

Universidade Federal do Espírito Santo

Departamento de Engenharia Civil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Mestrado em Transportes

EDSON PIMENTEL PEREIRA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS
EM UMA FERROVIA DE LINHA SINGELA**

VITÓRIA – ES

Junho 2015

EDSON PIMENTEL PEREIRA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS
EM UMA FERROVIA DE LINHA SINGELA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração em Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA – ES

Junho 2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

P436m Pereira, Edson Pimentel, 1975-
Modelo matemático para planejamento da circulação de trens
em uma ferrovia de linha singela / Edson Pimentel Pereira. –
2015.

82 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Ferrovias. 2. Transporte ferroviário. 3. Planejamento.
4. Modelos matemáticos. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS
EM UMA FERROVIA DE LINHA SINGELA**

Edson Pimentel Pereira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

Aprovada no dia **08 de junho de 2015** por:

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientador - UFES

Prof. Dr. Adelmo Inacio Bertolde
Doutor em Estatística
Membro Interno - UFES

Prof. Dr. Jodelson Aguiar Sabino
Doutor em Engenharia de Produção
Membro Externo - VALE S/A

VITÓRIA – ES, Junho de 2015

Dedico este trabalho aos meus pais Orlando e Mercilene, à
minha esposa Lorena e aos meus filhos André e Eduardo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me oportunizar chegar até aqui. Ele é a razão do nosso viver.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, pela dedicação e estímulo em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis; pela confiança depositada, conhecimento compartilhado, sugestões, cobranças na hora certa, enfim, por estar sempre presente e pronto a ajudar.

Aos membros da banca examinadora, pelo tempo dedicado à leitura, aos comentários, às correções e às sugestões de melhorias.

À minha esposa Lorena, a quem coube a difícil tarefa de suportar a minha ausência e me incentivar nos momentos de desânimo e cansaço.

Aos meus filhos, André e Eduardo, que mesmo ainda pequenos, me ajudaram a entender o verdadeiro sentido da busca pelo conhecimento.

Aos meus pais, por sempre me conduzirem no caminho correto, por seu insistente estímulo à busca do conhecimento e por suas orações constantes.

Ao meu irmão e sua esposa pelo apoio em todas as horas.

À minha sogra por toda ajuda com as crianças e incentivo permanente.

Aos meus amigos e demais familiares pelo incentivo constante.

Aos meus colegas do IFES, por toda colaboração e incentivo.

Aos amigos da Grande Vitória, que sempre me incentivaram ao aprimoramento e que ajudaram a moldar o profissional que hoje sou.

Ao IFES, pela oportunidade de me aprimorar como professor e pesquisador.

À FCA e à UFES por todo apoio.

RESUMO

Diversos fatores têm contribuído para o aumento da demanda por transporte ferroviário no Brasil. Dentre eles, citam-se: o aumento das exportações brasileiras nos últimos anos e a aprovação do novo marco regulatório para o setor ferroviário brasileiro que permitiu o uso da capacidade ociosa das ferrovias e o compartilhamento da malha por diversos operadores. Investimentos para construção de novas ferrovias e melhorias nas já existentes são muito elevados, o que dificulta a implantação de novos projetos. Assim, faz-se necessário melhorar o planejamento da circulação de trens visando o aumento de capacidade sem a necessidade de novos investimentos, otimizando o uso da estrutura já existente. Esta dissertação tem como objetivo propor um modelo matemático para realizar o planejamento da circulação de trens em uma ferrovia de linha singela, que minimize o *transit time*, isto é, o tempo total de viagem de todos os trens e consequentemente reduza o tempo parado em pátios de cruzamento. O modelo proposto permite que os trens sejam atrasados ou adiantados na partida visando reduzir o tempo parado em pátios de cruzamento. O modelo é resolvido de forma ótima usando o *solver* CPLEX 12.6. Foram realizados testes com dados reais da Ferrovia Centro Atlântica (FCA) e os resultados alcançados pelo CPLEX foram comparados com os resultados do planejamento manual da FCA. O modelo obteve redução do tempo de viagem dos trens em todos os cenários testados.

Palavras chave: Planejamento da circulação de trens, Operação Ferroviária, *Train Timetabling Problem*, Transporte Ferroviário

ABSTRACT

Several factors have contributed to the increasing demand for rail transportation in Brazil. Among them we can mention the increase of Brazilian exports in recent years and the approval of the new regulatory framework for the Brazilian railway sector that allowed the use of the railways idle capacity and the sharing of the rail tracks by several operators. Investments for construction of new railways and improvements on existing ones are very high, making it difficult to implement new projects. Therefore, it is necessary to improve train circulation planning in order to increase capacity without the need for new investments, thus optimizing the existing structure. This paper proposes a mathematical model to carry out the planning of train circulation on a single line railroad that minimizes the transit time, e.g., the total travel of all trains, and consequently reduces the time stopped at the crossing yards. The proposed model allows the trains to be delayed or advanced at departure time to reduce time stopped in crossing yards. The model was solved optimally using the solver CPLEX 12.6. Tests were performed with real data from Ferrovia Centro Atlantica (FCA) and the results achieved by CPLEX were compared with the real life planning results of FCA. The model achieved a reduction of the trains travel time in all scenarios tested.

Keywords: Train Timetabling Problem, Railroad Operation, Railroad Transportation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da malha ferroviária no Brasil.....	15
Figura 2 - Evolução da produção das concessionárias ferroviárias no Brasil.....	16
Figura 3 - Planejamento de Sistemas de Transporte Ferroviário.....	21
Figura 4 - Circulação de trens em linha singela com pátio de cruzamento	23
Figura 5 - Seção de bloqueio - Linha singela.....	24
Figura 6 - Gráfico de trens circulando na malha.....	25
Figura 7 – Etapas da Metodologia de Pesquisa.....	45
Figura 8 - Principais parâmetros e variáveis do modelo para um trem circulando.....	48
Figura 9 - Ferrovia de Teste	53
Figura 10 - Mapa da malha ferroviária da FCA	59
Figura 11 – Gráfico de trens Cenário de teste 01.....	65
Figura 12 - Gráfico de trens Cenário de teste 02	65
Figura 13 – Gráfico de trens Cenário de teste 03.....	67
Figura 14 - Gráfico de trens Cenário de teste 04	68
Figura 15 - Gráfico de trens Cenário de teste 05	69
Figura 16 - Comparação Modelo Proposto x Caso Real	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição Janelas de Tempo	51
Tabela 2 – Dados da Ferrovia de Teste.....	52
Tabela 3 – Operação Programada dos trens	53
Tabela 4 - Cenários de teste	54
Tabela 5 - Cenários de Teste com manutenção da VP	56
Tabela 6 - Cenários Dados Reais da FCA.....	60
Tabela 7 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 01	63
Tabela 8 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 02	63
Tabela 9 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 03	66
Tabela 10 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 04	68
Tabela 11 - Comparação dos Resultados do CPLEX x Caso Real.....	71
Tabela 12 - Comparação Resultados do CPLEX x Caso Real	73
Tabela 13 - Possíveis ganhos financeiros.....	75
Tabela 14 - Possíveis ganhos ambientais.....	75

LISTA DE SIGLAS

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

CNT - Confederação Nacional do Transporte

FCA – Ferrovia Centro Atlântica

PLIM - Programação Linear Inteira Mista

PNLIM - Programação Não Linear Inteira Mista

RFFSA - Rede Ferroviária Federal S/A

SB - Seção de Bloqueio

THP - Trem Hora Parado

TPP - *Train Platforming Problem*

TTP - *Train Timetabling Problem*

VLI – Valor Logística Integrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>17</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>17</i>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS	20
2.1	PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO	20
2.2	CIRCULAÇÃO DE TRENS EM LINHA SINGELA	22
2.3	O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS	25
2.4	PROBLEMA DE PLANEJAMENTO – <i>SCHEDULING</i>	38
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	42
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	42
3.2	ETAPAS	43
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	46
5	CENÁRIOS PROPOSTOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO.....	51
5.1	CENÁRIOS DE TESTES PROPOSTOS.....	52
5.2	CENÁRIOS DE TESTES PROPOSTOS COM MANUTENÇÃO	55
5.2.1	<i>A manutenção da Via Permanente.....</i>	<i>55</i>
5.2.2	<i>Os Cenários com manutenção.....</i>	<i>56</i>
5.3	CENÁRIOS PROPOSTOS COM DADOS REAIS DA FCA.....	57
5.3.1	<i>A Ferrovia Centro Atlântica - FCA</i>	<i>58</i>
5.3.2	<i>Os cenários reais com dados da FCA.....</i>	<i>59</i>
6	RESULTADOS E ANÁLISES.....	62

6.1	RESULTADOS OBTIDOS COM OS CENÁRIOS DE TESTE	62
6.2	RESULTADOS OBTIDOS COM OS CENÁRIOS DE TESTES COM MANUTENÇÃO	67
6.3	RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CENÁRIOS COM DADOS REAIS DA FCA	70
7	CONCLUSÕES.....	76
7.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Segundo o estudo “Transporte e Economia – O Sistema Ferroviário Brasileiro” publicado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2013, um dos elementos de maior importância para o desenvolvimento de países e regiões é um sistema de transporte eficiente. Uma rede de transporte ineficiente reduz o potencial de crescimento econômico, principalmente em países dependentes da exportação de matérias-primas. Em função de suas características que lhe proporcionam grande eficiência, o modo ferroviário assumiu um importante papel estratégico na composição da matriz de transporte. Dentre estas características destacam-se: capacidade de transportar grandes volumes com elevada eficiência energética, principalmente em casos de deslocamentos em médias e grandes distâncias; maior segurança, em relação ao transporte rodoviário, com menor índice de acidentes e menor incidência de roubos e furtos.

Ainda segundo o estudo da CNT, existe a necessidade de rotas alternativas para o escoamento da produção agrícola brasileira, principalmente a soja destinada à exportação e as ferrovias se apresentam como o modo de transporte mais eficiente, por apresentarem ganhos de escala na operação, ou seja, movimentam grandes volumes por longas distâncias a um custo menor que o praticado pelo rodoviário, que atualmente é o principal modo de transporte utilizado no Brasil.

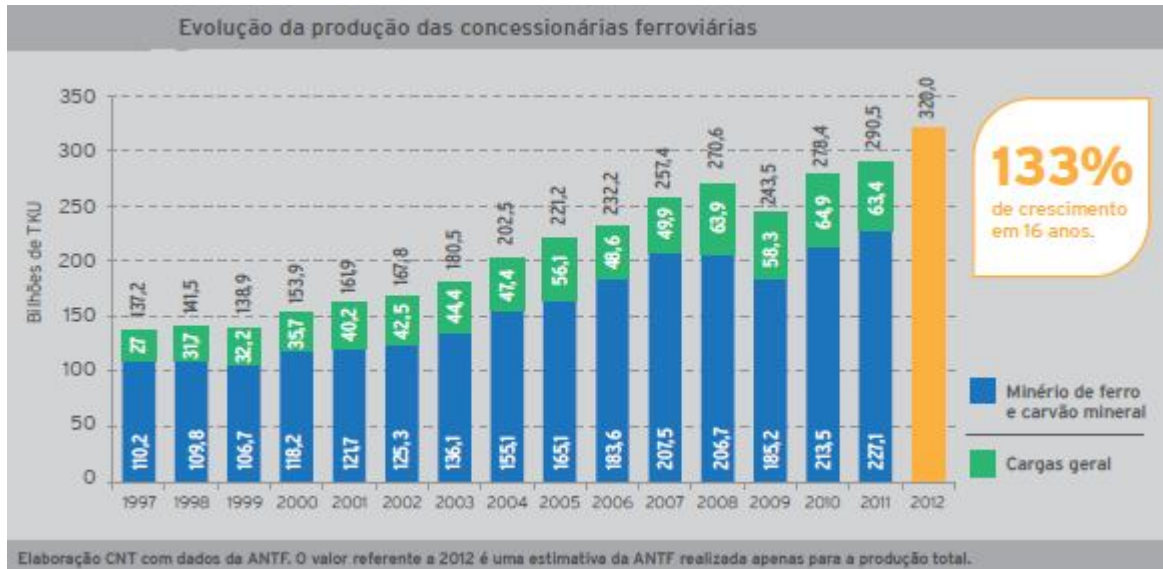
O Sistema Ferroviário Nacional continua evoluindo após as concessões que se iniciaram em 1996. Os ganhos de eficiência foram consideráveis. A malha ferroviária avançou aproximadamente 1,3% desde 1996, alcançando 30.129 km em 2012, marca superior a existente na década de 1980 quando a malha alcançou pouco mais de 28.942 km, conforme Figura 1.

Figura 1 - Evolução da malha ferroviária no Brasil-**Fonte: CNT - 2013**

A análise dos indicadores demonstra melhorias no período pós-concessão, como por exemplo, a produção ferroviária total, que aumentou 133%, passando de 137,2 bilhões de TKU (toneladas por quilômetro útil), em 1997, para 320,0 bilhões de TKU, em 2012 (Figura 2).

Essas melhorias promoveram o aumento dos investimentos na indústria ferroviária nacional, que passou de uma produção de 6 vagões anuais, em 1991, para 5.616, em 2011. Os investimentos ao longo dos últimos anos foram importantes, mas ainda não são suficientes para adequação da matriz de transporte brasileira e para o incentivo à produção nacional. Também o aumento da produção brasileira nos últimos anos levou a um considerável aumento na demanda por transporte ferroviário (CNT, 2013).

Figura 2 - Evolução da produção das concessionárias ferroviárias no Brasil.



Fonte: CNT – 2013

O aumento da capacidade de um sistema de transporte de qualquer natureza é influenciado diretamente pela operação do sistema e não está somente relacionado ao aumento de sua estrutura física. Esse aumento da capacidade é resultado da combinação do uso eficiente da infraestrutura e dos métodos de gestão (Nijkamp *et al.*, 1993).

O aumento da produtividade do sistema ferroviário requer uma análise detalhada de todos os fatores que afetam a circulação dos trens. A infraestrutura é de fundamental importância, pois a capacidade de transporte está limitada pela capacidade da ferrovia. A aplicação de técnicas e modelos de otimização que contribuam no estudo e análise das ferrovias podem gerar aumento da produtividade, sem a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura (Fonseca Neto, 1986). Ao gerar uma programação da circulação de trens otimizada, é possível melhorar a utilização da malha e consequentemente pode-se melhorar a eficiência do sistema ferroviário em geral (Liu e Kozan, 2011).

Para Fabris *et al.* (2014) uma programação adequada da circulação de trens representa um elemento-chave para a competitividade das ferrovias, uma vez que permite a exploração das infraestruturas existentes no seu máximo. Nos últimos

anos, a importância de uma ótima utilização destas infraestruturas aumentou devido à progressiva desregulamentação do mercado. Diferentes operadores podem agora competir para o acesso ao mesmo recurso e muitos conflitos podem surgir (Cacchiani et al., 2008) e estes devem ser resolvidos através de um adequado planeamento.

Portanto, propor modelos matemáticos que auxiliem no planeamento da circulação de trens, reduzindo o tempo total de viagem de todos os trens é de vital importância para as ferrovias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo propor um modelo matemático para o planeamento da circulação de trens em uma ferrovia de linha singela visando a redução do tempo total de viagens de todos os trens.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão da literatura dos últimos anos acerca dos conceitos de *Train Timetabling Problem* (TTP) e *Job Shop scheduling*;
- Avaliar os possíveis ganhos financeiros e ambientais, caso o modelo fosse utilizado para solucionar o TTP;
- Desenvolver uma ferramenta para apoio ao planeamento da circulação de trens para a Ferrovia Centro Atlântica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Gomes (1982) e Fonseca Neto (1986), uma alternativa viável para a melhoria do transporte ferroviário é investir em sua operacionalidade, uma vez que os investimentos necessários na estrutura física são muito elevados. Hamacher (2005) afirma que num contexto de demandas crescentes e recursos limitados, o uso de ferramentas de otimização para a solução de problemas reais ainda é limitado e que as soluções encontradas manualmente podem estar muito distante do ótimo, com consequente perda de eficiência.

Segundo Tazoniero (2007) existe uma carência no Brasil no que concerne a pesquisa e desenvolvimento de metodologias adequadas à realidade nacional para o planejamento de circulação de trens. Pesquisas sobre o uso de ferramentas computacionais no planejamento de trens iniciaram-se na década de 1970 e algumas ferramentas começaram a ser implantadas da década de 1990.

Portanto, propor modelos matemáticos que auxiliem no planejamento da circulação de trens numa ferrovia, reduzindo o tempo total de viagem de todos os trens é de vital importância para as ferrovias. Atualmente, muitas ferrovias ainda fazem o planejamento da circulação de trens de forma manual por despachadores experientes ou de forma semiautomatizada, o que pode levar a soluções que não aproveitem ao máximo a capacidade da ferrovia. À medida que ocorre um aumento de trens circulando, o planejamento da circulação tende a se tornar muito complexo e processos manuais ou semiautomatizados se mostram muito pouco eficientes (Tazoniero, 2007).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender os objetivos dessa dissertação, o conteúdo a ser desenvolvido será estruturado em sete capítulos, incluindo este primeiro que é uma introdução ao problema, e os demais distribuídos da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada a definição do problema e a revisão da literatura sobre os conceitos principais relativos ao problema. O Capítulo 3 trata da metodologia que conduzirá a realização do trabalho; O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto; No Capítulo 5 são apresentados os cenários para validação do modelo; O Capítulo 6 apresenta a análise dos resultados; No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros e, por fim, são apresentadas as referências.

2 O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA CIRCULAÇÃO DE TRENS

Este capítulo visa apresentar as definições do Planejamento de Sistemas de Transporte Ferroviário, Problema de Planejamento da Circulação de Trens e também a revisão da literatura sobre o Planejamento da Circulação de Trens.

2.1 Planejamento de Sistemas de Transporte Ferroviário

O planejamento de sistemas de transporte ferroviário envolve uma série de recursos que se relacionam numa rede complexa de decisões, interdependências e regras que afetam seus componentes de forma distribuída (Crainic, 2002). Segundo Assad (1980) o planejamento do transporte ferroviário pode ser classificado em três níveis: 1) estratégico, 2) tático e 3) operacional, como pode ser visto na Figura 3.

No nível estratégico as decisões envolvem, em geral, grandes investimentos de capital e são de longo prazo. São decisões tomadas geralmente pela alta direção da empresa. Alguns exemplos de decisões no nível estratégico são listados a seguir:

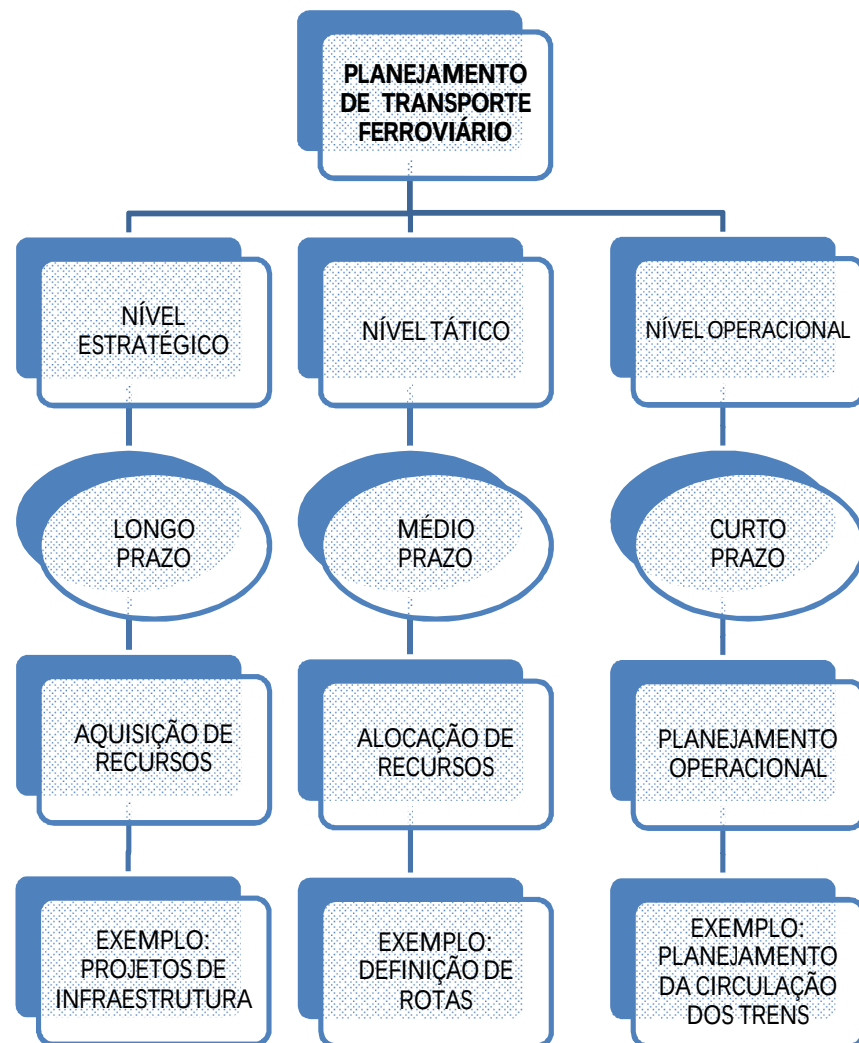
- Projetos de nova malha ferroviária ou duplicação de uma ferrovia já existente;
- Localização de pátios e terminais;
- Aquisição de recursos como vagões e locomotivas;
- Definição do rol de serviços a serem oferecidos no longo prazo e
- Políticas de tarifação.

O nível tático, que é de médio prazo, visa à definição de onde serão alocados efetivamente os recursos disponíveis, para obtenção dos resultados planejados. Alguns exemplos de decisões no nível tático são:

- Definição das rotas dos trens;
- Política de formação de trens;
- Política de manobras nos pátios;

- Distribuição de atividades ao longo dos pátios da ferrovia;
- Definição do tamanho dos trens.

Figura 3 - Planejamento de Sistemas de Transporte Ferroviário



Fonte: Adaptado de Sabino (2008)

O nível operacional, que é de curto prazo, visa tomar as decisões do dia a dia da operação ferroviária. São exemplos de decisões no nível operacional:

- Planejamento da circulação de trens, com a definição dos horários de chegada e partida em cada estação ao longo de sua rota;
- Planejamento dos embarques e desembarques;

- Plano de operação dos pátios;
- Distribuição e alocação de locomotivas e de vagões vazios;
- Definição de prioridades para o processamento de material rodante nos pátios e
- Agendamento de manutenções de via permanente e material rodante.

Vale destacar que em alguns casos a classificação nos níveis operacional e tático podem se confundir, como, por exemplo, a definição dos horários de trens de passageiros, que pode ser classificado como nível tático. Outro exemplo pode ser o planejamento da circulação de trens, que pode ser feito para um horizonte de 30 ou 60 dias para se avaliar os impactos de alterações na grade diária de trens no planejamento mensal ou num período maior e este poderia então, ser classificado como nível tático.

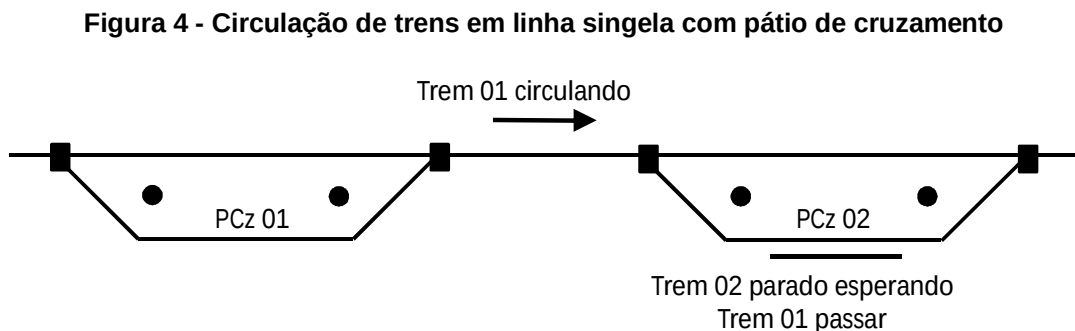
Esta dissertação está inserida no nível operacional e como o objetivo desta dissertação é propor um modelo para o planejamento da circulação de trens, na próxima seção será detalhado o Problema de Planejamento da Circulação de Trens.

2.2 Circulação de trens em linha singela

Uma ferrovia de linha singela é uma ferrovia que possui uma linha única, que liga dois pátios de cruzamento adjacentes e é utilizada para circulação de trens nos dois sentidos. Normalmente existem diversos trechos de linha singela em uma mesma rota. Cada trecho é a extensão de uma linha principal única entre dois pátios de cruzamento. Cada pátio de cruzamento possui uma linha adicional e paralela à linha de circulação da ferrovia para permitir o cruzamento de dois trens.

A circulação de trens em linha singela refere-se à viagem do trem ao longo da via permanente desde o momento que ele sai de um pátio até chegar a um outro pátio de cruzamento. A rota de um trem é o conjunto ordenado de trechos que o trem deve percorrer entre o ponto de partida e o ponto de chegada.

Na situação de dois trens competirem pela ocupação de um mesmo trecho na via, ocorre um conflito, sejam trens viajando em sentido contrário ou no mesmo sentido. A Figura 4 apresenta um conflito em que dois trens se encontrariam em sentidos opostos na mesma linha e um dos trens é desviado para o Pátio de Cruzamento (Trem 02) onde deve aguardar a passagem do outro trem (Trem 01) e depois da passagem deste, sair do Pátio de Cruzamento e prosseguir viagem. Cada linha que compõe o Pátio de Cruzamento deverá ter no mínimo o comprimento do maior trem previsto para circular no trecho, incluindo todos os vagões e todas as locomotivas que compõem este trem (Hay, 1982).

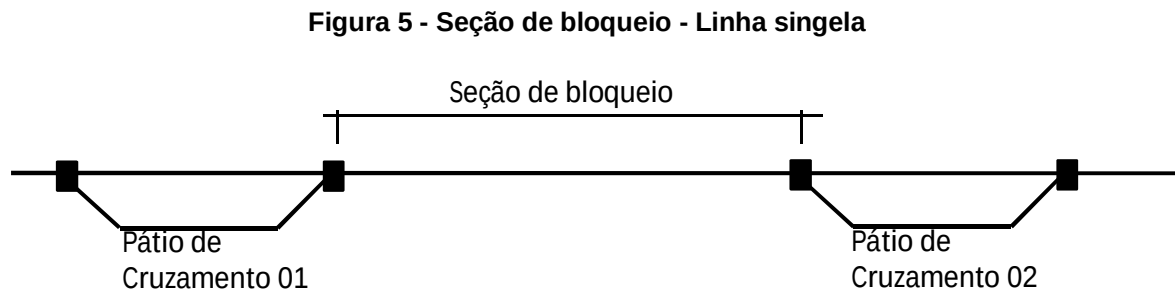


Fonte: Próprio autor

O tempo que um trem aguarda o outro no pátio de cruzamento pode ser classificado como Trem Hora Parado (THP), que é um conceito também importante para o trabalho. O THP é um indicador utilizado por grande parte das ferrovias para controlar os motivos que ocasionaram as paradas dos trens e o tempo gasto em cada uma delas. Elas são divididas em paradas obrigatórias (tempo de cruzamento, abastecimento, troca de maquinista, etc) ou não-obrigatórias (defeito na locomotiva, quebra de trilho, etc.).

Vale destacar que numa linha singela enquanto um trem ocupa um trecho, nenhum outro trem pode entrar neste trecho. Uma definição importante para entender a circulação de trens é a definição de seção de bloqueio (SB) que é o espaço físico entre dois pátios de cruzamento onde somente um trem pode ocupar em um certo momento de tempo (Figura 5). Assim, na circulação de trens, dois trens não ocupam

a mesma SB. Vale ressaltar que mesmo trens em um mesmo sentido não podem ocupar a mesma SB.



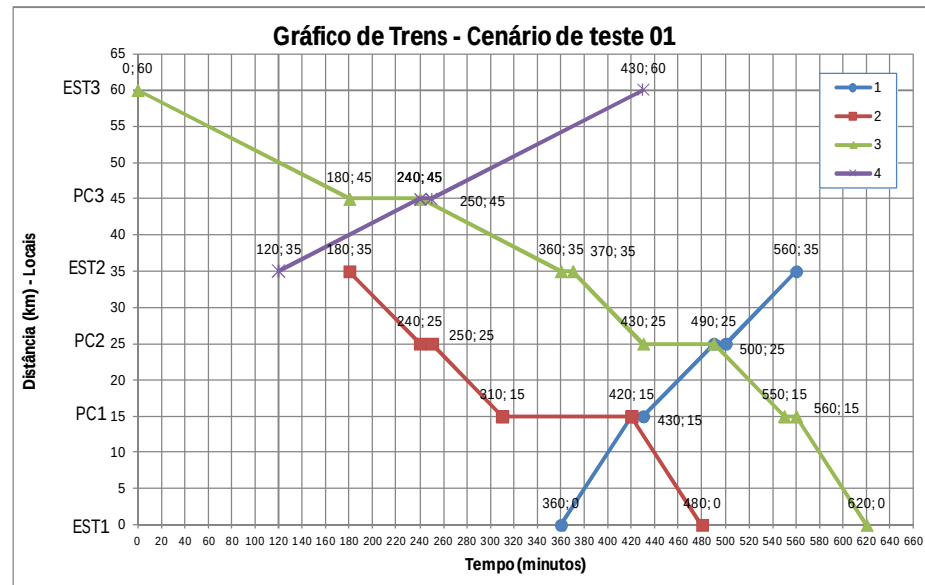
Fonte: Próprio autor

A principal decisão de um modelo de planejamento da circulação de trens é definir a preferência de um trem em relação a outros em situações de conflitos (Higgins *et al.*, 1997).

Para realizar o planejamento da circulação de trens deve-se ter a Grade de Trens que é o detalhamento de cada trem que deverá circular na ferrovia em um período de tempo, desde a origem até o destino, a velocidade média em cada trecho, se é trem prioritário ou não dentre outras informações (Rosa, 2004).

Com os conceitos vistos anteriormente é possível explicar uma ferramenta importante para o planejamento da circulação de trens na malha que é o Gráfico de Trens (Figura 6). O eixo vertical representa a posição das estações ferroviárias ou pátios de cruzamentos e o eixo horizontal representa a escala de tempo na qual os trens se deslocam (Rives *et al.*, 1983).

Figura 6 - Gráfico de trens circulando na malha



Fonte: Próprio autor

Com o gráfico de trens é possível prever onde cada trem irá cruzar com o outro ou se haverá conflito de ocupação de uma SB, o que não pode ocorrer sob nenhuma hipótese em linha singela.

O planejamento da circulação de trens consiste, basicamente, em definir os horários de partida e de chegada de cada trem em cada uma das estações ferroviárias/pátios de cruzamento existentes ao longo da viagem do trem, visando otimizar custo, tempo de parada ou indicadores de desempenho diversos. O Problema de Planejamento da circulação de trens é conhecido atualmente na literatura científica como *Train Timetabling Problem* (TTP) e será detalhado na seção 2.3, a seguir.

2.3 O Problema de Planejamento da Circulação de Trens

O Problema de Planejamento da Circulação de Trens em uma ferrovia diz respeito à definição da ordem em que os trens deverão ocupar os vários trechos de uma linha singela (Szpigel, 1972).

Caprara et al. (2002) foram os primeiros autores a chamar o problema de planejamento da circulação de trens de *Train Timetabling Problem* (TTP) que é um termo aceito atualmente na literatura científica para designar o referido problema.

Cacchiani et al. (2014) apresentaram uma classificação para o TTP que pode ser vista no Quadro 1. A seguir, serão detalhadas as subdivisões da classificação proposta por *Cacchiani et al. (2014)*.

Quadro 1 – Classificação do TTP por *Cacchiani et al. (2014)*

Classificação do TTP				
	Periódico		Não-Periódico	
	Robusto	Nominal	Robusto	Nominal
Cargas		x		
	x			
				x
			x	
Passageiros		x		
	x			
				x
			x	

A primeira subdivisão da classificação proposta por *Cacchiani et al. (2014)* é se a programação é periódica (ou cíclica) que ocorre quando a programação é repetida a cada período de tempo determinado, como por exemplo hora ou dia ou se a programação é não-periódica, mais aplicada no caso de redes mais congestionadas e/ou com muitas interferências, como é o caso dos trens de carga.

A segunda subdivisão do TTP apresentada por *Cacchiani et al. (2014)* consiste na distinção entre o problema nominal e problema robusto. No caso nominal, o objetivo é determinar uma programação para um conjunto de trens que proporcione a máxima eficiência do sistema ferroviário, por exemplo, programação do número máximo de trens possíveis na rede ou obter o menor tempo de viagem entre origem

e destino. No caso robusto, o objetivo é determinar uma programação que evita, em caso de interrupções na rede ferroviária, propagar os atrasos, tanto quanto possível.

Por fim, Cacchiani *et al.* (2014) apresentaram outra subdivisão do TTP que é entre trens de passageiros e trens de carga. Muitas vezes, o planejamento para os trens de passageiros é realizado em primeiro lugar, enquanto o planejamento dos trens de carga é determinado posteriormente. Diferentes objetivos e restrições podem surgir. Por exemplo, no caso de trens de carga, pode não ser tão importante uma programação periódica, ao passo que para os trens de passageiros, uma programação periódica é muito importante.

A partir destas classificações, esta dissertação terá o foco no planejamento não periódico, nominal e com foco para cargas, podendo ser usado para ferrovias de passageiros também.

O TTP tem sido estudado ao longo dos últimos anos e vários artigos têm sido publicados (Cacchiani *et al.*, 2014). Visando apresentar os principais trabalhos publicados até a presente data, a seguir é realizada uma revisão bibliográfica sobre o TTP.

Um dos primeiros trabalhos publicados e aplicados para otimização do planejamento da circulação de trens foi o de Szpigel (1972) que propôs abordar o TTP por meio do modelo *Job Shop Scheduling*. Assim, as operações são descritas por uma perspectiva temporal e espacial. Restrições temporais são requeridas para que o trem não atravessasse nenhuma interseção sem antes passar na anterior e as restrições espaciais estipulam que nenhuma via pode ser ocupada por mais de um trem. Ele assume que o tempo de partida da estação de origem é conhecido. Ele busca soluções para os conflitos, considerando as prioridades dos trens e tempos de viagem. Para prever que os trechos não serão ocupados por mais de um trem ao mesmo tempo, o autor declara restrições de ordenação. Estas restrições mostram que para trens que compartilham o mesmo trecho, o tempo de entrada do trem em determinado trecho é separado por um valor mínimo especificado. O modelo é resolvido usando um algoritmo *branch-and-bound*. A programação linear inicial do problema exclui as restrições de ordenação. O resultado da programação linear é a solução do agendamento com o objetivo de minimizar a soma dos tempos de

viagem dos trens. A solução ótima será aquela que apresentar menor valor para a soma dos tempos de viagem de todos os trens. Devido as limitações computacionais existentes na época, Szpigel considerou apenas envolver no problema 5 trechos e 10 trens.

Sauder e Westerman(1983) utilizaram métodos baseados em numeração que primeiro identificavam todos os conflitos em potenciais de todas as estações, facilitando sua solução. Uma completa enumeração de todas as possibilidades era construída na estrutura de árvore. Cada nível da árvore representava a solução de um conflito, onde a solução em particular de um nó identificava o trem que devia esperar e desviar, resolvendo assim o conflito. Foi incluído no modelo o custo dos atrasos e a espera nos desvios. O objetivo do estudo era minimizar o atraso total dos trens.

Jovanovic e Harker (1991) propuseram uma estratégia de numeração semelhante, mas diferentemente, seu modelo não explicitava uma função objetivo. Utilizaram um modelo de programação inteira mista, com uma estrutura de agendamento semelhante à usada na indústria. Variáveis binárias ditavam a ordem dos pares de trens nos trechos. Variáveis contínuas definiam o tempo de partida os trens. O numero trens que podiam ficar simultaneamente no desvio era restrito a um. Essa ferramenta utiliza uma tabela pré-definida de horários de circulação de trens em um determinado segmento de via singela, com suas características definidas. O sistema avaliava os conflitos deste segmento, os resolvia e na sequência, iniciava a análise de nova tabela em busca de novos conflitos, até que todos fossem solucionados. Experimentos computacionais contidos no artigo chegam a instâncias de até 100 trens.

Kraay *et al.* (1991) consideraram uma versão diferente do problema. Os autores procuraram determinar todas as possibilidades de velocidade do trem de forma endógena, ou seja, procuravam determinar o perfil de velocidade de cada trem, minimizando critérios como consumo de combustível, atraso, etc. Para isso o tempo de viagem foi considerado uma variável e buscou-se minimizar os custos de combustível, obviamente dependente da velocidade do trem. Os autores apresentaram um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM). O procedimento *branch-and-bound* foi proposto para resolver o problema. Foram

discutidos resultados para uma linha de 102 milhas e treze estações, o corredor era atravessado por 22 trens com potencial para 34 conflitos de passagem.

Carey (1994) propôs um modelo que permitisse que o modelo de Jovanovic e Harker (1991) viesse a ser utilizado também em casos em que existem múltiplas linhas entre as estações e estas tenham múltiplas plataformas, também para o caso em que o trecho de linha singela seja bidirecional.

Cai e Goh (1994) propuseram outra heurística gulosa e tinham como pressuposto o fato de que todos os trens viajavam na mesma direção, mas não na mesma velocidade e tendo o mesmo destino final. O modelo também podia ser generalizado para atender a possibilidade de ultrapassagem quando os trens têm velocidades diferentes. A heurística considerava os trens em ordem cronológica e assumia que o tempo inicial de partida do pátio de cada trem era conhecido. O estudo apresentou dois exemplos e ambos utilizavam 12 desvios e 12 e 20 trens respectivamente.

Carey e Lockwood (1995) consideraram uma rede ferroviária idêntica a de Szpigel (1972), entretanto, os trechos entre duas estações eram designados para tráfego em apenas uma direção. Os autores apresentaram uma formulação matemática baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), similar a apresentada por Jovanovic e Harker (1991). Cada variável binária definia a ordem do par de trens no trecho, restrições temporais idênticas aos do modelo do Szpigel (1972) foram aproveitadas afim de preservar a continuidade de tempo espaço do movimento dos trens, entretanto, diferentemente, o modelo inclui todas as restrições de ordenação. O objetivo do modelo era minimizar os desvios para encontrar tempos de chegada e partidas ideais para cada um dos trens. Considerando o tamanho da formulação, os autores adotaram uma aproximação heurística para o agendamento dos trens sequencialmente. A ordem dos trens tipicamente considera a ordem cronológica de partida dos trens e a prioridade dos trens. Para agendar os trens sequencialmente os autores sugeriram a construção de um sub-problema da formulação inicial fixando uma sequência de trens previamente agendados mas ainda assim permitindo que o tempo de partida e chegada dos trens varie. Cada sub-problema foi resolvido utilizando uma técnica *branch-and-bound*. Esta aproximação também possibilita um reagendamento de trens uma vez que uma possível solução seja obtida com a finalidade de aprimorar a solução atual.

Higgins *et al.* (1996) consideraram um trecho de linha singela bidirecional como é frequentemente encontrado em ferrovias australianas. Os autores apresentaram uma formulação matemática muito similar a de Carey e Lockwood (1995). Variáveis binárias definem a ordem de dois trens num determinado trecho e variáveis contínuas o tempo de chegada e partida nas estações entre os trechos. Os autores adicionam uma flexibilidade extra em termos de dinâmica de trens, onde cada trem pode atingir uma velocidade mínima e máxima em cada trecho. O modelo também permite variabilidade para que o trem atravesse o trecho. As restrições do modelo estipulavam que as restrições temporais deveriam ser respeitadas a fim de prevenir conflitos. O objetivo era minimizar o tempo total de atraso ponderado pela prioridade dos trens. O modelo apresentou uma metodologia *branch-and-bound* similar ao proposto por Szpigel (1973). O problema inicial considerou uma versão relaxada do problema onde nenhuma das restrições de interação entre os trens estava incluída. Apenas um subgrupo de restrições foi incluído no problema original. Conflitos foram identificados e solucionados através da criação de dois nós *branch-and-bound* como as respectivas restrições de interação entre os trens. Foram utilizados 30 trens e 12 estações no estudo realizado no artigo.

Em um artigo posterior Higgins *et al.* (1997) aplicaram e compararam quatro técnicas para solução do problema, procurando uma solução próxima da ótima, em um curto intervalo de tempo: Heurística de Busca Local (Local Search Heuristic – LSH), Algoritmo Genético (Genetic Algorithms – GA), Algoritmo de Busca Tabu (Tabu Search – TS) e dois Algoritmos Híbridos (Hybrid Algorithms – HA1 e HA2), elevando as instâncias do estudo anterior para 50 trens e de 103 para 113 conflitos.

Cordeau *et al.* (1998) forneceram uma visão geral sobre os modelos de otimização. Os autores concentraram-se principalmente nos problemas de roteamento e otimização da programação de trens, uma vez que estes representam a parte mais importante das atividades de planejamento realizada por ferrovias. Os autores fizeram uma classificação de acordo com o modelo e descreveram suas principais características.

Cai *et al.* (1998) estenderam o trabalho de Cai e Goh (1994) relaxando o requerimento de que a localização inicial do trem devia ser um pátio. Os autores apresentaram uma aproximação em duas fases, onde a primeira fase atualiza o

tempo e a posição atual de onde todos os trens estão posicionados nos pátios e a segunda fase implementa uma versão refinada da heurística de Cai e Goh (1994). Uma implementação com sucesso do algoritmo foi feita para uma companhia ferroviária asiática onde 400 trens rodam por dia com 60 trens simultâneos na malha ao mesmo tempo.

Brännlund *et al.* (1998) introduziram a noção de agrupamento de constantes para restringir o número de trens usados em cada trecho. Uma via singela bidirecional conectada por 17 estações na Suécia foi a motivação do trabalho. Os autores propuseram uma formulação *packing integer programming*. O modelo discretizou o agendamento horizontal em intervalos de um minuto e uma restrição de identificação para cada trecho a todo minuto. Uma única rede espaço-tempo acíclico formada por seis diferentes tipos de arco foi usada no modelo para cada movimento dos trens. O objetivo era minimizar todo o tempo de espera desnecessário ao longo dos trechos. As variáveis do modelo estão associadas às possíveis trajetórias dos trens, com cada variável contribuindo com as restrições que refletem movimento na rede ferroviária. Os autores sugeriram resolver o modelo utilizando técnicas de relaxação lagrangiana, relaxando todas as constantes do modelo e dividindo o problema em n sub-problemas independentes onde n é o número de trens. Resultados computacionais relatados indicaram que a instância envolveu até 26 trens de passageiros e cargas.

Sahin (1999) estudou o agendamento de trens em tempo real numa via singela. O autor apresentou uma heurística que avalia os conflitos na ordem em que eles aparecem e os resolve sequencialmente. Para todos os trens envolvidos em conflitos o algoritmo considerou utilizar o atraso para resolvê-los. Foi dada também uma visão futura que determina o tempo de chegada de todos os trens em seus respectivos destinos, como consequência do atraso de todos os trens, que também está incluído neste grupo. Os testes utilizaram de 6 a 20 trens num percurso de 163 km na Turquia.

Oliveira e Smith (2000) propuseram uma formulação *job shop scheduling* para o problema de agendamento de trens na linha singela num cenário com interrupções da via. A formulação é fundamentada na de Szpizel (1973) excluindo as restrições de ordenação. Os conflitos foram resolvidos em ordem cronológica com o objetivo

de minimizar o atraso total. O modelo também incorporou várias restrições extras, a fim de representar restrições práticas, em particular ele possui a capacidade de forçar dois trens a pararem no mesmo pátio num certo período de tempo e permite também que um mesmo trem realize múltiplos itinerários.

Caprara *et al.* (2002) foram os primeiros autores a denominar o problema do planejamento da circulação de trens como *Train Timetabling Problem* (TTP). Os autores consideraram o problema de agendamento de trens de um dos principais corredores da rede ferroviária italiana. A fim de reduzir o máximo de problemas independentes, Caprara *et al.* (2002) provaram que o problema considerado é NP-Hard. Os autores modelaram o problema usando multigrafo acíclico direcionado, em que os nós correspondem às saídas e chegadas a uma estação em um horário definido. A formulação considera uma heurística de programação linear inteira associada à Relaxação Lagrangiana, com as restrições relativas aos nós do grafo, resultando na obtenção de uma solução em menor tempo computacional. A proposta foi testada com casos reais que ocorrem na Itália. Os problemas consideraram ao menos 73 estações e 500 trens no período de 24 horas dividido em intervalos de 1 minuto. Na maioria dos casos, todos os problemas puderam ser resolvidos com 2% de otimização. Entretanto, em outras instâncias, particularmente em vários casos de congestionamento o nível de otimização encontrado ficou em torno de 20%.

Em um estudo posterior, Caprara *et al.* (2006) estenderam a formulação para incluir restrições adicionais que representaram restrições práticas, em particular, capacidade das estações, operações de manutenção e programação fixas para alguns trens. Os autores demonstraram como incorporar essas restrições adicionais em um modelo matemático para uma versão básica do problema, por meio de uma heurística Lagrangiana. Neste estudo, 49 estações e 221 trens da Rede Ferroviária Italiana foram considerados e os resultados foram apresentados.

Leal *et al.* (2004) propuseram uma heurística baseada em Szpigel (1973) e em Higgins (1996) e desenvolveram uma ferramenta para ser usada no Centro de Controle Operacional de uma grande ferrovia brasileira e demonstraram que, utilizando tanto a técnica de *Branch and Bound* quanto a técnica de descida em vários níveis, o modelo foi capaz de produzir resultados satisfatórios para o problema.

Borndorfer *et al.* (2005) apresentaram uma formulação muito similar a de Caprara *et al.* (2002). Diferente de Caprara *et al.* (2002), os autores não consideraram corredores interligando as principais estações e sim propuseram uma abordagem baseada em leilão para alocar de forma otimizada a capacidade de controle de uma rede ferroviária.

Dall'Orto *et al.* (2006) apresentaram uma formulação estocástica e temporal que busca otimizar o problema de serviços de despachos num terminal, num planejamento horizontal e propuseram uma aproximação para a solução baseada em princípio de programação dinâmica. Foram propostas duas meta-heurísticas *Tabu search* baseadas no conceito de *ejection-chain*. Também foi introduzido um mecanismo de aprendizagem que dá uma vantagem da experiência após repetidas execuções. Os problemas testados derivaram de casos reais e apresentaram boas e eficientes soluções.

Tornquist (2006) forneceu uma visão geral sobre planejamento da circulação de trens e foram revistas 48 abordagens publicadas entre 1973 e 2005, classificando-as quanto ao tipo de problema, o mecanismo de solução e o tipo de avaliação. Neste trabalho foi apresentada uma distinção entre a programação tática, programação operacional e reprogramação. A programação tática refere-se a programação mestre, ao passo que as preocupações da programação operacional são de uma fase posterior. A reprogramação centra-se no replanejamento de uma programação existente quando desvios ocorrem.

Zhou e Zhong (2007) apresentaram um algoritmo *branch and bound* para a solução do problema da programação de trens em linha singela. Os autores usaram relaxação lagrangiana na solução do problema, que foi subdividido em três etapas.

Borndorfer e Schlechte (2007b) estudaram o problema de alocação ótima de trechos de uma perspectiva ligeiramente diferente. Os autores reconheceram que os modelos tentam afastar os conflitos de trens por meio de um número enorme de restrições, assim como na *multicommodity flow formulation* proposta por Borndorfer *et al.* (2005) que tem relaxações fracas de programação linear que tornam extremamente difícil a resolução da programação inteira. O modelo proposto por eles tenta reger os conflitos por meio da adição de mais variáveis ao invés de

restrições. Os autores definiram variáveis binárias para governar a seleção do trajeto dos trens bem como variáveis binárias para ditar a configuração dos arcos para cada trecho. Restrições de empacotamento reforçam o requerimento de que mais uma trajetória possa ser escolhida por qualquer trem, bem como o requerimento de que no máximo uma configuração de arco seja selecionada para qualquer trecho. Os resultados computacionais para o problema continham 146, 250 e 570 trens numa parte da rede ferroviária de longa distância alemã. Evidências empíricas sugeriram que estes problemas podem ser resolvidos com esta aproximação de forma bem próximo da ótima.

Num estudo comparativo, Borndorfer e Schlechte (2007a) basearam a configuração da via na formulação dada por Borndorfer e Schlechte (2007b) e detalharam as formulações de empacotamento. Experimentos computacionais focaram numa porção da rede ferroviária alemã que consistiam em 37 estações conectadas através de 120 trechos. O objetivo era agendar o máximo de trens possível.

Tornquist e Persson (2007) consideraram o reagendamento de trens por conta de eventos que interferem no planejamento da circulação de trens. Os autores utilizaram uma formulação matemática baseada em PLIM para o problema e descreveram quatro diferentes aproximações para a solução. Uma aplicação a dados reais a partir da rede ferroviária sueca foi usada para testar a metodologia proposta. A rede testada continha 169 estações interligadas num agendamento diário que considerava 92 trens de carga e 466 trens de passageiros. Experimentos computacionais assumem a existência de um atraso para cada trem.

Cacchiani *et al.* (2008) descreveram um procedimento para geração de um gráfico de trens num corredor. A formulação utilizada foi a programação linear inteira subjacente, que é uma variante natural da proposta por Caprara *et al.* (2002, 2006). Uma rede de tempo e espaço idêntica é usada para modelar o problema. Entretanto, Cacchiani *et al.* (2008) apresentaram uma trajetória oposta a baseada em arcos *multicommodity flow formulation* descrita em Caprara *et al.* (2002, 2006). Variáveis de decisões binárias são associadas com a inclusão de caminhos e uma possível sequencia de arcos conectando o nó de origem ao nó de destino. As restrições do modelo simplesmente previnem a seleção de trajetórias conflitantes. Para construir o modelo, os autores empregaram um algoritmo *branch-and-cut-and-price* bem como

duas aproximações heurísticas. Ambas heurísticas constroem interativamente possíveis soluções fixando trajetórias na solução para relaxação LP. Diversas estratégias de busca local são utilizadas para melhorar a solução. Experimentos computacionais consideraram 11 casos reais da companhia ferroviária italiana que continha 102 estações e 221 trens. O método foi comparado com o método lagrangiano de Caprara *et al.* (2006). Os Resultados mostraram que a relaxação LP apresentou um limite superior de rendimento ao dado pela aproximação lagrangiana e num tempo muito mais curto. As soluções obtidas usando a primeira heurística que implementa uma estratégia de busca local quase sempre obtém uma solução melhor do que se obtém pela aproximação lagrangiana. O tempo de solução, entretanto, foi significativamente maior.

Liu e Kozan (2009) também fizeram uma analogia com um processo de manufatura para modelar um sistema ferroviário, onde trens são atividades, seções em linha singela são máquinas individuais e seções em linha dupla são máquinas paralelas. A circulação de trens é associada ao problema de *Job-shop scheduling* com máquinas paralelas e o objetivo é minimizar o *makespan*. Os autores propõem uma heurística para o problema que não admite a utilização simultânea de uma mesma máquina - linha singela - para realização de duas atividades distintas - passagem de mais de um trem.

Cacchiani *et al.* (2010) generalizam as abordagens anteriores de Cacchiani *et al.* (2008) e Caprara *et al.* (2002,2006) para o caso de uma rede ferroviária geral, onde já existe a programação para trens de passageiros que não pode ser alterada e o objetivo é introduzir o maior número de novos trens de carga possível, com a programação mais próxima da ideal. O problema é modelado por meio de um gráfico espaço-tempo e resolvido através de uma formulação de Programação Linear Inteira e propuseram uma heurística Lagrangiana. Resultados em instâncias reais foram apresentados. O método pode ser usado para construir novos horários a partir do zero e para adicionar novos trens de carga ou de passageiros, numa programação já existente. O modelo também pode ser utilizado para reprogramar trens em caso de atrasos ou interrupções.

Liu e Kozan (2011) apresentaram um algoritmo para solução de problemas de planejamento de trens prioritário, como trens expressos de passageiros que não

podem ter interrupções, e trens não-prioritários, como trens de cargas que podem aguardar a liberação da linha, numa mesma rede ferroviária de linha singela. Os autores classificaram os problemas de planejamento de trens em seis tipos: *blocking parallel-machine flow shop scheduling (BPMFSS)*, *blocking parallel-machine job shop scheduling (BPMJSS)*, *no-wait parallel-machine flow shop scheduling (NWPMFSS)*, *no-wait blocking parallel machine flow shop scheduling (NWBPMFSS)*, *no-wait parallel-machine job shop scheduling (NWPMJSS)* e *no-wait blocking parallel-machine job shop scheduling (NWBPMJSS)* e apresentaram um algoritmo construtivo genérico que compreende vários subalgoritmos utilizados de forma recursiva para solução do problema. Experimentos computacionais extensos demonstraram que o método proposto era promissor.

Lusby *et al.* (2011) apresentaram um levantamento geral sobre o tema com diversos modelos e métodos já propostos para problemas de planejamento da circulação de trens, expedição de trens, planejamento de pátios e problemas de roteamento. Os autores abordaram tanto problemas de linha singela quanto linha dupla e agruparam os problemas por tipo de rede ferroviária e discutiram a alocação em nível estratégico, tático e operacional.

Tornquist (2012) complementou a abordagem de Tornquist e Persson (2007) e apresentou um algoritmo guloso para problemas de reagendamento de trens, visando reduzir o tempo de solução encontrado com a PLIM apresentada em Tornquist e Persson (2007).

Harrod (2012) apresentou um tutorial para explicar o funcionamento de agendamento de trens e gráficos de trens, e apresentou quatro formulações fundamentais para a otimização: modelos *Mixed Integer Sequencing Linear Program (MISLP)*, *Binary Integer Occupancy Program (BIOP)*, *hypergraph formulation* e *Periodic Event Scheduling Problem (PESP)*. Ele apresentou os modelos de forma organizada, para que seja feita a escolha independentemente do tráfego ou do tamanho da rede. Fez uma vasta revisão bibliográfica sobre os termos utilizados nas ferrovias e as questões de agendamento.

Cacchiani e Toth (2012) apresentaram um levantamento sobre os principais estudos que lidam com TTP (*Train timetabling problem*), mostrando as diferenças entre os

problemas nominais (periódicos e não-periódicos, redes ferroviárias e linha singela, carga e passageiros) com a programação para um conjunto de trens e os robustos (otimização estocástica, gestão de atrasos, meta-heurísticas) que destacam as soluções que evitam a propagação de atrasos.

Harrod (2013) apresentou um método de otimização global de planejamento da circulação e expedição de trens, considerando um trem prioritário de alta velocidade numa rede de linha singela com vários trens mais lentos. As velocidades dos trens mais lentos foram aumentadas e o modelo avaliou a influência destas alterações e o ganho possível ao longo de toda malha.

Reimann e Leal (2013) propuseram uma heurística baseada em Ant Colony Optimization (ACO) para o problema de programação de trem em uma única linha que pode ser percorrido em ambos os sentidos por trens com prioridades diferentes que viajam com velocidades diferentes. Os autores afirmaram que os resultados mostraram um bom desempenho da ACO quando comparado com as soluções ótimas fornecidas por um modelo CPLEX.

Dundar e Sahin (2013) apresentaram um algoritmo genético para o problema do reagendamento de trens e os resultados foram comparados por meio dos tempos totais e atrasos totais com os dados obtidos pelos despachantes. Redes neurais artificiais foram desenvolvidas replicando o comportamento de decisão dos despachantes de trem de forma a reproduzir as suas resoluções de conflito e estas redes foram testadas com dados extraídos de resolução de conflitos em operações ferroviárias reais.

Fabris *et al.* (2014) apresentaram uma aplicação em larga escala de uma heurística, considerando um modelo mesoscópico da infraestrutura da rede ferroviária do norte da Itália, permitindo assim uma precisão maior nas análises. Os autores apresentaram uma abordagem heurística para solução do problema e o modelo permite estimativas de tempos de intervalo e de conflitos nas linhas e estações. São realizados testes de capacidade máxima de transporte de cargas combinado com transporte de passageiros.

Cacchiani *et al.* (2014) deram uma visão geral dos dois sistemas fundamentais de otimização de um sistema ferroviário: O TTP (*Train timetabling problem*) que é o

agendamento de trens ou o planejamento da circulação de trens e o TPP (*Train Platforming Problem*) que é a programação das plataformas nas estações. Os autores classificaram o TTP em periódica ou não-periódica, nominal ou robusto e por fim trens de passageiros ou trens de carga. Esta classificação já foi detalhada nas seções anteriores desta dissertação.

2.4 Problema de Planejamento – *Scheduling*

Szpigel (1972), que é um dos percussores do estudo do TTP, afirmou que o problema de definir a ordem em que os trens devem ocupar os vários trechos de uma linha singela é um problema análogo ao de sequenciar tarefas em um conjunto de máquinas. Por esta razão, no decorrer desta dissertação, serão utilizados elementos da literatura de *scheduling* e será apresentada uma breve revisão da literatura sobre planejamento e *job shop scheduling*.

Szpigel (1972) apresentou que um problema de *scheduling* existe quando há alternativas para a ordem de execução de um conjunto de operações. O problema típico é o *job shop scheduling*, onde tarefas constituídas de operações devem ser executadas por um conjunto de máquinas.

Planejamento é um processo de otimização, no qual máquinas e recursos limitados são designados ao longo do tempo para atender diversas solicitações que são compostas de diversas atividades, denominadas tarefas. Esta designação é feita de tal maneira que sejam respeitadas integralmente as restrições de tempo de execução das atividades e o limite de capacidade do conjunto de máquinas e recursos usados por todas as atividades (Pinedo, 2005). Num modelo de fabricação, se tem normalmente um recurso chamado *máquina*, e uma tarefa que tem que ser feita pela máquina, que é tipicamente chamada de *job*. Num processo de produção, o *job* pode estar ligado a uma única operação (*task*) ou várias operações que têm que ser realizadas em máquinas diferentes (Pinedo, 2005).

As principais decisões envolvidas nesse nível são: designação (sequenciamento) de tarefas (*jobs*) a recursos e programação (planejamento) das tarefas em cada recurso, isto é, a sequência de processamento das tarefas e o instante de início e término do processamento de cada tarefa. Em geral, o problema de planejamento é caracterizado por três conjuntos: conjunto $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ de n tarefas, conjunto $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ de m máquinas, conjunto $R = \{R_1, R_2, \dots, R_s\}$ de s tipos de recursos (Blazewicz *et al.*, 2007).

Os principais tipos de problema de planejamento são:

- *Job Shop*: n tarefas e m máquinas, em que cada tarefa é processada nas m máquinas, de acordo com um roteiro. Não há paradas das tarefas para execução de outras,
- *Open Shop*: Têm as mesmas características do *job shop*, com a permissão de parar tarefas para execução de outras e pode não haver relação de precedência entre as operações,
- *Flow Shop*: é um caso particular do *job shop*, em que as n tarefas têm o mesmo roteiro nas m máquinas (Blazewicz *et al.*, 2007; Brucker, 2007; Arenales *et al.*, 2007).

Em geral, cada tarefa T_i de T é caracterizada pelas seguintes informações (Pinedo, 2005): Tempo de processamento (p_{ij}): É o tempo (p_{ij}) que o processador p_i leva para processar a tarefa T_j ; Tempo de chegada, *ready time* ou *arrival time* (a_j): Representa o tempo (t) no qual a tarefa T_j está pronta para iniciar o processamento; Tempo limite de término, *due date* (d_j): É o tempo limite no qual cada tarefa T_j deve terminar seu processamento. Caso ele não seja cumprido, podem-se atribuir penalidades em função do atraso do término; *Deadline* (d_j): É equivalente ao tempo limite de término. No entanto não pode haver atraso no término sob nenhuma hipótese; Prioridade (w_j): Expressa a prioridade que cada tarefa T_j tem em relação às outras tarefas de uma lista de recursos necessários.

As tarefas do conjunto T num determinado tempo (t) devem respeitar as condições (Blazewicz *et al.*, 2007): A cada instante, cada processador é designado para no máximo uma única tarefa e cada tarefa é processada por no máximo um processador. Esta restrição eventualmente pode ser relaxada, a tarefa T_{ij} é processada numa janela de tempo $[a_j, \infty]$, todas as tarefas devem ser executadas, se tarefas T_i e T_j estão na condição de precedência o processamento de T_j não pode começar antes de T_i estar concluída, no caso de planeamento não-preemptivo nenhuma tarefa pode ser preemptiva, caso contrário o número de preempções de cada tarefa é finito e caso ocorra alguma restrição de recurso, elas devem ser satisfeitas.

Para cada tarefa T_i do conjunto T pode-se calcular diversos parâmetros de controle, dentre os quais os mais usados são:

- Tempo de término, *Completion Time* (C_i) que representa o instante que a tarefa terminou;
- Tempo de processamento, *Flowtime* ($F_i = C_i - a_j$) que é o resultado da subtração do tempo de término menos o tempo de chegada, este tempo representa o tempo total que a tarefa gastou para processar;
- Tempo de atraso, *Lateness* ($L_j = C_i - d_j$): É a subtração do tempo de término menos o tempo limite de término.

Se L_j for negativo, ocorreu um processamento adequado, pois ele terminou antes do limite. Se L_j for positivo, ocorreu um processamento inadequado, pois ele ultrapassou o limite estabelecido. Esta última situação não poderia ocorrer no caso de *Deadline*; Tempo mais tarde que o limite ou demora, *Tardiness* ($D_j = \max(C_j - d_j, 0)$): é a subtração do tempo de término menos o tempo limite de término. Os valores negativos não devem ser considerados, pois não são um tempo mais tarde que o limite estabelecido e tempo mais cedo que o limite, ou adiantamento; *Earliness* ($E_j = \max(d_j - C_j, 0)$): é calculado como sendo a subtração

do tempo limite de término menos o tempo de término. Os valores negativos não devem ser considerados pois não são um tempo mais cedo que o limite estabelecido.

Pode-se avaliar a qualidade da programação (planejamento) a partir de algumas medidas de desempenho (Blazewicz *et al.*, 2007): Tempo máximo de execução (*makespan*), sendo calculado para tarefas que podem ser executadas em paralelo como: $C_{\max} = \max(C_j)$ e para tarefas que são executadas de forma sequencial

calcula-se o *makespan* como: $C_{\max} = \sum_{j=1}^n C_j$; a média do tempo de

processamento como: $\overline{F_w} = \frac{1}{n} \sum_{j \in N} F_j$ a média ponderada pela prioridade de cada

tarefa como: $\overline{F_w} = \left(\sum_{j \in N} w_j F_j \right) / \left(\sum_{j \in N} w_j \right)$ e o máximo atraso como:

$$L_{\max} = \max(L_j).$$

Este estudo utiliza o *makespan*, que neste caso é o tempo total de viagens dos trens.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento dessa dissertação.

3.1 Classificação da pesquisa

Esta pesquisa pode ser classificada quanto aos fins e quanto aos meios conforme proposto por Vergara (2013): quanto aos fins, ela se classifica como aplicada e metodológica; Quanto aos meios de investigação, é dita como bibliográfica, documental e de campo.

Quanto aos fins, as evidências das classificações são apresentadas a seguir:

- **Aplicada:** A pesquisa visa gerar conhecimento para aplicação prática que neste caso é resolver um problema concreto existente na operação das ferrovias e tal problema consiste em otimizar a circulação de trens na malha ferroviária.
- **Metodológica:** Uma vez que a pesquisa tem como objetivo desenvolver um modelo que faça o planejamento da circulação de trens em linha singela.

Com relação aos meios de investigação, as evidências da classificação são apresentadas abaixo:

- **Bibliográfica:** A pesquisa tem como base estudos prévios desenvolvidos e publicados em artigos, revistas, dissertações, teses, jornais, relatórios e legislação específica para o desenvolvimento do referencial teórico e definição do método referencial para a resolução do problema.
- **Documental:** Para a realização do estudo, serão utilizados dados reais fornecidos pela FCA.
- **De campo:** Para a realização do estudo foram realizadas entrevistas com os responsáveis pelo planejamento da circulação de trens da FCA.

3.2 Etapas

Para alcançar o objetivo desta dissertação, uma metodologia de pesquisa foi definida. A mesma está dividida em dez etapas, que são apresentadas na sequência.

Etapas 1: Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre planejamento da circulação de trens. A partir desta revisão, foi possível definir qual a abordagem mais adequada para resolver o problema de planejamento da circulação de trens em ferrovias de linha singela. Com esta etapa, foi possível construir um conhecimento a respeito dos tipos de variáveis e parâmetros que estão envolvidos no problema estudado, dando o embasamento para construção do modelo e quais dados precisam ser levantados.

Etapas 2: O objetivo desta etapa foi elaborar o modelo matemático para resolver o TTP e implementar este modelo utilizando o *solver* IBM ILOG CPLEX 12.6 (IBM, 2015) que é uma ferramenta analítica de apoio à decisão disponibilizada gratuitamente para fins acadêmicos, utilizada para o desenvolvimento e implementação de modelos matemáticos e para solução de problemas.

Etapas 3: Com o modelo disponível, o próximo passo foi elaborar cenários de teste e validar o modelo, executando-o com os cenários de teste no *solver* CPLEX. Foram elaborados três cenários de teste. Os resultados obtidos pelo CPLEX foram comparados com os dados obtidos na solução feita manualmente, utilizando o gráfico de trens como ferramenta. Os gráficos de trens das soluções manuais e do CPLEX também foram comparados.

Etapas 4: Dois novos cenários de testes foram elaborados, para testar as funcionalidades do modelo, como priorização de trens e possibilidade do uso do modelo para planejamento da manutenção da via permanente. Em seguida, os resultados obtidos pelo CPLEX foram comparados com os dados obtidos na solução manual.

Etapas 5: Foi definida uma empresa para fornecer dados reais para serem utilizados na dissertação. Por apresentar uma malha extensa e grande movimentação de

cargas, além da disponibilidade em fornecer os dados, a Ferrovia Centro Atlântica - FCA foi escolhida para fornecer o estudo de caso para validar o modelo proposto nesta dissertação.

Etapa 6: Nesta etapa, para auxiliar na descrição do problema e construção dos cenários com dados reais da FCA, foram realizadas entrevistas com a equipe responsável pelo planejamento da circulação de trens na FCA. As seguintes informações foram obtidas com os técnicos que trabalham diariamente com o problema em estudo:

- Como o problema é atualmente resolvido pela equipe técnica e foi esclarecido que o planejamento é feito utilizando software específico e complementado manualmente utilizando uma planilha Excel;
- Se o planejamento é realizado de uma só vez para toda ferrovia ou se o mesmo é setorizado e foi esclarecido que o planejamento é feito por corredores de circulação, que são: Corredor Centro-Leste, Corredor Centro-Sudeste, Corredor Minas-Rio, Corredor Minas-Bahia e Corredor Centro-Norte;
- As características dos corredores: quantidade de estações, distâncias, frequência dos trens;
- As restrições operacionais, como tempo máximo de atraso e adiantamento de trens, velocidade média; e
- O planejamento da circulação de trens nos dias estudados e os resultados obtidos após a operação.

Etapa 7: Nesta etapa, foram elaborados os cenários de teste utilizando os dados fornecidos pela Gerência do Centro Controle Operacional da FCA. Dos dados que foram levantados junto à FCA, foram selecionados dias de maior movimento em cada um dos corredores da ferrovia, entre os meses de janeiro a junho de 2014.

Etapa 8: Executar o modelo no *solver* CPLEX, com os cenários elaborados a partir dos dados reais da FCA, para resolver o TTP.

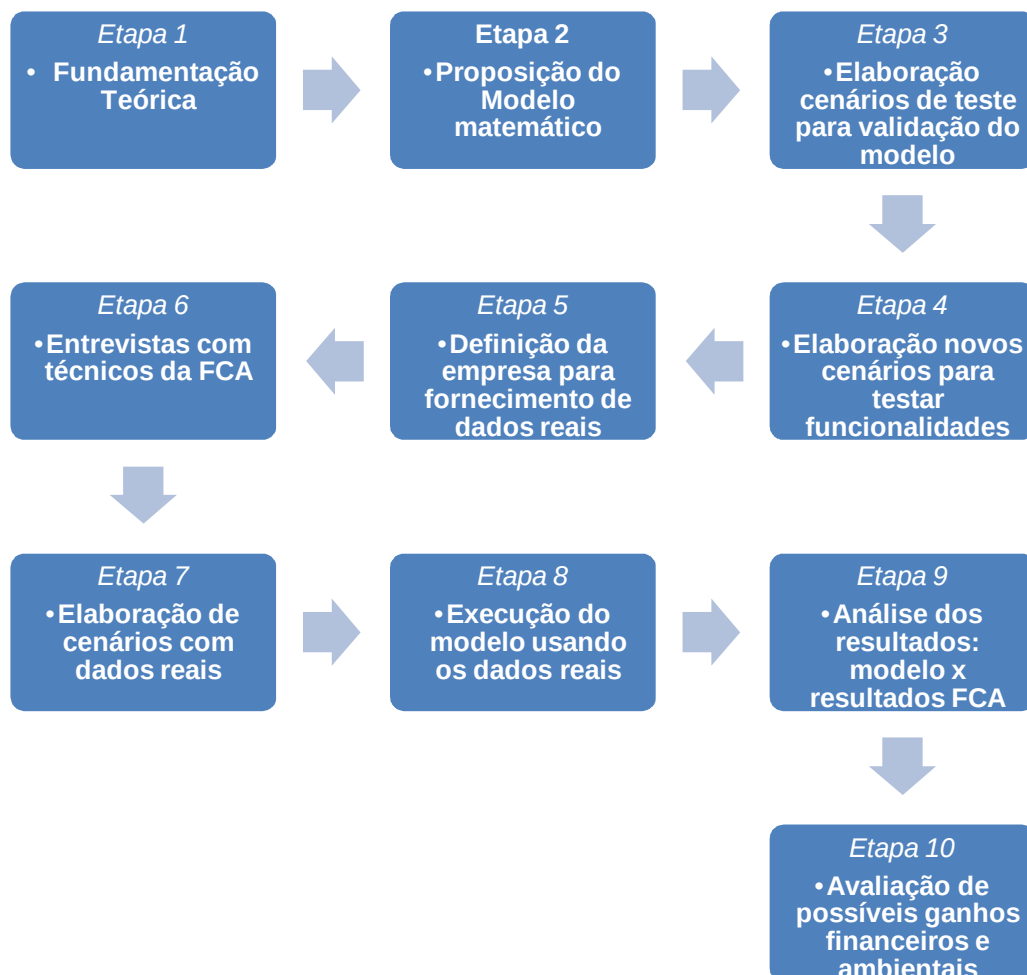
Etapa 9: Os resultados obtidos na etapa anterior, foram comparados nesta etapa, aos resultados reais alcançados pela operação da FCA, avaliando-se os tempos de

parada em pátios, aguardando cruzamentos e os tempos totais de viagens de cada cenário.

Etapa 10: A última etapa desta dissertação foi a de mensurar os possíveis ganhos financeiros e ambientais, caso o modelo tivesse sido utilizado para o planejamento da circulação de trens nos referidos trechos da FCA, isto é, se o TTP fosse resolvido utilizando o modelo proposto.

A Figura 7 mostra a ordenação das etapas da metodologia estabelecida.

Figura 7 – Etapas da Metodologia de Pesquisa



Fonte: Próprio autor

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto foi elaborado com base no modelo *Job Shop*, considerando que cada trecho da ferrovia é descrito como sendo um segmento entre pátios de cruzamento que pode ser usado por trens em ambas às direções e que os pátios de cruzamento são compostos por dois trechos, sendo um utilizado para o trem no sentido subindo e outro para o trem no sentido descendo. Analogamente ao modelo *Job Shop*, as tarefas são as viagens dos trens, as máquinas são os trechos a serem percorridos e o tempo de processamento é o tempo de circulação em cada trecho. A formulação matemática é apresentada a seguir em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e as restrições.

- Conjuntos

N - Conjunto de trens que circularão na ferrovia;

T - Conjunto de trechos da ferrovia, onde $nt = |T|$ é o número de trechos da ferrovia;

T_i - Conjunto de trechos percorridos pelo trem $i \in N$, $T_i \subset T$;

K - Conjunto que representa a ordem dos trechos que um trem deve percorrer para concluir a viagem. Varia de 1 até o número de trechos da ferrovia, ou seja, nt ; e

K_1 - Conjunto auxiliar para lógica do modelo que equivale ao conjunto K , porém o número de trechos é igual a $nt - 1$.

- Parâmetros

$p_{i,t}$ - Tempo de circulação do trem $i \in N$ no trecho $t \in T$. Para os trechos $t \in T_i$ é o tempo médio de circulação no trecho do trem $i \in N$. Para os trechos $t \notin T_i$, $p_{i,t} = 0$;

n_i - Número de trechos percorridos pelo trem $i \in N$ sendo $1 \leq n_i \leq nt$;

$r_{i,k}$ - Um trecho da sequencia $k \in K$ de trechos $t \in T_i$ que são percorridos pelo trem $i \in N$. Para $k \leq n_i$, $r_{i,k}$ representa um trecho $t \in T_i$ na sequencia de trechos a serem percorridos pelo trem $i \in N$. Para $k > n_i$, $r_{i,k} = 0$;

l_i - Último trecho $t \in T_i$ a ser percorrido pelo trem $i \in N$, sendo $l_i = r_{i, n_i}$;

sa_i - Limite de adiantamento do horário da partida do trem $i \in N$;

sd_i - Limite de atraso do horário da partida do trem $i \in N$;

ea_i - Limite de adiantamento do horário de chegada do trem $i \in N$; e

ed_i - Limite de atraso do horário da chegada do trem $i \in N$.

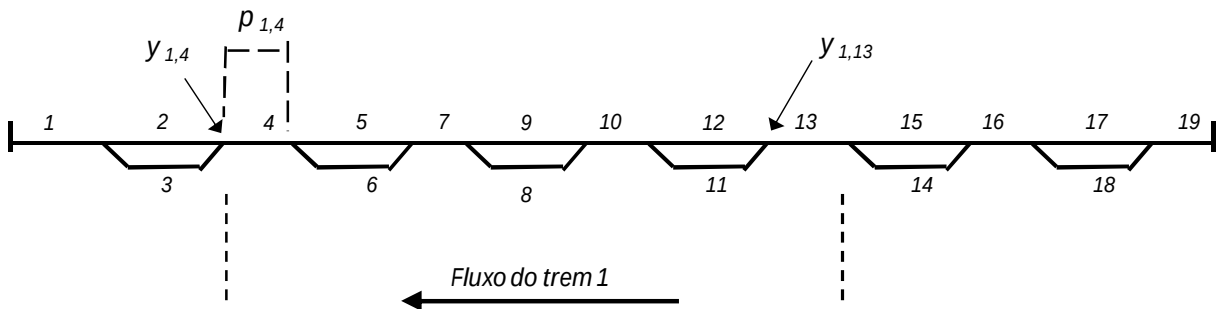
- Variáveis

$y_{i,t}$ - Tempo que o trem $i \in N$ termina de percorrer o trecho $t \in T$; e

$x_{i,j,t}$ - Define a precedência do trem $i \in N$ em relação ao trem $j \in N$ em um trecho $t \in T$. Variável binária que assume o valor 1 se o trem $i \in N$ precede o trem $j \in N$ e 0 caso contrário.

Antes de apresentar a função objetivo e as restrições do problema, a seguir são apresentados os principais parâmetros e variáveis do modelo proposto por meio de um exemplo (Figura 8) de uma ferrovia que possui 19 trechos, ou seja, $n_t = 19$, assim $T = \{1, 2, 3 \dots 17, 18, 19\}$. Suponha que um trem (*trem 1*) deve fazer uma viagem na ferrovia no sentido do trecho 13 para o trecho 4, portanto, $n_1 = 7$ e $T_1 = \{4, 5, 7, 9, 10, 12, 13\}$. Neste caso, a sequencia de trechos é definida como $k = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ e o trecho final é $l_1 = r_{1,7} = 4$. A partir desta sequencia, define-se $r_{1,1} = 13$; $r_{1,2} = 12$; $r_{1,3} = 10$; $r_{1,4} = 9$; $r_{1,5} = 7$; $r_{1,6} = 5$; $r_{1,7} = 4$. A partida do trem se dá na sequencia 1 e então o primeiro trecho será 13, $r_{1,1} = 13$, o tempo de término do trecho 13 será $y_{1,13}$. A chegada do trem se dá na sequencia 7 e então o último trecho será 4, $r_{1,7} = 4$, e o tempo de término do trecho 4 será $y_{1,4}$. Por fim, pode se ver o parâmetro $p_{1,4}$ que representa o tempo de circulação do trem 1 no trecho 4.

Figura 8 - Principais parâmetros e variáveis do modelo para um trem circulando



Fonte: Próprio autor

A partir das descrições anteriores, são apresentados a seguir o modelo matemático completo utilizado para minimizar o tempo total de viagem dos trens.

Função Objetivo

Minimizar (1)

$$\sum_{i \in N} y_{i,l_i}$$

Sujeito a:

$$y_{i,r_i(k+1)} \geq y_{i,r_i,k} + p_{i,r_i(k+1)} \quad \forall i \in N, k \in K, r_i(k+1) \geq 1 \quad (2)$$

$$y_{j,r_i,k} \geq y_{i,r_i,k} + p_{j,r_i,k} - M(1 - x_{i,j,r_i,k}) \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \quad (3)$$

$$k \in K, k \leq n_i, k \leq n_j$$

$$y_{i,r_i,k} \geq y_{j,r_i,k} + p_{i,r_i,k} - Mx_{i,j,r_i,k} \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \quad (4)$$

$$k \in K, k \leq n_i, k \leq n_j$$

$$sa_i \leq (y_{i,r_i,1} - p_{i,r_i,1}) \leq sd_i \quad \forall i \in N, k \in K \quad (5)$$

$$ea_i \leq y_{i,l_i} \leq ed_i \quad \forall i \in N, k \in K \quad (6)$$

$$y_{i,r_i,k} > 0 \quad \forall i \in N, k \in K, k \leq n_i \quad (7)$$

$$y_{i,r_i,k} = 0 \quad \forall i \in N, k \in K, k > n_i \quad (8)$$

$$x_{i,j,r_i,k} = 0 \quad \forall i, j \in N, i = j, k \in K \quad (9)$$

$$x_{i,j,r_i,k} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, i \neq j, k \in K \quad (10)$$

A função objetivo (1) minimiza o tempo total de circulação de todos os trens. Isto é conseguido porque a função objetivo minimiza a soma dos tempos de término de viagem no último trecho, l_i , da sequencia de viagem de cada trem, y_{i,l_i} .

As restrições (2) garantem que o tempo de término de viagem de um trem i numa sequencia $k+1$ seja maior ou igual ao tempo de término de viagem do trem i na sequencia k imediatamente anterior mais o tempo de viagem do mesmo trem i na sequencia $k+1$. As restrições (3) e (4) garantem a precedência de um trem em relação ao outro.

As restrições (5) garantem que cada trem inicie sua viagem dentro do intervalo compreendido entre o limite de adiantamento do horário de partida do trem e o limite de atraso do horário de partida do trem. As restrições (6) garantem que cada trem termine sua viagem dentro do intervalo compreendido entre o limite de adiantamento do horário de chegada do trem e o limite de atraso do horário de chegada do trem.

As restrições (7) garantem que quando $k \leq n_i$ o tempo que o trem termina a circulação em cada sequencia de trechos da sua rota seja sempre maior que zero. As restrições (8) garantem que caso uma sequencia de trecho não seja percorrida pelo trem, $k > n_i$, então o tempo de término de circulação neste trecho será igual à zero, isto é, o trem não circula neste trecho. As restrições (9) garantem que a variável $x_{i,j,r_{i,k}}$ assumirá o valor 0 se $i = j$, ou seja, o mesmo trem e, portanto, não pode haver precedência entre um trem e ele mesmo e as restrições (10) garantem que a variável $x_{i,j,r_{i,k}}$ assumirá apenas os valores 0 ou 1 se $i \neq j$.

5 CENÁRIOS PROPOSTOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO

Para testar o modelo proposto, foram definidos primeiramente cenários de teste e posteriormente foram utilizados cenários gerados com dados reais da FCA e os resultados obtidos pelo CPLEX executando o modelo proposto foram comparados com os dados reais.

Antes de se definir os cenários de testes, faz-se necessário definir três conceitos utilizados neste estudo:

- 1) Janela de tempo fechada;
- 2) Janela de tempo aberta e
- 3) Janela de tempo flexível.

Elas diferem entre si em função dos horários de início e fim da janela de tempo de partida e de chegada. O resumo dos limites de cada uma pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Definição Janelas de Tempo

Janela de Tempo			
Limites	Aberta	Fechada	Flexível
Limite de adiantamento do horário da partida	00:00 hora	Igual horário programado de partida	menor que o horário programado de partida
Limite de atraso do horário da partida	23:59 horas	Igual horário programado de partida	maior que o horário programado de partida
Limite de adiantamento do horário da chegada	00:00 hora	Igual horário programado de chegada	menor que o horário programado de chegada
Limite de atraso do horário da chegada	23:59 horas	Igual horário programado de chegada	maior que o horário programado de chegada

5.1 Cenários de testes propostos

Para validar as funcionalidades do modelo, foram elaborados trechos de uma ferrovia de teste com os seguintes dados operacionais:

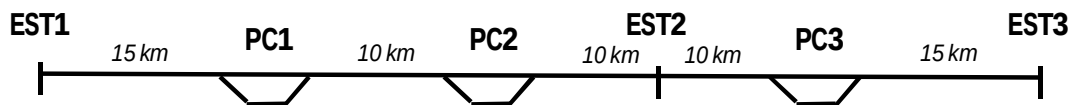
- Ferrovia de linha singela
- Três estações ferroviárias (EST1, EST2 e EST3)
- Três pátios de cruzamento (PC1, PC2 e PC3)
- A velocidade nos dois sentidos de circulação é igual em todos os trechos da ferrovia para todos os trens.

A Tabela 2 apresenta os dados relativos a estes trechos da ferrovia: distâncias, velocidades, tempo de circulação, tempo de cruzamento e tempo para circular os pátios.

Tabela 2 – Dados da Ferrovia de Teste

Dados Operacionais						
Origem	Destino	Distância (km)	Velocidade (Km/h)	Tempo circulação (min)	Tempo Cruzamento entre trens (min)	Tempo atravessar pátio (min)
EST1	PC1	15	15	60	10	10
PC1	PC2	10	10	60	10	10
PC2	EST2	10	10	60	10	10
EST2	PC3	10	5	120	10	10
PC3	EST3	15	5	180	10	10

A Figura 9 apresenta a Ferrovia de Teste apresentada na Tabela 2.

Figura 9 - Ferrovia de Teste

Fonte: Próprio autor

A Tabela 3 apresenta os dados referentes à operação de 4 trens (T01, T02, T03 e T04) com suas respectivas origens e destinos, horários previstos de saída e chegada e tempo de circulação mínimo para o trem circular todos os trechos desde a origem até o destino, sem paradas. Os horários estão em minutos, a partir de 00:00 h.

Tabela 3 – Operação Programada dos trens

Operação Programada					
Trem	Origem	Destino	Saída Prevista	Chegada Prevista	Tempo mínimo de circulação (min)
T01	ES1	ES2	360	560	200
T02	ES2	ES1	180	380	200
T03	ES3	ES1	0	520	520
T04	ES2	ES3	120	430	310
Total					1230

Para esta ferrovia de teste, foram elaborados três cenários utilizando-se os 4 trens da Tabela 3 com suas respectivas origens e destinos e com as janelas de tempo definidas conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Cenários de teste

Cenários						
Cenário de teste	Número de Trens	Janela de tempo Partida	Janela de tempo Chegada	Nº de Trechos	Nº de Pátios de Cruzamento	Extensão total (km)
01	4	Fechada	Aberta	5	4	60
02	4	Flexível	Aberta	5	4	60
03	4	Fechada para T01 e Flexível para demais trens	Fechada para T01 e Aberta para demais trens	5	4	60

No Cenário de teste 01 foi definido que todos os trens deveriam sair no horário programado e com horário de chegada livre.

O Cenário de teste 02 apresenta os mesmos trens do Cenário de teste 01, com horário de chegada livre e com o Limite de adiantamento do horário da partida igual a 60,0 minutos antes do horário programado e Limite de atraso do horário da partida igual a 60,0 minutos após o horário programado. Foram definidas duas horas de janela de tempo de partida, para dar maior aderência do modelo à realidade, mantendo a proximidade com a realidade operacional e, neste caso específico, mantendo os conflitos entre os trens, já que se os horários fossem totalmente livres, de 00h00min às 23h59min, não existiriam conflitos na ferrovia de teste.

Por razões comerciais, numa ferrovia não se pode adiantar muito o horário de partida dos trens, pois raramente os clientes conseguem adiantar muito as operações de carga e descarga, possibilitando a liberação do trem muito antes do horário programado e previamente acordado. Também não é admitido atrasos planejados muito grandes, visto que normalmente as ferrovias não possuem linhas suficientes para ficar com muitos trens parados, aguardando para sair, além da interferência que estes atrasos podem gerar em outras trechos em que os referidos trens irão circular posteriormente.

O Cenário de teste 03 é similar ao Cenário de teste 02, alterando somente a questão da priorização de trens. Esta prioridade é alcançada estabelecendo a Janela de

tempo de partida e de chegada como fechada para o Trem T01, isto é, o horário de partida deve ser igual ao horário programado de partida e o horário de chegada deve ser igual ao horário programado de chegada.

5.2 Cenários de testes propostos com manutenção

Ainda para testar o modelo e suas funcionalidades, foram elaborados cenários de teste incluindo a manutenção da via permanente.

Apesar deste não ser o objetivo desta dissertação, o modelo proposto pode ser usado para o planejamento da manutenção da Via Permanente, definindo qual o melhor horário para a execução da manutenção, gerando o menor impacto na circulação de trens.

No item seguinte, é apresentado um breve esclarecimento sobre a manutenção da via permanente e em seguida os cenários são propostos.

5.2.1 A manutenção da Via Permanente

Pelas próprias características do transporte ferroviário, faz-se necessário a entrega dos ativos para a manutenção. Uma situação crítica para uma ferrovia de linha singela, que é uma única linha que liga dois pátios/estações adjacentes e é utilizada para circulação de trens nos dois sentidos, é a entrega da via permanente para a manutenção, pois a mesma paralisa totalmente a circulação de trens durante o período de manutenção.

A eficiência do transporte ferroviário está intrinsecamente ligada ao estado da via (Ratton Neto, 1985). A manutenção dos equipamentos e componentes da via permanente tem como objetivo manter a disponibilidade da ferrovia, diminuindo as interrupções e restrições de velocidade (Barros, 2013).

A manutenção da via permanente pode ser basicamente dividida em corretiva (após ocorrência do problema) e preventiva (em intervalos pré-determinados, visando

reduzir a probabilidade de falhas). As manutenções da via permanente são em seus componentes e/ou elementos e correção geométrica.

5.2.2 Os Cenários com manutenção

Para testar a funcionalidade do modelo de ser utilizado para planejamento da VP, foram definidos mais dois cenários de teste, com manutenção da VP, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Cenários de Teste com manutenção da VP

Cenários						
Cenário de teste	Número de Trens	Janela de tempo Partida	Janela de tempo Chegada	Nº de Trechos	Nº de Pátios de Cruzamento	Extensão total (km)
04	4	Fechada para Trem manutenção e Flexível para demais trens	Fechada para Trem manutenção e Aberta para demais trens	5	4	60
05	4	Flexível	Flexível para Trem manutenção e Aberta para demais trens	5	4	60

O Cenário de teste 04 é também similar ao Cenário de teste 02 e nele foi inserida a manutenção da VP entre o PC2 e o PC3. Para isso, foi inserido um novo trem chamado “Trem Manutenção” com origem no início do trecho em manutenção e destino igual ao fim do trecho em manutenção, com tempo total de circulação igual ao tempo total de execução da manutenção, que neste exemplo é de 6 horas e horário fixo para início às 06h00min e término às 12h00min. Assim, espera-se testar o impacto da manutenção na circulação dos trens comparando este cenário com o Cenário de teste 02.

Por fim, o Cenário de teste 05 é similar ao Cenário de teste 04 e o que o diferencia os dois cenários é o fato de que a manutenção possui o horário de início e término flexível, mantendo o tempo total de execução de 6 horas. Assim, o trem que representa esta manutenção possui Janela de Tempo de partida flexível, estabelecendo que o Limite de adiantamento do horário da partida é igual ao horário de entrada da equipe de manutenção e o Limite de atraso do horário da partida é igual ao horário de saída desta equipe menos o tempo total para execução da manutenção. Para a Janela de tempo de chegada, estabelece-se que o tempo Limite de adiantamento do horário da chegada é igual ao horário de entrada da equipe mais o tempo de execução da manutenção e o Limite de atraso do horário da chegada é igual ao horário de saída da equipe. Com isso, garante-se que a manutenção possa ser executada em qualquer horário do dia em que a equipe de manutenção da VP esteja disponível.

Espera-se com o Cenário de teste 05 analisar a possibilidade do modelo de obter ganhos em função da flexibilidade permitida ao horário de manutenção. Para analisar estes ganhos, os resultados obtidos deste cenário foram comparados aos resultados obtidos com o Cenário de teste 04.

A seção seguinte apresenta os cenários propostos com dados reais da FCA e os resultados obtidos pelo CPLEX foram comparados com os dados reais da circulação de trens obtidos pela FCA e são apresentados no capítulo seguinte.

5.3 Cenários propostos com dados reais da FCA

Foram utilizados os dados fornecidos pela Gerência do Centro Controle Operacional da Ferrovia Centro Atlântica. Os dados da FCA correspondem a dias de maior movimento de trens e cargas em cada um dos corredores da ferrovia, entre os meses de janeiro a junho de 2014.

Para um entendimento melhor dos cenários reais, a seção 5.3.1 apresentará a ferrovia escolhida para a elaboração dos cenários reais e a seção 5.3.2 detalhará todos os cenários reais propostos.

5.3.1 A Ferrovia Centro Atlântica - FCA

A Ferrovia Centro Atlântica (FCA) é o principal eixo de conexão ferroviária entre as regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. A FCA originou-se da fusão de três superintendências da extinta Rede Ferroviária Federal S/A (RFFSA): SR2 com sede em Belo Horizonte (Minas Gerais), SR7 com sede em Campos (Rio de Janeiro) e SR8 com sede em Salvador (Bahia). Atualmente possui uma malha ferroviária de 7220 km, passando por 316 municípios em sete estados brasileiros (Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Sergipe, Goiás, Bahia, São Paulo) e no Distrito Federal. O mapa da Figura 10 mostra a malha ferroviária atual da FCA.

A FCA possui 87 terminais intermodais e se destaca como um importante corredor logístico de carga geral com acesso a portos localizados nos estados da Bahia, São Paulo e Rio de Janeiro e também está interligada com as principais ferrovias brasileiras, permitindo a conexão com os maiores centros consumidores do país. (VLI, 2014).

Os principais produtos transportados pela FCA são: soja, farelo de soja, fosfato, calcário siderúrgico, açúcar, minério de ferro, bauxita, enxofre, calcário britado e derivados de petróleo. Em 2012 foram transportados 16.680 (x10) TKU (tonelada por quilômetro útil). A operação está estruturada em corredores que atuam de forma integrada para atender vários setores importantes da economia.

Figura 10 - Mapa da malha ferroviária da FCA



Fonte: CNT - 2011

5.3.2 Os cenários reais com dados da FCA

Do período escolhido, entre os meses de janeiro a junho de 2014, foram elaborados 10 cenários de testes, priorizando os trechos de maior movimento de trens por dia. Estes cenários são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Cenários Dados Reais da FCA

Cenário	Nome do Corredor	Trecho Inicial	Trecho Final	Extensão total (km)	Nº Pátios Cruzamento	Número de Trens
1	Minas Rio	Arcos	Barra Mansa	467	29	13
2	Centro Sudeste	Ribeirão Preto	Paulínia	274	16	19
3	Minas Bahia	Pirapora	Wilson Lobato	351	17	6
4	Centro Leste	Brejo Alegre	El Dourado	733	61	16
5	Centro Leste	Roncador Novo	Brejo Alegre	174	11	4
6	Centro Sudeste	Uberlândia	Ribeirão Preto	316	16	11
7	Minas Rio	B.de Camargos	Três Rios	175	15	11
8	Minas Bahia	Pirapora	Wilson Lobato	351	17	8
9	Centro Leste	Garça de Minas	El Dourado	285	30	12
10	Centro Sudeste	Ribeirão Preto	Paulínia	274	16	17

O Cenário 1 é formado por trechos do Corredor Minas Rio; Possui 29 pátios de cruzamento e 467 km de extensão; Registra principalmente a movimentação de Calcário e Clínquer, entre as estações de Arcos (Minas Gerais) e Barra Mansa (Rio de Janeiro).

O Cenário 2, do Corredor Centro Sudeste, possui 16 pátios de cruzamento, com 274 km de extensão e apresenta principalmente a movimentação de açúcar, grãos, fosfato e enxofre, entre as estações de Ribeirão Preto (São Paulo) e a Refinaria de Paulínia (São Paulo).

O Cenário 3 é formado por trechos do Corredor Minas Bahia; Possui 17 pátios de cruzamento e 351 km de extensão; Apresenta principalmente a movimentação de grãos e Produtos químicos, entre as estações de Pirapora (Minas Gerais) e Wilson Lobato (Minas Gerais).

O Cenário 4, do Corredor Centro Leste, possui 61 pátios de cruzamento e 733 km de extensão, com movimentação principalmente de grãos e Produtos químicos, entre as estações de Brejo Alegre (Minas Gerais) e El Dourado (Minas Gerais).

O Cenário 5, do Corredor Centro Leste, possui 11 pátios de cruzamento e 174 km de extensão; Apresenta principalmente movimentação de Farelo de Soja, Outros - Produção agrícolas, Produtos Químicos – Perigosos, entre as estações de Roncador Novo (Goiás) e Brejo Alegre (Minas Gerais).

O Cenário 6 é formado por trechos do Corredor Centro Sudeste; ; Possui 16 pátios de cruzamento e 316 km de extensão; Apresenta principalmente a movimentação de Dunito, Farelo de Soja, Produtos Siderúrgicos, Produtos Químicos Perigosos, entre Uberlândia (Minas Gerais) e Ribeirão Preto (São Paulo).

O Cenário 7 é formado por trechos do Corredor Minas Rio; Possui 15 pátios de cruzamento e 175 km de extensão; Registra principalmente a movimentação de Bauxita, entre as estações de Barão de Camargos (Minas Gerais) e Três Rios (Rio de Janeiro).

Cenário 8 é formado por trechos do Corredor Minas Bahia; Possui 17 pátios de cruzamento e 351 km de extensão; Apresenta principalmente a movimentação de grãos e Produtos químicos, entre as estações de Pirapora (Minas Gerais) e Wilson Lobato (Minas Gerais).

O Cenário 9, do Corredor Centro Leste, possui 30 pátios de cruzamento e 285 km de extensão; Apresenta principalmente a movimentação de Calcário Siderúrgico, Produção agrícola, Pedras em Blocos e Placas, Produtos Químicos e Coque, entre as estações de Garça de Minas (Minas Gerais) e El Dourado (Minas Gerais).

Por fim, o Cenário 10, do Corredor Centro Sudeste, possui 16 pátios de cruzamento, com 274 km de extensão e apresenta principalmente a movimentação de açúcar, grãos, fosfato e enxofre, entre as estações de Ribeirão Preto (São Paulo) e a Refinaria de Paulínia (São Paulo).

Foi estabelecido um tempo limite de 7.200 segundos (2 horas) para execução do CPLEX de cada um dos modelos associados aos cenários apresentados na Tabela 6.

Os resultados obtidos com a execução destes cenários no CPLEX serão utilizados para comparação com os dados reais obtidos da FCA, comparando-se os tempos de parada e os tempos totais de viagens de cada cenário.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos através da execução do modelo proposto no CPLEX. Primeiramente são apresentados os resultados dos cenários de teste e em seguida os resultados obtidos com os cenários elaborados a partir dos dados reais da FCA.

Os resultados obtidos pelo CPLEX com os cenários de teste foram comparados com os resultados obtidos manualmente dos cenários de teste (cenários de tese 01 ao 05) e os resultados obtidos pelo CPLEX com os cenários com dados reais da FCA foram comparados com os dados reais da circulação de trens da FCA, que nesta dissertação são definidos como resultados do Caso Real.

6.1 Resultados obtidos com os cenários de teste

Na Tabela 7, pode-se observar que no Cenário de teste 01, devido aos cruzamentos dos trens nos pátios de cruzamento, o tempo de circulação total de todos os trens, passou de 1230,0 minutos para 1430,0 minutos, isto é, gerou-se um atraso de 200,0 minutos em relação ao programado caso não houvesse cruzamento de trens. Este atraso é normal e inerente à operação ferroviária em linha singela, pois durante a operação, existe o cruzamento de trens e a necessidade da parada de um trem para passagem do outro.

Neste cenário, o modelo chegou a uma solução ótima com tempo de execução menor que dois segundos. Este cenário foi criado para servir de referência para os demais cenários.

Tabela 7 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 01

Resultados obtidos pelo CPLEX - Cenário de teste 01							
Trem	Origem	Destino	Tempo Previsto (min)	Saída Realizada	Chegada Realizada	Tempo Realizado (min)	Atraso Normal (min)
T01	ES1	ES2	200	360	560	200	0
T02	ES2	ES1	200	180	480	300	100
T03	ES3	ES1	520	0	620	620	100
T04	ES2	ES3	310	120	430	310	0
Total			1230			1430	200

A Tabela 8 traz o resultado do Cenário de teste 02 que apresentou um atraso devido aos cruzamentos de trens de 60,0 minutos em relação ao programado, passando de 1230,0 minutos para 1290,0 minutos.

Tabela 8 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 02

Resultados obtidos pelo CPLEX - Cenário de teste 02							
Trem	Origem	Destino	Tempo (min)	Saída Realizada	Chegada Realizada	Tempo (min)	Atraso Normal (min)
T01	ES1	ES2	200	320	580	260	60
T02	ES2	ES1	200	120	320	200	0
T03	ES3	ES1	520	0	520	520	0
T04	ES2	ES3	310	60	370	310	0
Total			1230			1290	60

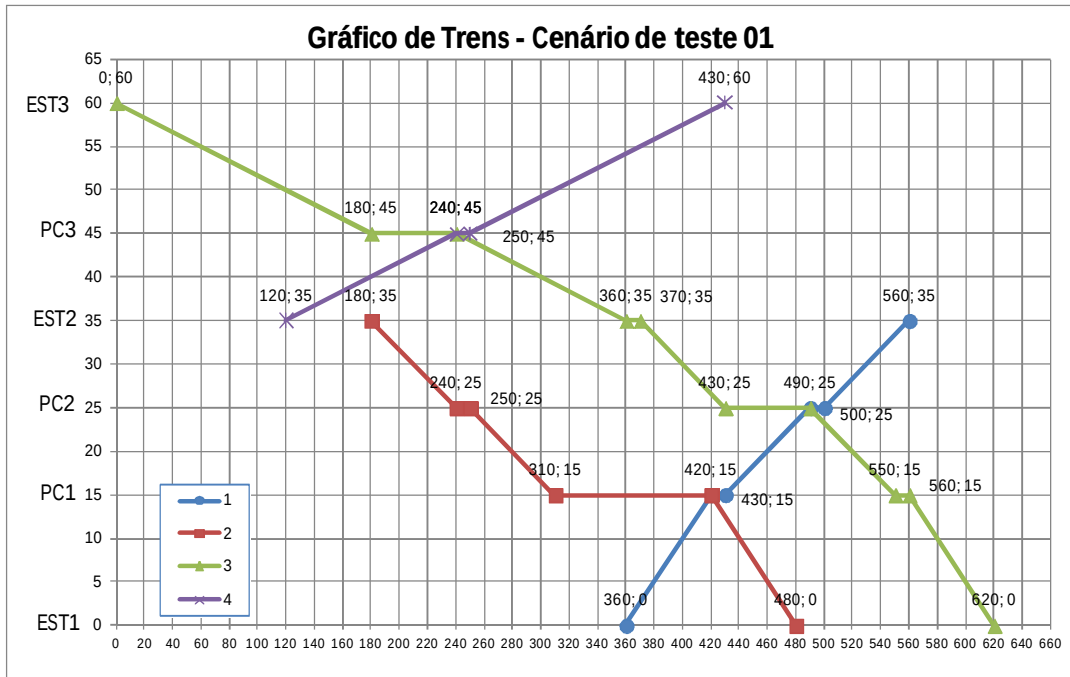
Observando-se a Figura 11 e a Figura 12 é possível fazer um comparativo entre o Cenário de teste 01 e o Cenário de teste 02 por meio dos respectivos gráficos de trens:

- O trem T01 teve sua partida adiantada em 40,0 minutos, partindo do tempo 320,0 minutos no Cenário de teste 02 (Figura 12) e no Cenário de teste 01 partiu no tempo 360,0 minutos (Figura 11);
- O trem T02 foi adiantado em 60,0 minutos, partindo do tempo 120,0 minutos no Cenário de teste 02 (Figura 12) e no Cenário de teste 01 partiu no tempo 180 minutos (Figura 11);
- O trem T03 que no Cenário de teste 01 teve que aguardar no PC3 o cruzamento com o T04 e no PC2 o cruzamento com o T01, gerando um atraso de 100,0 minutos, no Cenário de teste 02 não teve que aguardar para os cruzamentos e não teve atraso registrado, e
- O trem T04 também foi adiantado em 60,0 minutos, partindo do tempo 60,0 minutos no Cenário de teste 02 (Figura 12) e no Cenário de teste 01 partiu no tempo de 120,0 minutos (Figura 11), diminuindo assim os cruzamentos de trens, o que pode ser observado nos gráficos de trens apresentados.

Assim, foi reduzido o atraso no tempo de circulação de todos os trens de 200,0 minutos (Cenário de teste 01) para 60,0 minutos (Cenário de teste 02). Estes valores em relação ao programado caso não houvesse cruzamento de trens.

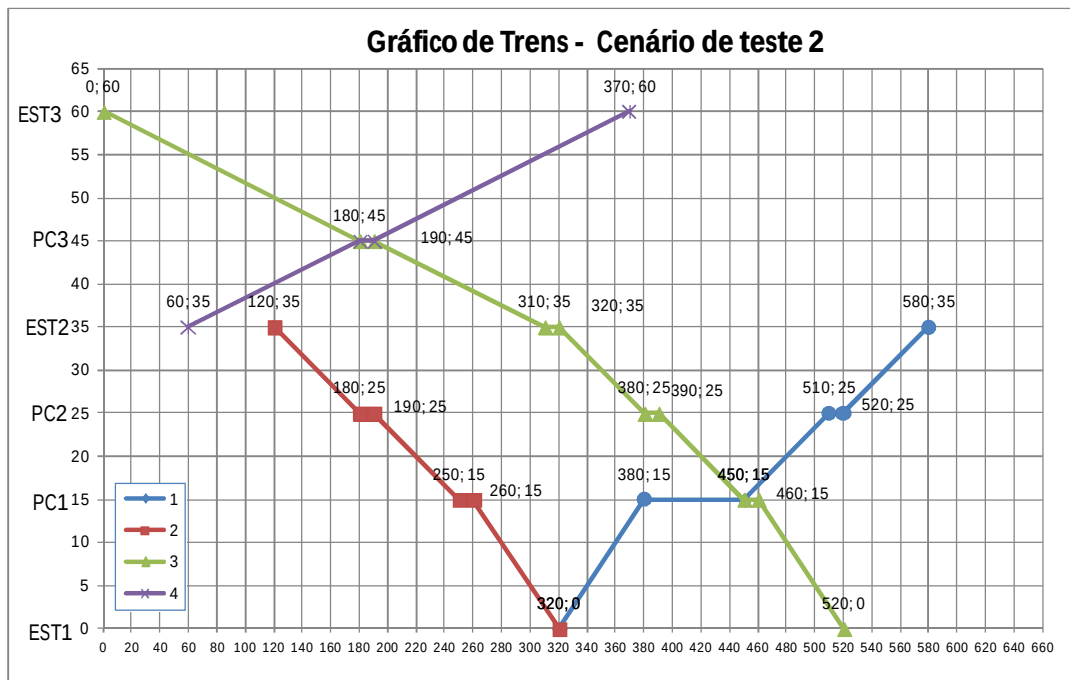
Estes resultados mostram o impacto da mudança da Janela de tempo de fechada para flexível, possibilitando ao modelo otimizar a circulação de trens. Neste cenário, o modelo também chegou a uma solução ótima em um tempo inferior a dois segundos.

Figura 11 – Gráfico de trens Cenário de teste 01



Fonte: Próprio autor

Figura 12 - Gráfico de trens Cenário de teste 02



Fonte: Próprio autor

No Cenário de teste 03, o trem T01 foi priorizado, fazendo as Janelas de tempo de partida e chegada Fechadas e na Tabela 9 observa-se que um atraso de 100,0 minutos ocorre no trem T03.

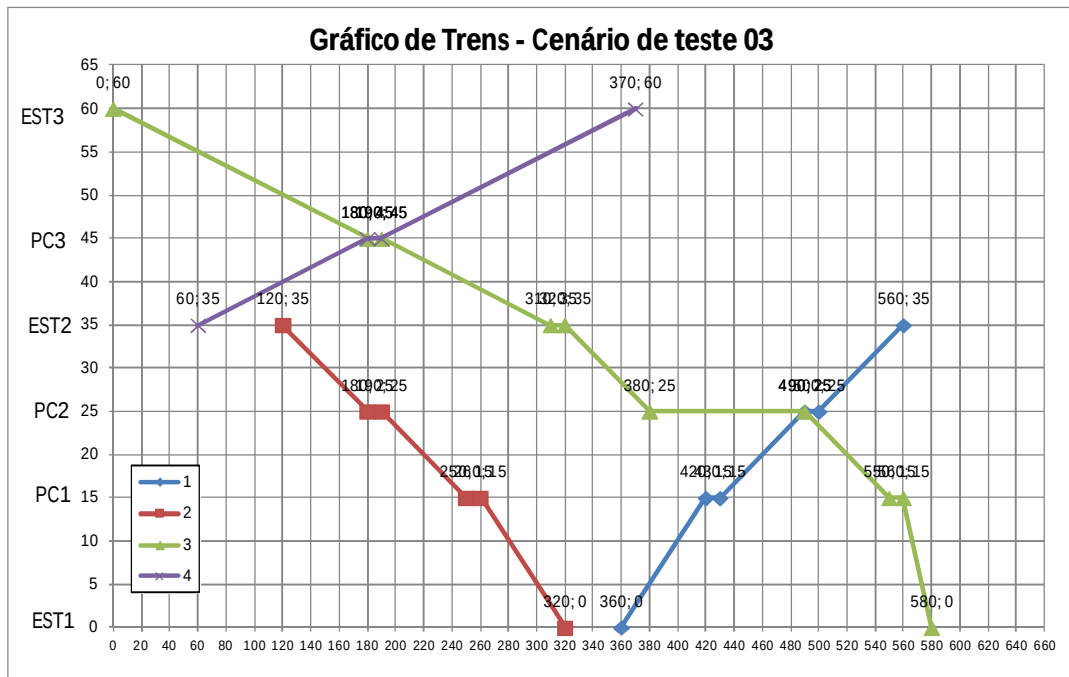
Tabela 9 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 03

Resultados obtidos pelo CPLEX – Cenário de teste 03							
Trem	Origem	Destino	Tempo (min)	Saída Realizada	Chegada Realizada	Tempo (min)	Atraso Normal (min)
T01	ES1	ES2	200	360	560	200	0
T02	ES2	ES1	200	120	320	200	0
T03	ES3	ES1	520	0	620	620	100
T04	ES2	ES3	310	60	370	310	0
Total			1230			1330	100

Da mesma forma, observando-se a Figura 12 e a Figura 13 é possível fazer o comparativo entre os cenários de teste 02 e 03 através dos respectivos gráficos de trens:

- Observa-se na Figura 13 que no PC2, o trem T03 ficou aguardando o trem T01 cruzar, para depois seguir viagem (Cenário de teste 03), gerando um atraso de 100,0 minutos; Este atraso estava no trem T01 (Cenário de teste 02) que ficou parado no PC1, aguardando o T03 passar, conforme visto na Figura 12. O tempo de execução para chegar à solução ótima foi de 1,6 seg.

Figura 13 – Gráfico de trens Cenário de teste 03



Fonte: Próprio autor

Assim, pode-se perceber que o modelo proposto é uma boa opção de ferramenta a ser aplicada para planejamento da circulação de trens.

6.2 Resultados obtidos com os cenários de testes com manutenção

No Cenário de teste 04, com a manutenção da VP introduzida na malha através do “Trem Manutenção” em horário fixo, isto é, Janela de tempo de partida e chegada Fechadas para o Trem Manutenção e exatamente iguais ao programado, gerou-se um atraso de 710,0 minutos em relação ao programado, que pode ser visto na Tabela 10 e Figura 14.

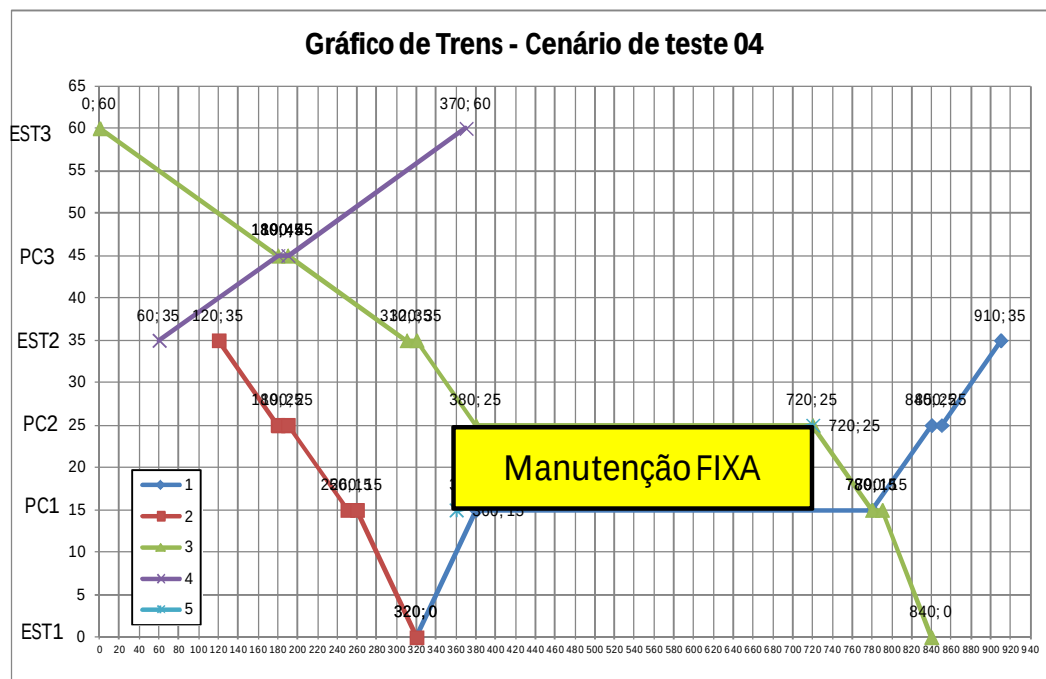
O trem T01 ficou parado no PC1, gerando um atraso de 390,0 minutos e o trem T03 ficou parado no PC2, gerando um atraso de 320,0 minutos, ambos aguardando a liberação da via, que estava interrompida para manutenção.

Tabela 10 - Resultados obtidos - Cenário de Teste 04

Resultados obtidos pelo CPLEX – Cenário de Teste 04							
Trem	Origem	Destino	Tempo (min)	Saída Realizada	Chegada Realizada	Tempo (min)	Atraso Normal (min)
T01	ES1	ES2	200	320	910	590	390
T02	ES2	ES1	200	120	320	200	0
T03	ES3	ES1	520	0	840	840	320
T04	ES2	ES3	310	60	370	310	0
Total			1230			1940	710

O gráfico de trens da Figura 14 mostra que os trens T01 e T03 foram afetados pela interrupção da VP entre o PC1 e o PC2 e tiveram que aguardar o término da manutenção para seguirem viagem. O tempo de execução para chegar à solução ótima foi de 1,0 seg.

Figura 14 - Gráfico de trens Cenário de teste 04

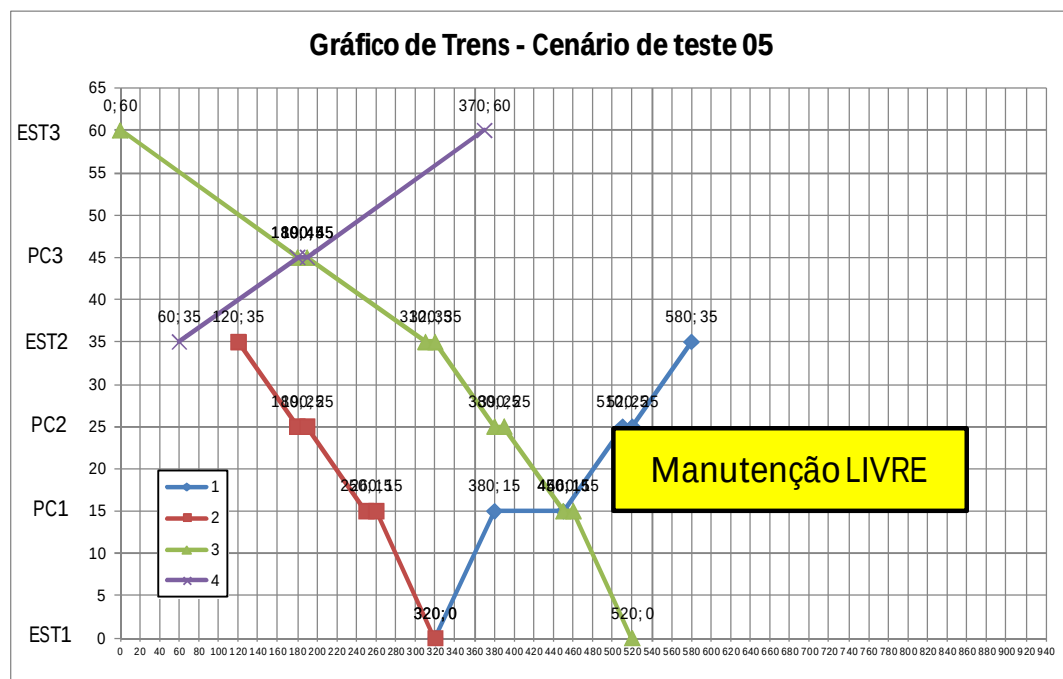


Fonte: Próprio autor

No Cenário de teste 05, com a inserção do “Trem Manutenção” com horário livre, isto é, Janela de tempo de partida e chegada flexíveis e limitadas somente ao horário de trabalho dos funcionários, para ser alocado de maneira a provocar o menor atraso nos demais trens, obteve-se o mesmo resultado do Cenário de teste 02, conforme Figura 15, com apenas 60,0 minutos de atraso, apenas dos cruzamentos de trens.

O “Trem Manutenção” foi alocado num horário que não teve intervenção na operação dos demais trens, mantendo-se dentro do horário de trabalho da equipe de serviço e atendendo ao tempo de execução da tarefa, de 6 horas. O resultado deste cenário pode ser comparado ao Cenário de teste 04 da Figura 14 onde fica evidenciado que com a Janela de tempo flexível, a manutenção da VP foi programada sem intervir na circulação dos trens, eliminando atrasos e otimizando a circulação. O tempo de execução para chegar à solução ótima foi de 1,6 seg.

Figura 15 - Gráfico de trens Cenário de teste 05



Fonte: Próprio autor

Com estes cenários, validaram-se as funcionalidades do modelo, onde foi possível planejar a circulação de trens, incluir prioridades e programar a manutenção da VP de forma a ter menor interferência na circulação dos trens estabelecendo inclusive o horário de início da manutenção.

6.3 Resultados obtidos para os cenários com dados reais da FCA

Na Tabela 11 são apresentados os resultados alcançados pelo CPLEX e o apurado no Caso Real. Na coluna 1, Cenário, tem-se o nome do cenário testado. Na coluna 2, Tempo de Execução, tem-se o tempo que o CPLEX foi executado até chegar à solução. Na coluna 3, CPLEX - Tempo de Viagem, é mostrado o tempo total de viagem de todos os trens da solução obtida pelo CPLEX. Na coluna 4, Caso Real - Tempo de Viagem, apresenta-se o tempo total de viagem de todos os trens do Caso Real. A coluna 5, Tempo, é destacada a redução de tempo de viagem alcançada pelo modelo em relação ao realizado pelo Caso Real. A coluna 6, Percentual, apresenta a redução de tempo alcançada na coluna 5 em termos percentuais.

O Tempo total de viagem do trem engloba a soma de todo o tempo de circulação em cada trecho mais a soma do tempo parado nos pátios de cruzamento.

Tabela 11 - Comparação dos Resultados do CPLEX x Caso Real

Cenário	CPLEX Modelo Proposto		Caso Real	Redução Tempo de Viagem (Modelo x Caso Real)	
	Tempo de Execução	Tempo de Viagem	Tempo de Viagem	Tempo	Percentual de redução
	(s)	(min)	(min)	(min)	(%)
1	11,2	7.123,0	9.353,0	2.230,0	23,8
2	183,3	11.915,0	25.536,0	13.621,0	53,3
3	2,7	4.460,0	6.566,0	2.106,0	32,1
4	3.162,2	26.725,0	36.928,0	10.203,0	27,6
5	1,4	1.286,0	2.941,0	1.655,0	56,3
6	7,4	6.289,0	13.333,0	7.044,0	52,8
7	9,4	5.719,0	6.295,0	576,0	9,2
8	4,7	6.318,0	8.481,0	2.163,0	25,5
9	5,9	5.551,0	6.690,0	1.139,0	17,0
10	1.467,8	10.974,0	26.293,0	15.319,0	58,3

Nos resultados apresentados na Tabela 11 para o Cenário 01 observou-se uma redução de 23,8%. O modelo proposto executado no CPLEX encontrou a solução ótima num tempo de execução de 11,2 segundos. Esse ganho observado pode, eventualmente, ser creditado ao fato de que no processo semiautomatizado, o operador não consegue, em face da complexidade do processo, perceber em tempo hábil todas as possibilidades de resolução de conflitos para avaliá-las e decidir qual é a melhor solução. Em contrapartida, o modelo matemático avalia todas as possibilidades de conflitos e consegue resolver de maneira ótima o sequenciamento de todos os trens com uma visão global de toda a circulação.

Tendo em vista que para alguns trens os ganhos foram muito expressivos em relação ao alcançado no Caso Real, optou-se por uma análise detalhada da operação destes trens. Após a análise, detectou-se que na circulação destes trens, eles ficaram parados ao longo do trecho por diversos motivos que não tinham relação com o cruzamento de trens.

Assim, foi realizada uma análise do Trem Hora Parado (THP) para identificar os motivos que ocasionaram as paradas dos trens e o tempo gasto em cada uma delas.

O tempo gasto em cada parada foi denominado nesta dissertação como Horas Paradas e estas foram descontadas do tempo de viagem, com exceção da Hora Parada por motivo de espera em Pátio de Cruzamento para cruzamento entre trens. Isso foi feito para que a comparação entre os resultados obtidos pelo CPLEX e pela ferrovia fosse realizada de maneira justa.

No caso do Cenário 01 foram registrados 1429,0 minutos de Horas Paradas e este valor foi subtraído do tempo total de viagem dos trens, que foi de 9353,0 minutos e o novo valor passou a ser de 7924,0 minutos, conforme pode ser visto na Tabela 12.

Em todos os cenários ocorreram Horas Paradas e estas foram subtraídas do tempo total de viagem do Caso Real, como realizado com o Cenário 1. Estes valores podem ser vistos na Tabela 12.

Na Tabela 12, a coluna 1, Cenário, tem o nome do cenário testado, as colunas 2 e 3, Tempo de Execução e Tempo de Viagem, representam o tempo de execução do CPLEX até alcançar a solução e o tempo total de viagem de todos os trens. Para o Caso Real, é apresentado na coluna 4, Horas Paradas, o total de horas paradas que foi computado conforme explicado anteriormente e a coluna 5, Tempo de Viagem sem Hora Parada, representa o tempo total de viagem, coluna Tempo de Viagem Total da Tabela 11, subtraindo-se as horas paradas. Na coluna 6, Tempo, é apresentada a redução de tempo de viagem alcançados pelo modelo em relação ao obtido no Caso Real. Por fim, na coluna 7, Percentual, a redução da coluna 6 é apresentada em percentual.

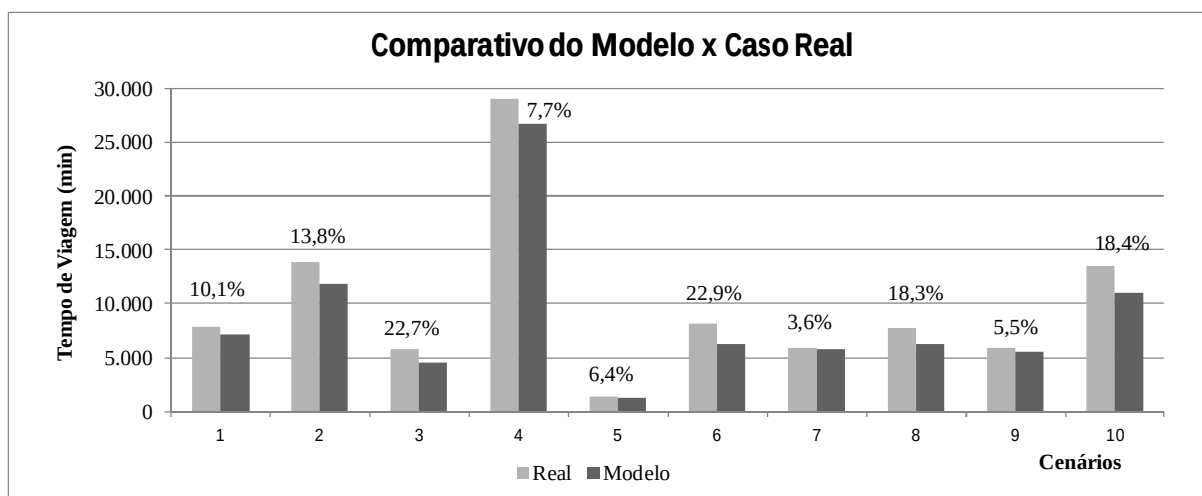
Tabela 12 - Comparação Resultados do CPLEX x Caso Real

Cenário	CPLEX Modelo Proposto		Caso Real		Redução Tempo de Viagem (Modelo x Caso Real)	
	Tempo de Execução	Tempo de Viagem	Horas Paradas	Tempo de Viagem sem Hora Parada	Tempo	Percentual de redução
	(s)	(min)	(min)	(min)	(min)	(%)
1	11,2	7.123,0	1.429,0	7.924,0	801,0	10,1
2	183,3	11.915,0	11.709,0	13.827,0	1.912,0	13,8
3	2,7	4.460,0	797,0	5.769,0	1.309,0	22,7
4	3.162,2	26.725,0	7.950,0	28.978,0	2.253,0	7,7
5	1,4	1.286,0	1.567,0	1.374,0	88,0	6,4
6	7,4	6.289,0	5.180,0	8.153,0	1.864,0	22,9
7	9,4	5.719,0	365,0	5.930,0	211,0	3,6
8	4,7	6318	751	7.730,0	1.412,0	18,3
9	5,9	5551	819	5.871,0	320,0	5,5
10	1.467,8	10974	12849	13.444,0	2.470,0	18,4

Na Tabela 11 pode-se observar que em todos os cenários o modelo conseguiu ganhos em relação ao caso real variando de 3,6% a 22,9%. No gráfico da Figura 16 são apresentados os tempos de viagem registrados no Caso Real e o tempo calculado pelo modelo para cada cenário. Ainda no mesmo gráfico, acima das barras que representam o tempo de viagem, são apresentadas as reduções em percentual do tempo de viagem alcançadas pelo modelo proposto em relação ao Caso Real.

É interessante notar que o modelo proposto conseguiu resolver o maior cenário em termos de pátio de cruzamento, Cenário 4, com 16 trens e 61 pátios de cruzamento, em 52 minutos. Todos os outros cenários foram resolvidos num tempo inferior a 25 minutos. Esses são tempos factíveis para o uso pela FCA do modelo proposto no planejamento diário da circulação de trens.

Figura 16 - Comparação Modelo Proposto x Caso Real



Fonte: Próprio autor

As reduções nos tempos de viagem apresentados na Tabela 12 e Figura 16 possibilitariam mais trens circulando na malha, ou seja, permitiriam um aumento de capacidade de circulação de trens sem necessidade de novos investimentos na infraestrutura ferroviária da FCA.

A redução total do tempo de viagem foi calculada somando-se toda a coluna Tempo e chegou-se, então, a uma redução de 12.640,0 minutos para os 10 cenários, isto é, 12.640,0 minutos que os trens deixaram de ficar parados. Tomando como base que o consumo médio de combustível de uma locomotiva típica da FCA parada (ponto morto) é de aproximadamente 15 litros/hora (0,25 litros/minuto), pode-se inferir que, caso o modelo proposto tivesse sido utilizado para o planejamento dos 10 cenários analisados, por dia seriam economizados 3.098,9 litros de combustível (sem considerar o combustível para os procedimentos de parada e para a partida dos trens).

Tendo em vista que os cenários testados representam uma amostra de alguns dias em alguns corredores da ferrovia, é possível extrapolar que em um ano de 365 dias, para estes corredores da ferrovia, os ganhos financeiros seriam muito mais expressivos. Assim, fazendo uma projeção simples na qual estes cenários se repetiriam ao longo dos dias do ano, é possível ainda ampliar a análise destes resultados para um ano. Considerando 365 dias, poder-se-ia projetar uma economia

de pouco mais de 1,1 milhões de litros de combustível. Considerando ainda o preço médio de um litro de óleo diesel para grandes empresas de R\$ 2,23 (valores estes obtidos no mercado), obtém-se uma economia da ordem de R\$ 2,5 milhões por ano. Estes valores podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 - Possíveis ganhos financeiros

Item	Valor
Tempo Total economizado por dia (minutos)	12.640,00
Tempo Total economizado por ano (minutos)	4.613.600,00
Consumo de diesel (litros/hora)	14,71
Consumo de diesel (litros/minuto)	0,25
Total de litros economizados por dia (litros)	3.098,91
Total de litros economizados por ano (litros)	1.131.100,93
Custo do litro de óleo diesel (R\$)	2,23
Economia possível em um ano (R\$)	2.518.170,01

Por dados estatísticos das ferrovias brasileiras, sabe-se que são emitidos em média 2,7 kg de CO₂ equivalente por litro de diesel consumido pelas locomotivas. Assim, utilizando os valores de redução de combustível encontrados, pode-se estimar uma redução de emissão na atmosfera de aproximadamente 3,0 milhões de quilos de CO₂ equivalente, o que é um número expressivo para o meio ambiente. Estes valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Possíveis ganhos ambientais

Item	Valor
Total de litros economizados por dia (litros)	3.098,91
Total de litros economizados por ano (litros)	1.131.100,93
Emissão de CO ₂ por litro de diesel (kg)	2,70
CO ₂ não emitidos por ano (kg)	3.053.972,52

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um modelo matemático que tem por objetivo maximizar o uso da capacidade das ferrovias de linha singela do Brasil, que representam aproximadamente 98% de todas as ferrovias brasileiras.

O modelo matemático apresentou ganhos de tempo de viagem de 3,6 a 22,9% em comparação com dados reais de tempo de viagem da FCA. Como visto, esses resultados podem gerar uma economia da ordem de R\$ 2,5 milhões por ano somente nos cenários testados e ainda uma redução de emissão de CO₂ da ordem de 3,0 milhões de quilos de CO₂ equivalente.

Apesar desta dissertação não analisar as questões de prioridade dos trens, o modelo matemático permite que sejam implementadas prioridades, bastando para isso estabelecer que os limites de adiantamento e de atraso sejam iguais à hora desejada da partida do trem e que os limites de adiantamento e de atraso sejam iguais à hora desejada de chegada do trem, permitindo ainda que trens tenham sua partida e/ou chegada atrasada ou adiantada, visando otimizar a circulação e pode ainda, considerar a interferência da manutenção propondo melhor horário para iniciar a manutenção de um trecho, que é uma das dificuldades dos gestores das ferrovias.

É importante destacar ainda, que o modelo matemático proposto pode ser aplicado a diversas ferrovias do Brasil e do mundo que possuam linha singela.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

Pelos resultados alcançados, sabe-se que o modelo proposto resolvido de forma exata com o CPLEX consegue resolver instâncias que são compatíveis com a realidade da maioria das ferrovias do Brasil. No entanto, para resolver cenários de maior escala, como por exemplo, ferrovias com maior circulação de trens e/ou com uma maior quantidade de pátios de cruzamento, sugere-se como trabalhos futuros o desenvolvimento de meta-heurísticas para que soluções possam ser obtidas em um tempo computacional aceitável.

REFERÊNCIAS

- ARENALES, M.; Armentano, V.; Morabito, R.; Yanasse, H. **Pesquisa Operacional: para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 526p.
- ASSAD, A. A., **Modeling of rail networks: Toward a routing/makeup model**. Transportation Research Part B 14:101-114, 1980.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Resolução nº 3694**, de 14 de julho de 2011. Disponível em http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4694/Resolucao_n__3695.html, acesso em 11 de abril de 2014.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Resolução nº 3695**, de 14 de julho de 2011. Disponível em http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4695/Resolucao_n__3695.html, acesso em 11 de abril de 2014.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). **Resolução nº 3696**, de 14 de julho de 2011. Disponível em http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4696/Resolucao_n__3696.html, acesso em 11 de abril de 2014.
- BARROS, J. M. F. M. **Avaliação dos principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego utilizados em ferrovia nacional e internacional**. Dissertação de Mestrado – UFMG, Minas Gerais, 2013.
- BLAZEWICZ, J. ; Ecker, k. H.; Pesch, E.; Schmidt, G.; Weglarz, J. **Handbook on scheduling: from theory to applications**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- BORNDÖRFER, R.; Grötschel, M.; Lukac, S.; Mitusch, M.; Schlechte, T.; Schultz, S.; Tanner, A. **An auctioning approach to railway slot allocation**. Technical Report 05–45, Konrad-Zuse-Zentrum für Information stechnik Berlin, 2005.
- BORNDÖRFER, R.; Schlechte, T. **Models for railway track allocation**. Technical Report 07–02, Konrad-Zuse-Zentrum für Informations technik Berlin, 2007a.
- BORNDÖRFER, R.; Schlechte, T. **Solving railway track allocation problems**. Technical Report 07–20, Konrad-Zuse-Zentrum für Information stechnik Berlin, 2007b.
- BRÄNNLUND, U.; Lindberg, P. O.; Nõu, A.; Nilsson, J. E. **Railway timetabling using lagrangian relaxation**. Transportation Science 32(4):358–369, 1998. doi.org/10.1287/trsc.32.4.358
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. v. 2. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos S.A., 1983.
- BRUCKER, P. **Scheduling Algorithms**. 5ª Edição. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

- CACCHIANI, V.; Caprara, A.; Toth, P. **A column generation approach to train timetabling on a corridor**. 4OR 6:125–142, 2008. doi 10.1007/s10288-007-0037-5
- CACCHIANI, V.; Caprara, A.; Toth, P. **Scheduling extra freight trains on railway networks**. Transportation Research Part B 44(2):215–231, 2010. doi:10.1016/j.trb.2009.07.007
- CACCHIANI, V.; Toth, P. **Nominal and robust train timetabling problems**. European Journal of Operational Research, Vol. 219(3):727–737, 2012. doi:10.1016/j.ejor.2011.11.003
- CACCHIANI, V.; Galli, L.; Toth, P. **A tutorial on non-periodic train timetabling and platforming problems**. EURO Journal on Transportation and Logistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. doi:10.1007/s13676-014-0046-4
- CAI, X.; Goh, C. J. **A fast heuristic for the train scheduling problem**. Computers & Operations Research 21 (5): 499–510, 1994.
- CAI, X.; Goh, C. J.; Mees, A. I. **Greedy heuristics for rapid scheduling of trains on a single track**. IIE Transactions 30:481–493, 1998.
- CAPRARA, A.; Fischetti, M.; Toth, P.; **Modeling and solving the train timetabling problem**. Operations Research 50(5):851–861, 2002.
- CAPRARA, A.; Monaci, M.; Toth, P.; Guida, P.L. **A Lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem**. Discrete Applied Mathematics 154:738–753, 2006. doi:10.1016/j.dam.2005.05.026
- CAREY, M. **A model and strategy for train pathing with choice of lines, platforms, and routes**. Transportation Research Part B 28(5):333–353, 1994.
- CAREY, M.; Lockwood, D. **A model, algorithms and strategy for train pathing**. The Journal of the Operational Research Society 46(8):988–1005, 1995.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE(CNT). **Pesquisa CNT de Ferrovias 2011**. Brasília: CNT, 2011.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE(CNT). **Transporte e Economia – O Sistema Ferroviário Brasileiro**. Brasília: CNT, 2013.
- CORDEAU, J. F. ; Toth, P. ; Vigo, D. **A survey of optimization models for train routing and scheduling**. Transportation Science Vol. 32(4):380–404, 1998. doi.org/10.1287/trsc.32.4.380
- CRAINIC, T. G. **Long Haul Freight Transportation**. Handbook of Transportation Science. R.W. Hall (Ed.), 2nd Edition, Kluwer, 2002.
- DALL' ORTO, L. C.; Crainic, T. G.; Leal, J. E.; Powell, W. B. **The single-node dynamic service scheduling and dispatching problem**. European Journal of Operational Research, vol. 170(1), p.1–23, 2006 doi:10.1016/j.ejor.2004.06.016

- DUNDAR, S., Sahin, I. **Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways**. Transportation Research Part C 27: 1-15. 2013 . doi:10.1016/j.trc.2012.11.001
- FABRIS, S.; Longo, G. ; Medeossi, G. ; Pesenti, R. **Automatic generation of railway timetables based on a mesoscopic infrastructure model**. Journal of Rail Transport Planning and Management 4:2–13, 2014. DOI:10.1016/j.jrtpm.2014.04.001
- FONSECA NETO, R. **Modelo de planejamento e otimização ferroviário**. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1986.
- GOMES, C. M. N. **Análise do Desempenho Operacional de Pátios Ferroviários**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1982.
- HAMACHER, F. C. **Logística Ferroviária: Resolução do problema de alocação ótima de vagões e locomotivas no curto prazo**. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- HARROD, S. S. **A tutorial on fundamental model structures for railway timetable optimization**. Surveys in Operations Research and Management Science, vol. 17 p. 85–96, 2012. doi:10.1016/j.sorms.2012.08.002
- HARROD, S. S. **A Method for Robust Strategic Railway Dispatch Applied to a Single Track Line**. Transportation Journal, vol. 52(1) p. 26–50, 2013. DOI:10.1353/tnp.2013.0002
- HAY, W. **Railroad Engineering**. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1982.
- HIGGINS, A.; Kozan, E.; Ferreira, L. **Optimal scheduling of trains on a single line track**. Transportation Research Part B 30(2):147–161, 1996.
- HIGGINS, A.; Kozan, E.; Ferreira, L. **Heuristic techniques for single line train scheduling**. Journal of Heuristics 3:43–62, 1997.
- IBM, IBM ILOG **CPLEX Optimization Studio**. Disponível em https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/jfp/entry/cplex_studio_in_ibm_academic_initiative?lang=en Acesso em: 24 de fevereiro de 2015.
- JOVANOVIĆ, D.; Harker, P. T. **Tactical scheduling of rail operations: the scan I system**. Transportation Science 25(1):46–64, 1991.
- KRAAY, D.; Harker, P. T.; Chen, B. **Optimal pacing of trains in freight railroads: model formulation and solution**. Operations Research 39(1):82–99, 1991.
- LEAL, J. E.; Soares, A. C.; Nunes, L. S. N. **Uma abordagem heurística para o problema de programação de trens em linhas singelas**. In: XVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – Florianópolis, 2004.
- LIU, S. Q.; Kozan, E. **Scheduling trains as a blocking parallel-machine job-shop scheduling problem**. Computers and Operations Research Vol. 36(10): 2840-

2852, 2009. doi:10.1016/j.cor.2008.12.012

- LIU, S. Q.; Kozan, E. **Scheduling Trains with Priorities: A No-Wait Blocking Parallel-Machine Job-Shop Scheduling Model**. *Transportation Science* Vol. 45(2):175–198, 2011. doi 10.1287/trsc.1100.0332
- LUSBY, R. M.; Larsen, J. Ehrgott, M.; Ryan, D. **Railway track allocation: models and methods**. *OR Spectrum*; vol. 33, p. 843-883, 2011. doi: 10.1007/s00291-009-0189-0
- NIJKAMP, P.; Vleugel, J. M.; Kreutzberger, E. **Assessment of capacity in infrastructure networks: a multidimensional view**. *Transportation Planning and Technology*, vol. 17(4): 301-310, 1993. doi: 10.1080/03081069308717521
- OLIVEIRA, E.; Smith, B. M. **A Job shop scheduling model for the single track-railway timetabling problem**. Technical Report 21, University of Leeds, 2000.
- PINEDO, M. L. **Planning and Planejamento in Manufacturing and Services**. Springer Series Operation Research: New York, USA, 2005.
- PINEDO, M. L. **Theory, Algorithms and Systems**. Springer. New York, USA, 2008.
- RATTON NETO, X. H. **Padrões para manutenção da via permanente**. 1985. 177 p. Dissertação de Mestrado em Transporte – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1985.
- REIMANN, M., Leal, J. E. **Single line train scheduling with ACO**. In *ProceedingEvoCOP'13 Proceedings of the 13th European conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Pages 226-237Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2013. doi 10.1007/978-3-642-37198-1
- RIVES, F. O.; Mendez, M. R.; Puente, M. M. **Tratado de Explotacion de Ferrocarriles (Planificacion)**, vol. I, Editora Rueda, Madri, 1983.
- ROSA, R. A. **Ferrovias: Conceitos Essenciais**. Instituto Histórico e Geográfico do Espírito Santo, 2004.
- SABINO, J. A.; **Otimização com colônia de formigas aplicada a programação de operações de locomotivas de manobras**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- SAHIN, I. **Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management**. *Transportation Research Part B* 33:511–534, 1999.
- SAUDER, R.; Westerman, W. M. **Computer aided train dispatching: decision support through optimization**. *Interfaces* 6:24–37, 1983. doi: 10.1287/inte.13.6.24
- SZPIGEL, B. **Optimal train scheduling on a single line railway**. *Operation Research*: 72:344–351.1973.

- SZPIGEL, B. **Sequenciamento de Trens**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 1972.
- TAZONIERO, A. **Estratégias de decisão para o planejamento de circulação de trens em tempo real**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas: Campinas, São Paulo, 2007.
- TÖRNQUIST, J., 2006. **Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: a review of models and algorithms**. 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways, (Dagstuhl, Germany). Dagstuhl Research Online Publication Server, 2006. doi: 10.4230/OASIcs.ATMOS.2005.659
- TÖRNQUIST, J.; Persson, J. A. **N-tracked railway traffic rescheduling during disturbances**. Transportation Research Part B 41(3):342–362, 2007. doi:10.1016/j.trb.2006.06.001
- TÖRNQUIST, J. **N Design of an effective algorithm for fast response to the re-scheduling of railway traffic during disturbances**. Transportation Research Part C vol. 20(1): 62–78, 2012. doi:10.1016/j.trc.2010.12.004
- VLI. **Valor Logística Integrada**. 2014. Disponível em <<http://www.vli-logistica.com.br>>. Acesso em 07 Outubro 2014.
- VERGARA, S.C. **Projeto e relatórios de pesquisa em administração**. 14. Ed. São Paulo: Atlas, 2013.
- Zhou, X., Zhong, M. **Single-track train timetabling with guaranteed optimality: branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds**. Transportation Research Part B 41 (3): 320–342. 2007. doi:10.1016/j.trb.2006.05.003