

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

HENRIQUE MARQUES DE ARAUJO

**TESTE DE UMA HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE
TRENS EM LINHAS SINGELAS**

São Bernardo do Campo

2013

HENRIQUE MARQUES DE ARAUJO

**TESTE DE UMA HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE
TRENS EM LINHAS SINGELAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário da FEI para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica com ênfase em Produção, orientado
pelo Prof. Dr. Mauro Sampaio.

São Bernardo do Campo

2013

Araújo, Henrique Marques de.

Teste de uma heurística para o problema de programação de trens em linhas singelas / Henrique Marques de Araújo. Bernardo do Campo, 2013.

79 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sampaio.

1. Ferrovia. Heurística. 3. Programação de Trens. I. Sampaio, Mauro, orient. II. Título.

CDU 007.5



APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA

PMG-10

Centro Universitário da **FEI**

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Henrique Marques de Araújo

Matrícula: 210120-2

Título do Trabalho: Teste de uma heurística para o problema de programação de trens em linhas singelas.

Área de Concentração: Produção

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Mauro Sampaio

Data da realização da defesa: 29/05/2013

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 29 de Maio de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Mauro Sampaio

Ass.: _____

Prof. Dr. José Eugenio Leal

Ass.: _____

Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Aos meus pais Alceu Marques de Araújo (*in memoriam*) e Solange Abranches Marques de Araújo, exemplos de caráter, amizade e perseverança.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelas oportunidades valiosas que me foram dadas, pela sabedoria que me guia, levando-me a conquistar com dignidade os meus ideais.

Ao Prof. Dr. Mauro Sampaio, pela atenção, orientação e ensinamentos imprescindíveis para a conclusão deste trabalho, ao Prof. Dr Yusin Lee pela colaboração na realização do segundo cenário e aos executivos da empresa ferroviária pelo fornecimento dos dados.

Aos meus irmãos, Adriana e Luciano, que juntos me fizeram empenhar para conseguir mais uma conquista.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho avalia a efetividade de uma heurística para a programação de trens em um trecho de ferrovia brasileira de linha singela. O algoritmo central empregado foi o módulo de grade de horário do *TrainWorld* (CHEN et al., 2013), uma versão melhorada da heurística de Lee e Chen (2009). A heurística avalia diversas alternativas de sequência de trens entre estações até encontrar a melhor alternativa possível capaz de minimizar atrasos no sistema. Dois cenários foram estudados: a simulação de um trecho de linha ferroviária fictícia (três trens e três estações) e uma simulação derivada de um caso real de uma ferrovia brasileira localizada no estado de Minas Gerais, envolvendo 28 trens e 15 estações em uma linha singela. Os resultados indicam que a grade de horário proposta pela heurística foi superior ao da grade de horário empregada pela ferrovia), entretanto o tempo de execução computacional ainda é parcialmente elevado. Oportunidades de melhoria da heurística foram identificadas.

Palavras-chave: Ferrovia. Programação de Trens. Heurística.

ABSTRACT

This study evaluates the effectiveness of a heuristic for scheduling trains on a stretch of a single Brazilian railway line. The algorithm used was the central module of the time grid *TrainWorld* (CHEN et al., 2013), an improved version of the heuristic Lee and Chen (2009). The heuristic evaluates several alternative sequence of trains between railway stations to find the best possible alternative that minimize delays in the system. Two scenarios were studied: a simulation of a fictional stretch of railway line (three trains and three stations) and a simulation derived from a real case of a railroad located in the Brazilian state of Minas Gerais, involving 28 trains and 15 stations in a single line. The results indicate that the time grid proposed by the heuristic was better than the time grid used by the railroad, but the computation running time remains high. Opportunities for improvement were identified heuristics.

Key words: Railroad. Scheduling of Trains. Heuristics.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANTT	Associação Nacional dos Transportes Terrestres
CCO	Centro de Controle de Operações
CNT	Confederação Nacional do Transporte
MT	Ministério dos Transportes
PL	Programação Linear
PO	Programação Operacional

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pátio de manobra, oficina, carga e descarga.....	20
Figura 2 – Diferença entre vias singelas e vias múltiplas	22
Figura 3 – Trens viajando em sentido contrário (cruzamento)	23
Figura 4 – Trens viajando no mesmo sentido (ultrapassagem)	23
Figura 5 – <i>Headway</i> mínimo e seção intermediária	24
Figura 6 – <i>Headway</i> mínimo e ponto de cruzamento ou ultrapassagem	24
Figura 7 – <i>Headway</i> mínimo de uma estação a outra estação.....	24
Figura 8 – Planejamento estratégico	25
Figura 9 – Definição de <i>link</i> , bloco e faixa	30
Figura 10 – Heurística para programação de serviços	32
Figura 11 – Representação das faixas dentro da estação	40
Figura 12 – Diagrama de horários	43
Figura 13 – Mudança do valor da função objetivo no processo do cenário 1	44
Figura 14 – Passos seguidos pela heurística.....	45
Figura 15 – Tempo de permanência médio dos trens nas estações	58
Figura 16 – Tempo de tráfego entre estações (horas)	59
Figura 17 – Tempo total de percurso (horas)	59
Figura 18 – Diagrama representativo da trajetória dos trens entre espaço-tempo	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração da ferrovia	39
Tabela 2 – Tempo mínimo de percurso pela faixa	39
Tabela 3 – Tempo de percurso (em minutos) dos serviços entre estações	40
Tabela 4 – Resultados do cenário 1 – teste de todas as alternativas possíveis de sequenciamento de trens	42
Tabela 5 – O melhor resultado (FO = 88,5)	43
Tabela 6 – Programação inicial livre de conflito (FO = 133)	46
Tabela 7 – Atrasos encontrados na programação(FO = 133).....	47
Tabela 8 – Nova programação de trens para alternativa C (FO = 88,5 h ponderadas)...	47
Tabela 9 – Atrasos encontrados na programação	48
Tabela 10 – Números de faixas por estação	49
Tabela 11 – Percurso para cada um dos 28 trens.....	50
Tabela 12 – O tempo mínimo de permanência nas estações em minutos.....	51
Tabela 13 – O tempo mínimo dos trens entre estações em horas.....	52
Tabela 14 – Grade de horário da heurística.....	54
Tabela 15 – Grade de horário real da empresa	55
Tabela 16 – Comparação da programação da empresa <i>versus</i> resultados da pesquisa...	56
Tabela 17 – Diferença absoluta da hora de partida.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Introdução à área do conhecimento	13
1.2 Objetivo	15
1.3 Pergunta de pesquisa	15
1.4 Justificativa do estudo.....	16
1.5 Abrangência do estudo.....	16
1.6 Metodologia	17
1.7 Organização do estudo	18
2 DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA	19
2.1 Elementos básicos do transporte ferroviário	19
2.2 Processo de operação ferroviária.....	20
2.3 Cruzamento e ultrapassagem de trens	22
2.4 <i>Headway</i> mínimo	23
3 PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO	25
3.1 Introdução aos problemas de programação em operação ferroviária	25
3.2 Aplicações de técnicas de pesquisa operacional em problemas táticos	28
4 HEURÍSTICA PARA PROGRAMAÇÃO DE TRENS.....	30
4.1 Definições.....	30
4.2 Descrição geral da heurística	30
4.3 Descrição esquemática da heurística	32
4.3.1 Solução inicial.....	33
4.3.2 Etapa 1 – ordenar dos serviços nos blocos entre as estações.....	33
4.3.3 Etapa 2 – atribuir faixas para os serviços dentro das estações	34
4.3.4 Etapa 3 – ordenar os serviços nas faixas dentro das estações.....	36
4.3.5 Etapa 4 – solução final para a programação de serviços	38
5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS	39
5.1 Cenário 01	39

5.2 Cenário 02	49
CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução à área do conhecimento

O modal ferroviário é considerado um meio de transporte sustentável, devido a menor emissão de poluente do sistema e ao mínimo impacto social e ambiental de sua infraestrutura, além de ser econômico para transporte de carga em países continentais com longas distâncias a serem percorridas.

No Brasil, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2012 as ferrovias são responsáveis por uma pequena parcela do volume de mercadorias transportadas (20,7% em peso), em comparação com o modal rodoviário (61,1%). O principal impacto da concentração de transporte no modal rodoviário é o congestionamento nas estradas e o aumento dos custos financeiros e ambientais. Para reverter esse cenário, o governo brasileiro está investindo prioritariamente no modal ferroviário e hidroviário; a ideia central é promover uma mudança na matriz de transporte nacional em algumas décadas, conforme o Ministério dos Transportes (MT).

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) no relatório de 2011 identificou a existência de uma ociosidade onerosa na malha ferroviária brasileira. Dos 28 mil quilômetros de linha férreas do país, 18 mil quilômetros são trechos abandonados, outros 7 mil quilômetros praticamente operam com baixa ocupação e apenas 3 mil quilômetros ativos restantes operam próximo da capacidade máxima. Estes fatos são decorrentes de um crescimento desordenado e não planejado de malhas ferroviárias brasileiras.

Outra dificuldade encontrada é a concorrência direta do modal ferroviário com as rodovias, pois estas deveriam ser modais de transporte complementar. Faltou no passado um pensamento de integração entre os modais pelas agências de controle governamental. Existem planos futuros de integração, mas ainda deve demorar algumas décadas para um desempenho mais eficiente da logística brasileira. Enquanto dias melhores não vêm, resta a importante atividade de otimizar a utilização da malha existente, mesmo sendo de apenas 3 mil quilômetros de extensão.

Há evidência da necessidade urgente de aumento do volume transportado, tanto nas linhas ativas como inativas, para a própria competitividade da economia brasileira. Nos

trechos ativos, foco deste estudo, é preciso buscar a melhor combinação entre o peso e a velocidade dos trens para aumentar a produtividade do sistema ferroviário.

A programação de horário de trens em uma linha singela tem o objetivo de reduzir o tempo total de viagem de um conjunto de trens com destinos diferentes. Ela determina o momento exato de cruzamento e ultrapassagem de trens em um sistema ferroviário, visando minimizar atrasos e os desvios do cronograma planejado e, simultaneamente, respeita as restrições operacionais do sistema, como, por exemplo, evita choques entre trens.

A programação de trens tem atraído atenção do meio acadêmico (SZPIGEL, 1972; SAUDER; WESTERMAN, 1983; JOVANOVIĆ; HARKER, 1991; LEAL; SOARES; NUNES, 2004; LEE; CHEN et al., 2013) e também de empresários. Diversas companhias férreas estão investindo no desenvolvimento e na implantação de sistemas avançados de controle de trens que fornecem informações em tempo real sobre a posição e velocidade dos trens que trafegam em suas malhas.

Na literatura há diversos trabalhos que modelam matematicamente as decisões de programação de horário de trens, a fim de minimizar o tempo total de viagem dos trens, sujeito a um conjunto de restrições operacionais e requisitos de segurança (LEAL; SOARES; NUNES, 2004; CAPRARA et al., 2006; D'ARIANO; PACCIARELLI; PRANZO, 2007; KROON; DEKKER; VROMANS, 2007; ZHOU; ZHONG, 2007; LI et al., 2008; LEE; CHEN, 2009; CORMAN et al., 2010; CASTILLO et al., 2011; CAIMI et al., 2011; MIN et al., 2011). As técnicas utilizadas foram diversas: otimização, heurística, meta-heurística e até simulações, porém, a maioria destas técnicas foi desenvolvida para a solução de problemas de programação de trens em vias múltiplas em países europeus e norte-americanos. Contudo, no caso das ferrovias brasileiras, predomina a circulação de trens em vias singelas. Assim, surge a oportunidade de testar, avaliar e, quando possível, adequar tais técnicas à realidade das ferrovias brasileiras, levando-se em consideração os requisitos de memória e tempo computacional para a solução dos problemas, garantindo assim sistemas de apoio à decisões eficazes (CASTILLO et al., 2011).

Seguindo esta linha, no Brasil, Leal, Soares e Nunes (2004) desenvolveram um procedimento heurístico para a resolução do problema de programação de trens em vias singelas. O procedimento heurístico proposto é uma ferramenta de apoio à decisão do centro de controle operacional no gerenciamento do tráfego ferroviário, na medida em que fornece ao controlador uma ferramenta que o auxilie no sequenciamento dos trens em tempo real. Este modelo pode ajudar o controlador a resolver os conflitos entre os trens (ultrapassagem ou cruzamentos) em estações, de maneira a cumprir com o objetivo pré-definido. Anteriormente,

os conflitos eram resolvidos através da avaliação de gráfico espaço-tempo, utilizando a experiência dos controladores e o conhecimento de algumas condições da via. A utilização do modelo, em uma aplicação real, mostrou que o modelo é capaz de produzir resultados satisfatórios para o problema. A heurística utiliza informações, tais como prioridade dos trens, impacto do atraso, tempo de percurso de cada trem em cada trecho, tempo máximo de atraso em cada estação, hora programada para saída do trem e quantidade de vias no trecho e nas estações, para minimizar os atrasos provocados pelos conflitos entre trens.

Contudo, o estudo de Lee e Chen (2009) chamou a atenção por trabalhar com mais variáveis, tais como faixas, pesos dos serviços, entre outros, e apresentar uma heurística para resolver o problema de fluxo de trem e o problema de horário simultaneamente. A heurística gera várias alternativas de sequenciamento de trem dentro da fase de inicialização. Um modelo de programação linear avalia a qualidade de cada combinação encontrada.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é compreender, descrever e aplicar o método de heurística proposto por Lee e Chen (2009) para controle de percurso de trens e problemas de programação em vias singelas com o intuito de verificar se tal método é computacionalmente viável e proporciona melhores resultados que o atual método utilizado pela rede ferroviária.

1.3 Pergunta de pesquisa

Em síntese, pretende-se responder à seguinte questão de pesquisa:

A heurística de Lee e Chen (2009) para programação de trens é computacionalmente viável e proporciona melhores resultados do que a praticada pela empresa ferroviária de linha singela?

1.4 Justificativa do estudo

No Brasil, ao contrário de outros países, as ferrovias foram divididas em concessões, de tal forma que cada concessionária fica responsável por administrar um conjunto de estações e vias de circulação. Apesar dos grandes investimentos realizados pelas concessionárias, alguns setores ainda necessitam de maior investimento, como é o caso do setor operacional que ainda utiliza locomotivas sucateadas. O resultado é um grande número de avarias de locomotivas no trecho limite de velocidade muito baixo. Por esses motivos, torna-se muito interessante a aplicação de uma heurística eficiente para lidar com esta situação.

A programação eficiente de trens é importante para o melhor aproveitamento da malha e evitar acidentes ocasionados por conflitos entre trens. Apesar dos diversos modelos propostos na literatura, ainda existe uma busca por melhores sistemas de controle e de programações antes e durante o percurso dos trens. Essa busca faz com que os estudos nessa área ainda perdurem (CASTILLO et al., 2011; CAIMI et al., 2011; MIN et al., 2011).

1.5 Abrangência do estudo

A aplicação da heurística analisa dois cenários distintos:

- a) pequeno cenário fictício com 3 trens em 3 estações;
- b) cenário real de um trecho de ferrovia brasileira caracterizado por um intenso fluxo de trens em final de dezembro de 2012. Este período de coleta de dados é considerado crítico devido à necessidade de fechamento de metas; logo, o fluxo de trens deve ser o mais eficiente possível.

1.6 Metodologia

Os métodos científicos são conhecidos como técnicas utilizadas para comprovar se um conhecimento é científico ou não. Gil (1999) afirma que existem duas abordagens amplas de pesquisa diferentes: qualitativa e quantitativa.

Um estudo qualitativo busca compreender um novo fenômeno em seu ambiente de ocorrência, de tal forma que uma análise em profundidade seja efetuada. Para esse tipo de análise, segundo Sampieri, Collado e Lúcio (2006), devem-se utilizar métodos de coleta de dados como entrevista, revisão de documentos, história de vida, discussão em grupo, entre outros. O estudo de caso é classificado como um método qualitativo (YIN, 2010). Pesquisa-ação e pesquisa participante também são classificadas como métodos qualitativos.

Por outro lado, a abordagem de um estudo quantitativo consiste em verificar a validade de hipóteses previamente estabelecidas através de análise dos dados gerados pelos resultados. Esse tipo de estudo está associado normalmente a experimentos, *surveys*, simulações e pesquisa operacional (ANDRADE, 2004; ARENALES et al., 2007).

Para cada tipo de problema de pesquisa existe um método mais adequado. Temas emergentes são mais adequados para serem explorados através de pesquisa qualitativa e temas mais maduros com pesquisa quantitativa.

O presente trabalho classifica-se como sendo quantitativo, por tratar de um estudo de programação de trens no qual será aplicado um método heurístico. Entretanto, a fonte de dados será de uma única organização.

Heurística é uma técnica que busca boas soluções. A solução encontrada por uma heurística não é necessariamente a melhor possível, mas uma boa solução do problema e muitas vezes próxima do ótimo global. A heurística usada neste trabalho começa com uma solução inicial. Ao final de algumas etapas, a heurística obtém um horário viável que pode ou não superar as soluções já conhecidas e analisadas anteriormente. Durante todo o processo, a heurística mantém uma melhor solução e uma solução corrente até chegar à melhor solução possível após 5.000 iterações.

Para aplicação da heurística neste trabalho foram utilizados dois programas, sendo eles: o *EXCEL da Microsoft*® e o módulo de grade de horário do *TrainWorld* (CHEN et. al., 2013), uma versão melhorada da heurística de Lee e Chen (2009). O programa *EXCEL da Microsoft*® foi utilizado para resolver o cenário de três trens em um trecho de três estações. Já o cenário com vinte e oito trens e quinze estações utilizou o módulo de grade de horário do

TrainWorld para o problema real da empresa, pois como esse cenário envolve um grande número de variáveis e o *EXCEL da Microsoft*© não teria capacidade suficiente para tratar computacionalmente o problema.

1.7 Organização do estudo

Esta proposta está organizada conforme segue:

A seção 1 corresponde à introdução do estudo. Neste capítulo foi apresentado o problema de pesquisa, ideia central do trabalho, juntamente com seus objetivos e perguntas de pesquisa. Também foram apresentadas as justificativas para a escolha do tema, a sua abrangência e a metodologia utilizada;

A seção 2 descreve os elementos básicos de uma operação ferroviária e explica como ocorrem os cruzamentos, as ultrapassagens e a função do *Headway* mínimo;

A seção 3 descreve os problemas de alocação e programação de horários de trens e as principais publicações sobre o tema;

A seção 4 descreve em profundidade a heurística proposta por Lee e Chen (2009);

Na seção 5, o modelo de Lee e Chen (2009) é aplicado em um trecho ferroviário, levando em consideração os dois cenários propostos. Os resultados computacionais dos experimentos realizados são analisados.

Posteriormente são feitas as conclusões e apresentada às propostas para futuros trabalhos.

2 DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA

2.1 Elementos básicos do transporte ferroviário

Brina (1988), Medeiros (1989), MRS logística S/A (2008), Leal (2003) e Tancredo (2005) definem alguns elementos que compõem o transporte ferroviário, tais como:

- a) rota de um trem – Percurso que um trem realiza de sua estação de origem até a estação destino;
- b) linha singela – É uma única linha que interliga duas estações adjacentes, sendo utilizada em ambos os sentidos, com restrições;
- c) linhas múltiplas – São múltiplas linhas que interligam duas estações adjacentes, sendo utilizadas para ambos os sentidos, com as mesmas restrições da linha singela;
- d) pátio – Conjunto de vias destinadas à circulação, formação, manobra de trens e estacionamento de vagões ou de trens, além de serem utilizados como pontos de cruzamento e ultrapassagem.
- e) estação – Local de origem ou destino, parada ou somente passagem de trens. Nela existe espaço destinado à execução de serviços ligados à operação e circulação de trens. Cada estação possui um pátio formado de, no mínimo, uma linha adicional ao lado da principal;
- f) trecho – Extensão de uma via principal entre duas estações;
- g) subtrecho – Também denominados seções de bloqueio, são segmentos de trecho em que somente um trem poderá ocupar em um dado momento. Para isso, possui limites definidos por sinais e detectores de passagem de trem (circuitos de linhas). Sua utilização é controlada pelo programador de tráfego;
- h) programador de tráfego – Pessoa responsável pelo planejamento, programação e execução da circulação dos trens na malha. É responsável pelas decisões referentes ao cruzamento de trens. Sua função é acompanhar continuamente a posição dos trens, com o intuito de transmitir as instruções resultantes das decisões sobre cruzamentos, rotas e paradas, garantindo assim a segurança na movimentação dos trens;

- i) operador ferroviário – Responsável pelo planejamento detalhado da operação dos trens.

2.2 Processo de operação ferroviária

Numa operação ferroviária, os pátios concentram o maior número de atividades desempenhadas na operação ferroviária. A sua utilização reflete diretamente sobre a eficiência do sistema ferroviário. Com isso, sua má utilização pode criar pontos de gargalos conforme aponta Torraca (1996).

Alguns autores, tais como Marinov e Veigas (2009), He, Song e Chaudhry (2003), Rosa (2009b) e Petersen e Taylor (1982) compreendem que os pátios possuem diversas funções e detinham a existência de cinco tipos:

- a) manobra;
- b) terminal;
- c) cruzamento;
- d) transbordo;
- e) oficina.

A Figura 1 ilustra um pátio de manobra com ramificações para o pátio de carga ou descarga (terminal) e o pátio da oficina.

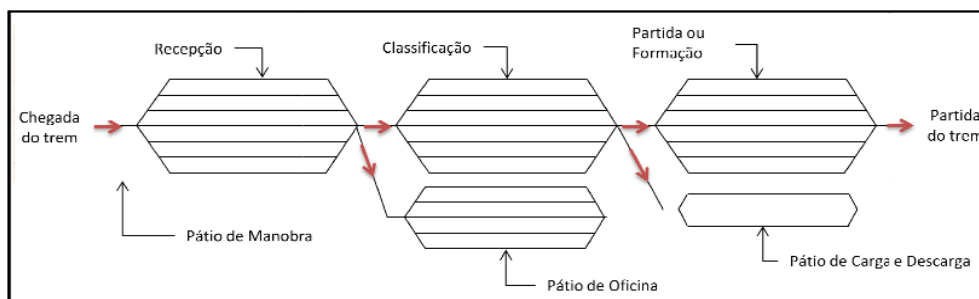


Figura 1 – Pátio de manobra, oficina, carga e descarga.
Fonte: Autor “adaptado de” Rosa, 2009b, p.25.

Conforme Figura 1, Rosa (2009b) entende que o pátio de manobra é destinado à realização de todo o tipo de manobra de veículos ferroviários. Essas linhas são agrupadas em feixes (conjunto de vários desvios), formando assim os subpátios que facilitam tanto as

manobras ferroviárias quanto o desmembramento, formação de composições e estacionamento de vagões.

Os pátios destinados à recepção de trens realizam a tarefa de receber os trens, recolher toda a documentação e vistoriar os vagões e o estado das cargas (BEKTAS; CRAINIC; MORENCY, 2009).

Caso haja necessidade, é realizada a segmentação da locomotiva com os vagões. Em seguida, esses vagões seguem para o pátio de classificação, onde é realizada a separação por lotes de vagões conforme destino do cliente ou produto comum. Normalmente, nesses pátios há uma maior quantidade de linhas, pois cada uma delas deve ser destinada a um conjunto de vagões com as mesmas características (ROSA, 2009a).

Após a classificação, eles são levados para o pátio de partida ou formação. Neste local, os vagões são agrupados dentro da sequência de estações a que eles se destinam e são engatados a uma locomotiva de viagem e ficam aguardando a liberação de viagem.

Em paralelo, todas as documentações necessárias são providenciadas para que o trem possa seguir viagem. Além disso, são vistoriados os vagões com o intuito de avaliar se existe alguma anomalia (ROSA, 2009a).

Os terminais ferroviários são dedicados à carga e descarga de produtos. Usualmente, após esse processo, os vagões são encaminhados aos pátios de recepção e de classificação, onde são direcionados para os novos destinos.

O trem, ao sair do pátio de manobra para realizar sua viagem, poderá vir a passar por algum pátio de cruzamento. Esses pátios têm como principal função a ordenação da circulação ferroviária em linhas singelas, criando possibilidades de cruzamento ou uma ultrapassagem, caso haja necessidade.

Existem também os pátios de intercâmbio ou transbordo que estão localizados no encontro entre duas ferrovias. Esses pátios servem de apoio no caso de haver o transbordo da carga, devido à diferença de bitolas entre os trechos. Já os pátios de oficina servem de apoio às manobras realizadas com as locomotivas em conserto.

Ao contrário das estações onde há um maior número de atividade, as linhas possuem como única atividade o deslocamento de trem. Sendo assim, as linhas podem ser singelas, quando somente uma linha interliga duas estações, ou vias múltiplas, quando existe mais de uma entre duas estações. A diferença entre as duas é que num trecho de linha singela a capacidade de transporte é menor do que num trecho de linhas múltiplas. Isso ocorre porque para cada via de circulação somente um trem pode circular de cada vez, ou seja, nenhum outro trem pode circular naquele trecho enquanto ele estiver sendo utilizado. Já no caso de

haver duas vias, dois trens de qualquer sentido podem circular naquele trecho, utilizando cada linha, conforme aponta Torraca (1996). A Figura 2 ilustra esse tipo de situação.

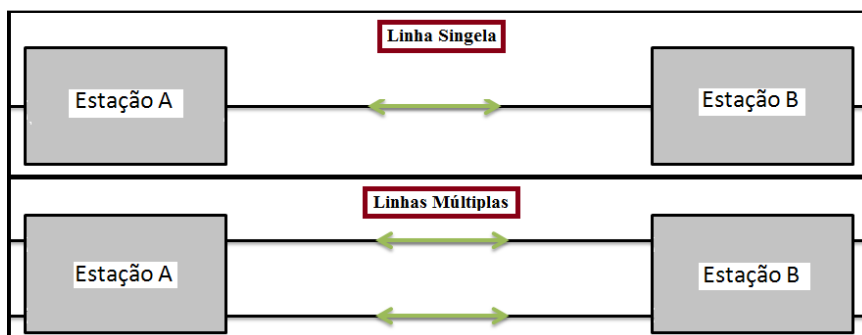


Figura 2 – Diferença entre linhas singelas e linhas múltiplas.
Fonte: Autor.

A capacidade da linha é o máximo volume de tráfego que a malha pode suportar num determinado período de tempo, levando em consideração os tempos de atraso aceitáveis, para que não haja perda de qualidade do serviço, conforme aponta Fonseca Neto (1986).

2.3 Cruzamento e ultrapassagem de trens

Os maiores conflitos ocorrem nas operações em linhas singelas, por ser uma linha única que liga duas estações adjacentes e que é utilizada para circulação de trens em ambos os sentidos. A circulação dos trens é representada por meio de um gráfico espaço-tempo para os dois sentidos (NUNES, 2004). As Figuras 3 e 4 mostram as necessidades dos cruzamentos e das ultrapassagens.

O conflito acontece quando dois trens estão prestes a ocupar o mesmo trecho ao mesmo tempo. Essa situação pode ocorrer de duas formas distintas: por meio de cruzamento ou ultrapassagem.

Na Figura 3, observa-se que os trens estão viajando em sentido contrário e ocorrerá um cruzamento:

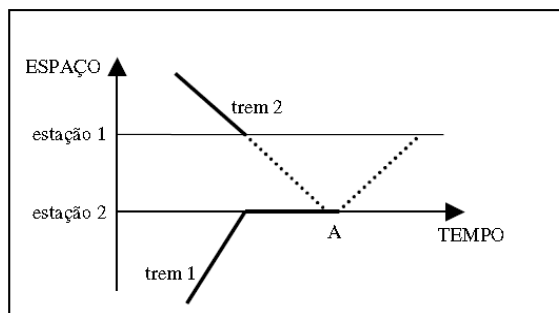


Figura 3 – Trens viajando em sentido contrário (cruzamento).
Fonte: Nunes, 2004, p.19.

Na Figura 4, observa-se que os trens estão viajando no mesmo sentido e ocorrerá ultrapassagem:

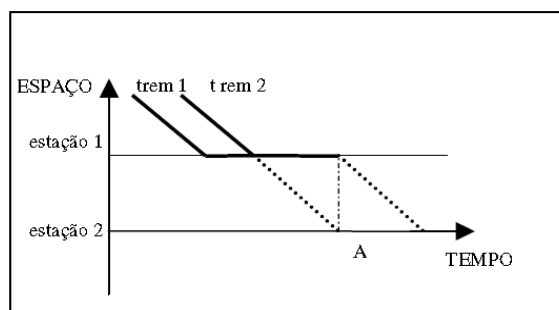


Figura 4 – Trens viajando no mesmo sentido (ultrapassagem).
Fonte: Nunes, 2004, p.20.

2.4 Headway mínimo

No caso de trens consecutivos, o primeiro fator do controle operacional é prevenir colisões entre trens. Desta forma, deve haver o cálculo de intervalo mínimo entre eles, ou seja, headway mínimo (HAY, 1961).

A primeira situação (Figura 5) refere-se à primeira seção do bloqueio, depois da estação de partida. Nesse caso, dois trens de mesmo sentido são separados por sinalização. Na sua maioria, essa sinalização é composta por semáforos que indicam quando a linha está ocupada ou desocupada.

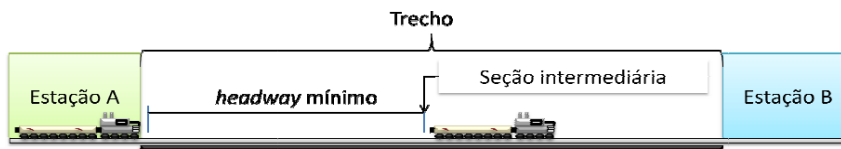


Figura 5 – Headway mínimo e seção intermediária.
Fonte: Autor.

A segunda situação (Figura 6) é calculada para seções intermediárias, nas quais os dois trens estão trafegando no mesmo sentido dentro de um mesmo trecho, estando eles separados somente por uma seção intermediária. A segmentação ocorre devido à existência de desvios nos trechos, ou seja, ao longo da linha existe um pequeno trecho em que a linha principal torna-se dupla. Esses desvios também são utilizados para realizar desvios e cruzamentos.

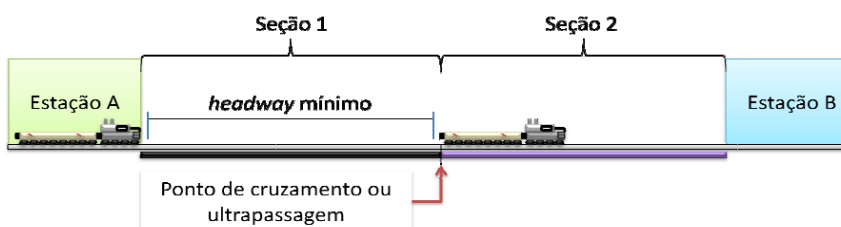


Figura 6 – Headway mínimo e ponto de cruzamento ou ultrapassagem.
Fonte: Autor.

A terceira situação (Figura 7) é realizada no final do trecho, ou seja, o intervalo mínimo entre os dois trens é o tempo que o trem leva para percorrer de uma estação a outra.

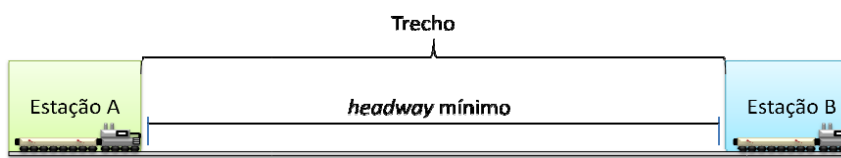


Figura 7 – Headway mínimo de uma estação a outra estação.
Fonte: Autor.

3 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO

3.1 Introdução aos problemas de programação em uma operação ferroviária

Uma ferroviária possui uma variedade de problemas de programação que podem ser modelados e resolvidos usando técnicas de pesquisa operacional. Normalmente, os problemas de programação são resolvidos através de uma série de decisões em diferentes níveis hierárquicos, mas interdependentes (ANDRADE, 2004). A Figura 8 mostra as principais etapas do processo, bem como a ordem em que ocorrem na prática. Em geral, a melhor solução de um nível superior é a entrada para a tomada de decisão do nível seguinte.

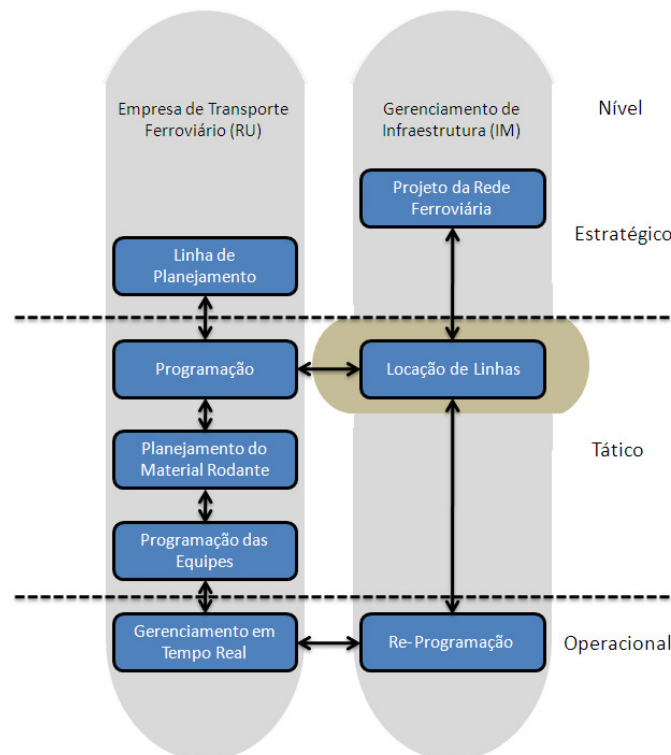


Figura 8 – Planejamento estratégico.

Fonte: Autor “adaptado de” Schlechte (2012), p. 11.

O nível estratégico trata questões de longo prazo como projeto de rede e o planejamento de sua expansão (aquisição de recursos). No plano tático é realizada a alocação de recursos sobre uma infraestrutura teoricamente fixa. Finalmente, na etapa operacional, os recursos de consumo, por exemplo, trens e tripulações, são monitorados em tempo real.

O planejamento estratégico normalmente é uma etapa do planejamento que se refere à organização como um todo e envolve decisões sobre grandes investimentos de capital por horizontes de longo prazo, sendo considerados elementos como o desenho da rede ferroviária e sua evolução.

Em um segundo nível está o planejamento tático, onde num horizonte de alguns meses é feito um planejamento de médio prazo. Os problemas da fase tática serão mais detalhados por ser foco deste trabalho. Um exemplo típico que pode ser evidenciado é a determinação da rota e do tipo de serviço a ser oferecido e o reposicionamento da frota de locomotivas para uso no próximo período de planejamento.

A primeira das três tarefas da fase tática, como mostra a Figura 8, é a geração de uma grade de horários que consiste em estabelecer programação, rotas, atividades e capacidades de todos os trens que circulam na ferrovia. Dadas às linhas disponíveis e as frequências demandadas, deve-se determinar, para cada trem, a hora de chegada e partida em cada uma das estações da linha. Os tempos escolhidos devem satisfazer as restrições de capacidade (isto é, dois trens não podem ocupar o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo), bem como várias outras restrições operacionais. Existem problemas específicos para ferrovias de passageiros e cargas. Para uma discussão detalhada sobre programação em ferrovias de passageiros, ver Peeters (2003), por não ser foco de estudo deste trabalho.

A programação de trens de carga, por outro lado, tem um número menor de restrições do que a programação de trens de passageiros. Um dos maiores desafios no controle de tráfego ferroviário em linhas singelas é a resolução dos conflitos entre trens. Na ferrovia, os movimentos dos trens são monitorados através de painéis com o movimento em tempo real dos trens, baseado em uma programação inicial pré-estabelecida (LEAL; SOARES; NUNES 2004). Para evitar acidentes é necessário respeitar o *headway*, que é o menor intervalo de tempo permitido entre trens consecutivos em qualquer trecho da linha. Tipicamente, a ordem dos trens em uma linha, seja em sentidos opostos ou não, só pode ser alterada nas estações ou nas junções paralelas à linha principal. O objetivo central de uma programação de trens é determinar os horários de entrada e saída de estações, visando minimizar os atrasos acumulados de um conjunto de trens.

Outro importante aspecto deste problema é que existem vários eventos imprevisíveis, mudanças no cenário operacional e na demanda. Qualquer perturbação no tráfego ferroviário, seja por questões técnicas seja por erros humanos, pode causar uma instabilidade no sistema e resultar em atrasos na programação, diminuindo o nível de serviço ao cliente. Esses eventos interferem diretamente no plano de alocação de trens, pois muitas vezes ocorre pouco tempo

antes da movimentação de trens, configurando um ambiente extremamente dinâmico. D'Ariano, Pacciarelli e Pranzo (2007) comentam que a gestão do tráfego ferroviário em tempo real requer movimentos de reagendamento do trem na malha, minimizando os atrasos ocasionados por outros e assegurando a viabilidade do plano resultante das operações. Além desses eventos, podem surgir também atrasos dos trens devido à demora nos terminais de carga e descarga e às manobras nos pátios. É costumeiro, por exemplo, vagões estarem disponíveis, mas aguardando a chegada do produto (COSTA, 2010).

Um problema comumente encontrado na programação tradicional de trens é ignorar o percurso detalhado do trem em toda a malha ferroviária. Uma programação só é viável se respeitar as restrições particulares da linha em estudo. Na prática, a viabilidade de uma programação proposta só é avaliada em uma segunda etapa. Neste segundo passo, os trens são alocados em plataformas ou linhas paralelas disponíveis em cada estação para suas necessárias paradas. Pode ocorrer de a programação não ser viável por falta de linhas paralelas em um determinado horário ou pela inviabilidade técnica de parada em uma determinada linha, como, por exemplo, a composição ser de um comprimento maior que a linha paralela. Um procedimento iterativo de revisão deve ser feito para avaliar a viabilidade de uma programação teórica.

Se, ao contrário, os trens forem primeiro alocados nas linhas paralelas à linha principal em cada estação, de acordo com suas prioridades, para facilitar a programação de paradas e ultrapassagem e, em seguida, realizada a programação dos horários de chegada e partida, a natureza do problema muda na literatura; passa a ser denominado um problema de trajeto de trens (*train pathing problem*). A principal decisão, nesse contexto, é definir quando, onde e em qual estação um trem deve ser ultrapassado por outro mais rápido ou que está atrasado.

Em grande medida, as questões de solução de conflitos são resolvidas por operadores humanos, chamados despachantes. Cada despachante controla uma única área de expedição. Sistemas de apoio à decisão têm sido desenvolvidos para auxiliar de forma rápida e eficaz as reprogramações dos trens. No entanto, os autores, D'Ariano, Pacciarelli e Pranzo (2007) acreditam que há uma necessidade de sistemas mais eficazes de resolução de conflitos, capazes de explorar a informação global sobre o status da rede.

Outros problemas no nível tático incluem a programação de material circulante (manutenção, combustível, entre outros) e horários da tripulação. Cada itinerário deve receber um trem de comprimento correto, bem como a necessária tripulação, manutenção e recursos para sua operação

No terceiro nível está o planejamento operacional, realizado por unidades locais de gestão, tais como a gerência de pátio e a supervisão do Centro de Controle de Operações - CCO. Nesse caso é feito um planejamento de curto prazo. Ele é realizado diariamente pela elaboração da programação das atividades do terminal, cabendo ao controlador de pátios e terminais a tarefa de programar todas as atividades do terminal ferroviário.

Embora a Figura 8 indique que os problemas são resolvidos em uma ordem descendente, isso pode não ser necessariamente uma verdade, pois pode ser necessário executar um ciclo de retorno e alterar decisões anteriores em níveis superiores.

3.2 Aplicações de técnicas de pesquisa operacional em problemas táticos

Nesta seção, será feita uma breve descrição dos trabalhos e artigos publicados relacionados ao problema alocação de trens. A maioria das abordagens da literatura utiliza modelo de otimização discreta para resolver este problema.

A aplicação de técnicas e ferramentas da pesquisa operacional e áreas correlacionadas em problemas de alocação de trens não são recentes. Um dos trabalhos pioneiros na literatura consultada foi Szpigel (1972) que trata do sequenciamento e resolução de conflitos de trens na ferrovia em trechos de linha singela, levando em conta as prioridades dos trens e tempos de viagem. O mérito do trabalho de Szpigel (1972) foi identificar semelhanças entre a alocação de trens em vias singelas com o problema de programação job shop, em que tarefas devem ser executadas por um conjunto de máquinas. Szpigel (1972) utiliza os termos ‘viagem de trem’ no lugar de ‘tarefas’ e ‘trechos da ferrovia’ no lugar de ‘máquinas’. O método de resolução utilizado foi um algoritmo *branch-and-bound*, que permite obter boas soluções através da pesquisa de uma parte relativamente pequena do espaço de soluções. Devido a sua importância, os temas relacionados com essa questão têm atraído considerável atenção na literatura.

Toth (2000) apresenta um resumo dos principais modelos de otimização usados em problemas de transporte ferroviário, propondo uma classificação dos modelos e descrevendo as características mais comuns, com foco na estrutura do modelo e algoritmos utilizados.

A maioria destas pesquisas focou seus esforços na resolução do problema de programação de trens (*train time tabling problem*), ou seja, no estabelecimento de horários de entrada e saída de trens nas estações sem considerar o percurso do trem individualmente. A

decisão principal desses modelos é determinar o momento ideal de encontro e ultrapassagens entre trens em uma linha ferroviária com o objetivo de minimizar o tempo total dos cruzamentos na viagem ou custos envolvidos de um conjunto de trens e obter naturalmente ganhos de produtividade. Jovanovic e Harker (1991), Higgins, Kozan e Ferreira (1996), Kraay e Harker (1995), Zhou e Zhong (2007), principais autores desse assunto, utilizaram variáveis de decisões inteiras e contínuas para tomada de decisões. Higgins, Kozan e Ferreira (1996), por exemplo, utiliza diferentes formas de abordagens do problema, fornecendo resultados para a solução exata do problema, através da técnica de *branch and bound* e aplica técnicas de heurística de solução. Predominaram, portanto, os métodos de pesquisa operacional com base em técnicas de otimização discreta ou combinatória (Linear MIP, relaxação langrangeana, método de enumeração implícita, e outras variantes). Para resolver um problema usando MIP existem duas formas: a primeira por uma solução exata, incluindo *branch and bound* e a outra por programação dinâmica e aproximação, incluindo técnicas de heurística e relaxamento, Garey e Johnson (1979) alertam que uma modelagem que utiliza variáveis inteiras possui uma natureza combinatória de difícil resolução. Duas críticas podem ser feitas a esses trabalhos: a) não consideraram o trajeto do trem e o layout das estações, assim podem gerar soluções não viáveis na prática e b) dificuldade computacional de chegar a boas soluções em tempos hábeis para tomada de decisão gerencial e operacional.

Além dessas técnicas, outros pesquisadores propuseram novos métodos, tais como programação *Job Shop*, técnicas de programação *PERT*, entre outras.

Os pontos fortes e fracos de cada método dependem dos objetivos da pesquisa. Muitos pesquisadores preferem o método heurístico para acelerar o tempo computacional ao direcionar a busca por uma solução viável e não necessariamente ótima. Para esses casos, há necessidade constante de avaliar o desempenho da heurística em situações práticas.

4 HEURÍSTICA PARA PROGRAMAÇÃO DE TRENS

4.1 Definições

Os autores Lee e Chen (2009) acreditam que as ferrovias são constituídas de *links*, faixas, blocos e serviços. A compreensão desses quatro elementos é de vital importância para aplicação do modelo.

A Figura 9 mostra que as estações e os segmentos de ferrovia entre duas estações consecutivas são definidos como *links*. Já as faixas correspondem às seções da linha ou segmentos de linha e os blocos são trechos onde somente um trem pode ocupar no mesmo instante.

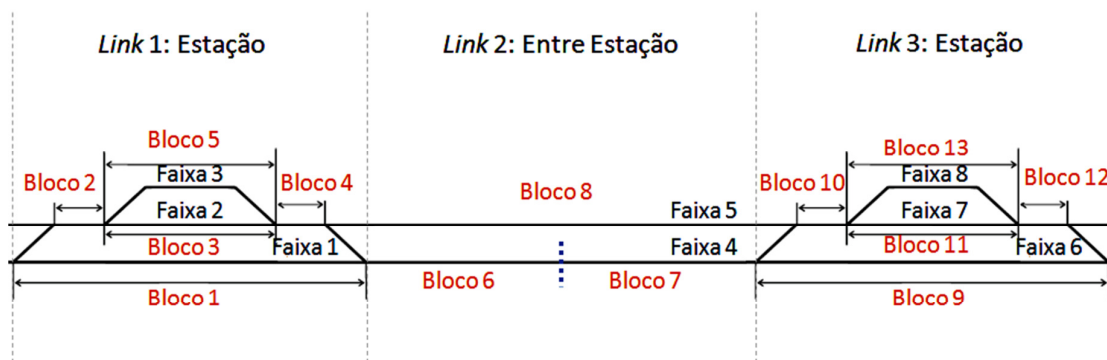


Figura 9 – Definição de *link*, bloco e faixa.

Fonte: Autor.

O serviço, por sua vez, é definido como sendo a percurso de um trem desde sua estação de origem até a estação de destino.

4.2 Descrição geral da heurística

O algoritmo central empregado neste estudo é o módulo de grade de horário do sistema de suporte à decisão – *TrainWorld* (CHEN et al., 2013), uma versão melhorada da heurística publicada por Lee e Chen (2009). Esse módulo, segundo os autores, é capaz de

resolver o problema de programação de trens do mundo real com qualidade aceitável. O algoritmo decompõe o problema de grade de horários em quatro etapas, ou seja, primeiro decide a ordem com que os serviços passam entre as estações, depois aloca os serviços às faixas disponíveis em cada estação, em seguida determina a ordem dos serviços que utilizam as faixas dentro de cada estação e, finalmente, determina a grade de horários em todos os blocos da linha ferroviária.

O algoritmo é iniciado com uma regra simples: a disponibilidade de uma grade de horário pré-existente e viável (etapa 1), mas muito provavelmente de má qualidade. Essa grade fornecerá uma sequência de serviços entre as estações programadas. Com essa sequência de trens estabelecida (etapa 2), o algoritmo usa um modelo de programação inteira binária para atribuir faixas para os serviços, levando em conta as preferências e prioridades dos serviços. O modelo baseia-se na simples observação de que, para quaisquer dois serviços que passam através de uma estação, se a ordem em que eles entram na estação é diferente da ordem de saída, os dois serviços têm de ser atribuídos a diferentes faixas da estação.

Após a atribuição de faixas, um modelo de programação linear é utilizado para resolver cada uma das outras duas próximas etapas: ordenar os serviços dentro da estação e ordenar os serviços entre as estações. Em conjunto, os quatro passos acima representam uma iteração do algoritmo. No caso de o modelo de programação inteira binária, ou de qualquer um dos dois modelos de programação linear não encontrar melhores soluções na sequência de ordem dos serviços, o algoritmo finaliza o conjunto de iteração corrente e procura outra sequência de ordens para os serviços. Antes de iniciar a procura por outra sequência, a heurística avalia todos os resultados encontrados. Essa avaliação é realizada por meio do valor da função objetivo da última etapa que dá uma estimativa da qualidade das grades de horários.

A ideia é encontrar o menor valor da função objetivo dentro do conjunto de iterações realizado e submetê-lo a um comparativo. Se o valor encontrado for menor que o já conhecido, a heurística substitui o valor antigo pelo melhor valor encontrado; caso contrário, o valor encontrado é desconsiderado. Em qualquer caso, o algoritmo continua executando um novo conjunto de iterações. Isso é feito empregando estratégias pré-definidas que trocam a ordem em que os serviços partem com muito atraso de suas estações de origem ou alteram os locais em que os serviços se encontram e ultrapassam uns aos outros. O algoritmo termina quando uma grade de horário razoável, que contém todos os serviços solicitados, é encontrada, ou quando um número pré-definido de iterações for atingido. Após a conclusão, a heurística produz a melhor grade de horário encontrada, juntamente com a distribuição da faixa correspondente.

4.3 Descrição esquemática da heurística

A heurística proposta por Lee e Chen (2009) pode ser representada graficamente pelo fluxograma mostrado na Figura 10:

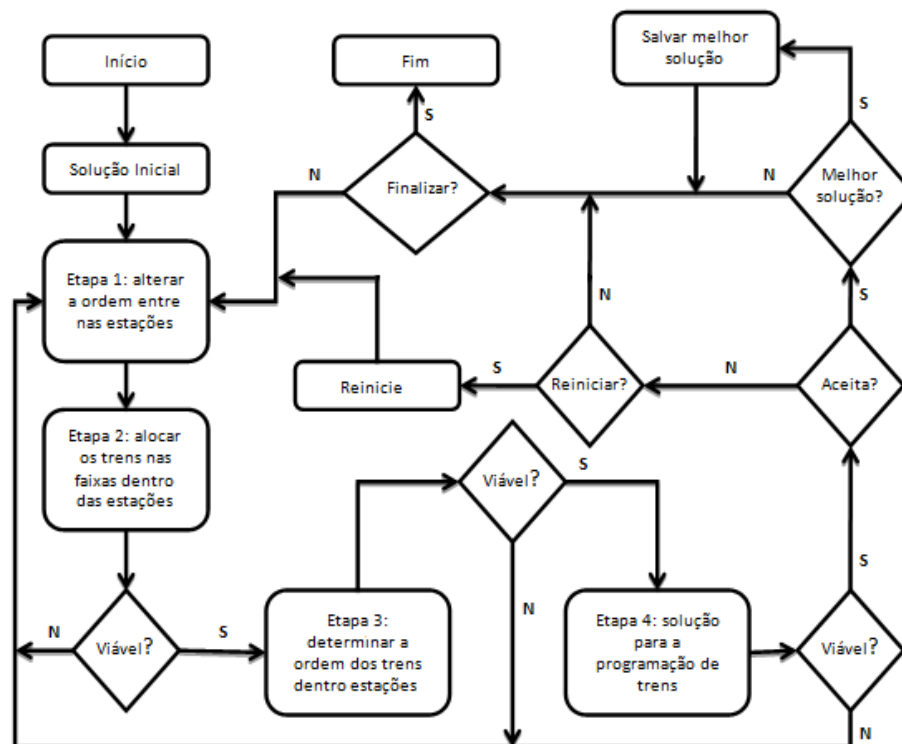


Figura 10 – Heurística para programação de serviços.
Fonte: Autor “adaptado de” Lee e Chen (2009), p. 842.

O modelo se inicia por meio de uma regra simples que cria uma solução inicial. Nessa solução inicial são atribuídas faixas para os serviços dentro das estações (etapa 2). Na etapa 3, por sua vez, é determinada a ordem dos serviços entre as estações. Após concluir essa etapa, a heurística passa para a etapa 4, a qual determina a ordem dos serviços dentro e fora das estações. A solução encontrada nessa etapa é a solução inicial para a programação dos serviços.

Essa solução inicial é então aceita e salva como a melhor solução. Isso ocorre no intuito de comparar o resultado inicial com os demais resultados encontrados por meio da aplicação de uma ou mais estratégias que ordenam os serviços nos blocos entre as estações (etapa 1).

A heurística termina quando a melhor solução conhecida não melhora após 5.000 iterações consecutivas. Para isso, a heurística utiliza a cada iteração a solução corrente para gerar uma nova solução (esses valores são os resultados da função objetivo da etapa 4). Para que a nova solução seja aceita, é necessário que ela seja menor ou igual à solução corrente vezes o valor correspondente à T (área de pesquisa). Sempre que a nova solução for melhor que a corrente ela será atualizada.

Durante o processo, a heurística mantém o controle de R (número de iterações) com a finalidade de descobrir novas soluções conhecidas. Quando a variável R for superior a 15, a heurística substitui a solução atual pela melhor solução conhecida e define o valor de R como 0. Isso ocorre quando o processo de pesquisa na direção atual não consegue encontrar melhores soluções. A variável T muda o seu valor a cada 5 resets e circula entre três valores 1.1, 1.3 e 1.5. Esse mecanismo é projetado para mudar a área de pesquisa quando múltiplos resets ocorrerem, indicando que a busca provavelmente entrou em uma condição na qual encontrar melhores soluções é extremamente difícil.

4.3.1 Solução Inicial

A solução inicial consiste em executar os serviços sequencialmente, de acordo com a hora programada pelos planejadores (equipe responsável pela circulação dos serviços). A ideia consiste em determinar a ordem com que os serviços utilizam os trechos de via singela.

4.3.2 Etapa 1 – ordenar os serviços nos blocos entre as estações

Para ordenar os serviços nos blocos entre as estações, a heurística adota quatro estratégias:

- a) Estratégia 1 – trocar aleatoriamente a ordem em que eles utilizam o bloco, quando houver essas três condições:
 - 1) Forem serviços consecutivos (um serviço atrás do outro utilizando a mesma faixa);
 - 2) Estiverem próximos com relação ao tempo;

- 3) O trem que segue atrás esteja atrasado com relação ao outro e que o serviço à frente esteja adiantado com relação ao seu tempo programado.
- b) Estratégia 2 – antecipar a segunda parte da viagem com o intuito de reduzir os tempos de atraso, porém essa estratégia somente deverá ser aplicada quando não houver atraso do serviço na sua estação inicial;
 - c) Estratégia 3 – adiar a hora de partida do trem em sua estação inicial, exceto quando houver atraso deste serviço em sua estação inicial;
 - d) Estratégia 4 – liberar, assim que possível, o trem na faixa, dando a ele o máximo de prioridade na circulação, quando for identificada a existência de serviços que estejam atrasados com relação à sua hora de partida na estação inicial.

A aplicação das estratégias é realizada pela nova ordenação dos serviços nos blocos entre as estações, criando assim uma nova programação.

4.3.3 Etapa 2 – atribuir faixas para os serviços dentro das estações

A tarefa de atribuir faixas para os serviços dentro das estações é dispensável quando a estação tem apenas duas faixas de mão única, uma designada para cada direção. Se não fosse isso, a heurística de Lee e Chen (2009) utiliza uma programação inteira binária para alocar os trens na faixa, segundo os seguintes parâmetros:

b_{ijk}	variável binária (onde 1 significa que o serviço k está atribuído na faixa i da estação j e 0 caso, contrário);
i	índice da linha;
j	índice da estação;
J_k	resultado da equação $[W_k/Q_k]$;
K_{ijk}	resultado da equação $[1/U_{ijk}]$;
k, m	índice da composição;
Q_k	maior valor de W_k ;
S	conjunto de todas as estações;
$S(k)$	conjunto de todas as estações usadas pelo serviço k ;
$T(j)$	conjunto de faixas da estação j ;

U_{ijk}	preferência do serviço k , na faixa i da estação j ;
V	conjunto de todos os serviços;
W_k	peso da composição k .

O modelo de programação binário é dado a seguir:

Função objetivo:

$$\text{Minimizar} \sum_{k \in V} \sum_{j \in S} \sum_{i \in T} J_k * P_{ijk} * b_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$b_{ijk} + b_{ijm} \leq 1 \quad \forall j \in S(k) \cap S(m) \quad \forall k, m \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in T(j)} b_{ijk} = 1 \quad \forall k \in V \quad \forall k \in S(k) \quad (3)$$

$$b_{ijk} = 1 \quad j \in S(k) \quad (4)$$

$$b_{ijk} \in \{0,1\} \quad (5)$$

A função objetivo (1) busca atribuir faixas minimizando o somatório da multiplicação das variáveis: J_k , P_{ijk} e b_{ijk} . Com isso, a heurística aloca os serviços em faixas que possuam menor valor para P_{ijk} . No caso de dois serviços competirem pela mesma faixa, a programação binária aloca o trem de maior valor de J_k na faixa de menor valor de P_{ijk} , e o outro trem na segunda faixa de menor valor de P_{ijk} .

A restrição (2) garante que somente um trem utilize a faixa em um dado instante. Isso ocorre quando mais de um está na estação, havendo a necessidade de colocá-los em faixas diferentes. A restrição (3), por sua vez, garante que um determinado trem esteja alocado somente em uma única faixa dentro da estação. Já a restrição (4) indica que o número 1 corresponde à faixa que está sendo utilizada e 0 no caso contrário. A restrição (5) indica que o valor da variável binária varia entre 0 e 1.

4.3.4 Etapa 3 – ordenar os serviços nas faixas dentro das estações

A etapa 3 da heurística utiliza um modelo de programação linear para obter uma boa ordenação dos serviços nas faixas dentro das estações, levando em consideração a ordem de entrada e saída, conforme determinado na etapa 1, bem como a atribuição de faixas dentro das estações, conforme determinado na etapa 2.

Abaixo são apresentados os parâmetros utilizados nessa etapa:

ah_k	hora em que o serviço k entra no bloco h ;
Atraso k	tempo total de atraso para o serviço k ;
B	conjunto de todos os blocos;
B_s	conjunto de blocos que estão localizados dentro das estações;
B_k	conjunto de todos os blocos utilizados pelo serviço k ;
B_k^0	primeiro bloco utilizado pelo serviço k ;
B_k^F	último bloco utilizado pelo serviço k ;
$B_{(h,k)}^-$	bloco anterior ao bloco h que serviço k está utilizando;
C_h	intervalo mínimo quando um serviço sai de um bloco e outro serviço entra no mesmo bloco;
D_h	tempo máximo de atraso permitido para qualquer serviço no bloco h ;
d_{hk}	hora em que o serviço k sai do bloco h ;
G_k	tempo de partida determinado pelos planejadores;
h	índice do bloco;
P_k	tempo mínimo para que o serviço k finalize sua viagem;
rk	valor absoluto da diferença entre o tempo determinado pelos programadores e o tempo determinado pela programação linear;
T_{hk}^{ext}	tempo máximo do serviço k no bloco h (tempo mínimo acrescido de um tempo extra);
T_{hk}^{min}	tempo mínimo de permanência do serviço k no bloco h ;
WD	peso relativo ao atraso total de um serviço;
y_{hk}	atraso com que o serviço k sai do bloco h ;
W_k	peso do serviço (valor determinado pelo planejador).

O modelo de programação linear proposto é dado a seguir:

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in V} W_k(r_k + W^D * \text{atraso}_k) \quad (6)$$

A função objetivo (6), tanto da etapa 3 quando da etapa 4, busca encontrar o menor tempo de percurso, levando em consideração as variáveis r_k e atraso e os pesos do serviço e do atraso. Para isso, a função objetivo busca ajustar a programação inicial, evitando que o trem fique muito tempo parado nas estações e nos blocos, garantindo, assim, um tempo mínimo de percurso em todos os blocos.

Sujeito a:

$$d_{hk} \geq a_{hk} + T_{hk}^{\min} \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (7)$$

$$d_{hk} \leq a_{hk} + y_{hk} + T_{hk}^{\text{ext}} \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (8)$$

$$y_{hk} \leq D_h \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$r_{hk} \leq a_{B_k^0, k} - G_k \quad \forall k \in V \quad (10)$$

$$r_{hk} \leq -a_{B_k^0, k} + G_k \quad \forall k \in V \quad (11)$$

$$a_{hk} - d_{hp_{h,k}^-} \geq C_h \quad \forall h \in B_k \setminus B^s \quad \forall k \in V \quad (12)$$

$$d_{B_k^F, k} \leq a_{hk} \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (13)$$

$$d_{B_k^F, k} - a_{B_k^0, k} = \text{atraso}_k + P_k \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (14)$$

$$y_{hk} \geq 0 \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (15)$$

A restrição (7) estabelece o tempo mínimo de saída para o trem ao entrar em um bloco. Com isso, o valor de saída do trem tem que ser maior que o tempo de entrada dele no bloco mais o tempo mínimo de operação no mesmo bloco. A restrição (8) restringe o valor d_{hk} , uma vez que o seu valor deve ser menor que o tempo de entrada no bloco mais o tempo de atraso e mais o tempo máximo de percurso daquele bloco. O valor do atraso precisa ser um valor maior que 0 (restrição 15) e menor que o máximo valor de atraso para qualquer serviço naquele bloco (restrição 9).

As restrições 10 e 11 fornecem o valor de r_k que é dado de forma absoluta, atuando diretamente sobre a função objetivo. A restrição 12, por sua vez, garante que o fluxo dos serviços pelos blocos entre as estações seja cumprido conforme determinado na etapa 2, garantindo assim que não haja conflitos de cruzamento e ultrapassagem. Isso acontece porque

essa restrição inclui um intervalo mínimo entre dois serviços, quando eles ocupam o mesmo bloco consecutivamente independente do seu sentido.

A restrição 13 garante que o serviço irá passar por todos os blocos programados em seu percurso, para isso, a restrição abrange desde a hora de saída do serviço dentro da estação de origem até a sua chegada à estação final. A restrição 14 iguala o tempo de saída do último bloco, menos o tempo de entrada do primeiro bloco, com o tempo de atraso do trem mais o mínimo tempo de percurso do trem da origem até o destino. Esse valor é encontrado ao se somar todos os tempos mínimos de percurso de cada bloco.

4.3.5 Etapa 4 – solução final para a programação de serviços

Para obter a solução final para a programação de serviços, a heurística utiliza a mesma programação linear estabelecida na etapa três. A única diferença entre essas duas etapas é a forma com que a restrição 12 é aplicada. Na etapa três, a restrição 12 garante o fluxo dos serviços pelos blocos entre as estações. Já na etapa quatro a restrição 16 garante o fluxo dos serviços por todos os blocos, garantindo assim o fluxo por todos os blocos e livre de conflitos.

$$a_{hk} - d_{hp_{h,k}^-} \geq C_h \quad \forall h \in B_k \setminus B^s \quad \forall k \in V \quad (12)$$

$$a_{hk} - d_{hp_{h,k}^-} \geq C_h \quad \forall h \in B_k \quad \forall k \in V \quad (16)$$

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

5.1 Cenário 01

O primeiro cenário é um trecho de uma ferrovia de pista singela bidirecional de 100 quilômetros de extensão. A ferrovia fictícia possui somente três estações: a estação 1, localizada no extremo leste da linha ferroviária, a estação 3, localizada na extremidade oeste, e a estação 2 entre a estação 1 e 3. Todas as estações possuem três faixas bidirecionais de manobra. Como se trata de uma linha ferroviária singela, apenas um trem circula entre duas estações adjacentes em qualquer momento. As informações detalhadas de cada estação são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Configuração da ferrovia

Número da estação	Nome da estação	Número de faixas	Distância para a próxima estação (Km)
1	A	3	70
2	B	3	30
3	C	3	-

Fonte: Autor.

Além disso, foi determinado um tempo mínimo de percurso para cada faixa (Tabela 2):

Tabela 2 - Tempo mínimo de percurso pela faixa

Faixas	Tempo mínimo nas estações (Min.)
1	1.5
2	1.0
3	1.5

Fonte: Autor.

Foi considerado que o percurso na faixa 2, faixa central da estação, é mais rápido do que o das faixas 1 e 3, que são faixas auxiliares ou secundárias, conforme pode ser visualizado na Figura 11:

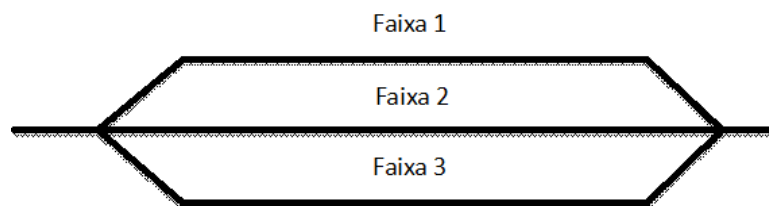


Figura 11 - Representação das faixas dentro da estação.
Fonte: Autor.

Os trens são de três tipos distintos com velocidades diferentes, conforme seu poder de tração. O tempo de percurso mínimo entre as estações depende não apenas do tipo de trem, mas também do sentido de marcha (importação e exportação) e das condições e do trajeto da linha. Os tempos mínimos de tráfego entre as estações estão listados na Tabela 3:

Tabela 3 - Tempo mínimo de percurso (em minutos) dos serviços entre estações

Segmento	Serviços		
	1	2	3
A-B	57	67	58
B-C	25	19	22

Fonte: Autor.

Existem três serviços em execução: dois no sentido de exportação (leste-oeste) e um no sentido de importação (oeste-leste). Todos os três serviços param na estação B e permanecem nessa estação um tempo mínimo estimado entre 1 a 1,5 min, conforme mostra a Tabela 2. O tempo máximo é 10% a mais desse valor mínimo.

As expressões matemáticas do modelo foram implementadas na sintaxe algébrica do software de otimização Excel Microsoft® para resolver o problema de programação inteira (etapa 2), bem como nos modelos de programação linear (etapas 3 e 4).

A heurística foi realizada seguindo a proposta de Lee e Chen (2009). Uma solução inicial viável foi definida a partir dos horários de partida e dos tempos de percurso pré-estabelecidos pela empresa (cenário inicial). Para essa solução inicial são atribuídas faixas para os trens dentro da estação (etapa 2); em caso de viabilidade, passa-se à próxima fase. Na etapa 3 é determinada a ordem dos trens entre as estações, respeitando as restrições do sistema (headway, tempos, conflitos, entre outros). A etapa 4 estabelece a grade de horários. Essa grade de horários é melhorada, pelas quatro estratégias, a partir da etapa 1.

A heurística garante o fluxo livre de conflitos por todos os blocos. Ao final de todas essas etapas, o resultado da função objetivo é armazenado. Em seguida, a heurística troca a ordem que os trens utilizam nos blocos entre as estações, adotando as 04 estratégias determinadas por Lee e Chen (2009), criando assim uma nova programação, que pode ou não ser melhor que a alternativa anterior. A nova solução conhecida é atualizada sempre que a nova solução apresentar uma menor função objetivo. Para avaliar as estratégias propostas por Lee e Chen (2009), em um primeiro cenário, todas as sequências possíveis de trens entre as estações foram geradas. Em um segundo cenário, foram avaliadas as sequências de trens aplicando a heurística.

Não foi necessário preocupar-se com a alocação dos trens nas estações, pois o exemplo trabalhou com 03 serviços e três faixas em cada estação. Apenas a sequência de serviços nos trechos A-B e B-C foi preocupação central desta simulação. Há uma série de sequências possíveis que os serviços podem seguir entre as estações, todos livres de conflito. Por exemplo: $1_4^e 1_4^s 2_4^e 2_4^s 3_4^e 3_4^s$, onde 1_4^s significa que o serviço n° 1 está saindo do bloco 4, e 2_4^e que significa que o serviço n° 2 está entrando no bloco 4 (trecho A-B) e assim por diante. No caso acima, o serviço n° 1 entra no bloco 4 e depois sai. Em seguida, o serviço n° 2 passa pelo bloco 4, depois o serviço n° 3 passa pelo bloco 4 de forma semelhante. Embora vários ordenamentos sejam livres de conflito, eles podem resultar em diferentes eficiências da operação.

Os resultados para o cenário n° 1 apresentado estão descritos nas Tabelas 4 e 5.

A Tabela 4 apresenta os resultados alcançados em cada alteração de ordenação dos trens, do melhor para o pior resultado em termos da função objetivo. Além de informações da função objetivo de cada etapa, temos também o tempo total de viagem de todos os serviços. Nota-se que a sequência de trens afeta diretamente o tempo total de viagem e que, mesmo sequências com resultados similares em termos de tempo de viagem, possuem diferentes valores na função objetivo nas etapas 3 e 4, que avaliam diferentes tipos de atrasos, como, por exemplo, a diferença entre tempos de partida em relação ao programado. Conclui-se, pelos dados da tabela 4, que as melhores sequências gerais foram: trecho A-B ($1_4^e 1_4^s 3_4^e 3_4^s 2_4^e 2_4^s$) e trecho B-C ($1_8^e 1_8^s 2_8^e 2_8^s 3_8^e 3_8^s$), sendo o tempo total de viagem de 252 minutos (4h 12min).

Tabela 4 - Resultados do cenário 1 – teste de todas as alternativas possíveis de sequenciamento de trens

Rodada	Sequência de serviços		Função objetivo da etapa			Tempo de viagem total (Min.)
	Trecho A-B	Trecho B-C	2	3	4	
1	1-3-2	1-2-3	2.22	88.5	88.5	252
2	1-2-3	2-1-3	2.17	133.0	133.0	252
3	3-1-2	3-1-2	2.17	151.5	151.5	251
4	3-1-2	3-2-1	2.22	155.5	155.5	252
5	1-3-2	1-3-2	2.17	173.5	173.5	251
6	1-2-3	1-2-3	2.17	175.0	175.0	251
7	3-1-2	2-1-3	3.39	240.5	240.5	337
8	3-1-2	1-2-3	2.22	257.0	257.0	356
9	3-1-2	1-3-2	2.22	283.5	283.5	336
10	1-3-2	2-1-3	2.17	302.5	302.5	312
11	2-1-3	2-1-3	2.33	312.5	312.5	251
12	3-1-2	2-3-1	2.17	331.5	331.5	311
13	3-2-1	2-3-1	2.22	473.0	473.0	252
14	3-2-1	3-2-1	2.22	515.0	515.0	251
15	2-3-1	2-3-1	2.33	522.5	522.5	251
16	2-3-1	2-1-3	2.39	607.5	607.5	336
17	1-3-2	2-3-1	2.39	840.5	840.5	336
18	1-3-2	3-1-2	2.22	979.5	979.5	335
19	2-1-3	2-3-1	2.39	1064.5	1064.5	335
20	1-3-2	3-2-1	2.28	1113.0	1113.0	336

Fonte: Autor.

Este exemplo, em pequena escala, apresenta todas as alternativas possíveis de sequenciamento de serviços (20) avaliados nos trechos da ferrovia A-B e B-C. Exatas 16 sequências de trens entre as estações foram abandonadas, devido a:

- a) ser impossível de ser operacionalizada como, por exemplo, a sequência trecho A-B ($1_4^e 1_4^s 2_4^e 2_4^s 3_4^e 3_4^s$), e, no trecho B-C ($1_4^e 1_4^s 3_4^e 3_4^s 2_4^e 2_4^s$), o serviço n° 2 não pode passar pelo trecho A-B antes de passar pelo trecho B-C, pois sua direção original é no sentido importação. Foram identificadas e eliminadas 14 sequências desse tipo;
- b) exceder o limite de atraso, que foi estipulado em 120 minutos entre estações e 105 minutos dentro de cada estação. Foram identificadas e eliminadas duas sequências desse tipo.

A grade de horários final dos trens com o melhor resultado é mostrada na Tabela 5:

Tabela 5 - O melhor resultado (FO = 88,5)

Serviço	Estação Inicial	Estação Final	Número de paradas	Horário programado (hora)	Horário de partida (hora)	Tempo de viagem (hora)
1	1	3	1	8:00	8:00	1:23
2	3	1	1	9:01	9:38	1:27
3	1	3	1	8:45	8:59	1:22

Fonte: Autor.

O tempo de viagem médio encontrado foi de 1h 22min 30seg para os trens sentido exportação e 1h 27min 00seg para o serviço de importação. Esse resultado é decorrente da seleção ótima de pontos de encontro e ultrapassagem dos serviços. Além disso, todos os serviços partiram próximos do horário previsto, conforme mostra a Figura 12, de acordo com o desejado.

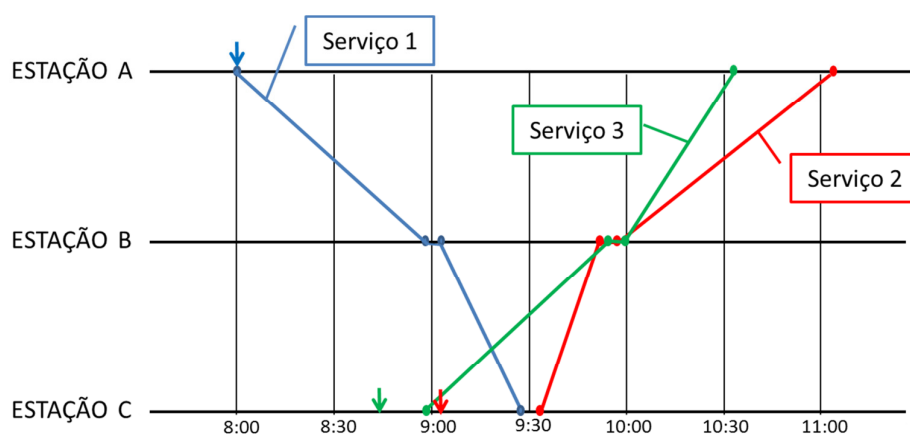


Figura 12 - Diagrama de horários.

Fonte: Autor.

Neste primeiro cenário, o processo trabalhou com 36 iterações para resolver o problema, e melhorou a função objetivo de 1.113 para 88,5 horas ponderadas, conforme mostra a Tabela 4, melhorando a solução 12.6 vezes no processo. O tempo de enumeração total foi reduzido cerca de 10 min, apesar de manual. A Figura 13 mostra os valores da função objetivo sendo reduzidos após cada iteração possível.

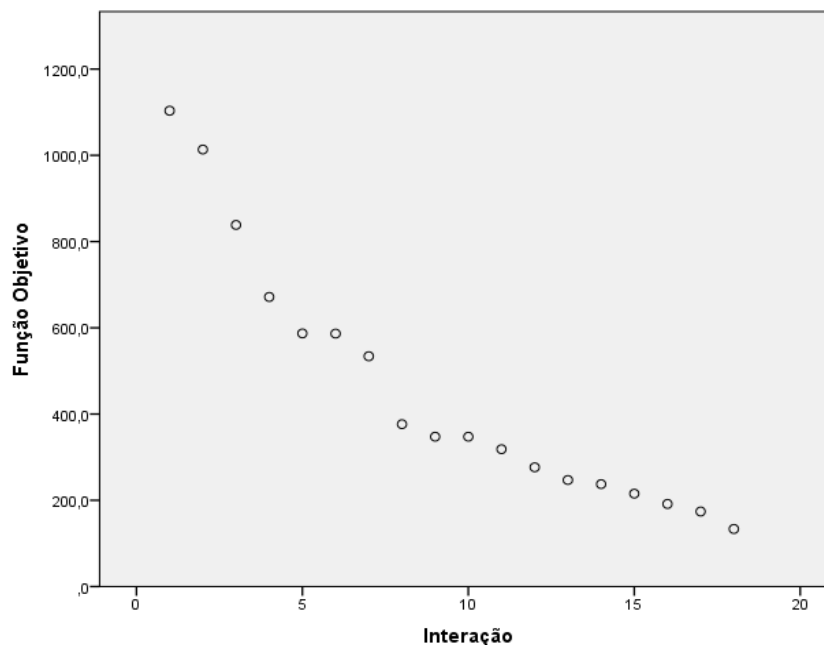


Figura 13 - Mudança do valor da função objetivo no processo do cenário 1.
Fonte: Autor.

Já a heurística de Lee e Chen (2009) não percorre todo este caminho; um processo de trocas de trens vizinhos é executado na etapa 1, seguindo determinadas estratégias, conforme explicado na seção de revisão da literatura.

O algoritmo da heurística de Lee e Chen (2009) pode ser representado em 16 passos:

1º Passo: selecione uma grade de trens inicial. Essa grade pode ser obtida pela programação que a empresa possui ou por meio da liberação dos trens segundo o horário de partida programada pela empresa;

2º Passo: alocar todos os trens nas faixas dentro das estações;

3º Passo: ordenar todos os trens nas faixas entre as estações;

4º Passo: ordenar todos os trens em todas as faixas (estação e entre estação). O resultado obtido é a solução final para aquela programação de trens;

5º Passo: estabelecer o resultado da função objetivo do Passo 4 como o melhor valor encontrado.

6º Passo: encontrar atrasos na programação;

7º Passo: fazer um levantamento das opções de ordenação dos trens que reduzirão os atrasos através das quatro estratégias descritas na heurística. O valor máximo deve ser inferior a 15;

8º Passo: escolher uma das opções do 7º Passo para aplicar o 9º Passo. Após executar a iteração, desconsiderar as opções utilizadas;

9º Passo: aplicar os 2º, 3º, 4º Passos;

10º Passo: aplicar os 8º e 9º Passos. O 10º Passo finaliza quando todas as possibilidades criadas pelo 8º Passo finalizarem;

11º Passo: encontrar o menor valor da função objetivo;

12º Passo: se o valor encontrado pela função objetivo no 11º Passo for menor que o valor da função objetivo já conhecida multiplicado pela variável T, que nesse caso será 1.1, adotar o valor como o melhor e seguir para o 13º Passo. Caso contrário, finalizar a heurística apresentando o melhor valor encontrado;

13º Passo: aplicar os 6º e 7º Passos;

14º Passo: aplicar os 8º, 9º, 10º, 11º e 12º Passos;

15º Passo: após aplicar o 12º Passo cinco vezes, mudar o valor da variável T para 1.3 e aplicar os 7º, 9º, 10º, 11º e 12º Passos;

16º Passo: ao finalizar o 15º Passo, mudar o valor da variável T para 1.5 e aplicar novamente os 7º, 9º, 10º, 11º e 12º Passos.

Esses passos auxiliaram na aplicação da heurística para o caso da programação dos três trens, conforme pode ser visto no Apêndice A.

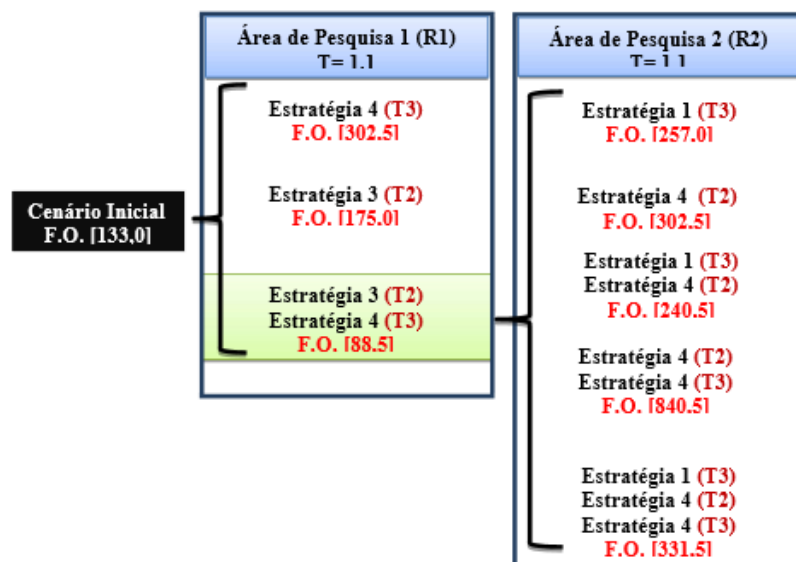


Figura 14 – Passos seguidos pela heurística.
Fonte: Autor.

A Figura 14 apresenta os passos seguidos pela heurística para encontrar a solução final apresentada no Apêndice A. Os quatro passos, descritos na heurística de Lee e Chen (2009), simplesmente criam e validam novos cenários. Contudo, para que a heurística consiga desempenhar um papel de avaliar e identificar qual o melhor cenário dentre uma gama de cenários é necessário aplicar uma regra.

A regra utilizada pelos autores Lee e Chen (2009) foi a *threshold accepting rule* ou regra de limite de aceitação. Essa regra contabiliza o número de iterações. Essas iterações são representadas pelos novos cenários que são criados a partir da aplicação das estratégias (etapa 2). Quando se chega ao número máximo 15 iterações consecutivas, a heurística para de realizar iterações e avalia os resultados encontrados por meio de uma fórmula e zera o número de iterações; isso ocorre quando não é mais possível encontrar soluções conhecidas.

A fórmula utilizada é $S_{nova} \leq S_{corrente} \times T$, onde a variável S_{nova} representa o novo melhor valor encontrado pela função objetivo do passo 4; $S_{corrente}$, a solução já conhecida e definida como a melhor; e a variável T , que representa o número de *resets*.

Os resets ocorrem após cada 15 iterações consecutivas e o valor inicial é de 1.1. Esse valor varia a cada 5 resets, passando de 1.1 para 1.3 e depois para 1.5, podendo variar dependendo da posição da área de pesquisa. Isso significa que a heurística pode voltar a qualquer nó para buscar melhores soluções, até porque ela limita o número de iterações consecutivas em 15.

Um exemplo simples da aplicação dessa regra pode ser visualizado pela Figura 13. A heurística parte de um cenário conhecido e viável, conforme mostra a Tabela 6:

Tabela 6 – Programação inicial livre de conflito (FO = 133)

Trem	Estação A	Trecho A-B		Estação B		Trecho B-C		Estação C
	Entrada/ Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada/ Saída
1°	480	480	537	537	538	538	563	563
2°	606	539	606	537	539	518	537	518
3°	607	607	665	665	666	666	688	688

Fonte: Autor

A partir do cenário inicial, a heurística busca atrasos na programação, conforme mostra a Tabela 7. Através das estratégias pré-determinadas, a heurística buscará reduzir esses atrasos por meio da alteração da ordem dos trens, criando assim novas soluções.

Tabela 7 – Atrasos encontrados na programação (FO = 133)

Trem	Atraso				
	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	0	0	0	0	-
2º	-	0	0.5	0	-23
3º	82	0	0	0	-

Fonte: Autor.

Por exemplo, nesse caso, analisando a Tabela 8, é possível encontrar três soluções possíveis de mudança das ordens dos trens:

- aplicar estratégia 4 (T3): liberar, assim que possível, o trem 3 na estação A, dando a ele o máximo de prioridade de circulação;
- aplicar estratégia 3 (T2): adiar a ordem de partida do trem 2 na estação C;
- aplicar estratégias 3 (T2) e 4 (T3) simultaneamente: liberar, assim que possível, o trem 3 na estação A, dando a ele o máximo de prioridade de circulação e adiar a ordem de partida do trem 2 na estação C.

Os resultados encontrados para a função objetivo desta rodada foram 302.5, 175.0 e 88.5. O menor valor encontrado é o 88.5. O valor 88.5 é, segundo a regra de limite de aceitação, menor que 146.3 ($133 \cdot 1.1$), portanto, uma nova grade de programação de trens deve ser procurada para a alternativa C. A nova programação de trens será:

Tabela 8 – Nova programação de trens para a alternativa C (FO = 88,5 h. ponderadas)

Serviço	Estação A	Via 1		Estação B		Via 2		Estação C
	Entrada/ Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada/ Saída
1º	480	480	537	537	538	538	563	563
2º	665	598	665	597	598	578	597	578
3º	539	539	597	597	598	598	620	620

Fonte: Autor.

Após definir a nova programação, devem-se levantar novamente os atrasos, como pode ser visualizado pela Tabela 9:

Tabela 9 – Atrasos encontrados na programação

Trem	Atraso				
	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	0	0	0.0	0	-
2º	-	0	0.0	0	37
3º	14	0	0.5	0	-

Fonte: Autor.

Para esta nova grade de atrasos, foi possível identificar cinco alternativas possíveis, sendo elas:

- a) aplicar estratégia 1 (T3): Trocar a ordem do trem 1 com o trem 3 na estação A;
- b) aplicar estratégia 4 (T2): Liberar assim que possível o trem 2, dando o máximo de prioridade na estação C;
- c) aplicar estratégia 1 (T3) e 4 (T2) simultaneamente: Trocar a ordem do trem 1 com o trem 3 na estação A e liberar assim que possível o trem 2 na estação C, dando a ele o máximo de prioridade;
- d) aplicar estratégia 4 (T2) e Estratégia 4 (T3) simultaneamente: Liberar assim que possível o trem 2 na estação C e o trem 3 na estação B e trocar a ordem do trem 1 com o 3 na estação A;
- e) aplicar estratégia 1 (T3), 4 (T2) e 4 (T3) simultaneamente: Liberar assim que possível o trem 2 na estação C e liberar assim que possível o trem 3 na estação B, dando a ele o máximo de prioridade.

Após realizar consecutivamente as cinco melhorias possíveis, chegam-se aos seguintes resultados: 257.0, 302.5, 240.5, 840.5 e 331.5. O menor valor desse grupo de iterações foi 240.5. Ao aplicar a fórmula, identificou-se que 240.5 é maior 97.35 ($88,5 \times 1,1$), logo, como não existem novas áreas de pesquisa para que a heurística continue sendo executada, ela finaliza sua operação apresenta o melhor resultado, ou seja, a melhor grade encontrada para a programação de trens.

Portanto, a heurística de Lee e Chen (2009) realizou nove iterações para chegar ao menor valor da função objetivo de 88.5, enquanto que os testes de todos os sequenciamentos possíveis de trens realizaram 36 iterações, uma redução de 75 % do número de iterações.

5.2 Cenário 02

O segundo exemplo provém de um sistema ferroviário real: uma ferrovia brasileira de via simples, com aproximadamente 350 km de extensão e quinze estações entre os pontos de início e término de tráfego. Um conjunto de dados e requisitos de programação foi solicitado para os executivos da empresa. As principais informações foram: o número de estações, o número de trens na linha exportação e importação, o tempo de espaçamento mínimo entre trens, o tempo de permanência nas estações, a distância entre as estações, o tempo de tráfego mínimo e máximo dos trens entre estações, a grade de horários passadas, entre outras. Os dados primários foram coletados em entrevistas com engenheiros da empresa estudada, e dados secundários foram coletados a partir de documentos fornecidos pela empresa, incluindo dados do equipamento, manual de operações e grades de horários existentes. As informações de tráfego do final do mês de dezembro de 2012 foram utilizadas como referência na comparação com os resultados obtidos pela heurística. Esse período foi selecionado por ser de intenso tráfego na linha ferroviária.

A estação n° 1 encontra-se ao norte da ferrovia e a estação n° 15 encontra-se ao sul. Cada estação da ferrovia estudada tem um número diferente de faixas de manobras, variando de duas a doze, conforme mostra a Tabela 10:

Tabela 10 - Número de faixas por estação

Estação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Faixas	8	2	3	2	8	2	2	2	3	3	3	3	2	2	12

Fonte: Dados da empresa.

Existe apenas um tipo de serviço – transporte de carga –, porém, as cargas são diversas: grãos, combustível e contêineres. No período de estudo (final de dezembro de 2012), o sistema trabalhou com 28 serviços diários nos sentidos importação e exportação, mas nem todos os serviços percorreram ponta a ponta a linha ferroviária. A Tabela 11 apresenta o percurso de cada serviço na linha ferroviária.

Tabela 11 - Percurso para cada um dos 28 trens

Serviço	Estação inicial	Estação final
1	1	15
2	4	15
3	5	15
4	8	15
5	9	15
6	10	15
7	12	15
8	1	15
9	1	15
10	1	15
11	3	15
12	5	15
13	5	15
14	5	15
15	7	15
16	7	15
17	7	15
18	8	15
19	8	15
20	14	1
21	3	1
22	8	1
23	7	1
24	15	5
25	15	7
26	15	8
27	11	5
28	15	1

Fonte: Dados da empresa.

Os tempos mínimos de permanência de cada trem em cada estação são apresentados na Tabela 12. Alguns serviços passam pelas estações quase sem parar, já outros permanecem um tempo adicional em estações específicas para complemento de carga e/ou atividades de manutenção pré-agendadas. A estação 9 apresenta o maior tempo de permanência médio, 59 minutos; trata-se de uma estação de carregamento de carga adicional, porém, com poucas faixas (3) para a execução da operação.

Tabela 12 - O tempo mínimo de permanência nas estações em minutos

Serviço	Estação												
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	00:00	00:02	00:15	01:20	00:05	00:15	01:36	00:00	00:02	00:05	00:02	00:00	00:02
2				00:02	00:05	00:05	00:02	00:02	00:00	00:05	00:07	00:05	00:00
3					00:05	01:09	00:01	00:05	00:03	00:05	00:00	00:05	00:03
4								03:29	00:05	00:02	00:05	00:04	00:05
5									00:05	00:00	00:05	00:05	00:05
6										00:05	00:04	00:04	00:05
7												00:08	00:05
8	00:15	00:05	00:04	00:15	00:05	00:02	00:05	00:01	00:05	00:04	00:00	00:02	00:05
9	00:01	00:03	00:15	00:02	00:00	00:05	00:05	00:05	00:02	00:02	00:05	00:00	00:00
10	00:03	00:09	00:05	00:03	00:02	00:01	00:04	00:02	00:03	00:05	00:03	00:05	00:01
11			00:05	00:03	00:01	00:00	00:02	00:05	00:01	00:05	00:05	00:05	00:02
12					00:15	00:05	00:05	00:05	00:00	00:05	00:04	00:05	00:05
13					00:05	00:09	00:05	00:04	00:02	00:05	00:04	00:05	00:00
14					00:04	00:05	00:05	00:40	00:05	00:04	00:02	00:02	00:05
15							00:01	00:20	00:05	00:05	00:00	00:03	00:05
16							00:05	00:46	00:05	00:11	00:05	00:05	00:05
17							00:05	00:08	00:05	00:05	00:05	00:05	00:02
18								00:16	00:05	00:05	00:16	00:05	00:02
19								00:05	00:05	00:03	00:05	00:04	00:04
20	00:04	00:05	00:02	00:15	02:40	00:05	00:55	01:39	03:42	00:15	00:05	00:05	
21	00:05												
22	00:05	00:04	00:00	00:00	00:05	03:20							
23	00:04	00:05	00:03	00:01	00:04								
24					00:12	00:05	00:00	02:36	01:52	03:11	00:05	00:02	00:02
25							00:05	03:36	00:50	02:43	00:57	00:00	00:05
26								02:26	00:15	00:15	03:53	01:11	00:05
27					01:21	00:05	00:08	03:31	00:03				
28	00:01	00:05	00:03	00:02	00:05	00:02	00:04	01:39	00:15	00:05	03:26	02:34	00:15
Média	00:04	00:04	00:05	00:12	00:19	00:22	00:11	00:59	00:20	00:20	00:25	00:12	00:03

Fonte: Dados da empresa.

O tempo mínimo de tráfego entre estações está relacionado à velocidade da composição utilizada, que varia em função do número de locomotivas utilizadas, da potência dos motores, do peso da carga transportada, do relevo e também da direção da viagem (importação ou exportação). O tempo mínimo de tráfego dos trens entre as estações estão declarados na Tabela 13:

Tabela 13 - Tempo mínimo dos trens entre estações em horas

Serviço	Entre estações													
	1↔2	2↔3	3↔4	4↔5	5↔6	6↔7	7↔8	8↔9	9↔10	10↔11	11↔12	12↔13	13↔14	14↔15
1	00:35	00:25	00:55	01:15	00:56	00:39	01:45	01:05	00:27	00:25	00:54	00:45	00:21	00:47
2					00:49	00:45	00:25	01:08	00:37	00:19	00:26	00:33	00:20	00:54
3					01:02	00:36	00:25	01:03	00:28	00:18	00:49	00:35	00:38	00:57
4								01:11	00:50	00:17	00:45	00:49	00:21	00:39
5									00:29	00:18	00:55	00:33	00:21	00:39
6										00:19	00:59	00:46	00:23	00:55
7												00:33	00:20	00:39
8	00:40	00:25	01:30	00:41	00:55	00:40	00:48	01:11	00:28	00:18	00:50	00:33	00:41	00:40
9	00:58	00:20	00:57	00:46	00:53	00:44	00:41	01:29	00:28	00:34	00:46	00:35	00:28	00:43
10	00:56	00:22	00:56	00:45	00:54	00:33	00:38	01:05	00:26	00:17	00:46	00:43	00:21	00:37
11			00:55	00:36	00:57	00:47	00:47	01:15	00:26	00:19	00:49	00:40	00:23	00:40
12					00:54	00:38	00:35	01:17	00:39	00:33	00:42	00:34	00:25	00:38
13					00:54	00:37	00:25	01:14	00:27	00:17	00:46	00:41	00:28	00:46
14					00:50	00:33	00:35	01:10	00:25	00:30	00:56	00:40	00:22	00:40
15							00:25	01:19	00:28	00:59	00:53	00:46	00:33	00:40
16							00:28	01:07	00:31	00:33	00:48	00:34	00:21	00:39
17							00:25	01:03	00:26	00:55	01:03	00:34	00:28	00:43
18								01:14	00:26	00:19	00:51	00:34	00:21	00:39
19								01:06	01:30	00:24	00:47	00:34	00:31	00:38
20	00:57	00:32	00:53	00:57	00:56	00:33	00:27	01:09	00:26	00:35	00:47	00:38	00:41	
21	00:55	00:41												
22	00:57	00:25	00:57	00:41	01:04	01:10	00:44							
23	01:00	00:30	00:59	00:35	00:54	00:40								
24					00:55	01:13	01:11	01:12	00:25	00:19	00:48	00:33	00:40	00:40
25							00:28	01:11	00:29	00:18	00:51	00:36	00:42	00:42
26								01:09	00:27	00:18	01:07	00:50	00:44	00:44
27					00:59	00:39	01:30	01:07	00:26	00:19				
28	00:57	00:23	01:01	00:37	00:35	00:32	00:30	01:05	00:29	02:35	01:09	00:49	00:39	00:39
Média	00:52	00:27	01:00	00:45	00:54	00:42	00:41	01:10	00:31	00:30	00:50	00:38	00:28	00:42

Fonte: Dados da empresa

A heurística, conforme discutido na revisão da literatura, inclui três modelos matemáticos: um deles é um programa inteiro binário e os demais são programas lineares. Neste segundo exemplo foi utilizado o *software Trainworld*, em desenvolvimento por Chen et al. (2013), que é uma versão aprimorada da heurística de Lee e Chen (2009). O Prof. Dr. Lee colaborou neste estudo, executando a heurística em seu *software*.

A heurística utiliza um pacote comercial CPLEX 9.0 para resolver os modelos matemáticos de programação linear. Um programa em C++ controla o CPLEX para testar

milhares de iterações possíveis pela troca de sequência de trens entre estações. O *hardware* utilizado foi um computador equipado com uma unidade de processamento central, *Pentium Intel Xeon 152620* rodando a 3.2 GHz de velocidade e 2,128 gigabytes de memória de acesso aleatório. O sistema operacional foi o *Windows XP*. O porte do modelo LP foi de cerca de 5000 variáveis e 8.000 restrições.

O resultado final da heurística é apresentado na Tabela 14 e comparado diretamente com a grade de horário real da empresa listada na Tabela 15.

Tabela 14 - Grade de horário da heurística

Trem	Data	Partida	Estação 1		Estação 2		Estação 3		Estação 4		Estação 5		Estação 6		Estação 7		Estação 8		Estação 9		Estação 10		Estação 11		Estação 12		Estação 13		Estação 14		Estação 15	
			Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai
1	27/12/2012	13:43	-	13:43	14:18	14:18	14:43	14:45	15:40	15:57	17:12	18:32	19:28	19:33	20:12	20:27	22:12	23:48	0:53	0:53	1:20	1:22	1:47	1:52	2:46	2:48	3:33	3:33	3:54	3:56	4:43	-
2	28/12/2012	2:12	-	-	-	-	-	-	-	2:12	2:47	2:49	3:38	3:43	4:28	4:33	4:58	5:00	6:08	6:10	6:47	6:47	7:06	7:11	7:37	7:44	8:17	8:22	8:42	8:42	9:36	-
3	28/12/2012	0:37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0:37	1:39	1:44	2:20	3:29	3:54	3:55	4:58	5:09	5:37	5:40	5:58	6:03	6:52	6:52	7:27	7:32	8:10	8:13	9:10	-
4	28/12/2012	3:34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3:34	4:45	8:14	9:04	9:09	9:26	9:28	10:16	10:21	11:10	11:14	11:35	11:40	12:19	-
5	28/12/2012	8:38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8:38	9:07	9:12	9:30	9:30	10:25	10:30	11:16	11:21	11:42	11:47	12:26	-	
6	28/12/2012	10:55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10:55	11:14	11:19	12:18	13:35	14:21	14:25	14:48	14:53	15:48	-
7	28/12/2012	17:01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17:01	17:34	17:42	18:02	18:07	18:46	-
8	28/12/2012	4:22	-	4:22	5:02	5:17	5:42	5:47	7:17	7:21	8:02	8:17	9:12	9:17	9:57	9:59	10:47	10:52	12:03	12:04	12:32	12:47	13:05	13:09	13:59	13:59	14:32	14:34	15:15	15:20	16:00	-
9	28/12/2012	8:10	-	8:10	9:08	9:09	9:29	9:32	10:29	10:44	11:55	11:57	12:50	12:50	13:34	13:39	14:20	14:27	16:03	16:14	16:42	17:06	17:40	17:42	18:28	18:33	19:08	19:08	19:36	19:36	20:19	-
10	28/12/2012	10:11	-	10:11	11:07	11:10	11:32	11:41	12:37	12:42	13:27	13:30	14:24	14:34	15:07	15:09	15:47	15:51	17:04	17:06	17:32	17:35	17:52	18:07	18:53	18:56	19:39	19:44	20:05	20:06	20:45	-
11	28/12/2012	13:43	-	-	-	-	-	13:43	14:38	14:43	15:19	15:23	16:22	16:35	17:22	17:22	19:08	19:10	20:25	20:30	20:56	20:58	21:23	21:28	22:17	22:22	23:02	23:07	23:36	23:38	0:18	-
12	27/12/2012	13:13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13:13	14:07	14:22	15:00	15:05	15:40	15:45	17:02	17:07	17:46	17:46	18:19	18:24	19:06	19:12	19:46	19:51	20:16	20:21	20:59	-
13	27/12/2012	15:21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15:21	16:15	16:20	17:11	17:20	17:45	19:06	20:20	20:24	20:54	20:56	21:21	21:26	22:12	22:16	22:57	23:02	23:30	23:30	0:16	-
14	27/12/2012	17:44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17:44	18:34	18:38	19:11	19:16	19:51	19:56	21:06	21:46	22:11	22:16	22:46	22:50	23:46	23:48	0:28	0:30	0:52	0:57	1:37	-
15	27/12/2012	9:24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9:24	9:49	9:50	11:09	11:32	12:00	12:05	13:04	13:11	14:04	14:04	14:50	14:53	15:26	15:31	16:11	-
16	27/12/2012	11:37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11:37	12:05	12:10	13:17	14:03	14:34	14:39	15:12	15:23	16:11	16:26	17:00	17:05	17:26	17:31	18:10	-
17	27/12/2012	14:32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14:32	14:57	15:02	16:05	16:13	16:39	16:44	17:39	17:44	18:47	18:52	19:26	19:31	19:59	20:01	20:44	-
18	27/12/2012	8:30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8:30	9:44	10:00	10:26	10:51	11:10	11:15	12:06	12:22	12:56	13:01	13:30	14:11	14:50	-	-
19	27/12/2012	10:50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10:50	11:56	12:05	13:35	13:40	14:04	14:07	14:54	14:59	15:33	15:37	16:08	16:12	16:50	-	-
20	27/12/2012	8:56	4:20	-	3:19	3:23	2:42	2:47	1:47	1:49	0:35	0:50	20:59	23:39	20:21	20:26	18:59	19:54	16:11	17:50	12:03	15:45	11:13	11:28	10:20	10:26	9:37	9:42	-	8:56	-	-
21	27/12/2012	13:34	15:15	-	14:15	14:20	-	13:34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	27/12/2012	10:52	20:36	-	19:34	19:39	19:05	19:09	18:08	18:08	17:27	17:27	16:18	16:23	11:36	15:08	-	10:52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	27/12/2012	13:41	18:36	-	17:32	17:36	16:57	17:02	15:55	15:58	15:19	15:20	14:21	14:25	-	13:41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	27/12/2012	9:51									2:35	-	1:28	1:40	0:10	0:15	22:59	22:59	19:11	21:47	16:42	18:34	13:08	16:19	12:15	12:20	11:13	11:17	10:31	10:33	-	9:51
25	27/12/2012	10:57													2:46	-	2:13	2:18	21:26	1:02	20:07	20:57	17:04	19:47	13:33	16:13	12:57	12:57	11:39	11:44	-	10:57
26	27/12/2012	12:43															2:15	-	22:40	1:06	21:58	22:13	21:25	21:40	16:25	20:18	14:23	15:35	13:27	13:32	-	12:43
27	27/12/2012	8:49									20:28	-	18:08	19:29	17:18	17:23	14:26	15:48	9:48	13:19	9:08	9:22	-	8:49	-	-	-	-	-	-	-	-
28	27/12/2012	13:31	12:57	-	11:59	12:00																										

Fonte: Autor.

Tabela 15 - Grade de horário real da empresa

Trem	Data	Partida	Estação 1		Estação 2		Estação 3		Estação 4		Estação 5		Estação 6		Estação 7		Estação 8		Estação 9		Estação 10		Estação 11		Estação 12		Estação 13		Estação 14		Estação 15		
			Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	Entra	Sai	
1	27/12/2012	13:18	-	13:18	14:15	14:30	14:55	15:00	15:57	16:12	17:35	18:57	19:53	19:58	20:37	20:52	22:37	0:13	1:18	1:23	1:50	1:55	2:20	2:25	3:19	3:24	4:11	4:16	4:37	4:42	5:29	-	
2	28/12/2012	2:42	-	-	-	-	-	-	-	2:42	3:17	3:22	4:15	4:20	5:10	5:15	5:40	5:45	6:53	6:58	7:35	7:40	7:59	8:04	8:52	8:59	9:33	9:38	9:58	10:03	10:57	-	
3	28/12/2012	0:59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0:59	2:06	2:11	2:47	3:56	4:21	4:26	5:35	5:40	6:08	6:13	6:31	6:36	7:26	7:31	8:08	8:13	8:51	8:56	9:53	-	
4	28/12/2012	3:05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3:05	4:16	7:45	8:35	8:40	8:57	9:02	9:50	9:55	10:48	10:53	11:14	11:19	11:59	-	
5	28/12/2012	9:08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9:08	9:37	9:42	10:00	10:05	11:00	11:05	11:38	11:43	12:04	12:09	12:48	-	
6	28/12/2012	10:46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10:46	11:05	11:10	12:11	12:16	13:02	13:07	13:30	13:35	14:30	-	
7	28/12/2012	17:31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17:31	18:04	18:12	18:32	18:37	19:16	-
8	28/12/2012	4:52	-	4:52	6:00	6:15	6:40	6:45	9:30	9:35	10:16	10:31	11:28	11:33	12:18	12:23	13:11	13:16	14:27	14:32	15:00	15:05	15:23	15:28	16:18	16:23	16:56	17:01	17:42	17:47	18:27	-	
9	28/12/2012	8:31	-	8:31	9:29	9:34	9:56	10:01	10:58	11:13	11:59	12:04	12:57	13:02	13:46	13:51	14:32	14:37	16:06	16:11	16:39	16:44	17:18	17:23	18:09	18:14	18:49	18:54	19:22	19:27	20:10	-	
10	28/12/2012	10:41	-	10:41	11:37	11:42	12:04	12:19	13:15	13:20	14:11	14:16	15:10	15:15	15:48	15:53	16:32	16:37	17:48	17:53	18:19	18:24	18:41	18:46	19:32	19:37	20:20	20:25	20:46	20:51	21:29	-	
11	28/12/2012	13:37	-	-	-	-	-	13:37	14:34	14:39	15:15	15:20	16:17	16:22	17:09	17:14	18:01	18:06	19:21	19:26	19:52	19:57	20:16	20:21	21:10	21:15	21:55	22:00	22:23	22:28	23:08	-	
12	27/12/2012	13:24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13:24	14:18	14:33	15:11	15:16	15:55	16:00	17:17	17:22	18:01	18:06	18:39	18:44	19:30	19:35	20:09	20:14	20:39	20:44	21:22	-	
13	27/12/2012	15:32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15:32	16:26	17:16	17:53	18:16	18:41	18:46	20:00	20:05	20:32	20:37	20:54	20:59	21:45	21:50	22:31	22:36	23:04	23:09	23:56	-	
14	27/12/2012	17:50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17:50	18:47	18:52	19:25	19:30	20:05	20:10	21:20	22:00	22:25	22:30	23:00	23:15	0:12	0:17	0:57	1:02	1:24	1:29	2:09	-	
15	27/12/2012	8:54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8:54	9:19	9:24	10:43	11:17	11:45	11:50	12:54	12:59	13:54	14:01	14:47	15:16	15:49	15:54	16:34	-	
16	27/12/2012	11:36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11:36	12:04	12:09	13:16	14:41	15:12	15:17	15:50	16:02	16:51	16:56	17:30	17:35	17:56	18:01	18:40	-	
17	27/12/2012	14:12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14:12	14:38	14:43	15:50	15:58	16:24	16:29	17:26	17:31	18:34	18:39	19:13	19:18	19:46	19:51	20:34	-	
18	27/12/2012	8:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8:00	9:14	10:05	10:31	10:36	10:55	11:00	11:51	13:17	13:51	13:56	14:17	14:22	15:01	-	
19	27/12/2012	10:53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10:53	11:59	12:04	14:31	14:36	15:00	15:05	15:52	15:57	16:31	16:36	17:08	17:13	17:51	-	
20	27/12/2012	8:34	7:07	-	6:05	6:10	5:28	5:33	4:24	4:29	3:12	3:27	21:20	2:16	20:42	20:47	18:36	20:15	15:48	17:27	11:40	15:22	10:50	11:05	9:58	10:03	9:15	9:20	-	8:34	-	-	
21	27/12/2012	13:34	15:22	-	14:20	14:25	-	13:34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	27/12/2012	10:42	21:21	-	20:19	20:24	19:28	19:33	18:26	18:31	17:40	17:45	16:31	16:36	11:26	15:21	-	10:42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	27/12/2012	13:43	19:05	-	17:41	17:46	17:06	17:11	16:02	16:07	15:22	15:27	14:23	14:28	-	13:43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	27/12/2012	9:53	-	-	-	-	-	-	-	-	5:20	-	4:10	4:25	23:58	2:57	22:42	22:47	18:36	21:30	16:19	18:11	12:49	16:00	11:56	12:01	11:18	11:23	10:33	10:38	-	9:53	
25	27/12/2012	10:57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0:36	-	0:03	0:08	19:15	22:52	17:56	18:46	14:55	17:38	13:07	14:04	12:26	12:31	11:39	11:44	-	10:57	
26	27/12/2012	12:13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2:55	-	23:02	1:28	21:22	22:35	20:49	21:04	15:47	19:40	13:46	14:57	12:57	13:02	-	12:13	
27	27/12/2012	9:05	-	-	-	-	-	-	-	-	21:02	-	18:42	20:03	17:58	18:03	14:33	16:05	9:55	13:26	9:24	9:29	-	9:05	-	-	-	-	-	-	-	-	
28	27/12/2012	13:33	13:39	-	12:37	12:42	12:09	12:14	11:03	11:08	10:21	10:26	9:20	9:25	8:43	8:48	8:08	8:13	2:29	7:03	1:45	2:00	23:05	23:10	18:29	21:55	15:06	17:40	14:12	14:27	-	13:33	

Fonte: Autor.

A comparação da programação da empresa versus resultados da pesquisa é apresentada na Tabela 16. Para a maioria dos serviços em qualquer direção, a heurística obteve um tempo de viagem menor em comparação com o plano real. O tempo de viagem médio foi reduzido em 12h 27min no total, representando uma redução de 4,4 % do tempo total. No sentido exportação (norte/sul), a redução foi de 5h 11min e, no sentido importação (sul/norte), a redução foi de 7h 15min, representando 3,3 e 5,8 % respectivamente em tempo de viagem. Essa melhoria é proveniente da melhor escolha de momentos de encontro e ultrapassagens dos trens.

Tabela 16 - Comparação da programação da empresa *versus* resultados da pesquisa

Trem	Empresa (hora)		Tempo (hora)	Heurística (hora)		Tempo (hora)	Diferença Absoluta	Diferença Relativa (%)
	Início	Fim		Início	Fim			
1	13:18	5:29	16:11	13:43	4:43	14:59	-1:11	-7,4%
2	2:42	10:57	8:15	2:12	9:36	7:24	-0:51	-10,3%
3	0:59	9:53	8:54	0:37	9:10	8:33	-0:21	-3,9%
4	3:05	11:59	8:54	3:34	12:19	8:45	-0:09	-1,7%
5	9:08	12:48	3:40	8:38	12:26	3:48	+0:08	3,6%
6	10:46	14:30	3:44	10:55	15:48	4:52	+1:08	30,6%
7	17:31	19:16	1:45	17:01	18:46	1:45	0:00	0,0%
8	4:52	18:27	13:35	4:22	16:00	11:38	-1:56	-14,3%
9	8:31	20:10	11:39	8:10	20:19	12:09	+0:30	-4,4%
10	10:41	21:29	10:48	10:11	20:45	10:34	-0:13	-2,1%
11	13:37	23:08	9:31	13:43	0:18	10:35	+1:04	-11,2%
12	13:24	21:22	7:58	13:13	20:59	7:45	- 0:12	-2,6%
13	15:32	23:56	8:24	15:21	0:16	8:55	+0:31	-6,2%
14	17:50	2:09	8:19	17:44	1:37	7:53	-0:26	-5,2%
15	8:54	16:34	7:40	9:24	16:11	6:47	-0:53	-11,5%
16	11:36	18:40	7:04	11:37	18:10	6:33	-0:31	-7,3%
17	14:12	20:34	6:22	14:32	20:44	6:12	-0:10	-2,6%
18	8:00	15:01	7:01	8:30	14:50	6:20	-0:40	-9,6%
19	10:53	17:51	6:58	10:50	16:50	6:00	-0:58	-13,9%
20	8:34	7:07	22:33	8:56	4:20	19:24	-3:08	-13,9%
21	13:34	15:22	1:48	13:34	15:15	1:41	-0,07	-6,5%
22	10:42	21:21	10:39	10:52	20:36	9:44	-0:54	-8,5%
23	13:43	19:05	5:22	13:41	18:36	4:55	-0:26	-8,2%
24	9:53	5:20	19:27	9:51	2:35	16:44	-2:42	-13,9%
25	10:57	0:36	13:39	10:57	2:46	15:49	+2:10	15,9%

Fonte: Autor.

(Continua)

Tabela 16 - Comparação da programação da empresa *versus* resultados da pesquisa

Trem	Empresa (hora)		Tempo (hora)	Heurística (hora)		Tempo (hora)	Diferença Absoluta	Diferença Relativa (%)
	Início	Fim		Início	Fim			
26	12:13	2:55	14:42	12:43	2:15	13:32	-1:10	-7,9%
27	9:05	21:02	11:57	8:49	20:28	11:39	-0:17	-2,4%
28	13:33	13:39	24:06	13:31	12:57	23:26	-0:39	-2,7%
Total	280:55		Total	268:28	-12:27	-4,4%	Total	280:55

Fonte: Autor.

(Conclusão)

Além disso, a maior parte dos serviços se distanciou menos de 30 minutos do tempo programado de saída, que é utilizado como o tempo de partida para o destino pela heurística.

Tabela 17 - Diferença absoluta da hora de partida

Trem	Data	Partida (hora)		Diferença Absoluta
		Empresa	Heurística	
1	27/12/2012	13:18	13:43	+ 0:25
2	28/12/2012	2:42	2:12	- 0:30
3	28/12/2012	0:59	0:37	- 0:22
4	28/12/2012	3:05	3:34	+ 0:29
5	28/12/2012	9:08	8:38	- 0:30
6	28/12/2012	10:46	10:55	+ 0:09
7	28/12/2012	17:31	17:01	- 0:30
8	28/12/2012	4:52	4:22	- 0:30
9	28/12/2012	8:31	8:10	- 0:21
10	28/12/2012	10:41	10:11	- 0:30
11	28/12/2012	13:37	13:43	+ 0:06
12	27/12/2012	13:24	13:13	- 0:10
13	27/12/2012	15:32	15:21	- 0:10
14	27/12/2012	17:50	17:44	- 0:05
15	27/12/2012	8:54	9:24	+ 0:30
16	27/12/2012	11:36	11:37	+ 0:01
17	27/12/2012	14:12	14:32	+ 0:20
18	27/12/2012	8:00	8:30	+ 0:30
19	27/12/2012	10:53	10:50	- 0:02
20	27/12/2012	8:34	8:56	+ 0:22
21	27/12/2012	13:34	13:34	0:00
22	27/12/2012	10:42	10:52	+ 0:10

Fonte: Autor.

(Continua)

Tabela 17 - Diferença absoluta da hora de partida

Trem	Data	Partida (hora)		Diferença Absoluta
		Empresa	Heurística	
23	27/12/2012	13:43	13:41	- 0:02
24	27/12/2012	9:53	9:51	- 0:02
25	27/12/2012	10:57	10:57	0:00
26	27/12/2012	12:13	12:43	+ 0:30
27	27/12/2012	9:05	8:49	- 0:16
28	27/12/2012	13:33	13:31	- 0:02

Fonte: Autor.

(Conclusão)

A diferença entre os horários de partida da heurística e os horários reais foi em média de 16 minutos, sendo mais especificamente 19 min no sentido exportação e 9 min no sentido importação (Tabela 17).

A Figura 15 compara os tempos de permanência médios de cada trem estabelecidos pela heurística versus a programação da empresa, além do tempo mínimo especificado ao sistema. Observa-se que a maioria dos trens na heurística optou por permanecer o mínimo possível nas estações e/ou em tempos inferiores ao programado pela empresa, com exceção de alguns trens (6, 13 e 25) que permaneceram um tempo maior que o programado nas estações.

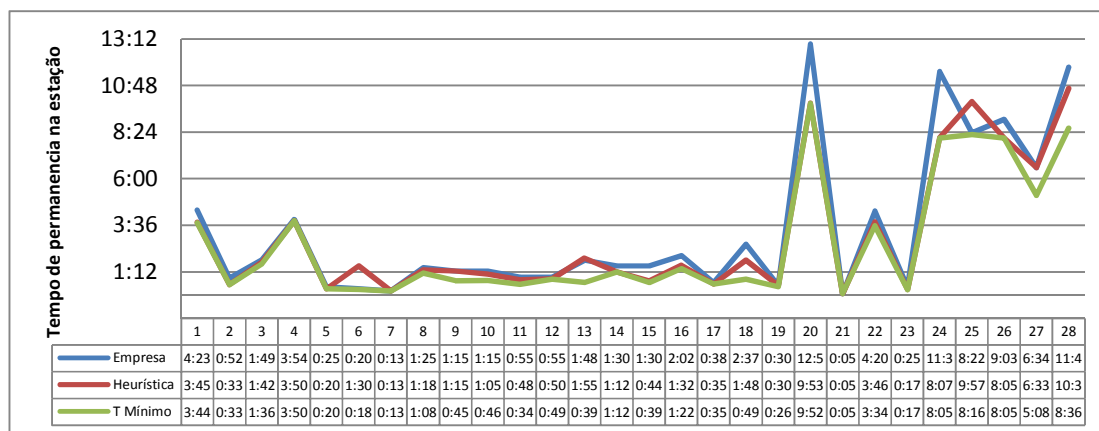


Figura15 - Tempo de permanência médio dos trens nas estações.

Fonte: Autor.

A Figura 16 compara os tempos de percurso entre estações de cada trem estabelecidos pela heurística versus a programação da empresa, além do tempo mínimo entre estações especificado ao sistema. Observa-se que a maioria dos trens na heurística trafegou em um tempo menor do que o tempo do trem programado pela empresa, com exceção de alguns trens (9, 11, 13, 24, 25 28) que permaneceram um tempo maior que o programado nas estações.

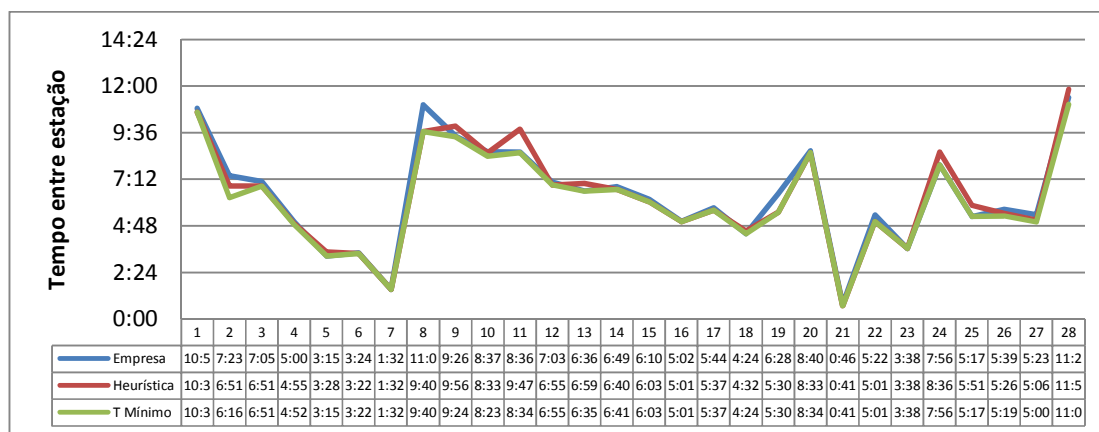


Figura 16 - Tempo de tráfego entre estações (horas).

Fonte: Autor.

Já a Figura 17 mostra o tempo total de percurso de cada trem tanto para a heurística como para a programação real da empresa. Na maioria dos casos, os tempos da heurística foram mais rápidos que os trens segundo a programação real da empresa.

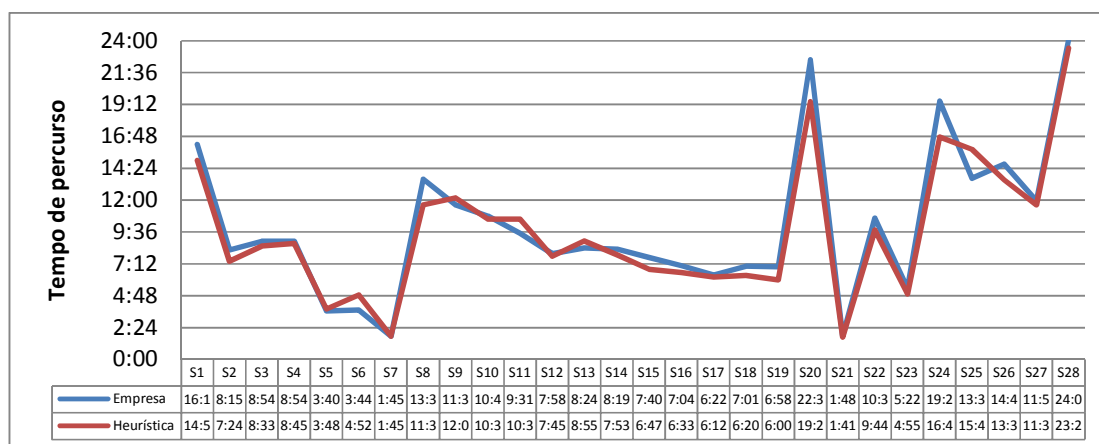


Figura 17: Tempo total de percurso (horas).

Fonte: Autor.

A Figura 18 mostra o diagrama do trem final. O diagrama do trem representa a trajetória dos trens em espaço-tempo: o eixo horizontal representa o tempo e o eixo vertical está relacionado ao espaço percorrido. As linhas horizontais marcam as posições das estações.

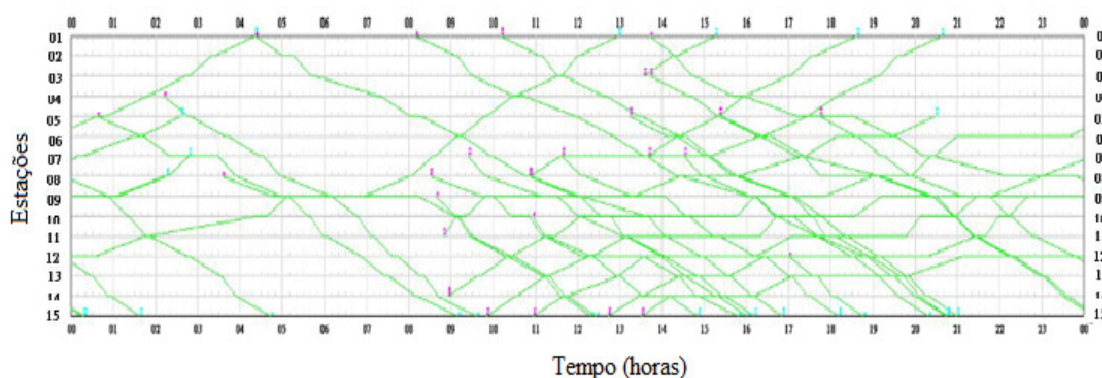


Figura 18 - Diagrama representativo da trajetória dos trens em espaço-tempo.
Fonte: Autor.

A heurística fez 40.734 iterações para resolver o problema, e melhorou a solução em 380 vezes no processo. O tempo de processamento total foi de quase 35 horas.

Os níveis de economia alcançados com a heurística foram considerados significativos pelos responsáveis da operação ferroviária, e a solução proposta é viável na prática.

A heurística favoreceu a alternativa de programação da empresa, pois os atrasos de partida em relação ao programado foram zerados. Uma possível melhoria do desempenho da heurística seria esperada se os dois modelos estivessem sob as mesmas condições. Portanto a melhoria de 4,4% pode ser maior na realidade. Novos estudos podem comprovar esta hipótese.

Este experimento de uma empresa ferroviária brasileira promoveu algumas alterações na heurística original de Lee e Chen (2009).

A heurística original previa uma parada obrigatória de duas horas por dia para toda a operação ferroviária, atividade rotineira da ferrovia de Taiwan, porém não comum na operação brasileira. O programa original do Lee e Chen (2009) foi atualizado para tornar esta parada de manutenção opcional.

O atraso permitido na estação inicial não era controlado. Os primeiros testes da heurística indicaram que os tempos totais eram melhores que a prática, porém antecipavam demasiadamente a partida dos trens, em até duas horas. Entretanto, esta situação não era viável na realidade, uma vez que antecipar uma partida além de 30 minutos é operacionalmente impossível. Uma nova restrição foi acrescentada ao algoritmo de Lee e Chen (2009) para evitar a antecipação superior a 30 minutos da partida de trens ($rk < 30$).

CONCLUSÕES

Esta dissertação teve o objetivo de compreender, descrever e aplicar o método de heurística proposto por Lee e Chen (2009) para controle de percurso de trens e problemas de agendamento em vias singelas, com o intuito de verificar se tal método é computacionalmente viável e tecnicamente melhor que o atual método utilizado pela rede ferroviária.

Os resultados da simulação fictícia simples de três trens e três estações permitiram a plena compreensão dos passos da heurística em níveis mais didáticos e detalhados que o apresentado em Lee e Chen (2009).

Os resultados da simulação real mostraram que o resultado da heurística foi melhor do que a prática em 4,4 % do tempo total de percurso e também considerada satisfatória pelos gestores da operação ferroviária. Os trens da heurística reduziram 3,3% e 5,8% do tempo de viagem em comparação com a programação da empresa, no sentido exportação e importação respectivamente. O módulo de programação de horário do *TrainWorld* gerou uma grade de horário de trens sem conflitos, de acordo com um programa de partida de trens pré-determinada, considerando várias restrições da infraestrutura disponível. A heurística de Lee e Chen (2009) apresenta-se como uma alternativa viável na gestão de operações ferroviárias da empresa, pois explora a capacidade limite da linha singela, gerando boas soluções operacionais, ou ao menos tão boas como a operação real. A diferença média no tempo da partida dos trens entre o programado e a heurística foi inferior a 30 minutos e em média 16 minutos para ambas as direções.

A heurística resolveu o problema em 40.734 iterações, e melhorou a solução 380 vezes. O tempo de computação total foi de 35h, considerado ainda elevado e ainda inviável para a tomada de decisão.

Cabe a resposta à questão de pesquisa: A heurística de Lee e Chen (2009) para programação de trens é computacionalmente viável e tecnicamente melhor que a prática da empresa ferroviária de linha singela?

Os resultados alcançados neste trabalho indicam que a heurística de Lee e Chen (2009) caminha em direção de bons resultados, fornecendo um tempo total de percurso menor do que aquele atualmente obtido pela ferrovia. Outro ponto forte desta heurística é considerar também o trajeto do trem e o *layout* das estações gerando assim soluções viáveis na prática. Porém, ainda apresenta dificuldades computacionais de chegar a boas soluções em tempo

hábil para a tomada de decisão gerencial em real time. Portanto novos estudos são recomendados para reduzir o tempo computacional.

As contribuições deste trabalho foram: melhoria no entendimento de uma nova heurística da literatura; identificação de dois pontos reais de melhoria da heurística; aplicação da heurística em uma situação real com resultados satisfatórios; e finalmente divulgação do conceito no ambiente de negócio nacional.

As principais oportunidades de melhoria desta pesquisa são: avaliar mais situações da empresa estudada; entender a lógica do método empregado pela empresa ferroviária (informação considerada sigilosa pelos executivos da empresa); reprodução da heurística em escala real devido a restrições de tempo para execução da programação, e ausência de testes de heurísticas alternativas.

Segue algumas sugestões para pesquisas futuras:

- a) testar a heurística em outras situações, levando em consideração clima, temperatura, tamanho da composição, número de estações, extensão da ferrovia, entre outras;
- b) avaliar a possibilidade de apenas adiar a partida dos trens, para averiguar se melhores resultados são encontrados;
- c) testar novas heurísticas para reduzir o tempo computacional;
- d) aplicar a heurística em outras empresas ferroviárias de via singela ou múltipla, procedendo-se a adaptações e ajustes, caso necessário;
- e) avaliar a qualidade e tempo computacional da heurística de Lee e Chen (2009) *versus* outras heurísticas já identificadas na literatura;
- f) avaliar tempo computacional para pequenas mudanças de ordens de trens e/ou incorporação de novos trens em uma programação já definida.

Incorporar novas variáveis a atual heurística, como: tempo para manutenção pré-programada, distância mínima entre trens em espaço, entre outras.

Extensões mais abrangentes de testes desta heurística merecem estudos futuros.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Relatório de Gestão 2010**. Brasília, 2011. 168 p. Relatório.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional**: métodos e modelos para análise de decisões. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa operacional**: para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BEKTAS, T.; CRAINIC, T. G.; MORENCYC, V. Improving the performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars. **Transportation Research Part C: New Technologies**. Canada, 2009, v.17, n.3, p. 259-273.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. Belo Horizonte: UFMG, 1988.

CAIMI, G. et al. Periodic railway timetabling with event flexibility. **Institute for Operations Research**: ETH Zurich, Zurich, Switzerland. v. 57, n.1, p.3-18, 2011.

CAPRARA, A. et al. A lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem. **Discrete Applied Mathematics**. Italy: Elsevier, 2006, v. 154, n.5, p. 738-753.

CASTILLO, E. et al. Timetabling optimization of a mixed Double and single tracked railway network. **Applied Mathematical Modelling**. Spain: Elsevier, 2011, v. 35, n.2, p. 859-878.

CHEN, I. C. et al. Trainworld: A powerful tool for railway timetabling. **Proceedings of the Joint Rail Conference JRC** Knoxville. Tennessee, USA, April 15-17, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Relatório Anual 2011**. Brasília, 2012, v. 9, n.5, p. 64, Relatório.

CORMAN, F. et al. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. **Transportation Research Part B**. Italy: Elsevier, v. 44, n.1, p. 175–192, 2010.

COSTA, J. C. **Algoritmo de distribuição e alocação vagões em tempo real**. 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

D'ARIANO, A. D.; PACCIARELLI, D.; PRANZO, M. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a Railway Network. **European Journal of Operation Research**. Italy: Euro, 2007, v.183, n.2, p. 643-657.

FONSECA NETO, R. **Modelo de planejamento e otimização ferroviária**. 1986. 286 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Transporte) Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computer and intractability – a guide to the theory of NP-completeness**. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 1999.

HAY, W. W. **An introduction to transportation engineering**. Illinois, USA: University of Illinois, 1961.

HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S. S. Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for rail yards operation. **European Journal of Operation Research**. England: Elsevier, v. 124, n.2, p. 307 - 331, 2003.

HIGGINS, A.; KOZAN, E.; FERREIRA, L. Optimal scheduling of trains on a single line track. **Transportation Research Part B: Methodological**. France, v. 30, n B, p. 147-161, 1996.

JOVANOVIC, D.; HARKER, P. T. Tactical scheduling of rail operations: the SCAN I system. **Transportation Science**. University of Pennsylvania, Philadelphia – USA, v.25, n.1, p. 46–64, 1991.

KRAAY, D.; HARKER, P. Real-time scheduling of freight railroads. **Transportation Research Part B: Methodological**. Philadelphia – USA, v. 29, n.3, p. 213- 229, 1995.

KROON, L. G.; DEKKER, R.; VROMANS, M. J. C. M. Cyclic railway timetabling a stochastic optimization approach. In: GERAETS, F. et al. (Eds.). **Algorithmic methods in railway optimization**. New York - USA: Springer, 2007.

LEAL, J. E. Um procedimento para a programação de trens em linhas singelas. **Centro Técnico e Científico do Departamento de Engenharia Industrial**. Memorando Técnico. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.

LEAL, J. E.; SOARES, A. C.; NUNES, L. S. N. Uma abordagem heurística para problema de programação de trens em linhas singelas. In: **XVIII ANPET**, 2004, Rio de Janeiro. Anais Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial/PUC-RIO, p. 945-956, 2004.

LEE, Y.; CHEN, C. A heuristic for the train pathing and timetabling problem. **Transportation Research Part B: Methodological**. China: Elsevier, 2009, v.43, n 2, p. 837-851.

LI, F. et al. Efficient scheduling of railway traffic based on global information of train. **Transportation Research Part B: Methodological**. China: Elsevier, 2008, v. 42, n. 10, p. 1008–1030.

MARINOV, M.; VIEGAS, J. A. Simulation modeling methodology for evaluating flat shunted yard operations. **Simulation Modelling Practice and Theory**. Portugal: Elsevier, 2009, v. 17, n. 6, p. 1106-1129.

MEDEIROS, S. R. **Modelo de simulação de tráfego ferroviário**. 1989. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MIN, Y. H. et al. An appraisal of a column-generation-based algorithm for centralized train-conflict resolution on a metropolitan railway network. **Transportation Research Part B: Methodological**. Korean: Elsevier, 2011, v. 45, n.2, p. 409-429.

MRS LOGÍSTICA S/A. **Regulamento de Operações Ferroviárias da MRS Logística S/A**. Versão: 04/00 de Março de 2008, Rio de Janeiro, 2008. Relatório.

NUNES, L. S. N. **Sistema de apoio á decisão ao centro de controle operacional no gerenciamento do tráfego ferroviário**. 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PEETERS, L. W. P. **Cyclic railway timetable optimization**: Optimalise van cyclische spoorwediensregelingen. 2003. 247 f. Erasmus University Rotterdam - Rotterdam School of Management, Holland.

PETERSEN, E. R.; TAYLOR, A. J. A Structured model for rail line simulation and optimization. **Transportation science**. University of Pennsylvania, Philadelphia – USA, v. 16, n. 2, p. 192-206, 1982.

ROSA, R. A. Modelo de simulação aplicado à avaliação de capacidade dos recursos de um terminal ferroviário. In: XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2009, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro, 2009a, p. 1202-1213.

ROSA, R. A. **Pátios ferroviários**. 2009b. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ferroviária). Instituto de Educação Continuada, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LÚCIO, P. B. **Metodologia de Pesquisa**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SAUDER, R. L; WESTERMAN, W. M. Computer-aided train dispatching: decision support through optimization, **Interfaces**. USA, v. 13, n.6, . p.24-37, 1983.

SCHLECHTE, T. **Railway Track Allocation: Models and Algorithms**. 244 f. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften. Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Berlin, Germany, 2012

SZPIGEL, B. **Sequenciamento de trens**. 1972. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TANCREDO, A. C. **Operação ferroviária**. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ferroviária). Instituto de Educação Continuada, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TORRACA, N. A. **Produtividade e qualidade do sistema de transporte ferroviária de cargas**. 1996. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de transporte). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

TOTH, P. Optimization engineering techniques for the exact solution of NP-hard combinatorial optimization problems. **European Journal of Operational Research**. England: Elsevier, v. 125, n.2, p. 222-238, 2000.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ZHOU, X.; ZHONG, M. Single-track train timetabling with guaranteed optimality: branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds. **Transportation Research Part B: Methodological**. Korean: Elsevier, 2007, v. 41, n.3, p. 320–341.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Aplicação da heurística de Lee e Chen (2009)

1º Passo: Selecione uma grade de trens inicial. Essa grade pode ser obtida pela programação que a empresa possui ou por meio da liberação dos trens segundo o horário de partida programada pela empresa (Tabela 6):

Tabela 6 – Programação inicial livre de conflito

Trem	Estação A	Trecho A-B		Estação B		Trecho B-C		Estação C
	Entrada/ Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada/ Saída
1º	480	480	537	537	538	538	563	563
2º	606	539	606	537	539	518	537	518
3º	607	607	665	665	666	666	688	688

Fonte: Autor.

2º Passo: Aloque todos os trens nas faixas dentro das estações (Ilustração 1). Aplicando a Programação Inteira Binária apresentada pela heurística, temos:

Ilustração 1 – Alocação dos trens nas faixas dentro da estação

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X		X				X	
3º	X				x			X	

Fonte: Autor.

3º Passo: Ordene todos os trens nas faixas entre as estações (Ilustração 2).

Ilustração 2 – Ordenação de todos os trens nas faixas entre as estações

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 1	Trem 2
2º	Trem 2	Trem 1
3º	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

4º Passo: Ordene todos os trens em todas as faixas (estação e entre estação) (Ilustração 3). O resultado obtido é a solução final para aquela programação de trens.

Ilustração 3 – Ordenação de todos os trens nas faixas entre as estações

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 2	Trem 2
2º	Trem 2	Trem 2	Trem 1	Trem 1	Trem 1
3º	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

5º Passo: Estabeleça o resultado da função objetivo do Passo 4 como o melhor valor encontrado:

Valor da Função objetivo do Passo 4 = 133

6º Passo: Encontre atrasos na programação (Tabela 7).

Tabela 7 – Atrasos encontrados na programação

Trem	Atraso				
	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	0	0	0	0	-
2º	-	0	0.5	0	-23
3º	82	0	0	0	-

Fonte: Autor.

7º Passo: Faça um levantamento das possibilidades de se reduzir os atrasos através das 4 estratégias descritas na heurística. O valor máximo deve ser inferior a 15.

Para esse caso, levantaram-se três possibilidades, sendo elas:

- liberar assim que possível a saída do trem 3 na estação A, dando o máximo de prioridade. [Estratégia4];
- adiar o trem 2 [Estratégia 3];
- aplicar as duas estratégias anteriores simultaneamente [Estratégia 3 e 4].

8º Passo: Escolha uma das opções do 7º Passo para aplicar o 9º Passo. Após executar a iteração desconsiderar as opções utilizadas:

Opção escolhida: “a” [executar]

9º Passo: Aplique os 2º, 3º, 4º Passos (Ilustrações 4, 5 e 6).

Ilustração 4 – Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X		X				X	
3º	X				X			X	

Fonte: Autor.

Ilustração 5 – Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 1	Trem 2
2º	Trem 3	Trem 1
3º	Trem 2	Trem 3

Fonte: Autor.

Ilustração 6 – Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 2	Trem 2
2º	Trem 3	Trem 3	Trem 1	Trem 1	Trem 1
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 3	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

10º Passo: Aplique os 8º e 9º Passos. O 10º Passo finaliza quando todas as possibilidades criadas pelo 8º Passo finalizarem (Ilustrações 7 a 11).

8º Passo:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção escolhida “b” [executar]

9º Passo:

Ilustração 7 – Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X			X		X		
3º	X				X			X	

Fonte: Autor.

Ilustração 8 – Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 1	Trem 1
2º	Trem 2	Trem 2
3º	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

Ilustração 9 – Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 1	Trem 1	Trem 1	Trem 1	Trem 1
2º	Trem 2	Trem 2	Trem 2	Trem 2	Trem 2
3º	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

8ºPasso:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção “b” [desconsiderar]

Opção escolhida “c” [executar]

9ºPasso:

Ilustração 10 – Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X			X		X		
3º	X			X				X	

Fonte: Autor.

Ilustração 11 – Resultado da aplicação do 3º Passo.

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 1	Trem 1
2º	Trem 3	Trem 2
3º	Trem 2	Trem 3

Fonte: Autor.

Ilustração 12 – Resultado da aplicação do 4º Passo.

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 1	Trem 1	Trem 1	Trem 1	Trem 1
2º	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 2	Trem 2
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 2	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

8º Passo:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção “b” [desconsiderar]

Opção “c” [desconsiderar]

11º Passo: Encontre o menor valor da função objetivo (Ilustração 12).

Ilustração 13 – Menor valor da função objetivo

Opção	Valor da F.O. (Passo 4)
a	302.5
b	175.0
c	88.5

Fonte: Autor.

12º Passo: Se o valor encontrado pela função objetivo no 11º Passo for menor que o valor da função objetivo já conhecida vezes a variável 1.1, adote o valor como o melhor e siga para o 13º Passo. Caso contrário, finalize a heurística apresentando o melhor valor encontrado.

$$88.5 \leq 133 * 1.1$$

$$88.5 \leq 146.3$$

O valor encontrado satisfaz a condição, logo a nova grade de trens passa a ser a Ilustração 13:

Ilustração 14 – Programação inicial livre de conflito

Trem	Estação A	Trecho A-B		Estação B		Trecho B-C		Estação C
	Entrada/ Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada/ Saída
1º	480	480	537	537	538	538	563	563
2º	665	598	665	597	598	578	597	578
3º	539	539	597	597	598	598	620	620

Fonte: Autor.

13º Passo: Aplique os passos 6º e 7º.

6º Passo (Tabela 9):

Tabela 9 – Atrasos encontrados na programação

Trem	Atraso				
	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	0	0	0	0	-
2º	-	0	0	0	37
3º	14	0	0.5	0	-

Fonte: Autor.

7º Passo: Para essa nova grade de trens, levantaram-se cinco possibilidades, sendo elas:

- trocar a ordem do trem 1 com o trem 3 na estação A [estratégia 1];
- liberar assim que possível o trem 2, dando o máximo de prioridade à estação C. [estratégia 4];
- trocar a ordem do trem 1 com o trem 3 na estação A e liberar assim que possível o trem 2 na estação C, dando a ele o máximo de prioridade [estratégias 1 e 4];
- liberar assim que possível o trem 2 na estação C e o trem 3 na estação B [estratégias 4];
- trocar a ordem do trem 1 com o 3 na estação A, liberar assim que possível o trem 2 na estação C e liberar assim que possível o trem 3 na estação B, dando a ele o máximo de prioridade. [Estratégias 1 e 4].

14º Passo: Aplique os 8º, 9º, 10º, 11º e 12º Passos (Ilustrações 14 a 30).

8º Passo

Opção escolhida “a”

9º Passo:

Ilustração 15 – Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X			X		X		
3º	X			X				X	

Fonte: Autor.

Ilustração 16 – Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 3	Trem 1
2º	Trem 1	Trem 2
3º	Trem 2	Trem 3

Fonte: Autor.

Ilustração 17– Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 1	Trem 1
2º	Trem 1	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 2
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 2	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

8ºPasso:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção escolhida “b”[executar]

Ilustração 18– Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X		X				X	
3º	X				X			X	

Fonte: Autor.

Ilustração 19– Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 1	Trem 2
2º	Trem 3	Trem 1
3º	Trem 2	Trem 3

Fonte: Autor.

Ilustração 20 – Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 2	Trem 2
2º	Trem 3	Trem 3	Trem 1	Trem 1	Trem 1
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 3	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

8º Passo:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção “b” [desconsiderar]

Opção escolhida “c” [executar]

Ilustração 21– Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X		X				X	
3º	X					X		X	

Fonte: Autor.

Ilustração 22 – Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 3	Trem 2
2º	Trem 1	Trem 1
3º	Trem 2	Trem 3

Fonte: Autor.

Ilustração 23 – Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 2	Trem 2
2º	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 1	Trem 1
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 1	Trem 3	Trem 3

Fonte: Autor.

8ºPasso:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção “b” [desconsiderar]

Opção “c” [desconsiderar]

Opção “d” [executar]

Ilustração 24 – Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X		X				X	
3º	X					X		X	

Fonte: Autor.

Ilustração 25 – Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 1	Trem 2
2º	Trem 3	Trem 3
3º	Trem 2	Trem 1

Fonte: Autor.

Ilustração 26 – Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 1	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 2
2º	Trem 3	Trem 3	Trem 2	Trem 3	Trem 3
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 3	Trem 1	Trem 1

Fonte: Autor.

8ºPasso:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção “b” [desconsiderar]

Opção “c” [desconsiderar]

Opção “d” [desconsiderar]

Opção “e” [executar]

Ilustração 27 – Resultado da aplicação do 2º Passo

Trem	Estação A			Estação B			Estação C		
	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3	Faixa 1	Faixa2	Faixa3
1º		X			X			X	
2º		X		X				X	
3º	X				X			X	

Fonte: Autor.

Ilustração 28– Resultado da aplicação do 3º Passo

Ordem	Trecho A-B	Trecho B-C
1º	Trem 3	Trem 2
2º	Trem 1	Trem 3
3º	Trem 2	Trem 1

Fonte: Autor.

Ilustração 29 – Resultado da aplicação do 4º Passo

Ordem	Estação A	Trecho A-B	Estação B	Trecho B-C	Estação C
1º	Trem 3	Trem 3	Trem 3	Trem 2	Trem 2
2º	Trem 1	Trem 1	Trem 2	Trem 3	Trem 3
3º	Trem 2	Trem 2	Trem 1	Trem 1	Trem 1

Fonte: Autor.

8º Passo:

Opção “a” [desconsiderar]

Opção “b” [desconsiderar]

Opção “c” [desconsiderar]

Opção “d” [desconsiderar]

Opção “e” [desconsiderar]

11º Passo:

Ilustração 30– Valor da função objetivo

Possibilidades	Valor da F.O. (Passo 4)
a	257.0
b	302.5
c	240.5
d	840.5
e	331.5

Fonte: Autor.

12º Passo:

$$240.5 \leq 88.5 * 1.1$$

$$240.5 \leq 97.35$$

O valor encontrado não satisfaz a condição, logo a heurística finaliza os passos e apresenta a grade de programação de trens (Ilustração 31) que corresponde ao melhor valor encontrado, ou seja, 88.5.

Ilustração 31 – Programação inicial livre de conflito

Trem	Estação A	Trecho A-B		Estação B		Trecho B-C		Estação C
	Entrada/ Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada/ Saída
1º	480	480	537	537	538	538	563	563
2º	665	598	665	597	598	578	597	578
3º	539	539	597	597	598	598	620	620

Fonte: Autor.