fitness	t(m)	fitness	t(m)	fitness	t(m)
112	<b>5,44</b>	24,75	5,70	11,54	5,62	8,28	5,52	17,02	5,65	7,06
21	6,63	42,13	7,78	26,51	6,97	21,08	6,81	38,00	7,00	15,73
211	5,34	54,78	5,91	24,05	5,49	19,41	5,35	23,62	5,55	14,9
351	<b>2,03</b>	9,61	2,38	4,10	2,29	3,13	2,10	4,82	2,13	3,03
357	<b>6,91</b>	34,53	7,26	20,11	7,17	16,23	7,07	23,90	7,25	11,71
67	13,71	197,30	13,78	82,08	13,76	88,03	13,74	100,16	14,01	168,36
303	1,12	2,2	1,45	1,67	1,37	1,77	1,20	1,63	1,16	3,43
830	<b>6,16</b>	19,25	6,49	13,65	6,25	15,56	6,26	14,71	6,35	24,4
887	<b>6,06</b>	40,90	6,32	29,97	6,20	30,87	6,20	30,76	6,52	49,68
979	<b>4,48</b>	10,91	4,88	7,55	4,58	8,24	4,55	7,99	4,59	16,25

As figuras 22 a 31 demonstram a evolução do processo por meio de um diagrama com a média dos melhores indivíduos x chamadas da função objetivo. Este resultado também demonstra um resultado melhor do GA quando aplicado com o operador de mutação proposto na Seção 4.2.2.5 (Algoritmo EA).

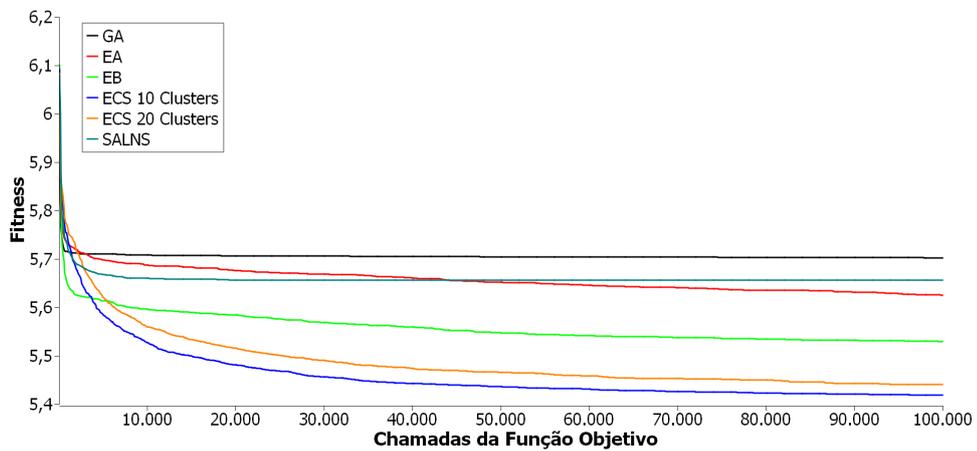
A Tabela 8 apresenta resultados do operador proposto de mutação contra um operador tradicional. Em 9 de 10 instâncias testadas, há relevância estatística ( $p \leq 0,05$ ).

Com os experimentos, pode ser observada a efetividade do ECS para este modelo, assim como os algoritmos propostos mostraram relevância estatística na maioria dos casos de teste.

Tabela 7 – Valores p do teste t do ECS comparado a outros algoritmos

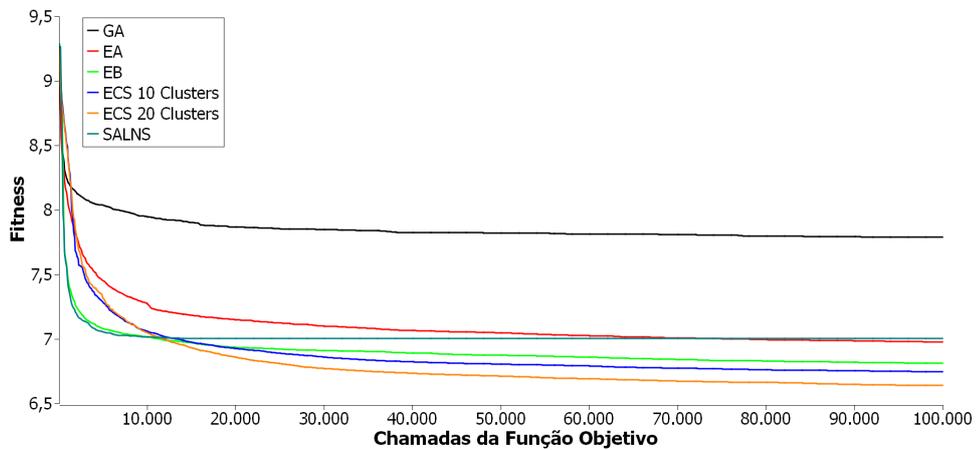
Inst.	GA	EA	EB	SALNS
112	4,14283E-18	4,56255E-13	1,26846E-05	9,81748E-15
21	3,2808E-29	1,83696E-07	0,129724325	2,39385E-07
211	4,65666E-28	6,32805E-05	0,772948126	1,51752E-07
351	8,37615E-29	1,37597E-24	8,86139E-10	6,69422E-11
357	5,61911E-14	5,42373E-07	0,007567656	3,62879E-07
67	0,13372203	0,254137055	0,558376512	6,97635E-07
303	4,22218E-25	3,43092E-18	0,002953507	0,160776483
830	8,33353E-16	0,003501988	0,001850352	1,48838E-06
887	2,74295E-15	3,07633E-07	3,12718E-05	4,36207E-23
979	2,52192E-25	7,50326E-05	0,028715285	0,000945134

Figura 22 – Resultados para a ferrovia 112



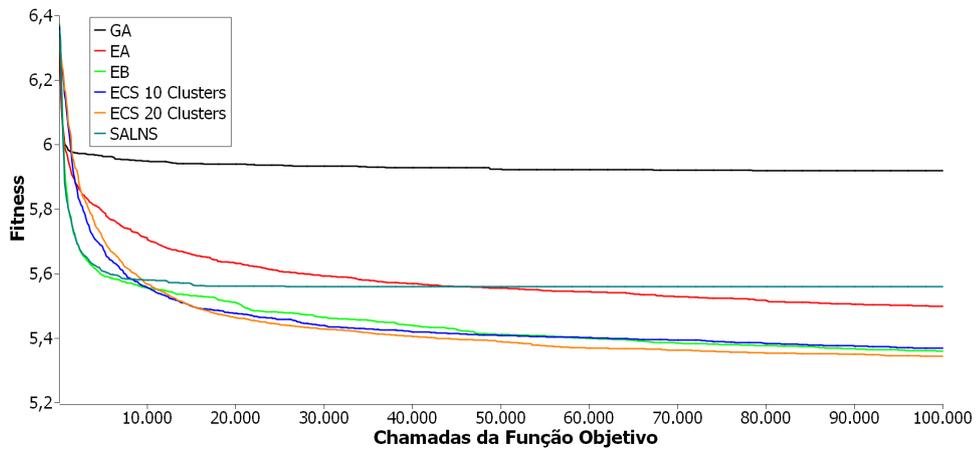
Fonte: Acervo do autor

Figura 23 – Resultados para a ferrovia 21



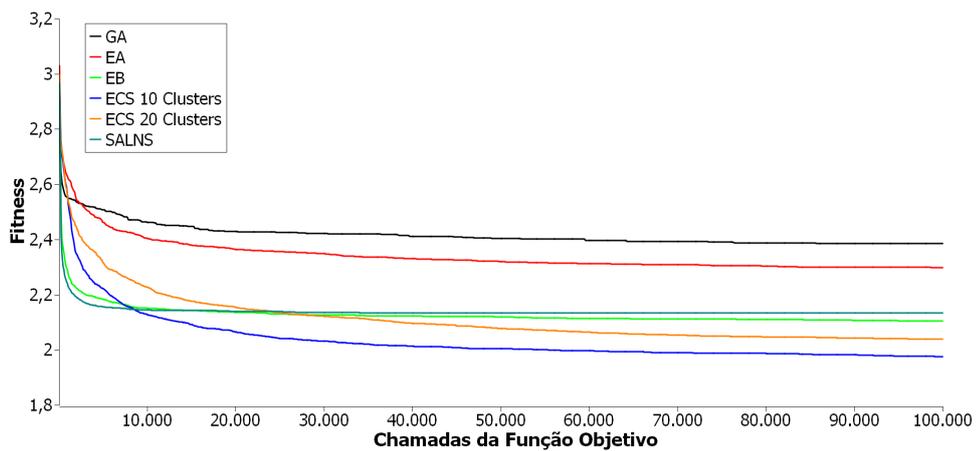
Fonte: Acervo do autor

Figura 24 – Resultados para a ferrovia 211



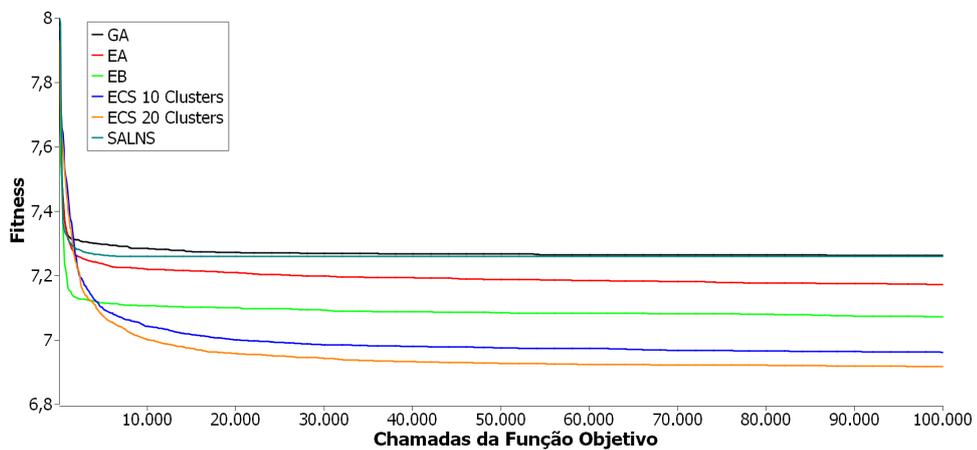
Fonte: Acervo do autor

Figura 25 – Resultados para a ferrovia 351



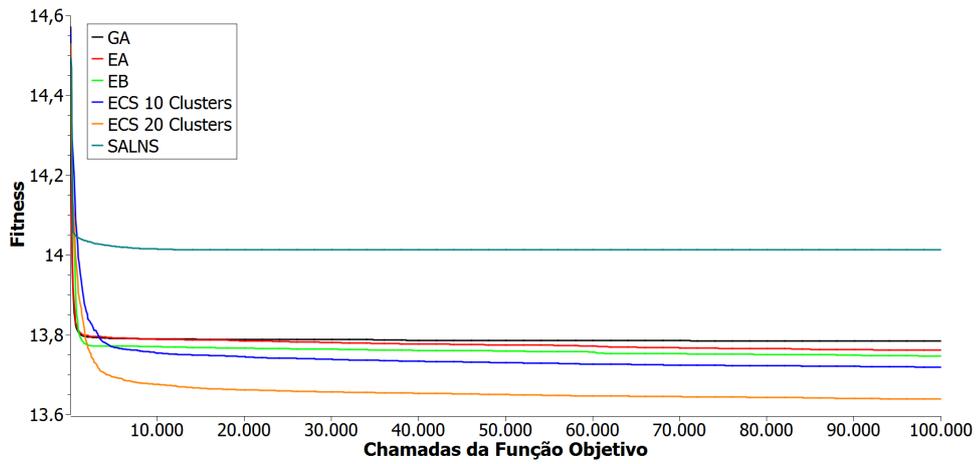
Fonte: Acervo do autor

Figura 26 – Resultados para a ferrovia 357



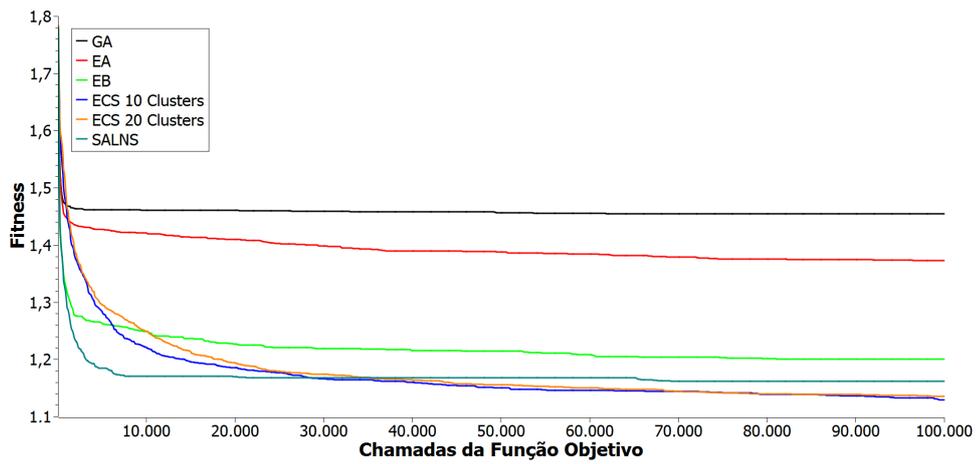
Fonte: Acervo do autor

Figura 27 – Resultados para a ferrovia 67



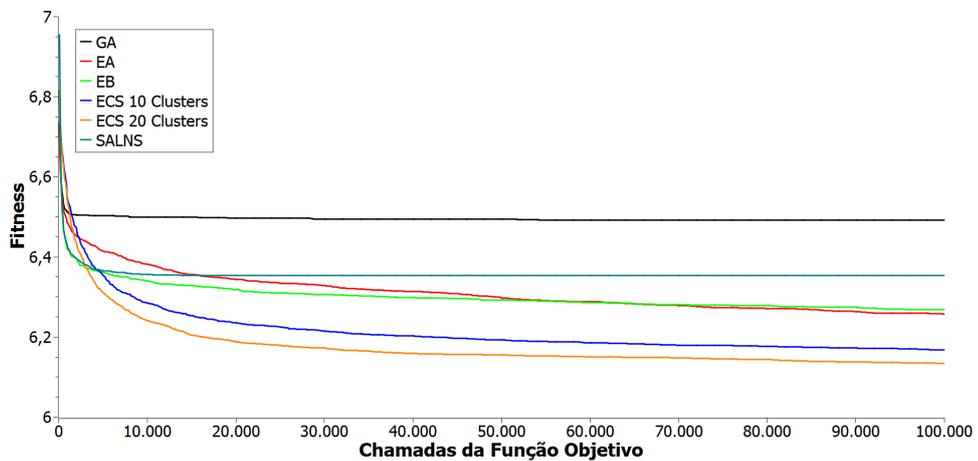
Fonte: Acervo do autor

Figura 28 – Resultados para a ferrovia 303



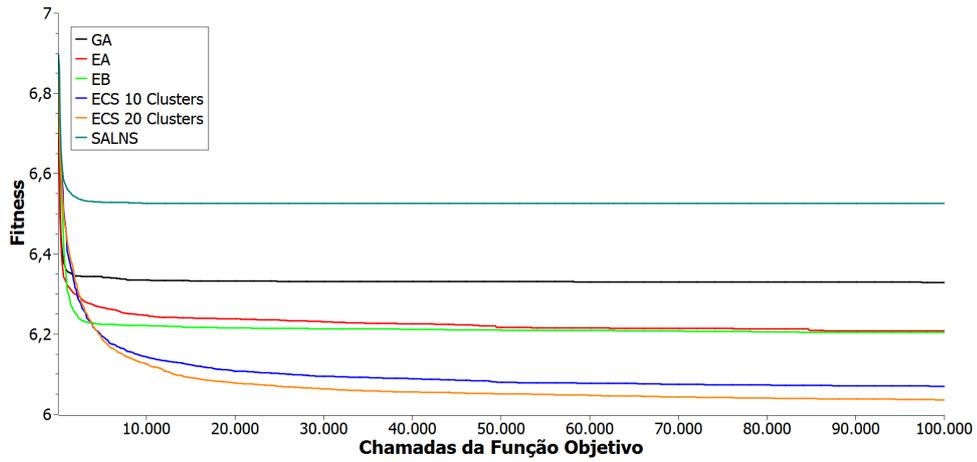
Fonte: Acervo do autor

Figura 29 – Resultados para a ferrovia 830



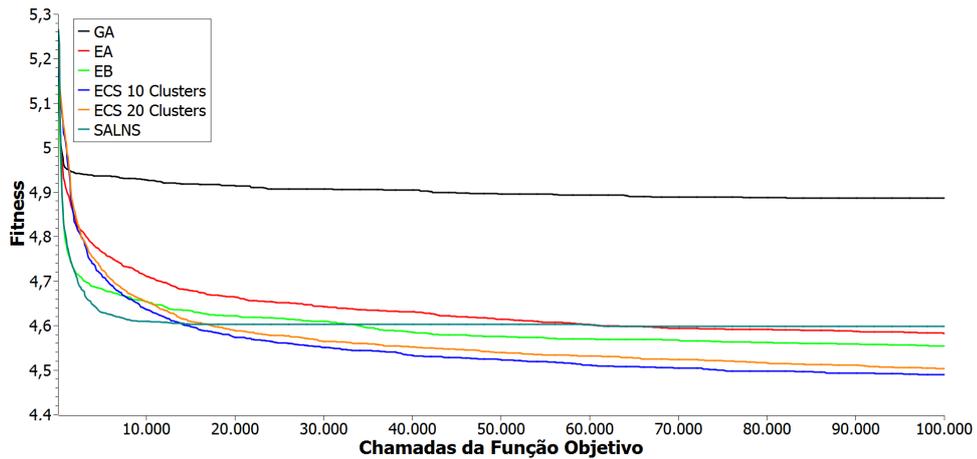
Fonte: Acervo do autor

Figura 30 – Resultados para a ferrovia 887



Fonte: Acervo do autor

Figura 31 – Resultados para a ferrovia 979



Fonte: Acervo do autor

Tabela 8 – Valores p do teste t do EA comparado ao GA

Inst.	<i>p-value</i>
112	5,98175E-24
21	0,000486454
211	3,86531E-21
351	7,18096E-05
357	0,011546515
67	<b>0,565496023</b>
303	5,91521E-06
830	1,73861E-13
887	1,56268E-06
979	2,45157E-19

## 6 Conclusão

Neste trabalho foi, inicialmente, descrito o funcionamento de uma ferrovia com base em perspectiva elétrica e estrutural, assim como o seu interligamento ao centro de controle de tráfego, contextualizando o funcionamento e efeitos do planejamento da circulação de trens em uma visão global considerando todas essas camadas. Os mecanismos e tecnologias que garantem a segurança da ferrovia e dos trens que nela circulam foram descritos, assim como a necessidade de fazer manutenção em sua estrutura e como isso afeta a circulação. Essas informações foram explicadas para a base do entendimento do modelo e solução propostos.

Foi considerado cenários de instâncias de teste com tamanho compatíveis a ferrovias reais criados por uma aplicação geradora destas instâncias. Além disto, para um entendimento melhor do problema.

Foi proposto um novo modelo matemático que descreve os cenários de teste criados e lida com todos os elementos apresentados no Capítulo 3. Este modelo é definido de forma a evitar conflitos ao invés de levar a reparação ou descarte de soluções. Além disto, ele considera:

- ferrovias com várias possibilidades de infraestrutura, que tem desde linhas singelas até locais de parada com qualquer capacidade de linhas paralelas em diferentes regiões;
- ultrapassagem em qualquer local de parada com impossibilidade de levar a *deadlocks*;
- prioridades de trens incorporada a função objetivo;
- inércia na aceleração e frenagem dos trens;
- compatibilidade com todos os modelos de sinalização descritos na literatura (para bloco móvel virtual há a necessidade apenas de ter locais de parada com tamanho variado, a alteração seria nos dados de entrada);
- uso em aplicações de Gráfico de Trens em ferrovias do mundo real, já que tem mapeamento direto para essa ferramenta, lidando assim com trens já circulando no momento da otimização e os que são planejados para partir no futuro.

Uma abordagem do *Evolutionary Clustering Search* (ECS) foi implementada para resolver este problema, e testes mostraram que ele foi superior na maioria das instâncias em comparação com outros algoritmos com relevância estatística ( $p \leq 0.05$ ). Isso demonstra

a eficiência da intensificação da pesquisa direcionada em regiões promissoras que leva a melhores soluções finais. Assim, estes experimentos computacionais mostraram que o ECS é um mecanismo apropriado para explorar o espaço de busca em problemas complexos de permutação devido à sua estrutura de agrupamento de soluções em diferentes *clusters*.

Para uma aderência do modelo a implementação, foi usado mecanismos de remoção e inserção de genes como operador de mutação baseado no problema, assim como unidade de medida de distância implementado em uma abordagem de *Longest Increasing Subsequence* (LIS) pelo mesmo motivo. O operador de mutação proposto foi usado em todos os algoritmos de teste, exceto o GA, e mostrou uma notável melhora nos resultados finais, com relevância estatística em todos as instâncias de teste contra a sua versão tradicional sem ele, devido ao fato de conseguir escapar mais eficientemente de ótimos locais.

Pelo motivo dos mecanismos do ECS ser dividido em 4 componentes principais, que podem ser ajustados para se adequar a um propósito específico, e por ele ter mostrado resultados substanciais neste trabalho e em anteriores na literatura para outros problemas, é encorajado como trabalho futuro aplicações em outras abordagens. Especificamente, para o problema de planejamento de circulação de trens em trens de carga, pode ser considerado o seu uso para otimização multi-objetivo levando em conta a produtividade da circulação e a necessidade de manutenção de via como descrito na Seção 3.5.

Um outro ponto que deve ser considerado é o uso de abordagens da plataforma CUDA para aplicação de computação paralela, de modo a diminuir o tempo de execução do ECS e torná-lo mais factível seu uso em ferrovias do mundo real.

Uma outra sugestão, seria a criação de heurísticas de remoção e inserção para o problema de circulação de trens de carga para que o *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) original seja usado integralmente como componente LS (definido na Seção 4.2.5) do ECS.

Com base neste trabalho e em anteriores, é mostrado a aplicabilidade do ECS tanto para problemas de otimização combinatória quanto de permutação. Da mesma forma, o modelo matemático pode ser aplicado em diversas configurações e tipos de ferrovias.

## Referências

- ABRAMSON, D.; MILLS, G.; PERKINS, S. Parallelisation of a genetic algorithm for the computation of efficient train schedules. *Parallel Computing and Transputers*, v. 37, p. 139–149, 1994. Citado na página 25.
- ABRIL, M.; BARBER, F.; INGOLOTTI, L.; SALIDO, M.; TORMOS, P.; LOVA, A. An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 44, n. 5, p. 774–806, 2008. Citado na página 15.
- BANCI, M.; FANTECHI, A.; GNESI, S. The role of formal methods in developing a distributed railway interlocking system. In: TECHNICAL UNIVERSITY OF BRAUNSCHWEIG, INSTITUTE FOR TRAFFIC SAFETY AND AUTOMATION ENGINEERING. *Proc. of the 5th Symposium on Formal Methods for Automation and Safety in Railway and Automotive Systems (FORMS/FORMAT 2004)*. [S.l.], 2004. p. 220–230. Citado na página 35.
- BARBER, F.; SALIDO, M. A.; INGOLOTTI, L. P.; ABRIL, M.; LOVA, A. L.; TORMOS, M. P. An interactive train scheduling tool for solving and plotting running maps. In: *Current Topics in Artificial Intelligence*. [S.l.]: Springer, 2004. p. 646–655. Citado na página 39.
- BARRENA, E.; CANCA, D.; COELHO, L. C.; LAPORTE, G. Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 70, p. 134–150, 2014. Citado na página 24.
- BINDER, S.; MAKNOON, Y.; BIERLAIRE, M. Passenger-oriented railway disposition timetables in case of severe disruptions. In: *Proceedings of the 15th Swiss Transport Research Conference (STRC)*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 24.
- BLÄSER, L.; EGLOFF, D.; KNOBEL, O.; KRAMER, P.; ZHANG, X.; FABIAN, D. Alea reactive dataflow: Gpu parallelization made simple. In: *Proceedings of the companion publication of the 2014 ACM SIGPLAN conference on Systems, Programming, and Applications: Software for Humanity*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 25.
- BUDAI, G.; HUISMAN, D.; DEKKER, R. Scheduling preventive railway maintenance activities. *Journal of the Operational Research Society*, Springer, v. 57, n. 9, p. 1035–1044, 2006. Citado na página 42.
- CACCHIANI, V.; CAPRARA, A.; FISCHETTI, M. A lagrangian heuristic for robustness, with an application to train timetabling. *Transportation Science*, INFORMS, v. 46, n. 1, p. 124–133, 2012. Citado na página 24.
- CACCHIANI, V.; FURINI, F.; KIDD, M. P. Approaches to a real-world train timetabling problem in a railway node. *Omega*, Elsevier, v. 58, p. 97–110, 2016. Citado na página 24.
- CACCHIANI, V.; TOTH, P. Nominal and robust train timetabling problems. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 219, n. 3, p. 727–737, 2012. Citado na página 18.

- CAI, X.; GOH, C. A fast heuristic for the train scheduling problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 21, n. 5, p. 499–510, 1994. Citado na página 22.
- CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; TOTH, P. Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations research*, Informs, v. 50, n. 5, p. 851–861, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 16, 23, 40 e 41.
- CHAKRABORTY, A. Fault tolerant fail safe system for railway signalling. In: *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 2, p. 20–22. Citado na página 38.
- CHAVES, A.; CORREA, F. de A.; LORENA, L. Clustering search heuristic for the capacitated p-median problem. *Innovations in Hybrid Intelligent Systems*, Springer, p. 136–143, 2007. Citado na página 26.
- CORMAN, F.; D'ARIANO, A.; PACCIARELLI, D.; PRANZO, M. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 175–192, 2010. Citado na página 23.
- CPLEX, I. I. V12. 1: User's manual for cplex. *International Business Machines Corporation*, v. 46, n. 53, p. 157, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- EPSTEIN, D.; LU, Q.; ZHAO, J.; LEACHMAN, R. *An exact solution procedure for determining the optimal dispatching times for complex rail networks*. [S.l.], 2005. Citado na página 21.
- FANTI, M. P.; GIUA, A.; SEATZU, C. Monitor design for colored petri nets: An application to deadlock prevention in railway networks. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 14, n. 10, p. 1231–1247, 2006. Citado na página 50.
- FILHO, G. R.; NAGANO, M. S.; LORENA, L. A. N. Evolutionary clustering search for flowtime minimization in permutation flow shop. In: SPRINGER. *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*. [S.l.], 2007. p. 69–81. Citado na página 26.
- GHOSEIRI, K.; SZIDAROVSKY, F.; ASGHARPOUR, M. J. A multi-objective train scheduling model and solution. *Transportation research part B: Methodological*, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 927–952, 2004. Citado na página 16.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and cybernetics*, v. 29, n. 3, p. 653–684, 2000. Citado na página 63.
- GOLDBERG, D. Genetic algorithms in optimization, search and machine learning. *Addison Wesley*, v. 905, p. 205–211, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.
- HIGGINS, A.; KOZAN, E.; FERREIRA, L. Optimal scheduling of trains on a single line track. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 30, n. 2, p. 147–161, 1996. Citado na página 21.
- HIGGINS, A.; KOZAN, E.; FERREIRA, L. Heuristic techniques for single line train scheduling. *Journal of heuristics*, Springer, v. 3, n. 1, p. 43–62, 1997. Citado na página 22.
- HO, N. B.; TAY, J. C.; LAI, E. M.-K. An effective architecture for learning and evolving flexible job-shop schedules. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 179, n. 2, p. 316–333, 2007. Citado na página 24.

- HOOKE, R.; JEEVES, T. A. “direct search” solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM (JACM)*, ACM, v. 8, n. 2, p. 212–229, 1961. Citado na página 25.
- JAMILI, A.; SHAFIA, M. A.; SADJADI, S. J.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. Solving a periodic single-track train timetabling problem by an efficient hybrid algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 25, n. 4, p. 793–800, 2012. Citado na página 23.
- KANSO, K.; MOLLER, F.; SETZER, A. Automated verification of signalling principles in railway interlocking systems. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Elsevier, v. 250, n. 2, p. 19–31, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- KESLER, S. E. Mineral supply and demand into the 21st century. In: *US Geological Survey circular 1294: proceedings for a workshop on deposit modeling, mineral resource assessment, and their role in sustainable development*. Reston, VA: US Geological Survey. [S.l.: s.n.], 2007. p. 55–62. Citado na página 14.
- KRÖMER, P.; SNÁŠEL, V.; PLATOŠ, J.; ABRAHAM, A. Many-threaded implementation of differential evolution for the cuda platform. In: ACM. *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. [S.l.], 2011. p. 1595–1602. Citado na página 25.
- LAMPORT, L.; SHOSTAK, R.; PEASE, M. The byzantine generals problem. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, ACM, v. 4, n. 3, p. 382–401, 1982. Citado na página 39.
- LEE, Y.; CHEN, C.-Y. A heuristic for the train pathing and timetabling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 43, n. 8, p. 837–851, 2009. Citado na página 23.
- LINDNER, T.; ZIMMERMANN, U. T. Cost optimal periodic train scheduling. *Mathematical Methods of Operations Research*, Springer, v. 62, n. 2, p. 281–295, 2005. Citado na página 21.
- LIU, S. Q.; KOZAN, E. Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 2840–2852, 2009. Citado na página 16.
- LIU, X.; SAAT, M.; BARKAN, C. Analysis of causes of major train derailment and their effect on accident rates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, n. 2289, p. 154–163, 2012. Citado na página 41.
- MISSIKOFF, M. An object-oriented approach to an information and decision support system for railway traffic control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 11, n. 1, p. 25–40, 1998. Citado na página 39.
- MIURA, S.; TAKAI, H.; UCHIDA, M.; FUKADA, Y. The mechanism of railway tracks. *Japan Railway & Transport Review*, v. 3, p. 38–45, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 41.

- MORADI, E.; GHOMI, S. F.; ZANDIEH, M. Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert systems with applications*, Elsevier, v. 38, n. 6, p. 7169–7178, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 42.
- MORLEY, M. J. Safety in railway signalling data: A behavioural analysis. In: *Higher order logic theorem proving and its applications*. [S.l.]: Springer, 1994. p. 464–474. Citado na página 33.
- MORLEY, M. J. Safety-level communication in railway interlockings. *Science of Computer Programming*, Elsevier, v. 29, n. 1-2, p. 147–170, 1997. Citado na página 33.
- MU, S.; DESSOUKY, M. Scheduling freight trains traveling on complex networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 45, n. 7, p. 1103–1123, 2011. Citado na página 61.
- NAGANO, M. S.; SILVA, A. A. D.; LORENA, L. A. N. A new evolutionary clustering search for a no-wait flow shop problem with set-up times. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 1114–1120, 2012. Citado na página 26.
- NICKOLLS, J.; BUCK, I.; GARLAND, M.; SKADRON, K. Scalable parallel programming with cuda. *Queue*, ACM, v. 6, n. 2, p. 40–53, 2008. Citado na página 25.
- NIJKAMP, P.; VLEUGEL, J.; KREUTZBERGER, E. Assessment of capacity in infrastructure networks: a multidimensional view. *Transportation planning and technology*, Taylor & Francis, v. 17, n. 4, p. 301–310, 1993. Citado na página 15.
- NIU, H.; TIAN, X.; ZHOU, X. Demand-driven train schedule synchronization for high-speed rail lines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 16, n. 5, p. 2642–2652, 2015. Citado na página 24.
- NIU, H.; ZHANG, M. An optimization to schedule train operations with phase-regular framework for intercity rail lines. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2012, 2012. Citado na página 23.
- OLIVEIRA, A.; LORENA, L. Pattern sequencing problems by clustering search. *Advances in Artificial Intelligence-IBERAMIA-SBIA 2006*, Springer, p. 218–227, 2006. Citado na página 26.
- OLIVEIRA, A. C.; LORENA, L. A. Detecting promising areas by evolutionary clustering search. In: *Advances in Artificial Intelligence-SBIA 2004*. [S.l.]: Springer, 2004. p. 385–394. Citado 6 vezes nas páginas 18, 25, 26, 27, 57 e 63.
- OLIVEIRA, A. C.; LORENA, L. A. Hybrid evolutionary algorithms and clustering search. In: *Hybrid Evolutionary Algorithms*. [S.l.]: Springer, 2007. p. 77–99. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- OLIVEIRA, A. C. M. d.; CHAVES, A. A.; LORENA, L. A. N. Clustering search. *Pesquisa operacional*, SciELO Brasil, v. 33, n. 1, p. 105–121, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

OLIVEIRA, A. C. M. de; LORENA, L. A. N. A constructive genetic algorithm for gate matrix layout problems. *IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems*, v. 21, n. 8, p. 969–974, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TCAD.2002.800454>>. Citado na página 58.

OLIVEIRA, E.; SMITH, B. M. A job-shop scheduling model for the single-track railway scheduling problem. *RESEARCH REPORT SERIES-UNIVERSITY OF LEEDS SCHOOL OF COMPUTER STUDIES LU SCS RR*, University of Leeds, n. 21, 2000. Citado na página 22.

OLIVEIRA, R. M. de; MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Clustering search for the berth allocation problem. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 39, n. 5, p. 5499–5505, 2012. Citado na página 27.

PACCIARELLI, D.; PRANZO, M. A tabu search algorithm for the railway scheduling problem. In: *Proceedings of the 4th Metaheuristic International Conference, Porto*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 16–20. Citado na página 23.

PACHL, J. Deadlock avoidance in railroad operations simulations. In: *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 50.

PAIS, P. S. M.; GOMES, M. F. M.; CORONEL, D. A. Análise da competitividade das exportações brasileiras de minério de ferro, de 2000 a 2008. *Revista de Administração Mackenzie*, Mackenzie Presbyterian University, v. 13, n. 4, p. 121, 2012. Citado na página 15.

PEETERS, L. *Cyclic railway timetable optimization*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 41.

PETERSSON, A. *Train Re-scheduling: A Massively Parallel Approach Using CUDA*. 2015. Citado na página 25.

PING, L.; AXIN, N.; LIMIN, J.; FUZHANG, W. Study on intelligent train dispatching. In: *IEEE. Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*. [S.l.], 2001. p. 949–953. Citado na página 23.

PINHEIRO, E. *RailWay File Repository*. 2016. <<https://github.com/ehfp/ttp/>>. [Online; accessed 03-Feb-2016]. Citado na página 67.

PINHEIRO, E.; MIRANDA, E.; OLIVEIRA, A. On the train timetabling problem and heuristics. *SBPO, SOBRAPO*, v. 48, n. 1, p. 1942–1952, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 23, 58 e 67.

RAMOND, F.; MARCOS, N. Roadef/euro 2014 challenge, trains don't vanish!-final phase, rolling stock unit management on railway sites. *Challenge ROADEF/EURO*, 2014. Citado na página 28.

ROPKE, S.; PISINGER, D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation science*, Informs, v. 40, n. 4, p. 455–472, 2006. Citado na página 64.

ROSENBLATT, M. A central limit theorem and a strong mixing condition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 42, n. 1, p. 43–47, 1956. Citado na página 71.

- ROY, B.; SUSSMANN, B. Les problemes d'ordonnement avec contraintes disjonctives. *Note ds*, SEMA Montrouge, v. 9, 1964. Citado na página 23.
- RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I.; BOOCH, G. *Unified modeling language reference manual, the*. [S.l.]: Pearson Higher Education, 2004. Citado na página 55.
- RYOO, S.; RODRIGUES, C. I.; BAGHSORKHI, S. S.; STONE, S. S.; KIRK, D. B.; HWU, W.-m. W. Optimization principles and application performance evaluation of a multithreaded gpu using cuda. In: ACM. *Proceedings of the 13th ACM SIGPLAN Symposium on Principles and practice of parallel programming*. [S.l.], 2008. p. 73–82. Citado na página 25.
- ŞAHIN, İ. Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 33, n. 7, p. 511–534, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 39.
- SALIDO, M. A.; ABRIL, M.; BARBER, F.; INGOLOTTI, L.; TORMOS, P.; LOVA, A. *Applying topological constraint optimization techniques to periodic train scheduling*. [S.l.], 2005. Citado na página 21.
- SCHENSTED, C. Longest increasing and decreasing subsequences. *order*, v. 7, p. 59, 1961. Citado na página 62.
- SCHRAGE, L. E. *Optimization modeling with LINGO*. [S.l.]: Lindo System, 2006. Citado na página 22.
- SERAFINI, P.; UKOVICH, W. A mathematical model for periodic scheduling problems. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, SIAM, v. 2, n. 4, p. 550–581, 1989. Citado na página 17.
- SHAFIULLAH, G.; GYASI-AGYEI, A.; WOLFS, P. Survey of wireless communications applications in the railway industry. In: IEEE. *Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, 2007. AusWireless 2007. The 2nd International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 65–65. Citado na página 38.
- SHAW, P. A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. *APES Group, Dept of Computer Science, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK*, 1997. Citado na página 61.
- SHI, R.-J.; MAO, B.-H.; DING, Y.; BAI, Y.; CHEN, Y. Timetable optimization of rail transit loop line with transfer coordination. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2016, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 61.
- STUDENT. The probable error of a mean. *Biometrika*, JSTOR, p. 1–25, 1908. Citado na página 71.
- SULLIVAN, L.; D'AGOSTINO, R. Robustness of the t test applied to data distorted from normality by floor effects. *Journal of dental research*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 71, n. 12, p. 1938–1943, 1992. Citado na página 71.
- SUN, X.; ZHANG, S.; DONG, H.; ZHU, H. Optimal train schedule with headway and passenger flow dynamic models. In: IEEE. *Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2013 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 307–312. Citado na página 23.

- SZPIGEL, B. Optimal train scheduling on a single line railway. *JOURNAL OF OPERATIONS RESEARCH*, 1973. Citado na página 21.
- TAKASHIGE, T. Signalling systems for safe railway transport. *Japan Railway & Transportation Review*, v. 21, p. 44–52, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 31, 35 e 36.
- TALBI, E.-G. A taxonomy of hybrid metaheuristics. *Journal of heuristics*, Kluwer Academic Publishers, v. 8, n. 5, p. 541–564, 2002. Citado na página 18.
- TALBI, E.-G. *Metaheuristics: from design to implementation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. v. 74. Citado 3 vezes nas páginas 18, 57 e 70.
- TORMOS, P.; LOVA, A.; BARBER, F.; INGOLOTTI, L.; ABRIL, M.; SALIDO, M. A. A genetic algorithm for railway scheduling problems. In: *Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications*. [S.l.]: Springer, 2008. p. 255–276. Citado 6 vezes nas páginas 23, 43, 53, 54, 58 e 61.
- XU, X.; LI, K.; YANG, L.; YE, J. Balanced train timetabling on a single-line railway with optimized velocity. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 38, n. 3, p. 894–909, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 61.
- YAN, Y.; GROSSMAN, M.; SARKAR, V. Jcuda: A programmer-friendly interface for accelerating java programs with cuda. In: SPRINGER. *European Conference on Parallel Processing*. [S.l.], 2009. p. 887–899. Citado na página 25.
- YELLISHETTY, M.; RANJITH, P.; THARUMARAJAH, A. Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable? *Resources, conservation and recycling*, Elsevier, v. 54, n. 12, p. 1084–1094, 2010. Citado na página 14.
- ZAFAR, N. A.; KHAN, S. A.; ARAKI, K. Towards the safety properties of moving block railway interlocking system. *Int. J. Innovative Comput., Info & Control*, v. 8, n. 7, p. 5677–5690, 2012. Citado na página 34.
- ZHONG, J.-H.; SHEN, M.; ZHANG, J.; CHUNG, H. S.-H.; SHI, Y.-H.; LI, Y. A differential evolution algorithm with dual populations for solving periodic railway timetable scheduling problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, IEEE, v. 17, n. 4, p. 512–527, 2013. Citado na página 24.
- ZIMMERMANN, A.; HOMMEL, G. A train control system case study in model-based real time system design. In: IEEE. *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2003. Proceedings. International*. [S.l.], 2003. p. 8–pp. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.