



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

JORGE UBIRAJARA PEDREIRA JÚNIOR

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE
CARGAS NA FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE LESTE (FIOL)



SALVADOR
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial - PEI

JORGE UBIRAJARA PEDREIRA JÚNIOR

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGAS NA
FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE LESTE (FIOL)**

Salvador
2015

JORGE UBIRAJARA PEDREIRA JÚNIOR

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGAS NA
FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE LESTE (FIOL)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientadores: Ademar Nogueira do Nascimento
Cristiano Hora de Oliveira Fontes

Salvador

2015

P371

Pedreira Júnior, Jorge Ubirajara

Modelagem, simulação e otimização do transporte de cargas na Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL)/ Jorge Ubirajara Pedreira Júnior. – Salvador, 2015.

151 p.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ademar Nogueira do Nascimento.

Co-orientador: Prof. Dr. Cristiano Hora de Oliveira Fontes.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2015.

1. Transporte ferroviário de carga. 2. Simulação (Computadores). 3. Otimização matemática. 4. Logística. I. Nascimento, Ademar Nogueira do. II. Fontes, Cristiano Hora de Oliveira. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 625.4

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGAS NA
FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE LESTE**

JORGE UBIRAJARA PEDREIRA JÚNIOR

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Ademar Nogueira do Nascimento _____
Doutor em Engenharia Química, Brasil, 2006;

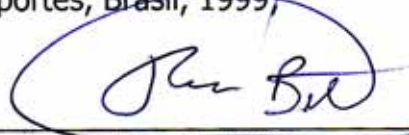


Prof. Cristiano Hora de Oliveira Fontes _____
Doutor em Engenharia Química, Brasil, 2001;

Prof^a. Ilce Marília Dantas Pinto de Freitas _____
Doutora em Engenharia de Transportes, Brasil, 1999;



Prof. Rui Carlos Botter _____
Doutor em Engenharia Naval e Oceânica, Brasil, 1992;



Salvador, BA - BRASIL
dezembro/2015

Conforme resolução do Programa, o conjunto de orientadores teve a representação de 1 (um) único voto no parecer final da banca examinadora.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Lívia e Jorge,
e ao meu irmão Kaio,
tudo o que tenho de mais precioso nessa vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, aos meus orientadores Ademar Nogueira do Nascimento e Cristiano Hora de Oliveira Fontes, pela oportunidade concedida, conhecimentos e experiências transmitidos ao longo desse processo.

À minha família, pela paciência, incentivo e patrocínio no início de uma longa jornada acadêmica que pretendo seguir.

Aos meus amigos, pelas valiosas contribuições a este trabalho. Em especial, Bernardo Pereira Cabral, meu economista predileto e gigante particular em cujos ombros venho me apoiando há quase uma década, pela revisão do texto sobre as perspectivas histórico-econômicas do mercado do minério de ferro. Bruno Fernandes, pelas dicas sempre bem-vindas de um discente com notável desempenho acadêmico. Mateus Eça, pelo grande companheirismo e experiências compartilhadas desde o início do mestrado.

Aos meus colegas de graduação da Universidade Federal de Viçosa, especialmente Luiz Paulo da Cruz Scarp, ex-companheiro de república e hoje mestre pela UFMG, com quem muito aprendi e continuo aprendendo, principalmente durante nossa jornada simultânea de mestrado.

Aos queridos Tati e Robinson, membros do Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial, pelo inestimável apoio em todos os procedimentos curriculares.

Aos entes públicos e privados: VALEC, Governo do Estado da Bahia, Agência Nacional dos Transportes Terrestres, Bahia Mineração e Thyssenkrupp pelo fornecimento e atualização de informações, disponibilidade para entrevistas e oportunidades para apresentação do trabalho desenvolvido.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia, pela concessão da bolsa e subsídio a todas as atividades de pesquisa.

“Sem dúvida, a implantação da Transulamericana, usando o modal dentro de seu fim precípua (...) contribuirá, decisivamente, para formar gerações de mentalidade ferroviária autêntica”

Vasco Azevedo Neto

RESUMO

A expansão do modal ferroviário brasileiro tem sido um tema central no contexto de políticas públicas para o desenvolvimento nacional. São inúmeras as contribuições do transporte ferroviário para a competitividade de um país de dimensões continentais e exportador de *commodities*. Motivado por esse propósito, este trabalho apresenta um estudo de do futuro transporte de cargas na Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL), em fase de construção nos estados do Tocantins e Bahia, conectando a Ferrovia Norte Sul, em Figueirópolis-TO, ao Porto Sul, em Ilhéus-BA. Este trabalho se justifica em função da queda acentuada dos preços das *commodities* que compõem a maior proporção de receitas da FIOL (especialmente, o minério de ferro), além das restrições orçamentárias enfrentadas pelos entes públicos e privados que reduziram a oferta de recursos de infraestrutura deste empreendimento. Como consequência, problemas de capacidade poderão surgir em um novo cenário que ainda não foi avaliado pelos *stakeholders* do negócio. Sendo assim, um estudo de Modelagem, Simulação e Otimização de caráter determinístico foi proposto com o mérito de identificar os gargalos do processo, fornecendo soluções economicamente eficientes para resolvê-los. Foram modelados, em nível conceitual, os macroprocessos de circulação, carregamento e descarregamento de trens. A partir dos estudos operacionais e de licenciamento da FIOL e do Porto Sul, foi possível alimentar esse modelo com os dados relativos a cada atividade relativa a esses macroprocessos. Com o processo descrito e os dados coletados, o modelo computacional foi implementado no *software* Arena[®], onde as simulações foram realizadas. Posteriormente, o modelo foi validado de acordo com critérios objetivos, avaliando-se a diferença entre os resultados das simulações e do comportamento esperado do sistema. A partir de então, conduziu-se uma série de experimentos onde foi possível identificar/reconhecer os macroprocessos de carregamento e descarregamento como gargalos do sistema. Por fim, uma análise de otimização foi realizada, visando proporcionar um portfólio de investimentos ótimo para resolver os problemas de capacidade do sistema. Utilizando-se a meta-heurística *Scatter Search*, executada pelo *software* OptQuest, buscou-se minimizar uma função de investimento total em infraestrutura, respeitando restrições de oferta mínima de cada mineradora envolvida no negócio. Analisando-se os resultados, foi possível constatar que uma permutação simples na solução fornecida pelo programa (2 silos de carregamento com menor capacidade por 1 silo com maior capacidade) conseguiu melhorar o valor da função objetivo, destacando a importância de uma visão crítica sobre os resultados obtidos nesse tipo de análise.

Palavras-chave: simulação, otimização, logística, transporte ferroviário

ABSTRACT

Rail transport expansion is a major issue in the context of public policies for the Brazilian development. There are many advantages from this means of transportation, especially for a commodity-exporter and continental-dimension country. Driven by this purpose, this work presents a study concerning the freight transport in the West East Integration Railroad (FIOL), under construction in the states of Tocantins and Bahia (Brazil). This railroad will connect the North-South Railroad, in the town of Figueirópolis (State of Tocantins), to the South Port, in the town of Ilhéus (State of Bahia). The sharp drop in the commodities' prices - accounting for the larger proportion of FIOL revenues (especially iron ore) - together with budget constraints - faced by public and private sector involved - justify and highlight the importance of this study. Capacity-related problems may arise in a scenario that has not been evaluated yet by the stakeholders. A deterministic Modeling, Simulation and Optimization study was proposed to identify the process' bottlenecks and to provide feasible and economically efficient solutions to the system. First, traffic, loading and unloading train operations were modeled at a conceptual level. Afterwards, the input data were obtained from FIOL and South Port operational and licensing reports to quantitatively describe the model. Then, a computational model was implemented in the Arena[®] software, in order to run the simulations. The model was validated according to objective criteria, assessing the difference between the simulation results and the expected system operation. Subsequently, a series of experiments were carried out, enabling the identification/recognition of loading and unloading as the bottlenecks of the system. Finally, an optimization analysis was conducted to provide an optimal investment portfolio to solve the capacity drawbacks of the system. The problem was solved using a Scatter Search meta-heuristic method in the OptQuest software, aiming at minimizing a total infrastructure investment function, subject to the minimum supplying from the mining companies involved. In a post-optimization analysis, it was found that a simple permutation on the solution provided by the software (1 higher-capacity silo instead of 2 lower-capacity silo) enabled further improvements in the objective function, highlighting the importance of a critical approach regarding the results obtained from this kind of analysis.

Keywords: simulation, optimization, logistics, rail transport

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Indicadores de desempenho logístico por país (BRICS).....	23
Figura 2 – Percentual da quantidade de carga transportada por modal no Brasil	24
Figura 3 – Regiões de preferência pelos modais ferroviário e rodoviário em termos de carga e distância.....	25
Figura 4 - Traçado da FIOl entre a FNS e o Porto Sul.	27
Figura 5 - Extensão da malha ferroviária nacional entre 1854 e 2012	30
Figura 6 - Carga transportada por via ferroviária no Brasil em toneladas úteis (tu) entre 2006 e 2013.....	31
Figura 7 - Traçado da FNS entre Barcarena (PA) e Estrela D'Oeste (SP).....	33
Figura 8 - Mapa da Hidrovia do São Francisco.....	34
Figura 9 - Mapa de abrangência da Ferrovia Centro Atlântica	35
Figura 10 - Representação do CLIPS	36
Figura 11 - Trecho em Construção da FIOl	37
Figura 12 - Série histórica da produção de soja no estado da Bahia (em 10 ³ t).....	37
Figura 13 – Proporção da receita anual prevista por produto transportado na FIOl entre 2015 e 2045. Fonte: BRASIL (2010)	39
Figura 14 - Variação do preço do minério de ferro no mercado à vista entre os anos de 2000 e 2015.....	40
Figura 15 - Representação das linhas singela e dupla em um trecho de ferrovia.....	43
Figura 16 - Representação de um pátio de cruzamento.....	44
Figura 17 - Representação de um pátio de atividades	44
Figura 18 - Representação de um entroncamento ferroviário	44
Figura 19 - Esquema de comunicação telemática entre os trens e o CCO.....	46
Figura 20 - Sistema de Bloqueio Fixo entre dois pátios	47
Figura 21 - Representação de um gráfico horário de cruzamento de trens em linha singela	50
Figura 22 - Gráfico horário da circulação de trens durante um intervalo de tempo Δt	50
Figura 23 - Possíveis impactos dos parâmetros elencados por Krueger (1999) nas variáveis custo, segurança e eficiência operacional das ferrovias.....	52
Figura 24 - Estrutura do método para a execução da modelagem, simulação e análise do sistema ...	77
Figura 25 - Definição geográfica do sistema a ser modelado.....	79
Figura 26 - Origem das cargas movimentadas no sistema FIOl	81
Figura 27 - Propagação de filas em um sistema ferroviário em circuito fechado (operando com trens de ciclo)	82
Figura 28 – Resolução de conflitos de movimento de trens na FIOl.....	84
Figura 29 - Travamento de trens na malha.....	85
Figura 30 - Resolução de conflito para dois trens em sentidos contrários	86
Figura 31 - Resolução do conflito para 3 trens	87
Figura 32 - Resolução de conflitos para 2 pares de trens em sentidos contrários.....	88
Figura 33 - Esquema dos pátios P28, P26, linhas de trânsito principal (LP) e desviada (LD), auxiliares (LA) e para carregamento (LC)	90
Figura 34 - Sequência de movimentos do trem BAMIN para carregar, acessando o P28 (1), movendo-se para uma linha auxiliar (2), carregando (3) e voltando por uma linha auxiliar (4) para retornar à FIOl	90
Figura 35 - Resolução de conflitos no processo de carregamento (trens de minério de ferro).....	91
Figura 36 - Travamento causado pelo não atendimento das condições i) e iii), respectivamente, do algoritmo de atividade de carregamento (Figura 35)	92
Figura 37 - Representação dos últimos dois pátios da FIOl e o acesso à região <i>onshore</i> do Porto Sul.....	93
Figura 38 - Resolução de conflitos no processo de descarregamento dos trens de minério de ferro ..	94

Figura 39 - Animação contendo a malha ferroviária modelada.....	103
Figura 40 - Pseudocódigo do método <i>Scatter Search</i> para um problema de minimização.....	108
Figura 41 - Evolução dos valores de tempo de ciclo médio ao longo de uma replicação	111
Figura 42 - Trens trafegando em sentidos opostos no mesmo segmento duplicado	113
Figura 43 - Animação da resolução do conflito para 2 trens em sentidos contrários	113
Figura 44 - Animação da resolução do conflito de travamento.....	114
Figura 45 - Animação da sequência de movimento dos trens no carregamento.....	115
Figura 46 - Representação do processo de descarregamento na animação de cenários	116
Figura 47 - Impacto do aumento do número de trens CR/SF carregando no P34	119
Figura 48 – Curvas do total de minério entregue no porto anualmente (Total, BAMIN e CR/SF) com a variação no número de trens CR/SF	120
Figura 49 – Curvas dos tempos médios em filas/dia por causa. Legenda dos motivos: TF_{LIC} = licenciamento; TF_{CBM_EXT} = Carregamento BAMIN (externo); TF_{CBM_INT} = Carregamento BAMIN (interno); TF_{CCR/SF_EXT} = Carregamento CR/SF (externo); TF_{CCR/SF_INT} = Carregamento CR/SF (interno); TF_{Desc_EXT} = Descarregamento (externo); TF_{Desc_INT} = Descarregamento (interno).....	121
Figura 50 – Efeito da espera no carregamento na circulação pela FIOL.....	122
Figura 51 - Impacto da melhoria do tempo de carregamento CR/SF no tempo de ciclo dos trens	123
Figura 52 - Impacto do aumento no número de silos CR/SF no tempo de ciclo dos trens.....	123
Figura 53 - Tempo médio em filas/dia por motivo carregamento CR/SF decrescendo (linhas contínuas) e motivo descarregamento crescendo (linhas pontilhadas) com a melhoria da capacidade do silo CR/SF.....	124
Figura 54 - Taxa de ocupação do virador de vagões (azul) e do silo CR/SF (vermelho) com alteração no tempo de carga do silo CR/SF	124
Figura 55 - Representação da área <i>onshore</i> suprimida (preto e branco) na nova concepção do Porto Sul para uma primeira etapa de operação.....	126
Figura 56 - Impacto do aumento do número de trens CR/SF nos tempos de ciclo na nova perspectiva (linhas contínuas) em relação à original (linhas pontilhadas)	127
Figura 57 - <i>Knock-on effect</i> na FIOL devido à espera para descarregar no porto, quando se desconsidera o terminal de descarga de minério no porto público e utiliza-se um virador de vagões simples no TUP BAMIN	128
Figura 58 - Impacto da variação no tempo de descarga do virador de vagões (VV) sobre o tempo de ciclo dos trens	129
Figura 59 - Impacto do aumento do número de virador de vagões no tempo de ciclo dos trens	129
Figura 60 - Tempo médio em filas/dia por motivo carregamento CR/SF aumentando (linhas pontilhadas) e motivo descarregamento decrescendo (linhas contínuas) com a melhoria da capacidade do virador de vagões	130
Figura 61 - Taxa de ocupação do virador de vagões (azul) e do silo CR/SF (vermelho) com alteração no tempo de descarga do virador de vagões.....	131
Figura 62 – Cenário básico de formação de filas por motivo licenciamento para cada pátio, considerando-se entre 8 e 11 trens CR/SF	133
Figura 63 - Evolução do valor da função objetivo ao longo das iterações.....	140
Figura 64 - Nova execução da simulação com solução inicial modificada	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo da proporção de carga e do custo de transporte por modal no Brasil e nos EUA em 2012	25
Tabela 2 - Alternativas de escoamento da soja do oeste baiano e razões da rejeição.....	38
Tabela 3 - Lista de pátios e suas localizações entre Caetité e Ilhéus nas duas fases de instalação ...	79
Tabela 4 - Parâmetros considerados na modelagem	96
Tabela 5 – Elementos do Arena® e associação com o modelo proposto	101
Tabela 6 - Diferenças percentuais entre os tempos de ciclo, de carregamento e de descarregamento nos dois patamares da 1ª fase de operação da FIOL.....	117
Tabela 7 – Redução dos tempos de ciclo (em %) de BAMIN e CR/SF para cada cenário de duplicação para 8, 9, 10 e 11 trens CR/SF	134
Tabela 8 - Caracterização dos variáveis de decisão do modelo	139
Tabela 9 - Resultados da otimização com incrementos de 5%, 10% e 20% dos <i>Ok</i> de cada mineradora.....	143

SUMÁRIO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA	1
DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	9
RESUMO	13
ABSTRACT	14
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 INFRAESTRUTURA E A LOGÍSTICA DE TRANSPORTE.....	21
1.2 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	26
1.3 OBJETIVO GERAL.....	28
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
2 ASPECTOS CONJUNTURAIS E O SISTEMA FIOI	29
2.1 O TRANSPORTE FERROVIÁRIO BRASILEIRO	29
2.2 A FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE LESTE (FIOI)	32
2.2.1 Integração Logística	32
2.2.2 Aspectos técnicos	36
2.2.3 Aspectos históricos	37
2.2.4 Aspectos econômicos	39
2.2.5 Consequências para a FIOI.....	42
3 CAPACIDADE DE TRANSPORTE EM FERROVIAS	43
3.1 ELEMENTOS DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO	43
3.1.1 Infraestrutura ferroviária	43
3.1.2 Controle de tráfego ferroviário.....	45
3.1.3 Dinâmica de material rodante.....	47
3.2 DESEMPENHO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO	48
4 MODELAGEM E ANÁLISE DE SISTEMAS FERROVIÁRIOS	53
4.1.1 Estudos de Otimização	55
4.1.2 Estudos de Simulação.....	60
4.1.3 Estudos com métodos híbridos de Simulação-Otimização.....	71
4.1.4 Análise e Discussão dos Trabalhos	72
4.1.5 Trabalhos mais Relevantes para esta Pesquisa	74
5 MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGAS NA FIOI	76

5.1	ESTRUTURAÇÃO DO MÉTODO	76
5.2	MODELAGEM DO TRANSPORTE DE CARGAS NA FIOLE.....	78
5.2.1	Representação dos trens de ciclo.....	81
5.2.2	Circulação de Trens na FIOLE.....	83
5.2.3	Carregamento de Trens.....	89
5.2.4	Descarregamento de Trens	93
5.2.5	Parâmetros do modelo.....	95
5.3	SIMULAÇÃO DO MODELO.....	97
5.3.1	Avaliação do desempenho logístico do sistema	98
5.3.2	Implementação computacional	100
5.4	ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO	104
5.4.1	Definição do modelo de otimização	104
5.4.2	Meta-heurística Scatter Search	105
6	RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO	111
6.1	VALIDAÇÃO DO MODELO	112
6.1.1	Adequação às regras dos macroprocessos.....	112
6.1.2	Aderência às variáveis de saída da simulação	116
6.2	IMPLICAÇÕES DAS ALTERAÇÕES NO PROJETO ORIGINAL DO SISTEMA.....	118
6.2.1	Alteração no volume de cargas movimentadas previsto.....	118
6.2.2	Solução para o gargalo no carregamento CR/SF	122
6.2.3	Alteração na região onshore do Porto Sul	125
6.2.4	Soluções para o gargalo na região de descarregamento	128
6.3	EFEITOS DE MELHORIAS NO MACROPROCESSO DE CIRCULAÇÃO DE TRENS.....	131
6.4	DESENHO ÓTIMO DE INFRAESTRUTURA.....	135
6.4.1	Variáveis de decisão do modelo	135
6.4.2	Modelo de otimização desenvolvido	136
6.4.3	Resultados da otimização.....	140
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	145
8	REFERÊNCIAS	149

1 INTRODUÇÃO

A economia brasileira está posicionada no 7º lugar do *ranking* mundial, de acordo com a dimensão do seu produto interno bruto (WORLD BANK, 2013). Apesar da posição de destaque entre as maiores economias do mundo, pode-se considerar que o Brasil não possui um ambiente de negócios que propicie a sustentabilidade deste resultado. Segundo o relatório de competitividade global do Fórum Econômico Mundial relativo aos anos de 2013 e 2014, o Brasil é somente o 56º país mais competitivo dentre os 148 analisados (SCHWAB et al., 2013). Este documento elenca a oferta inadequada de infraestrutura, incluindo movimentação de cargas, como o principal impedimento para se fazer negócios, seguida de um sistema tributário ineficaz, excesso de burocracia, regulações trabalhistas restritivas, corrupção e baixa qualificação da força de trabalho. Outras importantes fontes de referências como o anuário de competitividade mundial do *International Institute for Management Development* (IMD), divulgado pela Fundação Dom Cabral (FDC, 2014), além do relatório de desempenho de competitividade industrial, elaborado pela Organização para o Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas (ANDREONI, 2013), endossam esse resultado indesejável da economia brasileira.

1.1 Infraestrutura e a Logística de Transporte

Uma das operações mais afetadas por esse conjunto de ineficiências é a logística das organizações. Ballou (2006) define logística como a gestão do fluxo de matérias-primas, estoque e produtos acabados, desde a organização produtora até o consumidor final, incluindo todas as atividades importantes para a disponibilização dos produtos e serviços no local e prazos requisitados pelos clientes de uma cadeia produtiva. Este ramo da ciência compreende, basicamente, as funções de armazenagem, estoque e transporte de bens ao longo da cadeia de suprimentos, que pode ser regional ou global. A capacidade de executar essas funções de forma eficiente é, portanto, um fator decisivo para incrementar a competitividade de empresas e países. Partindo desse pressuposto, o Banco Mundial (ARVIS et al., 2014) computa periodicamente o indicador de desempenho logístico (LPI, acrônimo em língua inglesa), através do relatório “Conectando para Competir”, com a finalidade de mensurar a grau de maturidade logística das nações. De acordo com

este referencial, o Brasil ocupa a 65ª posição em um total de 160 países investigados e é interessante notar que esta métrica considera 6 índices distintos, a saber:

- a) Alfândega: eficiência nos processos de desembaraço de fronteira;
- b) Infraestrutura: qualidade da infraestrutura de comércio e transporte;
- c) Facilidade de organizar expedições: capacidade de organizar embarques a preços competitivos;
- d) Competência logística: eficiência em serviços como transporte, expedição e despacho aduaneiro;
- e) Rastreamento e acompanhamento: habilidade para rastrear e acompanhar remessas;
- f) Pontualidade: frequência com que as remessas atingem os destinatários dentro da programação.

Cada indicador representa uma variável de entrada (3 primeiras) ou de saída (3 últimas) do processo logístico, avaliadas em uma escala de 1 a 5. Em suma, mede-se o esforço de uma nação via políticas regulatórias e a eficácia destas práticas. Para demonstrar a relativa carência nacional em termos globais, a Figura 1 enfatiza a penúltima colocação do Brasil no LPI em relação aos países que compõem as principais economias emergentes, conhecidos como “BRICS”: Brasil (65º), Rússia (90º), Índia (54º), China (28º) e África do Sul (34º). Também é possível observar a posição relativa brasileira em cada perspectiva.

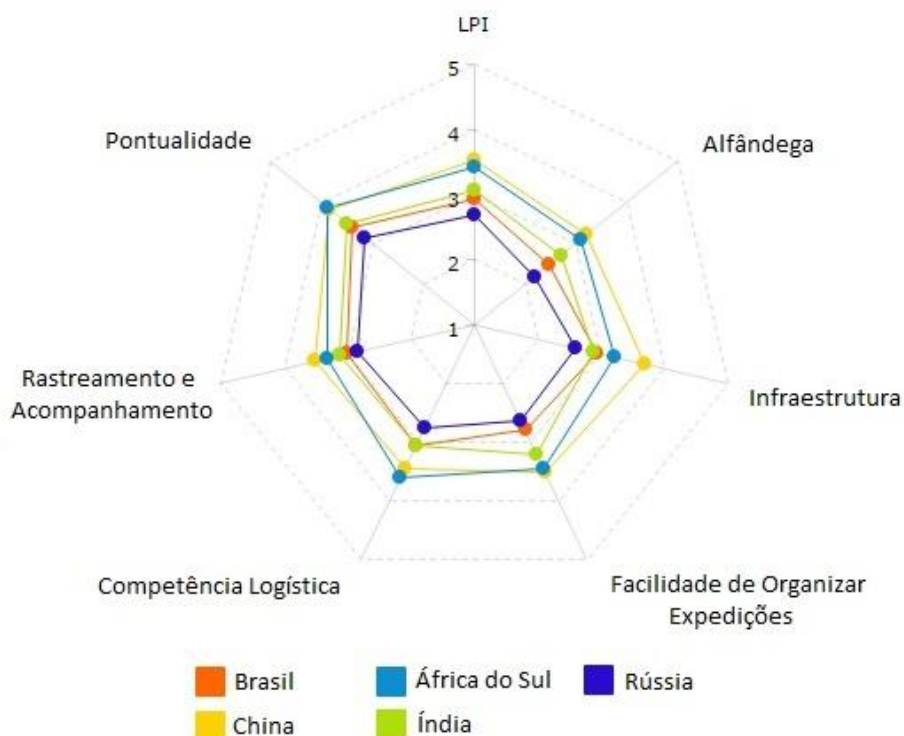


Figura 1 – Indicadores de desempenho logístico por país (BRICS)
 Fonte: Adptado de ARVIS e colaboradores (2014)

Arvis e colaboradores (2014) apontam que uma logística ineficiente é diretamente responsável pelo aumento dos custos de produtos e serviços e pela redução do potencial de integração global. Em particular, o custo do transporte de cargas é bastante significativo para a maioria das empresas. Estima-se que os gastos com movimentação de carga compreendam entre um e dois terços do custo logístico total das organizações (BALLOU, 2006). Especificamente no Brasil, uma pesquisa realizada com diversos setores produtivos (ILOS, 2014) indica que os gastos com transporte são da ordem de 4,7% da receita líquida das empresas, ao passo que 2,1% são provenientes de armazenagem e 1,9% com estoques, somando 8,7% de custo logístico total médio em relação a esse resultado.

Em verdade, parte considerável do elevado custo de movimentação de cargas no Brasil está associado a dois fatores preponderantes: a composição inadequada da matriz de transportes e a precariedade da infraestrutura viária nacional. O primeiro fator diz respeito a uma excessiva proporção do modal rodoviário em detrimento dos demais (Figura 2), resultado de sucessivas e inapropriadas políticas de governo ao longo do século XX. Isto porque esse modal de transporte não é o mais indicado para uso em longas distâncias e que envolvam cargas muito pesadas.

Logo, configura-se como indesejável para um país de dimensões continentais e exportador de *commodities* como minério de ferro e soja, a exemplo do Brasil.

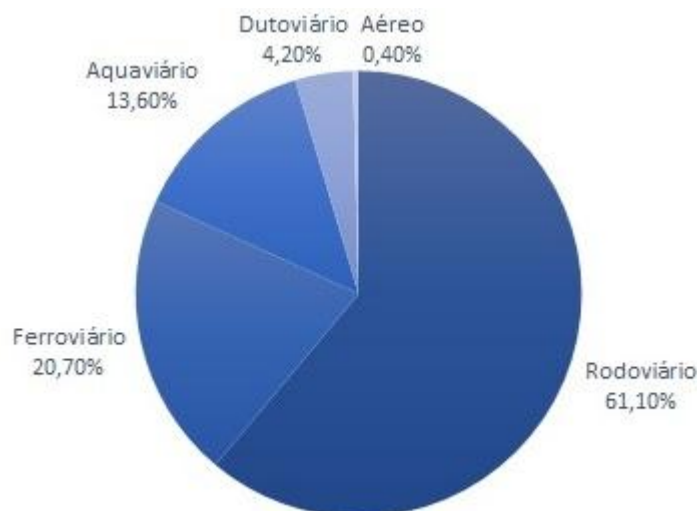


Figura 2 – Percentual da quantidade de carga transportada por modal no Brasil
Fonte: CNT, (2015)

O segundo fator evidencia a situação crítica do modal rodoviário no Brasil. De fato, em razão de somente 20% dos cerca de 1,7 milhões quilômetros de estradas nacionais serem pavimentadas, o custo final da movimentação de mercadorias é encarecido em torno de 25%, segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2014). Para endossar essa evidência com uma estatística similar, um estudo sobre carga extra na indústria brasileira realizado pela Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) revela que dos R\$ 68,2 bilhões gastos com transportes em grandes indústrias, aproximadamente R\$ 13,7 bilhões (20% do total) são provenientes dos custos advindo de deficiências estruturais das rodovias brasileiras (FERNANDES et al. 2012). Esses custos concentram-se basicamente em inconvenientes com atrasos e esperas (65%) e manutenções devido às más condições de estrada (35%).

Para fins de comparação, a Tabela 1 confronta os percentuais de carga transportada em tonelada por quilômetro útil (tku) e o custo de transporte de cada modal do Brasil em relação aos Estados Unidos (9º lugar no *ranking* LPI). É possível observar a importância dos modais, principalmente o ferroviário, o aquaviário e o dutoviário, na realidade norte-americana, impulsionando a competitividade em termos de estratégia de custo para esse país.

Tabela 1 – Comparativo da proporção de carga e do custo de transporte por modal no Brasil e nos EUA em 2012

	Brasil		EUA	
	Proporção (% tku)	Custo (US\$/mil tku)	Proporção (% tku)	Custo (US\$/mil tku)
Rodoviário	67%	133	31%	310
Ferrovário	18%	22	37%	29
Aquaviário	11%	30	10%	10
Dutoviário	3%	25	21%	9
Aéreo	0,04%	1060	0,3%	1107

Fonte: ILOS (2014)

Certamente, o Brasil pode progredir consideravelmente nesse aspecto com uma recomposição da sua matriz de transporte de cargas. O gráfico da Figura 3 ilustra claramente uma recomendação mais racional na escolha pelo modal ferroviário em relação ao rodoviário, à medida em que se aumenta a carga transportada e a distância percorrida.

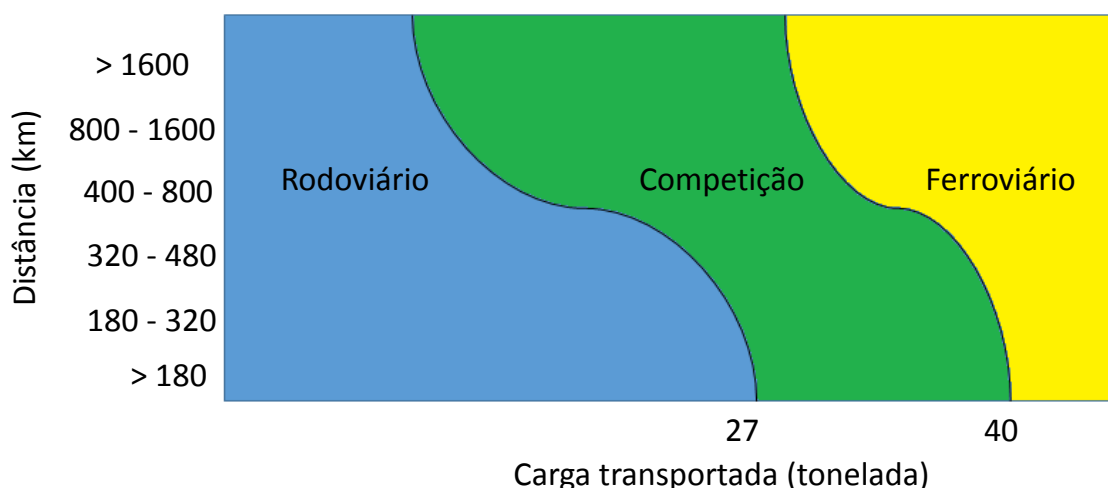


Figura 3 – Regiões de preferência pelos modais ferroviário e rodoviário em termos de carga e distância

Fonte: Adaptado de CNT (2013)

O modal ferroviário, contudo, apresenta suas inconveniências em relação ao rodoviário, a exemplo de uma menor flexibilidade de rota e um maior prazo de entrega (*lead time*), visto que muitas vezes depende de outro modal para atingir o destino final da carga. Entretanto, existem ainda outras grandes vantagens a serem auferidas com a utilização desse sistema. Dentre elas, vale destacar o impacto ambiental que é significativamente inferior. De fato, estudos (OIKOS, 2009) revelam que a emissão média de dióxido de carbono para atmosfera através do transporte ferroviário é de 1,14 t(CO₂)/10³tu (toneladas de CO₂ POR 1000 toneladas úteis, tu,

transportadas), ao passo que no modal rodoviário essa cifra é de 49,05 t(CO₂)/10³ tu.

Ainda segundo OIKOS (2009), existe uma prerrogativa importante em termos de segurança operacional a ser salientada. No cenário nacional, as estatísticas de acidentes são vultosamente inferiores nas estradas de ferro, registrando 4,14 acidentes a cada bilhão de tku (toneladas por quilômetro útil) em contraste com os 95,7 acidentes/bi tku nas rodovias. Essa diferença é ainda mais contrastante quando se observa o número de vítimas em cada modal, sendo 0,7 mortos/bilhões tku para o ferroviário e 105 mortos/bilhões tku para o rodoviário. Desta forma, pode-se atestar que uma alteração na infraestrutura de transportes brasileira, nesse sentido, corrobora com as perspectivas de sustentabilidade não só econômica, como também ambiental e social.

1.2 Problema e Justificativa

Dada a contribuição estratégica que uma reorganização na infraestrutura de transportes, favorecendo o modal ferroviário, pode acarretar na economia brasileira, esta dissertação apresenta um estudo acerca da Estrada de Ferro 334 - Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL) -, a qual se encontra ainda em fase de projeto e construção. Esse importante componente logístico terá como objetivo principal escoar mercadorias como minério de ferro e produtos agrícolas (principalmente soja) advindas das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil. Conforme se observa na Figura 4, a FIOL inicia em Figueirópolis (TO), no km 0, onde haverá um intercâmbio com a Ferrovia Norte Sul (FNS). Ao longo de sua extensão, a FIOL atravessa o sudeste do estado do Tocantins e todo o território baiano em direção ao município de Ilhéus (km 1520), onde se prevê a construção do Porto Sul para escoar as mercadorias transportadas por essa ferrovia.



Figura 4 - Traçado da FIOL entre a FNS e o Porto Sul.
Fonte: Adaptado de BRASIL (2010)

Esse estudo justifica-se pela mudança nas perspectivas econômica e técnica do empreendimento, entre os momentos iniciais em que foram realizados os estudos de viabilidade e o atual cenário econômico. Em decorrência desse projeto ter sido viabilizado levando-se em consideração preços das principais *commodities* à época, bem distintos do cenário atual, o perfil da demanda para uso da capacidade da ferrovia foi alterado sensivelmente. Aliada a essa circunstância, a recente conjuntura macroeconômica, com uma política fiscal mais restritiva, ocasionou alterações no contexto do projeto original, trazendo consigo situações de incerteza ainda maiores com relação à futura operação. Nesse quesito, encontram-se indecisões por parte das mineradoras envolvidas a respeito da oferta da infraestrutura nos processos de carga e descarga do minério de ferro, oportunizando um conjunto de investigações sobre a eficiência logística do negócio.

Desta forma, acredita-se que o emprego de técnicas de simulação e otimização permitirá a obtenção de estimativas de interesse para os gestores do negócio, buscando entender os gargalos logísticos que se apresentarem e propor soluções eficientes (menor investimento possível) para os mesmos.

1.3 Objetivo geral

O propósito principal deste trabalho é fornecer um modelo representativo da movimentação de cargas entre os municípios de Caetité (BA) e Ilhéus (BA) através da FIOI. Espera-se que as análises desenvolvidas possam contribuir para a consolidação do transporte de cargas nesse empreendimento.

1.4 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- a) Construção de um modelo matemático representativo e validado para o transporte de cargas na FIOI, de acordo com as características da infraestrutura ferroviária e a estratégia de tráfego desse sistema;
- b) Desenvolvimento de uma ferramenta computacional flexível para a gestão da logística de transportes na FIOI, considerando-se a possibilidade de testar variados parâmetros do modelo;
- c) Formulação de um portfólio de intervenções na malha ferroviária, com base em uma análise de otimização que vise a melhoria de capacidade de tráfego ferroviário, levando-se em consideração variáveis como tempo e custo do processo logístico.

2 ASPECTOS CONJUNTURAIS E O SISTEMA FIOF

2.1 O Transporte Ferroviário Brasileiro

O advento das estradas de ferro no Brasil, na metade do século XIX, aconteceu em um período em que o transporte terrestre nacional ainda era bastante arcaico. Diferentemente da transição na Europa e nos Estados Unidos, que já possuíam um modal rodoviário bem desenvolvido para a época, com elevado volume transportado em diligências de tração animal, as tropas de mula constituíam o principal meio de transporte terrestre brasileiro (TELLES, 2011). Além disso, as estradas de rodagem eram raras exceções (a exemplo das estradas União e Indústria) e os caminhos abertos para as tropas de mulas não possuíam o preparo de leito necessário, o que dificultava extremamente a movimentação de cargas em períodos de intempéries.

Em um primeiro momento, o marco regulatório do transporte ferroviário no Brasil foi sancionado pelo regente padre Feijó, em nome do imperador D. Pedro II, sob o Decreto nº 100, de 31 de outubro de 1835. Este documento estabelecia, entre outras coisas, uma concessão de 40 anos a companhias que construíssem estradas de ferro do Rio de Janeiro a Minas Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul. Entretanto, devido ao estágio incipiente da engenharia ferroviária bem como à escassez da mão-de-obra especializada e à dificuldade de atrair capital para executar as obras, a primeira ferrovia foi somente inaugurada em 1854, a estrada de ferro Mauá. Com o suporte de engenheiros e técnicos ingleses e americanos, esse empreendimento e outros relevantes como as estradas de ferro D. Pedro II e Recife ao Cabo foram construídas e algumas delas se tornaram canais de escoamento importantes para mercadorias agrícolas no país, principalmente café.

Durante o ciclo do café, que predominou dos anos 1830 até a década de 1930, houve expansão substancial das fronteiras agrícolas nacionais (CNT, 2013). Sabe-se, por exemplo, que somente no período de 1830 a 1850, as exportações totais brasileiras passaram de 3.348 libras esterlinas para £8.121 (TELLES, 2011). Esse aumento foi devido, em grande parte, à expansão da produção de café que representava cerca de 60% do total das exportações. Ao fim deste período, a malha nacional contava com 29 mil km de extensão, operando com cerca de 30 mil vagões e 2 mil locomotivas.

Com a crise de 1929, que provocou a estagnação do consumo de café no mundo, os investimentos em transportes no Brasil encolheram. Somente a partir dos anos 1950, quando o governo federal unificou a gestão das estradas de ferro em nome da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), observou-se novamente um crescimento da tonelagem transportada e da produtividade do trabalho (CNT, 2013), quando a extensão da malha se aproximou de 40 mil km. Apesar disso, as ferrovias ainda representavam 90% do déficit público federal e com as crises internacional e fiscal das décadas seguintes, a participação do setor privado começou a ser repensada. A partir dos anos 1990, a gestão ferroviária foi, então, transferida para o capital privado, visando estimular a competitividade e investimentos no setor. Não obstante o tamanho da malha tenha permanecido o mesmo, as empresas concessionárias atingiram significativos acréscimos de produtividade, ocasionados por investimentos em melhoria na infraestrutura existente e em processo de gestão. Conforme indicado pela CNT (2013), após a transferência da gestão pública para a privada, houve um crescimento expressivo de carga transportada (133%), saindo de 137,2 bilhões de tku, em 1997, para 328 bilhões de tku, em 2012.

Em suma, a evolução da extensão da malha ferroviária nacional pode ser evidenciada na Figura 5. Percebe-se claramente um período inicial de franca expansão até os anos 1960, seguida de uma fase de queda e estagnação nos últimos 50 anos.

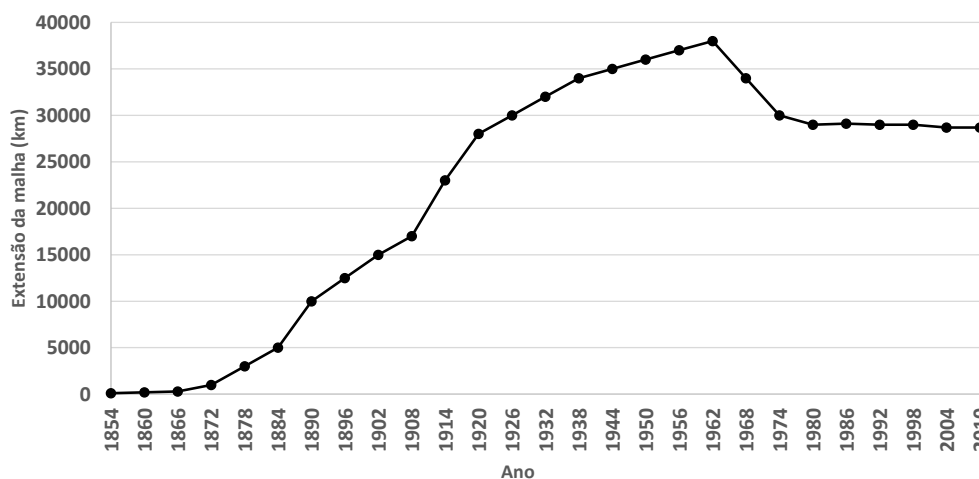


Figura 5 - Extensão da malha ferroviária nacional entre 1854 e 2012

Fonte: CNT (2013)

Em termos econômicos, atualmente os operadores ferroviários nacionais transportam, em escala mais expressiva, minério de ferro e produtos agrícolas (ANTT, 2015a). Na Figura 6 pode-se observar que entre 2006 e 2013, esses dois

grupos de mercadorias corresponderam, em média, a 70% e 10% do total transportado, respectivamente. Pode-se notar também a franca expansão da tonelagem transportada ao longo desse período, interrompida somente no período subsequente à crise financeira internacional de 2008.

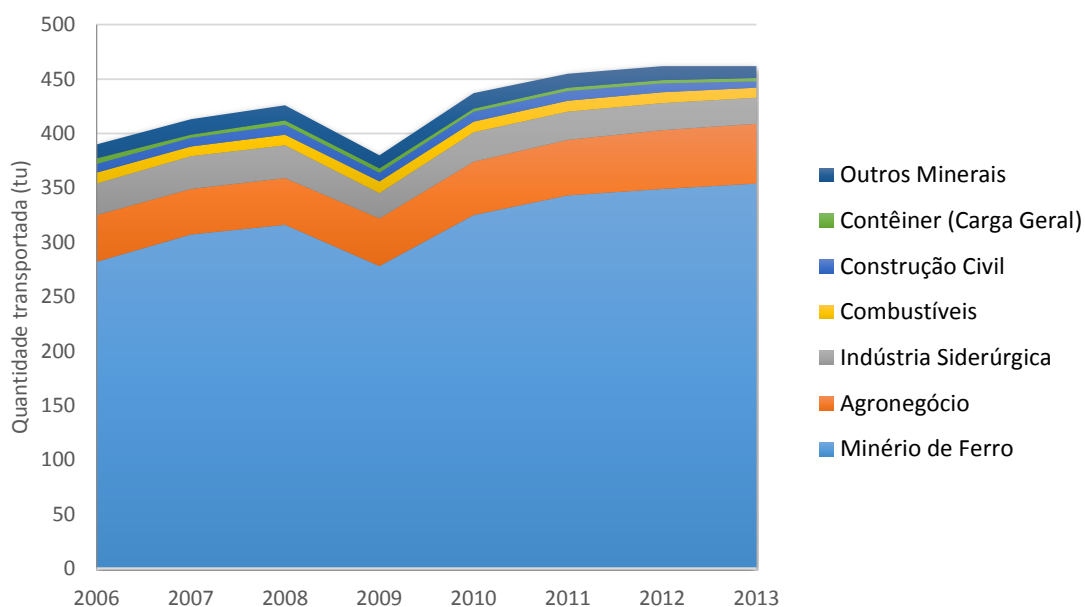


Figura 6 - Carga transportada por via ferroviária no Brasil em toneladas úteis (tu) entre 2006 e 2013
Fonte: ANTT (2015b)

Apesar do otimismo com os resultados recentes, ainda existe uma enorme lacuna a ser preenchida pelo modal ferroviário no Brasil. Em virtude desse cenário desfavorável, uma série de investimentos do governo federal está sendo planejada, principalmente para a construção, ampliação e melhoria da infraestrutura de transporte, em geral. Esses investimentos (BRASIL, 2012a) fazem parte do Programa de Investimentos em Logística (PIL) que prevê a destinação de aproximadamente R\$240 bilhões para projetos em rodovias (R\$17,8 bi), ferrovias (R\$99,6 bi), portos (R\$54,6 bi), aeroportos (R\$9,2 bi), trens de alta velocidade (R\$35,6 bi) e instrumentos de apoio financeiro.

Percebe-se que a maior proporção dos investimentos impactará a estrutura ferroviária brasileira. Devido ao potencial de integração peculiar deste modal, espera-se reduzir os diversos gargalos logísticos existentes, atingindo os objetivos estratégicos do PIL e, conseqüentemente, uma posição mais satisfatória nos *rankings* internacionais anteriormente mencionados. Desta forma, com um ambiente mais satisfatório para se fazer negócios e, logo, mais atrativo para investimentos, aumenta-se as expectativas para um desenvolvimento econômico mais sustentável para o Brasil.

Um importante componente nesse contexto é a construção da Ferrovia de Integração Oeste Leste (EF334 - FIOLE), que terá um papel fundamental na integração logística nacional.

2.2 A Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOLE)

O projeto da FIOLE está constituído entre os municípios de Figueirópolis (TO) e Ilhéus (BA), abrangendo as regiões Norte e Nordeste do Brasil (Figura 4). Em Figueirópolis (TO) haverá o ponto de intercâmbio com outro importante empreendimento, a Ferrovia Norte Sul (EF151), ao passo que em Ilhéus (BA) deverá convergir ao que o Governo do Estado da Bahia vem denominando Complexo Logístico Intermodal Porto Sul (CLIPS). O principal objetivo deste empreendimento será transportar cargas de minério ferro, grãos e farelo de soja para escoamento no Porto Sul (em fase final de licenciamento), de onde serão exportados para o mercado internacional.

2.2.1 Integração Logística

Conforme previsto em projeto, ao longo do seu trajeto, a FIOLE deverá apresentar importantes conexões viárias. Como já citada anteriormente, a primeira delas é a FNS, que ligará a região Norte do Brasil até o estado de São Paulo, percorrendo outras unidades federativas como Maranhão, Tocantins e Goiás, como se pode observar na Figura 7. Esse eixo ferroviário percorre a região mais produtiva de soja do país e tem os objetivos de reduzir o custo do frete dos produtos agrícolas, além de descongestionar os portos das regiões Sul e Sudeste que recebem essas mercadorias (a exemplo de Santos e Paranaguá). Tendo em vista esses aspectos, a FIOLE poderá vir a ser uma importante alternativa para a movimentação de cargas cativas da FNS, a partir do ponto de intercâmbio entre essas ferrovias em Figueirópolis (TO), fortalecendo ainda mais a estratégia logística nacional, contida no Plano Nacional de Logística de Transporte (BRASIL, 2012b).



Figura 7 - Traçado da FNS entre Barcarena (PA) e Estrela D'Oeste (SP)
Fonte: Adaptado de BRASIL (2015)

Seguindo a jusante de Figueirópolis (TO) na FIOCRUZ, haverá um ponto de interseção com a Hidrovia do São Francisco (HSF, na Figura 8), no município de Bom Jesus da Lapa (BA). É importante lembrar que o Brasil dispõe de aproximadamente 21 mil km de vias internas economicamente navegáveis, onde na Bahia limita-se basicamente ao emprego de barcaças para o transporte de matérias-primas de baixo valor agregado através do Rio São Francisco. Dos seus 2800 km de extensão, a Hidrovia do São Francisco possui 1579 km de trechos navegáveis, sendo 1371 km entre os municípios de Pirapora (MG) e Petrolina (PE) e 208 km entre Piranhas (AL) e a sua foz (ANTAQ, 2013). Como se pode notar, essa conexão apresenta também um aspecto integrador bastante rico, conectando a FIOREL com o Sudeste do país, em Minas Gerais, e com outros estados do Nordeste.

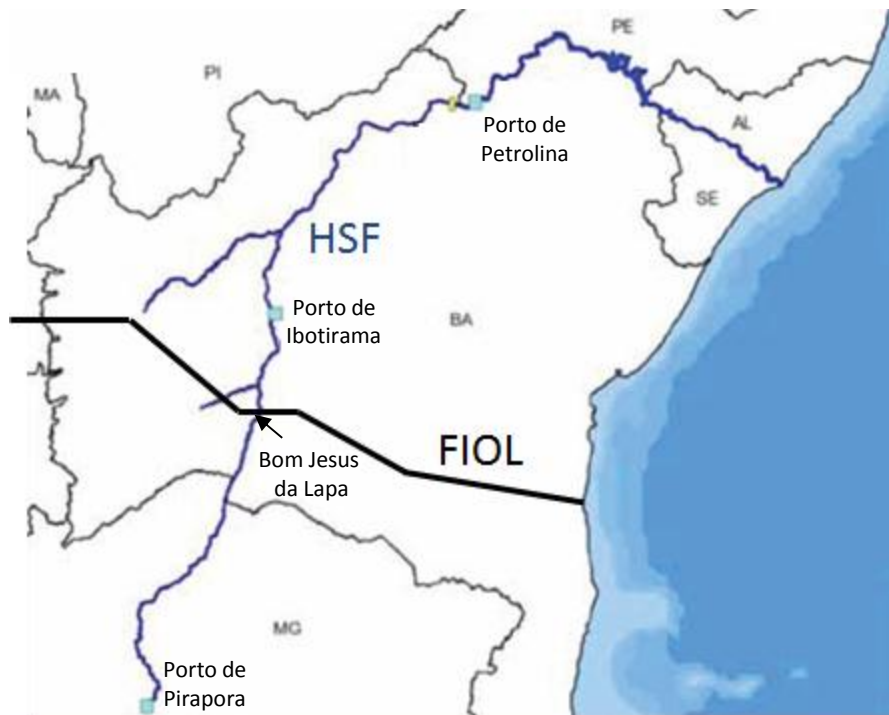


Figura 8 - Mapa da Hidrovia do São Francisco
Fonte: Adaptado de ANTAQ (2013)

Continuando em sentido ao Porto Sul, nas proximidades do município de Brumado (BA), a FIOLE deverá se conectar com a Ferrovia Centro Atlântica (FCA), apresentada na Figura 9. Esse empreendimento ferroviário foi iniciado ainda no século XIX, no ano de 1876, sendo construído aos poucos e chegando na região de Brumado (BA) por volta de 1945 (OIKOS, 2010). Pelas suas características antigas, se apresenta como uma ferrovia de baixo desempenho ferroviário, com raio de curvatura mínimo de 60 m, rampa máxima de 3,8% e capacidade de suporte de via de 20 toneladas brutas por eixo. Entretanto, apresenta-se com um potencial integrador para a FIOLE bastante significativo, uma vez que se estende através das regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

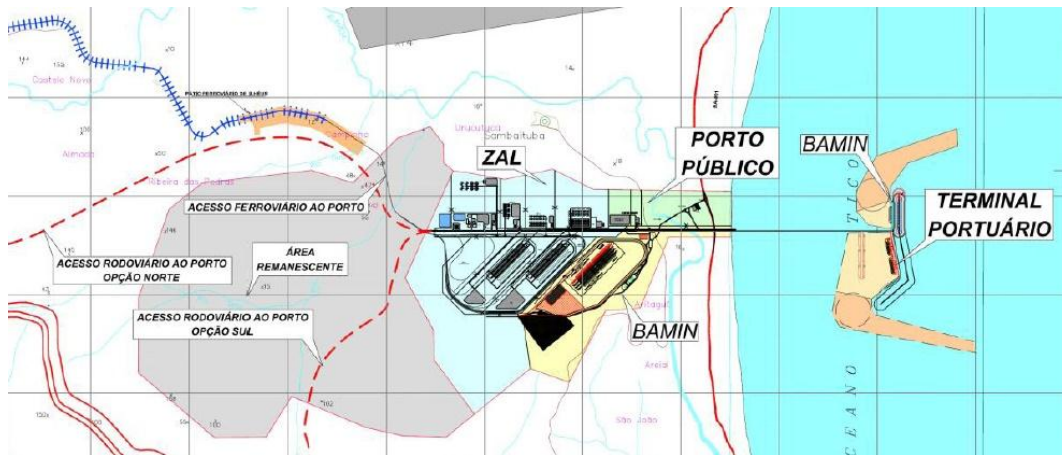


Figura 10 - Representação do CLIPS
Fonte: BAHIA (2011)

2.2.2 Aspectos técnicos

A extensão total da FIOLE é de 1527 km entre os seus dois extremos (Figueirópolis-Ilhéus). A superestrutura (porção superior ao leito ferroviário) se configura com uma bitola (distância entre trilhos) de 1,6 m, trilhos TR-57 (57 kg a cada metro de barra), dormente monobloco de concreto protendido e fixação de grampo elástico. Com relação aos parâmetros geométricos, tem-se um raio mínimo de curvas de 350 m e rampas máximas de 1,45% em ambos os sentidos. Desta maneira, caracteriza-se como uma ferrovia de alto desempenho para os padrões nacionais, permitindo uma capacidade de suporte de via de 32 toneladas brutas por eixo e velocidades de 60 km/h, no sentido exportação (Figueirópolis-Ilhéus), e 65 km/h, no sentido importação (Ilhéus-Figueirópolis). Pode-se observar um recorte da construção dessa ferrovia na Figura 11.



Figura 11 - Trecho em Construção da FIOLE

2.2.3 Aspectos históricos

A demanda por um canal de escoamento ferroviário ligando Oeste Baiano ao Litoral se confunde com o processo de ocupação dos cerrados, a partir do final da década de 1970 (OIKOS, 2010). Com efeito, esse processo migratório se deu após a viabilização da produção da soja na faixa tropical e no cerrado, graças à pesquisa de desenvolvimento de cultivares resistentes a altas temperaturas realizada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (JORNAL INOVAÇÃO - UNICAMP, 2006).

Os benefícios da pesquisa desenvolvida pela EMBRAPA sobre a produção de soja nos anos subsequentes, no estado da Bahia, são evidentes, como se pode notar na Figura 12.

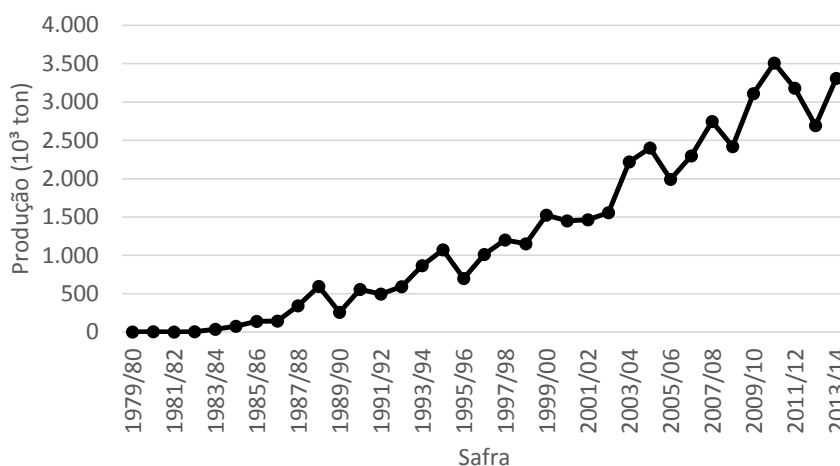


Figura 12 - Série histórica da produção de soja no estado da Bahia (em 10³ t)
Fonte: CONAB (2015)

Com o rápido crescimento da produção da soja nessa região, desde então, algumas alternativas logísticas para o transporte de cargas foram avaliadas. Essas opções consideravam a utilização de outros sistemas como as estradas de ferro FCA, FNS, a Hidrovia do Rio São Francisco e os portos de Aratu e Itaqui. A Tabela 2 elenca essas opções de rotas e apresenta as justificativas pelas quais elas não foram levadas adiante.

Tabela 2 - Alternativas de escoamento da soja do oeste baiano e razões da rejeição

Alternativa	Motivo da Rejeição
FNS → Porto de Itaqui	- Não contribui com a integração do território baiano
Hidrovia São Francisco → FCA → Belo Horizonte → Outras Ferrovias	- Utilização de uma ferrovia de baixa produtividade (FCA)
Hidrovia São Francisco → FCA → Salvador → Porto de Aratu	- Utilização de uma ferrovia de baixa produtividade (FCA) - Agravamento do já congestionado fluxo na região metropolitana de Salvador

Fonte: OIKOS (2010)

A necessidade premente de uma ferrovia para escoar a soja desta região se explica pela indiscutível disparidade de custos em relação ao modal rodoviário. Considerando-se uma simulação do escoamento da soja produzida em Lucas do Rio Verde (GO) realizada pela CNT (2013), pode-se observar que em uma rota exclusivamente rodoviária (caminhões em direção ao Porto de Paranaguá, no estado do Paraná) o custo de transporte seria de R\$232,74/t, ao passo que em uma rota somente ferroviária (utilizando a FNS, sentido porto de Itaqui, no estado do Maranhão), a tonelada transportada acarretaria em um gasto muito inferior, R\$148,58.

Entretanto, a pressão por uma nova rota ferroviária só atingiu seu resultado após o crescimento da China nas duas últimas décadas, que elevou o preço internacional de algumas *commodities* (OIKOS, 2010), a exemplo de minérios e produtos agropecuários. Esse processo tornou viável a lavra de minério de ferro existente na Serra do Espinhaço, na região de Caetité (BA), despertando o interesse de investidores para a sua exploração. A partir de então, diversos estudos foram realizados no desenho rota ferroviária mais desejável para atender as demandas destas regiões, principalmente de minério de ferro e produtos agrícolas. Por fim, o projeto final da FIOLE, como já apresentado na Figura 4, vale-se de ideia similar ao traçado projetado para o trecho inicial da ferrovia Transulamericana, compreendendo

os estados de Bahia e Tocantins (AZEVEDO NETO, 2006). Tal estrada de ferro foi idealizada por Vasco Azevedo Neto (1916-2010), professor emérito da Universidade Federal da Bahia, que durante sua vida acadêmica e política pleiteou a execução deste empreendimento logístico.

2.2.4 Aspectos econômicos

A FIOLE se apresenta como uma solução logística não somente para mineradoras e produtores de soja. Espera-se que a atratividade de um eficiente sistema de transporte aumente a demanda pelo uso da capacidade da ferrovia para a movimentação de outras cargas, a exemplo de etanol, açúcar, algodão, entre outras. De fato, o perfil das mercadorias a serem transportadas na FIOLE está bastante aderente à realidade da balança comercial brasileira, na qual o complexo soja e minerais são os principais produtos negociados e correspondem por cerca de 25% do resultado financeiro das exportações (BRASIL, 2014). A Figura 13 demonstra a proporção do total da receita operacional advinda das operações de frete de cada produto na malha, entre os anos de 2015 e 2045, inicialmente prevista nos estudos operacionais desta ferrovia (BRASIL, 2010).

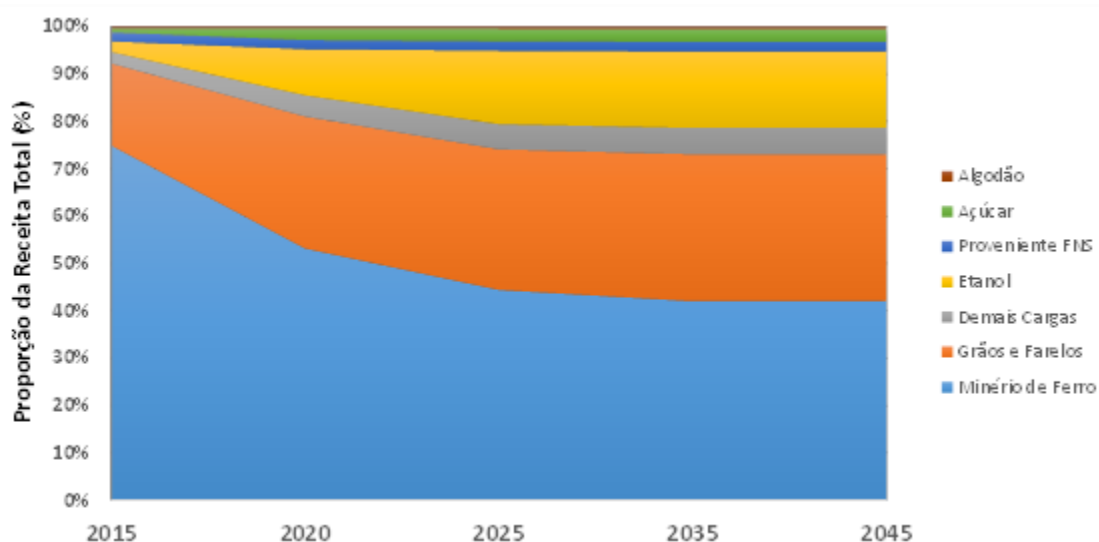


Figura 13 – Proporção da receita anual prevista por produto transportado na FIOLE entre 2015 e 2045. Fonte: BRASIL (2010)

Observa-se claramente a importância do minério de ferro para a viabilidade do projeto, correspondendo a 70% da receita operacional da malha no início da operação. Ao longo do tempo, apesar do faturamento com esse produto crescer em valor absoluto, nota-se que sua importância relativa diminuirá, devido a uma taxa de

aumento mais expressiva da receita resultante de outras cargas como grãos e etanol, advindos principalmente da região oeste da Bahia. De fato, esse aumento de cargas agrícolas pode ser ainda mais expressivo caso se consolidem futuras conexões com as ferrovias planejadas para a região Centro-Oeste do país.

Nesse contexto, é importante salientar que o Brasil e outros países exportadores de produtos primários se beneficiaram bastante do “Superciclo de Commodities” iniciado nos anos 2000, que representou uma fase de grande ascensão nos preços desses tipos de mercadorias. A Figura 14 demonstra o crescimento significativo no preço do minério de ferro, em particular, na década passada, saindo de US\$ 12,45 por tonelada base seca, em 2000, para US\$ 187,18/t, em 2011. Com efeito, esse processo proporcionou uma reestruturação completa da composição dos fatores agregados (agrupamento de produtos industriais, classificados em básico, semimanufaturado ou manufaturado) nas exportações brasileiras nos últimos 15 anos. Durante esse período, houve um aumento considerável do fator agregado básico (produtos que envolvem pequena agregação de valor no processo de transformação, como minério de ferro e grãos), saltando de 22,8% para 46,7% da receita total com exportações (BRASIL, 2013).

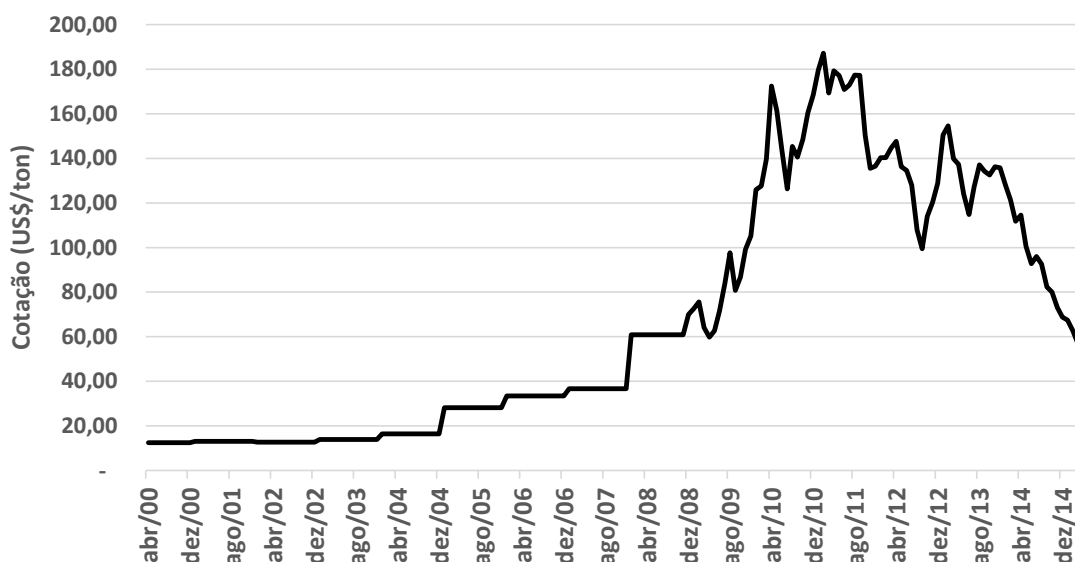


Figura 14 - Variação do preço do minério de ferro no mercado à vista entre os anos de 2000 e 2015
Fonte: Adaptado de INDEX MUNDI (2015)

Ainda nos estágios iniciais de ascensão do preço do minério, um estudo conduzido por Cuddington & Jerrett (2008), observando séries históricas de preços de bens metálicos, mostrou que essa subida de preços em curso era similar a outros 3 superciclos ocorridos neste mercado nos últimos 150 anos. Neste último

fenômeno, para o caso específico do minério de ferro, as causas de um crescimento tão acentuado são diversas e estão lastreadas tanto nas esferas macro e microeconômica que envolvem o comércio internacional deste produto. Em suma, pode-se elencar cinco razões principais para a ocorrência desse superciclo (HUMPHREYS, 2009, 2010; RADETZKI et al., 2008; WILSON, 2012):

- Choque de demanda pelo uso mais intensivo de *commodities* na manufatura mundial, devido ao processo de urbanização e industrialização dos países emergentes nas últimas décadas;
- Uma expansão macroeconômica sem precedentes, onde os bancos centrais aumentaram consideravelmente a oferta de liquidez global, reforçando esse surto na demanda por bens minerais;
- Longevidade do crescimento do PIB mundial na década de 2000, com crescimento superior a 4% ao ano entre 2004 e 2007;
- Barreiras naturais à entrada de novos ofertantes no mercado, em função do setor de mineração ser bastante intensivo em capital desde o processo produtivo até a distribuição;

Após um breve período de recuo durante a crise internacional de 2008, o preço do minério de ferro continuou a crescer até atingir o valor máximo da série em US\$ 187,18/t, no ano de 2011. Não obstante a situação favorável até o início da década de 2010, o cenário recente não tem sido o mais otimista para as mineradoras. Esse preço tem caído significativamente desde 2011 e, somente em 2014, experimentou uma queda de cerca de 50% em seu valor (de US\$ 135,79 para US\$ 68,80 por tonelada em base seca). De acordo com uma análise do grupo empresarial Goldman Sachs (NG, 2014), foi apontado em relatório que a “Era do Ferro” deveria acabar em 2014, ao passo que nova capacidade produtiva finalmente alcançou o crescimento da demanda e os lucros marginais começarão sua reversão para a média histórica. De fato, até o fim do ano de 2015 está prevista uma triplicação do excesso de oferta global (para 163 milhões de toneladas, a partir de 52 milhões de toneladas, em 2014), à medida que as maiores mineradoras (Vale, Rio Tinto, BHP Billiton e Fortescue Metals) continuam a expandir as suas capacidades produtivas de baixo custo, na expectativa de que o aumento da oferta compense o rebaixamento do preço do minério e retire os produtores de alto custo do mercado.

Atrelado a esse fator, a China - que consome cerca de dois terços da produção mundial de minério de ferro - cresceu ao seu ritmo mais lento desde 1990, agravando ainda mais esse cenário negativo para o ano corrente (NG, 2015). Desta forma, no curto prazo, devido à volatilidade do preço e a falta de capacidade de produzir a custo competitivo, espera-se que muitas mineradoras não sobrevivam a esse mercado em baixa.

2.2.5 Consequências para a FIOLE

Em função dessa delicada situação econômica, a FIOLE poderá exercer um papel importante na mitigação dos riscos para o setor de minério de ferro no estado da Bahia, oferecendo uma alternativa de transporte mais eficiente. Apesar da viabilidade do projeto já ter sido atestada em estudos preliminares (BRASIL, 2010), em um futuro próximo quando novos operadores pleitearem a utilização de capacidade da ferrovia, alguns desafios se tornarão prementes. Este fato está relacionado com o principal gargalo de um projeto ferroviário em linha singela, onde somente um trem pode utilizar a linha principal, enquanto os outros aguardam a sua passagem em linhas desviadas, onde é possível a realização de cruzamentos de trens em sentidos contrários (caso da FIOLE). Além disso, diversas reduções na oferta de recursos de infraestrutura têm sido discutidas, a exemplo da diminuição da área total do porto (tanto *onshore* quanto *offshore*) e da indefinição acerca de quais tipos de equipamento de carga e descarga (silos e viradores de vagão) serão utilizados. Ainda segundo BRASIL (2010), após os primeiros 5 anos de operação, a capacidade de transporte ferroviária estará comprometida, devido ao aumento do número de cruzamentos de trens. Esse processo, por sua vez, conduzirá a um atraso do tempo de trânsito entre origem e destino das composições ferroviárias (conjunto locomotiva e vagões). Caso isto se consolide, um aumento de custos associados à espera de trens em filas e atrasos causados por navios aguardando por carregamento (*demurrage*) deverão ocorrer com maior frequência.

Desse modo, faz-se necessário investigar a influência que diversos elementos na operação ferroviária podem exercer no processo logístico. Através dessa compreensão, pode-se identificar a maneira pela qual podem ser solucionadas algumas limitações peculiares, atuando em diferentes aspectos das estruturas componentes do tráfego em estradas de ferro e, particularmente, no sistema FIOLE.

3 CAPACIDADE DE TRANSPORTE EM FERROVIAS

3.1 Elementos do transporte ferroviário

O transporte ferroviário é influenciado por três elementos principais: infraestrutura viária, mecanismos de controle de tráfego e dinâmica de material rodante. Em suma, o desempenho de tráfego em uma ferrovia é resultado da combinação das restrições presentes na morfologia de uma estrada de ferro, da regulação do trânsito das composições (trens) e das propriedades mecânicas que envolvem o deslocamento dessas composições. Fioroni (2008) explica que a consequência principal desse arranjo de fatores é a baixa flexibilidade de tráfego, acarretando situações de decisão bastante complexas sobre a movimentação de trens no sistema real. Por conseguinte, na construção de modelos deste tipo, diversos autores empenham-se em incorporar essas características em um nível razoavelmente aceitável de forma a garantir a validação das suas representações.

3.1.1 Infraestrutura ferroviária

De forma geral, pode-se observar os seguintes elementos na infraestrutura física de um sistema ferroviário (BRINA, 1988; CHANDRA; AGARWAL, 2007; FIORONI, 2008):

- Linha singela: permite a circulação em um único sentido por vez (Figura 15);
- Linha dupla: duas linhas singelas em paralelo, permitindo o tráfego simultâneo em sentidos contrários (Figura 15);

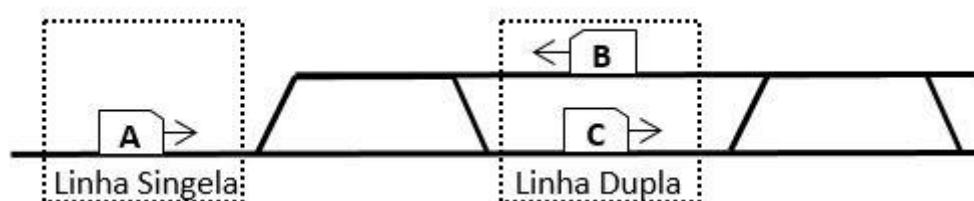


Figura 15 - Representação das linhas singela e dupla em um trecho de ferrovia

- Pátio de cruzamento: pontos da malha que possibilitam o estacionamento dos trens, permitindo, assim, a passagem de outros trens no sentido contrário – cruzamento – ou no mesmo sentido – ultrapassagem – (Figura 16)

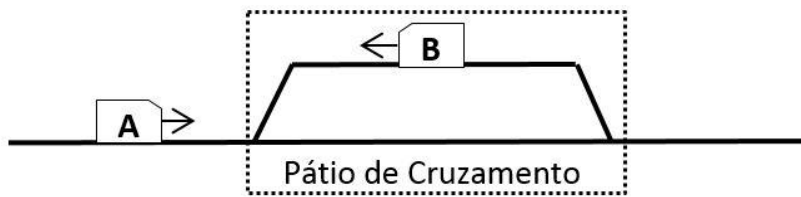


Figura 16 - Representação de um pátio de cruzamento

- Pátios de atividade: regiões da ferrovia com um conjunto de linhas que viabilizam diversos processos como carregamento, descarregamento, inspeção, manutenção e abastecimento de material rodante (Figura 17).

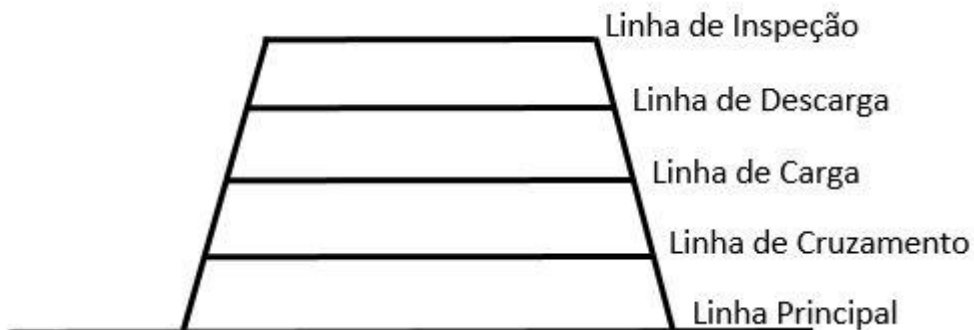


Figura 17 - Representação de um pátio de atividades

- Entroncamento: encontro de três ou mais linhas que possibilitam o deslocamento de trens entre trechos diferentes (Figura 18).

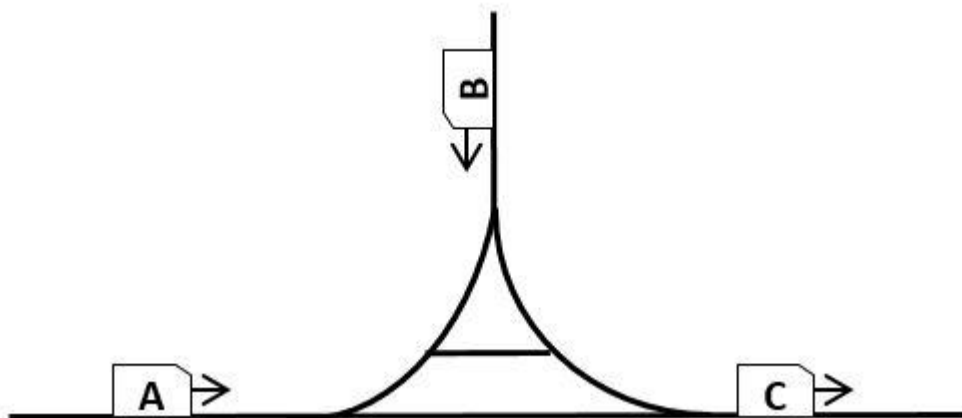


Figura 18 - Representação de um entroncamento ferroviário

É importante mencionar que os pátios ferroviários podem assumir diversas configurações, que variam de acordo com as funções às quais eles se destinam e limitando-se, obviamente, pelas características do terreno. Brina (1988) assume que existem três tipos básicos de pátios ferroviários, que podem ser de cruzamento

(atendem aos propósitos de cruzamento e ultrapassagem), de triagem (entroncamentos e pontos de mudança de tração, devido à alteração no perfil de rampa da linha) e os pátios terminais (contemplando operações de carregamento, descarregamento ou ambas).

3.1.2 *Controle de tráfego ferroviário*

Diferentemente dos sistemas rodoviários, onde os veículos concorrem a espaços nas estradas e interagem sem um processo regulador, as ferrovias necessitam de um controle sobre os possíveis movimentos que os trens podem realizar. Isto ocorre em função de os veículos ferroviários estarem extremamente sujeitos à via, não havendo a possibilidade de desviarem uns dos outros em qualquer ponto da malha (BRINA, 1988). Para tanto, um sistema de sinalização e licenciamento de trens se faz necessário, visando atender a diversos propósitos, dentre os quais vale destacar (BONNETT, 2005; CHANDRA; AGARWAL, 2007):

- a) Regular o movimento dos trens, permitindo que eles circulem com segurança, considerando às velocidades máximas autorizadas (VMA) de cada trecho;
- b) Garantir a segurança dos trens que estão trafegando na mesma linha e no mesmo sentido;
- c) Evitar o abalroamento de trens que aproximam-se em sentidos opostos;
- d) Prevenir quaisquer possíveis movimentos conflitantes de trens na malha (que causem travamento de tráfego);
- e) Assegurar que os trens trafeguem em velocidade restrita durante ocorrências que exijam fluxo limitado (a exemplo de manutenção ou reparos na via);

Esses objetivos são alcançados através da supervisão exercida por órgãos centralizados ou Centros de Controle Operacional (CCO) - outrora denominados Seções do Movimento (BRINA, 1988). Estas centrais se comunicam com os trens e estações, avaliando os impactos na eficiência e na segurança da operação dos possíveis movimentos subsequentes (esquema na Figura 19). Em observância a esses fatores, um conjunto de regras deve ser obedecido para disciplinar o movimento dos trens, comumente denominado licenciamento. Através do

licenciamento, o CCO pode analisar a viabilidade de conceder a licença (permissão) para um determinado veículo ferroviário ocupar um próximo trecho em sua trajetória.

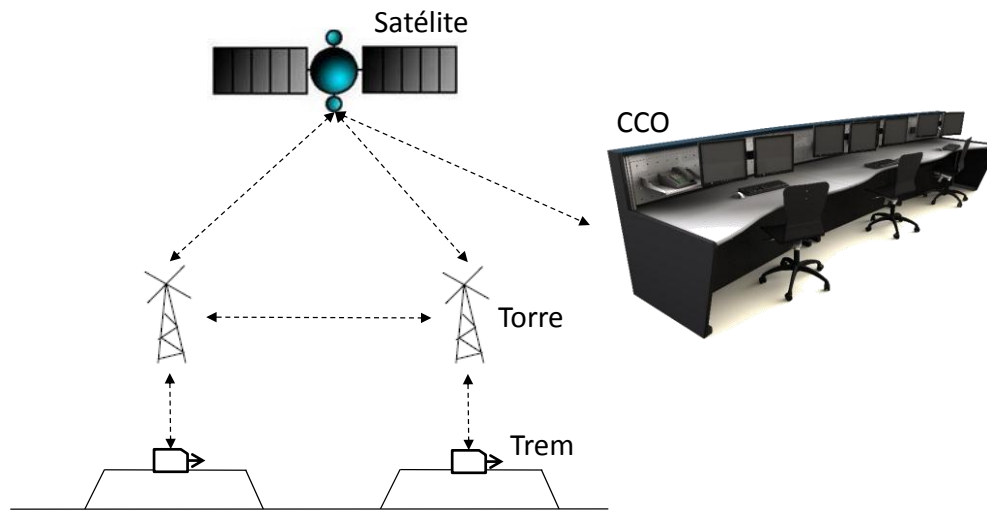


Figura 19 - Esquema de comunicação telemática entre os trens e o CCO

O licenciamento de trens pode ser de dois tipos: a intervalo de tempo ou a intervalo de espaço (BRINA, 1988; CHANDRA; AGARWAL, 2007). No primeiro caso, um trem só pode ser despachado após um tempo suficiente (intervalo de segurança) desde a partida do trem anterior. Entretanto, Chandra e Agarwal (2007) ressaltam que esse sistema só funciona razoavelmente se não houver uma parada imprevista ou acidental do trem anterior, o que poria ambos em risco de colisão iminente. Tendo em vista a ineficiência e a vulnerabilidade do método precedente, o licenciamento a intervalo de espaço tem sido bastante empregado. Nele, os trens ocupam determinados espaços guarnecidos por agentes ferroviários ou sinais luminosos existentes nos extremos dessas regiões (BRINA, 1988). Um subtipo comum de licenciamento a intervalo de espaço considera a existência de locais fixos e restritos para o deslocamento de um único trem, motivo pelo qual é conhecido como sistema de bloqueio fixo. Estas regiões delimitadas no trecho, por sua vez, são denominadas seções de bloqueio (SB). A Figura 20 ilustra o sistema de bloqueio fixo presente no trecho compreendido entre os pátios 1 e 2, contendo o segmento de linha que os conecta. É importante notar que, para a FIO, existirão 2 sessões de bloqueio em cada segmento de linha entre pátios e que cada linha em um pátio (principal e desviada) representa uma SB.

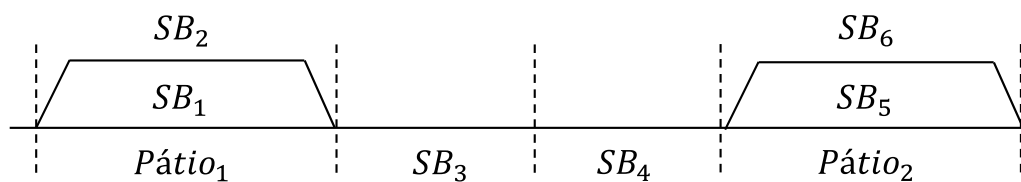


Figura 20 - Sistema de Bloqueio Fixo entre dois pátios

Fioroni (2008) destaca que nesse tipo de estrutura, os trens podem formar filas de espera entre os pátios de cruzamento (contanto que em um mesmo sentido), respeitando o critério de que somente um trem pode ocupar uma sessão de bloqueio.

3.1.3 Dinâmica de material rodante

Sob o ponto de vista mecânico, existem três grandezas principais que influenciam no transporte ferroviário (BRINA, 1988):

- Peso da carga a ser transportada (peso útil) conjugada ao peso dos vagões e locomotivas (tara);
- O caminho percorrido pela composição na via;
- A força aplicada à carga total (peso útil mais tara) a fim de realizar o deslocamento

Pode-se afirmar que existem várias forças que oferecem resistência ao movimento dos trens, originárias da relação entre as duas primeiras grandezas listadas. Dentre os tipos de resistência existentes, pode-se destacar como principais (CHANDRA; AGARWAL, 2007):

- a) Fricção: resultante da interação entre as diferentes partes dos trens (locomotivas e vagões), bem como entre as superfícies metálicas dos trilhos e rodeiros;
- b) Ondulação: causada pela ondulação do trem quando em movimento e por irregularidades dos trilhos como desníveis longitudinais;
- c) Ar: oriunda do atrito das correntes de ar com o trem e varia de acordo com o desenho do veículo, com a velocidade de tráfego e a intensidade e direção do vento, podendo atuar frontalmente, lateralmente e/ou na traseira da composição;

- d) Gradiente: comumente conhecida como resistência de rampa, relativa à dificuldade oferecida ao trem pela gravidade ao se deslocar em terrenos com inclinação ascendente;
- e) Curvatura: força que atua nos trens em curvas horizontais;
- f) Acidental: resultado da atuação conjunta de rampas e curvas;
- g) Início do movimento e aceleração: inércia que se opõe à mudança de velocidade.

Para rebocar o trem a uma determinada velocidade, Chandra e Agarwal (2007) explicam que o esforço trator das locomotivas deve ser devidamente dimensionado para compensar a oposição sinérgica destas resistências. Desta forma, no processo de escolha do trem-tipo (combinação ideal da quantidade de vagões e locomotivas para atender a um determinado propósito comercial), é importante frisar que o esforço trator deve ser sempre igual ou levemente superior à capacidade de reboque da locomotiva. Caso contrário, a carga não será tracionada (se o esforço trator for subdimensionado) ou os rodéis da locomotiva patinarão (quando esta grandeza é muito superior à requerida para o reboque).

3.2 Desempenho de Tráfego Ferroviário

Os três elementos anteriormente mencionados (Infraestrutura, sistema de controle de tráfego e dinâmica de material rodante) determinam preponderantemente o desempenho logístico das ferrovias. Uma importante variável nesse contexto é a capacidade de tráfego, à qual Krueger (1999) define como a habilidade de mover uma quantidade específica de fluxo sobre uma linha ferroviária, por meio de um conjunto de recursos existentes e sob um plano de serviço específico. O conceito de capacidade pode ser medido através de diferentes abordagens, a exemplo da quantidade de toneladas transportadas, pontualidade de serviço ou número de trens que um trecho comporta diariamente.

A avaliação da capacidade de frete ferroviário e a sua flexibilidade para acomodar demandas crescentes é uma urgente necessidade para os planejadores de transporte (MITRA et al, 2010). Deste modo, existe uma variedade de opções disponíveis em termos de expansão de infraestrutura e racionalização de recursos existentes que podem ser importantes para alcançar tais objetivos.

Uma avaliação muito frequente da capacidade de um determinado trecho ferroviário em linha singela é dada pela quantidade máxima de pares de trens por dia que podem trafegar neste trecho, conforme mencionado anteriormente. O cálculo desta capacidade é dado pela fórmula de Colson (BRINA, 1988), de acordo com a Equação 3.1:

$$C = \frac{1440 - T_m}{t_e + t_i + 2\theta} K \quad 3.1$$

onde t_e , t_i , θ , T_m e K são, respectivamente, o tempo de trânsito do trem exportação, o tempo de trânsito do trem importação, o tempo de licenciamento, o tempo de manutenção planejada no trecho e o coeficiente redutor, que depende da eficiência de cada estrada de ferro e varia no intervalo entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, ou seja, quanto mais eficiente for o sistema de gestão de tráfego ferroviário, maior a capacidade C do trecho em estudo.

O valor de 1440 no numerador da Equação 5.5 indica a quantidade de minutos em um dia (24 h/dia x 60 min/h = 1440 min/dia) que é subtraído das paradas planejadas para intervenção no trecho em análise. Os valores presentes no denominador indicam o tempo necessário para o cruzamento de um par de trens. Esse valor total é dado pela soma do tempo de tráfego do trem no sentido exportação (t_e) com o tempo de deslocamento do trem no sentido importação (t_i) mais o atraso causado pelo tempo de concessão da permissão (tempo de licenciamento) para que ambos trafeguem na linha entre os pátios que estão compreendidos. O valor desta razão fornece, por sua vez, a quantidade de pares de trens por dia que um determinado trecho comporta durante um período de 24 horas. A visualização do tempo total para o cruzamento de um par de trens está apresentada no diagrama espaço x tempo da Figura 21. Neste diagrama, é possível observar os períodos em que ambos os trens esperam nos pátios A ou B (θ_e e θ_i), bem como o tempo de deslocamento entre o segmento que conecta esses pátios (t_e e t_i).

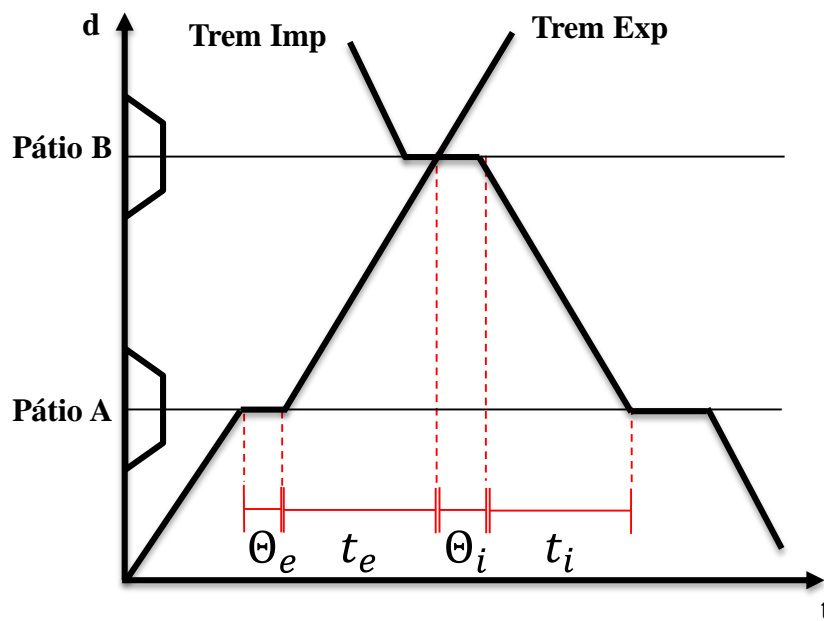


Figura 21 - Representação de um gráfico horário de cruzamento de trens em linha singela

Através da inserção de todas as rotas na malha no gráfico horário da circulação de trens, os planejadores de tráfego podem prever o local e o momento de todas as possíveis paradas para cruzamento ao longo de um determinado período de interesse. Na Figura 22, um exemplo desse gráfico horário esboça o movimento de 5 trens entre 5 pátios de cruzamento, durante um intervalo de tempo Δt .

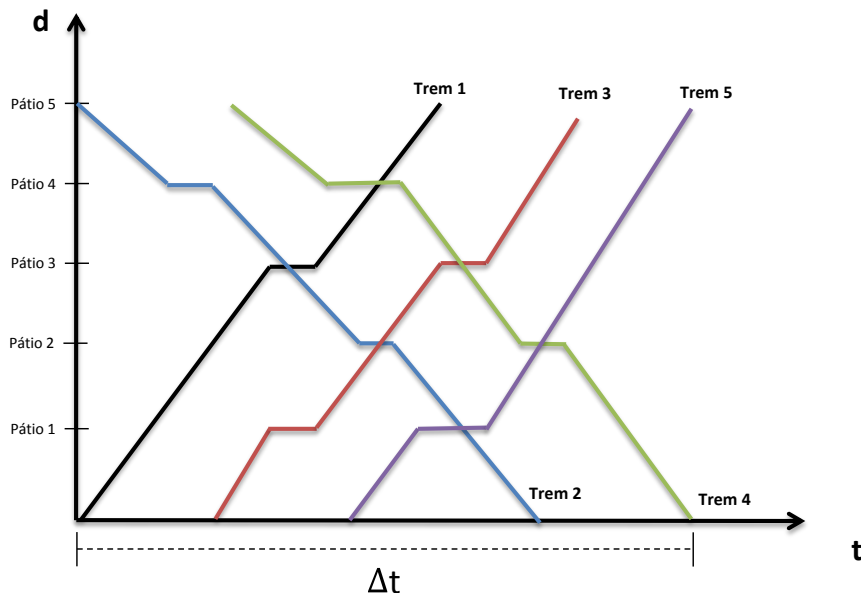


Figura 22 - Gráfico horário da circulação de trens durante um intervalo de tempo Δt

Obviamente, algumas paradas não planejadas – acidentes e avaria de material rodante ou via permanente, por exemplo – podem acontecer ao longo desse período e modificar o planejamento outrora realizado, exigindo uma reprogramação do

tráfego. Por isso, o cálculo da capacidade estabelecido na fórmula de Colson (Equação 5.5) é tratado como um desempenho ideal (teórico), ao qual os tomadores de decisão estabelecem como meta para a capacidade efetivamente utilizada. Para tanto, é necessário um alto grau de confiabilidade para os recursos de infraestrutura, tráfego e material rodante. Nesse contexto, Krueger (1999) lista certos parâmetros, classificados em três grandes categorias, que podem influenciar positiva ou negativamente na capacidade de um determinado trecho ferroviário:

- a) Parâmetros de instalação/projeto: comprimento total do trecho, comprimento entre pátios de cruzamento, variabilidade do comprimento dos pátios componentes do trecho, presença de sinalização intermediária e percentual de linhas duplicadas;
- b) Parâmetros de tráfego: concentração (pico) de tráfego em períodos específicos, priorização de trens, velocidade média do trecho e diferença de velocidade entre os trens;
- c) Parâmetros operacionais: interrupções de via, operação em velocidade reduzida, paradas por avaria de trens no trecho e tempo máximo de viagem para trens prioritários.

De maneira geral, a melhoria do desempenho logístico de sistemas ferroviários está fortemente relacionada com a intervenção em um ou mais parâmetros pertencentes às categorias elencadas. À parte de um melhor desempenho de tráfego, eles também influenciam em aspectos de custos, segurança e eficiência operacional das operadoras ferroviárias. De forma elucidativa, pode-se observar, na Figura 23, algumas correlações resultantes da variação de diferentes níveis dos parâmetros elencados por Krueger (1999) e os seus possíveis efeitos sobre os aspectos supracitados. Desta forma, identificar quais são as melhores políticas e estratégias dentro dessa gama de possibilidades para apoio à tomada de decisão é um grande desafio para a melhoria de competitividade nessas empresas.

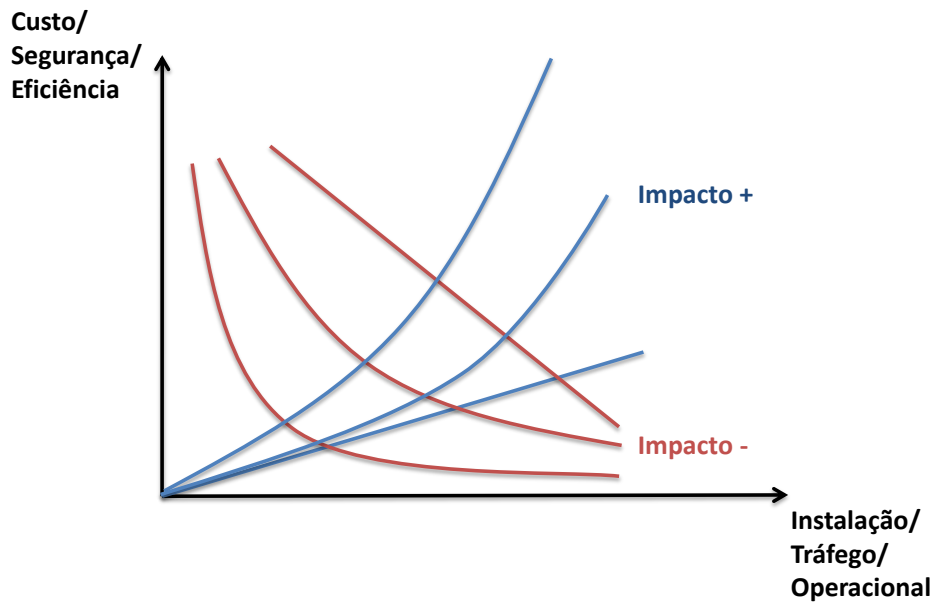


Figura 23 - Possíveis impactos dos parâmetros elencados por Krueger (1999) nas variáveis custo, segurança e eficiência operacional das ferrovias

4 MODELAGEM E ANÁLISE DE SISTEMAS FERROVIÁRIOS

Krueger e outros (2000) apontam que o transporte ferroviário apresenta grandes desafios de modelagem. Enquanto em certos setores, a formulação matemática iterativa e a modelagem por teoria das filas mostram-se razoáveis, a representação de vários aspectos da operação ferroviária não pode ser alcançada de maneira satisfatória utilizando-se qualquer dessas duas abordagens. Essa complexidade se explica pela larga dimensão dos territórios modelados, devido à realização de decisões de forma dispersa e sob condições dinâmicas, pela oscilação de prioridades ao longo do trajeto dos trens e pelo fato das operações raramente refletirem um estado estacionário. Ahuja, Cunha e Sahin (2005) garantem que estes obstáculos para a modelagem tornam desafiadoras as oportunidades de aplicação de métodos e ferramentas da Pesquisa Operacional (PO) neste modal.

Abril e outros (2008) explicam que a avaliação da capacidade de transporte ferroviário pode ocorrer por meio de métodos analíticos, de otimização ou de simulação. Os métodos analíticos são, em geral, formulações simples que fornecem soluções preliminares para o problema em estudo. Estes métodos são desenhados por meio de fórmulas matemáticas ou expressões algébricas que dimensionam uma capacidade teórica. Os resultados são dados pela quantidade de trens/dia, pela tonelagem de cargas transportadas ou pela velocidade dos trens em um determinado trecho em estudo (KRUEGER, 1999). Frequentemente, obtém-se também uma capacidade prática, dada como percentual da capacidade teórica, a exemplo da fórmula de Colson (Equação 3.1).

Os métodos de otimização, por sua vez, são desenvolvidos para fornecer soluções mais elaboradas em relação às formulações analíticas. A resolução dos problemas, nesse caso, compreende a seleção de valores para um conjunto de variáveis de decisão, de forma a maximizar ou minimizar uma função objetivo, sujeita a restrições que representam os limites operacionais do problema em estudo. Abril e outros (2008) afirmam que um problema bastante comum é a definição de um cronograma “saturado” ótimo de transporte. Essa saturação ocorre via minimização de um período de transporte (tempo compreendido entre a partida do primeiro trem e a chegada do último trem), dado um número fixo de trens, ou por meio de uma maximização do número de trens dentro de um período pré-definido. Esses resultados são obtidos empregando-se técnicas de programação matemática, a

exemplo da programação inteira mista. Contudo, Marinov e colaboradores (2013) ressaltam que a resolução desses tipos de problema pode se tornar inviável quando o número de variáveis e restrições envolvidas for muito grande, devido ao tempo computacional excessivo para se encontrar uma solução ótima (comum aos problemas das classes NP-Difícil ou NP-Completo). Como alternativa, métodos meta-heurísticos são utilizados, sendo possível atingir, em alguns casos, soluções viáveis e com valores satisfatórias em tempo reduzido (ABRIL et al., 2008).

Por fim, os métodos de simulação estabelecem uma representação do comportamento dinâmico do transporte ferroviário. Banks e outros (1998) definem simulação como uma imitação de um processo real ou um sistema ao longo do tempo. Isso ocorre por meio de sucessivas mudanças de estado em um modelo que, por sua vez, deve ser válido sobre o sistema em análise (ABRIL et al., 2008). Marinov e outros (2013) afirmam os modelos de simulação operam com entradas que consistem em um conjunto de regras e propriedades para descrever realisticamente a infraestrutura ferroviária, a movimentação de material rodante, os itinerários e demais elementos presentes em uma malha ferroviária. Ainda segundo Marinov e outros (2013), a simulação tem sido especialmente empregada no setor ferroviário para estudar a capacidade de tráfego e avaliar cenários para a implementação de mudanças operacionais (e.g. uma nova configuração de itinerário, um novo esquema de produção) ou de infraestrutura (e.g. construção de uma nova linha ou terminal). Abril e outros (2008) expõem que, em certos casos, os métodos de simulação vêm combinados com outras técnicas, constituindo o que se pode chamar de métodos híbridos. Nesses casos, pretende-se obter um processo de tomada de decisão eficiente (por meio dos métodos de otimização) em um contexto onde o sistema pode ser representado de forma mais realística (modelos de simulação).

Com o propósito de expor de forma sistemática as contribuições no setor ferroviário, serão apresentados os trabalhos com emprego de métodos de otimização, seguidos das pesquisas que utilizaram análises de simulação e concluindo com os estudos envolvendo métodos híbridos de simulação-otimização. Uma vez que não foram empregados métodos analíticos nesta pesquisa, a discussão desses trabalhos está fora do escopo deste capítulo. Por fim, discute-se as características de cada abordagem e a influência dos trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento da pesquisa relatada nesta dissertação.

4.1.1 Estudos de Otimização

4.1.1.1 Definição de infraestrutura crítica para a capacidade de tráfego na malha

Nas últimas décadas, é possível observar uma demanda crescente pelo uso do modal ferroviário norte-americano em paralelo a uma redução significativa do total de linhas disponíveis. Em virtude da deficiência de capacidade que se desenha nesse cenário, Khaled e outros (2015) desenvolveram duas soluções para o problema de reprogramação de tráfego, que acontece quando uma perturbação (avaria de material rodante, acidente ou defeito de via) acontece na malha. Desta forma, procurou-se determinar a melhor decisão de rota e a criticidade (impacto na capacidade de tráfego) dos elementos da infraestrutura existente. Em primeiro lugar, um modelo de programação inteira mista foi desenvolvido visando a minimização de uma função de custo total sujeita a diversas restrições operacionais de trens e de capacidades de linhas e pátios. Obtido o valor mínimo, os parâmetros ótimos de rotas e número de trens são fornecidos para execução da estratégica de tráfego pós-perturbação de modo a evitar grandes congestionamentos. Todavia, como problemas de programação inteira mista são altamente combinatórios e complexos, a sua utilização em largas malhas ferroviárias torna-se inadequada para solução em tempo comercial. Sendo assim, uma heurística foi proposta para esse fim, e seus resultados para malhas com até 13 nós, 23 arcos e 13 rotas mostraram-se bastante satisfatórias, com uma variação não superior a 1% dos valores obtidos com o modelo de otimização. Com esses resultados, foi possível, então, definir a criticidade de linhas e pátios em uma grande malha ao longo de todo o território americano, composta por 200 nós e 478 arcos e 552 rotas.

4.1.1.2 Apoio às decisões de reprogramação em tempo real

Ainda dentro do cenário de decisões de reprogramação, Afonso e Bispo (2011) desenvolveram uma rotina para despachadores (operadores de tráfego) de ferrovias de linha singela com um *mix* de tráfego peculiarmente europeu: trens de passageiros (rápidos e lentos) e trens de carga. Após uma busca por todos os possíveis conflitos na malha, duas soluções foram propostas: uma heurística de escolha por prioridade e mínimo atraso e um algoritmo de busca em profundidade através de uma rotina

branch-and-bound para se obter uma solução ótima. Neste sentido, os autores realizam alguns experimentos computacionais, concluindo que para certos limites operacionais (número trens ≤ 12 e pátios ≤ 24 , por exemplo), a busca pela otimalidade ainda vale a pena (solução ótima obtida em menos de 30 minutos). Além disso, foi possível notar que apesar do caráter guloso da heurística, as soluções encontradas não se mostraram consideravelmente díspares em relação às obtidas pela busca em profundidade, atestando a qualidade de uma alternativa de menor complexidade de implementação.

4.1.1.3 Minimização do tempo de espera em um sistema ferroviário de passageiro

Tipicamente, as decisões em sistemas ferroviários de passageiros concernem a satisfação dos usuários e um dos principais indicadores é o tempo médio de espera. Seguindo esse princípio, Barrena e outros (2014) formularam 3 modelos de otimização através de programação inteira mista, com o intuito de minimizar o tempo total de espera dos passageiros no sistema metropolitano de Madrid. Esse modelo apresenta a particularidade de atender a uma demanda dinâmica que varia ao longo do dia, buscando a melhor configuração de trens durante a jornada. Valendo-se de um algoritmo *branch-and-cut* e considerando-se restrições como tempo de permanência dos trens nas estações, lotação máxima dos vagões e número de trens disponíveis, foi possível encontrar resultados satisfatórios para o sistema em análise. De fato, a redução média na espera por passageiro foi de 30% e, no melhor caso, essa diminuição chegou a 77%.

4.1.1.4 Comparação do desempenho de dois sistemas de licenciamento distintos

Conforme evidenciado na seção 3.1.2 (Controle de tráfego ferroviário), existem dois tipos básicos de licenciamento (controle de tráfego) de trens: a intervalo de tempo e a intervalo de espaço. Tratando desse problema, Harrod e Schlechte (2013) explicam que há uma formulação matemática específica para a representação de cada sistema de licenciamento e, desta forma, pretenderam avaliar o desempenho de ambas abordagens, aplicando-as a sistemas ferroviários de características distintas. Através de modelos de programação inteira, onde uma função de lucro ponderado é maximizada (diferenciando-se somente pelas restrições de cada tipo de

licenciamento), foi possível observar que para mais da metade dos casos, a aplicação dos diferentes modelos não gerou diferenças no valor ótimo da função objetivo e no tempo de processamento. Na média geral, a diferença foi somente de 5% e, em alguns casos particulares, as diferenças discrepantes foram devidas a problemas de especificação do problema (modelagem) em cada caso estudado. Desta forma, constatou-se que não existe uma preferência em termos de retorno financeiro na escolha de qualquer dos dois métodos no sistema modelado.

4.1.1.5 Estratégia de tráfego em “onda verde” para eficiência energética

Em muitas ferrovias utiliza-se um sistema de sinalização de bloqueio fixo de três aspectos luminosos. Desta forma, os trens podem encontrar, ao longo de seus percursos, um sinal verde, amarelo ou vermelho nos limites entre duas sessões de bloqueio (SB). Isso significa que três alternativas são possíveis: seguir com máxima velocidade autorizada (as duas próximas SB estão livres); com um valor limite abaixo da velocidade máxima autorizada (somente a próxima SB está livre) ou ter que parar (próxima SB está ocupada), respectivamente para os sinais verde, amarelo e vermelho. Apesar desse sistema garantir a segurança do tráfego, o dispêndio energético é muito maior em virtude das desacelerações e acelerações a que as locomotivas são submetidas na variação da velocidade. Desta forma, Corman e outros (2009) propôs uma solução de programação de trens chamada “onda verde”, pela qual os trens só encontram sinais verdes à sua frente. Através de um algoritmo *branch-and-bound* aliado a estratégias de resolução de conflitos de trens na malha, os autores puderam demonstrar que essa estratégia fornece bons resultados, compatibilizando minimização de atrasos e eficiência energética. Entretanto, ressaltam que o tempo computacional médio de resolução de 120 segundos não é aceitável para aplicação real, exigindo a formulação de heurísticas que atendam a esse propósito com boas soluções.

4.1.1.6 Reprogramação em um horizonte de tempo móvel de curtíssimo prazo

Caimi e outros (2012) desenvolveram um sistema de apoio a decisões de controle de tráfego em uma malha de trens de passageiros. Este sistema trabalha na forma de um modelo preditivo em circuito fechado, com as seguintes etapas: a)

obtenção e processamento de informações sobre as condições do tráfego em tempo real; b) recomendação de decisões para os despachadores; c) atualização das condições de tráfego a partir das decisões tomadas. Desta maneira, através dos atrasos ocorridos ao fim de cada ciclo, os controladores de tráfego podem reprogramar constantemente o fluxo de trens a partir de uma decisão ótima obtida por um modelo de otimização. Uma peculiaridade interessante é que as decisões, nesse modelo, consideram um horizonte de decisões móvel e de curtíssimo prazo (20 minutos), o que confere um alto grau de confiabilidade das previsões. Uma falha reconhecida pelos autores é que as perturbações consideradas para as decisões de programação dizem respeito somente ao atraso comum de percurso de trens na malha, excetuando-se os casos de avaria de material rodante, acidentes ou desgaste de infraestrutura.

Para obter as melhores decisões de reprogramação os autores desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo, visando maximização de 4 critérios de confiabilidade e pontualidade do serviço. Para diagnosticar a qualidade dos resultados, os autores aplicaram esse sistema em um trecho de malha de trens de passageiros na Suíça podendo observar que existem inconsistências com relação ao tempo de processamento no modelo, às quais os autores sugeriram abordagens alternativas de menor desempenho, mas aplicáveis para tempo comercial de processamento, a exemplo de métodos heurísticos.

4.1.1.7 Programação estocástica para resolução de problemas com incerteza de atraso

Semelhante ao trabalho de Caimi e outros (2012), Meng e Zhou (2011) desenvolveram um método para resolução de problemas de reprogramação em um horizonte de tempo móvel, em tempo real. Uma primeira particularidade observada na formulação, entretanto, considera a característica de incerteza dos possíveis atrasos causados por perturbações na malha. Desta forma, foi utilizada uma técnica de programação estocástica para considerar os diferentes cenários probabilísticos no horizonte de tempo móvel, visando otimizar as decisões de reprogramação baseado nestas entradas. Posteriormente alguns experimentos numéricos foram conduzidos para se demonstrar a importância de decisões de reprogramação de forma mais robusta, considerando um ambiente dinâmico e estocástico. Os

resultados se mostraram mais robustos que em Caimi e outros (2012), uma vez que horizontes de tempo mais longos para decisão foram modelados. Também foi possível concluir que, em termos do tempo total de atraso minimizado, os valores obtidos foram entre 10% e 30% melhores, em relação às soluções de informação perfeita (determinísticas).

4.1.1.8 Meta-heurísticas eficientes para detecção e resolução de conflitos

Os problemas de detecção e resolução de conflitos foram também uma preocupação do trabalho desenvolvido por Corman e outros (2010). Para tanto, os autores desenvolveram uma série de algoritmos de busca tabu, com diferentes configurações de vizinha e estratégia de busca, a fim de minimizar o atraso total devido a reprogramação das rotas dos trens. Essas abordagens foram testadas em uma malha ferroviária de passageiros com extensão de 50 km, 191 sessões de bloqueio, 21 plataformas e 356 possíveis rotas.

Para testar a qualidade de cada método desenvolvido, os autores compararam as soluções obtidas com modelos de otimização (por método *branch-and-bound*) e puderam comprovar que o valor ótimo foi alcançado em 4 das 5 versões dos algoritmos de busca tabu. Além disso, os autores puderam comparar que as soluções obtidas com 20 segundos de processamento foram em média 15% melhores que aquelas encontradas após 180 segundos nas versões antigas dos algoritmos de busca tabu desenvolvidos para este propósito por trabalhos anteriores.

4.1.1.9 Minimização de tempo total de viagem em uma malha de trem de passageiros

Dotoli e outros (2013) desenvolveram um modelo para a programação diária de trens de passageiros em uma malha regional italiana. Para tanto, um modelo misto de programação inteira linear foi executado para minimizar o tempo total de viagem ao longo de uma jornada para obtenção de um diagrama de cruzamentos (vide Figura 22) ótimo. Além das restrições habituais de prevenção de conflitos, procurou-se identificar soluções que atendessem a um melhor cenário de custo-benefício, considerando um bom nível de serviço com uma menor utilização de material rodante. A solução final para o modelo de 260 variáveis e 244 constantes foi

encontrada com 10 minutos de processamento, através de um critério de parada que considerou melhorias menores que 5% como insignificantes.

4.1.2 Estudos de Simulação

4.1.2.1 Desempenho de duas estratégias operacionais de tráfego

Marinov e Viegas (2011) analisaram uma empresa ferroviária portuguesa com o intuito de avaliar impactos de dois padrões básicos de tráfego: operação improvisada e operação estruturada. O primeiro caso trata-se de uma estratégia indisciplinada de programação, na qual os trens só deixam os pátios de carregamento a partir de uma tonelagem mínima que se aproxime dos limites de capacidade da malha, permitindo uma redução da quantidade de trens na via. A segunda estratégia visa uma confiabilidade de tempos de partida de trens próxima à que ocorre com transporte de passageiros, exigindo um alto nível de padronização, caracterizado por planos operacionais integrados, eficientes e detalhados.

Os autores conduziram um estudo de simulação de eventos discretos para avaliar o comportamento do sistema, utilizando como ferramenta o *software* comercial Simul8. Os resultados evidenciaram que o percentual de tempo em fila dos trens foi maior para o primeiro caso em relação ao segundo, acontecendo o inverso em relação ao percentual de tempo operando efetivamente. De fato, em um período de 24 horas, o número estimado de trens com a estratégia improvisada foi de 60 entrando no sistema em seus pontos de carregamento e 59 saindo em seus pontos de descarga, comparado a 70 entrando e 70 saindo na estratégia estruturada. Levando-se também em consideração o impacto financeiro de cada operação, os autores estimaram o custo anual de cada tipo através do custo unitário de vagões esperando em filas por pátio, obtendo um valor quase quatro vezes maior para a estratégia improvisada. Desse modo, o estudo permitiu inferir que deve haver um esforço direcionado ao controle de uma programação fixa de serviço, evitando a perda de negócios quando desvios significativos geram redução de receitas, custos com sistemas inativos e deterioração de recursos estáticos, prejudicando a imagem da empresa como uma boa provedora de serviços de frete.

4.1.2.2 Avaliação da inclusão do transporte de cargas leves em um sistema metroviário

Em um estudo similar, Motraghi e Marinov (2012) investigaram um sistema metroviário britânico, propondo associar oportunidades de frete urbano de mercadorias à infraestrutura existente de transporte de passageiros. O sistema em questão é uma linha do metrô de Newcastle, Inglaterra, que compreende a região entre um aeroporto e uma estação ferroviária localizada em um centro urbano de consolidação de cargas leves e de alto valor agregado.

Por intermédio do *software* Arena, os autores desenvolveram um estudo de simulação de eventos discretos para descrever o sistema atual e propor duas alternativas para inclusão do negócio de fretes neste contexto. Ambas tratam da adição de trens na malha diferindo somente pela estratégia de operação: improvisada e estruturada, semelhante ao estudo realizado por Marinov e Viegas (2011). Entretanto, com resultados diferentes, onde a estratégia improvisada trouxe mais benefícios, obteve-se uma melhor eficiência através de um maior percentual de utilização em todos os subsistemas analisados, apesar de incremento nos tempos de espera. Os autores alertaram, entretanto, para os problemas organizacionais que podem ocasionar uma operação improvisada (de cargas) acontecendo em paralelo com uma operação estruturada (transporte de passageiros) numa mesma malha, podendo afetar a estratégia principal do serviço de metrô, que é o da confiabilidade de prazos para o transporte de passageiros. O estudo também permitiu concluir que o sistema poderia acomodar 5% a mais de trens acima da operação prevista, sem danos significativos à circulação.

4.1.2.3 Comparação da eficiência de três estratégias de sinalização

Hongsheng, Jing e Shiming (2012) realizaram um trabalho visando avaliar o desempenho da circulação de trens a partir de três sistemas de sinalização ferroviária: blocos fixos, misto e blocos em movimento. O sistema de blocos fixos é caracterizado pela existência de diferentes regiões entre trens deslocando-se no mesmo sentido, onde o trem anterior deve obedecer a determinadas regras de velocidade a depender da região onde se encontra. No segundo sistema, a velocidade do trem anterior depende da sua curva de frenagem e uma distância de segurança em relação a uma posição estática da seção onde o trem posterior se

encontra. A última estratégia é semelhante à anterior, diferindo-se somente por considerar o posicionamento dinâmico e a curva de frenagem do trem posterior. Para tanto, foi utilizado um autômato celular, que consiste numa grade com células que podem assumir diversos estados E_t , que são descritos deterministicamente através de uma associação temporal que depende do estado imediatamente anterior: $E_t = f(E_{t-1})$. No caso em estudo, cada estado é determinado pelas regras de velocidade dos trens a partir das lógicas de controle de velocidade dos três sistemas de sinalização apresentados. Através da ferramenta VC++6.0, os autores executaram a simulação e graficamente puderam avaliar as trajetórias por meio de diagramas espaço-tempo, observando uma maior eficiência na estratégia de blocos em movimento (após 2000 estados, 28 trens estavam em circulação, ante 14 e 20 da primeira e da segunda estratégia, respectivamente). Ademais, os autores também identificam que com uma correta proporção de trens lentos e rápidos dentro da rede e uma sequência de partidas adequadas o tempo de percurso pode ainda ser reduzido significativamente.

4.1.2.4 Apoio às decisões de reprogramação em tempo real combinando SED e simulação em redes

Como já foi mencionado anteriormente, a programação diária realizada pelos especialistas pode ser prejudicada por perturbações que ocorrem ao longo da operação, a exemplo de condições ambientais adversas, falhas de equipamentos e acidentes. Para enfrentar esse tipo de situação, onde os profissionais da central de tráfego devem reprogramar com rapidez a circulação, Cheng (1998) desenvolveu um modelo combinando SED e simulação em redes em um sistema ferroviário de fluxo intenso. A ideia principal foi aproveitar os benefícios e mitigar as deficiências de cada método para construir um algoritmo aplicável à rotina dos planejadores de tráfego. De forma experimental, os resultados do modelo proposto foram testados, permitindo concluir que o método proposto se mostrou mais eficiente e flexível do que a simulação em redes, retendo as vantagens de um modelo em SED.

4.1.2.5 Compatibilizando estratégias de tempo e eficiência energética

Sabe-se que alguns aspectos da dinâmica ferroviária (movimento de trens) influenciam significativamente nos custos operacionais e no tocante à eficiência

energética (consumo de combustível). Buscando relacionar algumas variáveis da dinâmica ferroviária aos propósitos de programação (e reprogramação) de trens, Medanic e Dorfman (2011) desenvolveram um modelo também em SED a partir do algoritmo TAS (*Travel Advance Strategy*), que funciona como uma disciplina de filas para decidir o movimento dos trens (avançar ou parar). Dentro deste cenário, os autores propuseram medir a eficiência do algoritmo em termos de dois critérios distintos: tempo e energia. Para o critério tempo, verificou-se o quanto o intervalo entre a partida do primeiro trem e a chegada do último trem se aproxima de um intervalo em condições ideais (sem cruzamentos de trens em sentidos contrários, como em linhas duplas, uma reservada para cada sentido). Para o critério energia, um ajuste no cronograma foi realizado, reduzindo a espera em cruzamentos através da diminuição da velocidade dos trens, mas mantendo a eficiência do critério anterior. Com isso, reduz-se diretamente o consumo energético que é, matematicamente, uma função convexa que depende da velocidade do trem. Os resultados mostraram-se satisfatórios com uma complexidade de implementação moderada, atingindo os objetivos do critério tempo (intervalo com apenas 5% superior em relação às condições ideais) e de eficiência energética previstos.

4.1.2.6 Um *framework* para gerenciamento estratégico de uma malha ferroviária

Meireles (2010) desenvolveu uma representação dos trens de ciclo de minério de ferro na EFVM (Estrada de Ferro Vitória a Minas) do Sistema Sudeste de companhia Vale, entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. O modelo foi validado com a observação da variação dos valores de diversas variáveis em relação aos observados no sistema real. Posteriormente, foi elaborada um módulo de interface com o usuário, em MS Excel, permitindo uma análise de planejamento a longo prazo da malha através da investigação de diversas políticas operacionais. Dentre as diversas possibilidades, pode-se listar o dimensionamento da frota de vagões para atender determinado volume de transporte, a identificação dos principais gargalos a partir desse aumento de volume e avaliar os impactos de investimentos em estrutura viária, de carrega e de descarga no sistema.

4.1.2.7 Influência do virador de vagões no tempo de ciclo dos trens

Guachala (2012) investigou a influência na formação de filas na malha a partir da operação do virador de vagões (equipamentos para descarga de vagões de minério), no porto da concessionária MRS, na cidade de Itaguaí-RJ. O autor considera esse processo como um gargalo para muitas operadoras ferroviárias no Brasil. Neste caso, foram analisados os efeitos de diversos parâmetros do processo de manutenção destes equipamentos sobre o desempenho do tempo de ciclo dos trens, permanência na descarga e tempo de espera em filas. 4 cenários foram analisados e os resultados mostraram que a medida mais eficaz, em termos de redução de tempo de ciclo, foi a melhoria no tempo de reparo das falhas mecânicas diretas do virador de vagões. De fato, a redução de 1 hora no tempo de reparo possibilitou uma economia de custos de 2,61% em relação à tarifa de utilização da malha.

4.1.2.8 Avaliação da classificação e formação de trens na operação ferroviária

O esforço de representação de pátios ferroviários de classificação e formação de trens é bastante considerável, uma vez que o conjunto de regras e restrições de movimentação nesses sistemas torna os métodos de otimização matemática bastante difíceis de serem aplicados. Dessa maneira, a simulação tem se apresentado como uma ferramenta satisfatória e bastante empregada. Imbuídos nesse propósito, Syed e Easa (2011) desenvolveram um modelo em MS Excel e VBA para uma simulação de eventos discretos e determinística, com a presença de vários pátios de classificação e formação de trens. Posteriormente, comparou-se alguns planos operacionais de acordo com três saídas do modelo, a saber: a) o total de trens por plano; b) a quantidade de operações de classificação; c) total da distância percorrida por cada vagão no plano. Desta forma, foi possível escolher o plano que melhor se adequava à minimização destas três perspectivas, que possuem um impacto direto nos custos operacionais da malha ferroviária analisada.

4.1.2.9 Modelagem de pátios ferroviários complexos

Lin e Cheng (2009) descreveram o processo de classificação e formação de vagões em um pátio ferroviário de grande dimensão no sistema norte-americano

Norfolk Southern. Para a modelagem, o *software Rail Yard Sim* (implementado em linguagem java) é desenvolvido para representar todos os possíveis movimentos de separação, formação de blocos e expedição de vagões ao longo das diversas linhas existentes nesse pátio. Além de um mecanismo de simulação, o *software* conta com uma biblioteca de heurísticas e algoritmos (e.g. método do caminho mais curto) para tomada de decisão sobre os processos existentes, uma animação 3D para visualização das decisões e um módulo de análise estatística de dados. Os autores garantem que essa ferramenta tem o grande potencial de reduzir drasticamente o tempo de modelagem de sistemas com essas características, permitindo análises que contribuam com a eficiência e os custos para os operadores ferroviários.

4.1.2.10 Avaliação de performance em pátios ferroviários complexos

Em um outro trabalho mais analítico sobre pátios de classificação e formação, Lin e Cheng (2011) utilizaram o *Rail Yard Sim* de forma a investigar o desempenho desse tipo de sistema. É importante mencionar que o trem, ao acessar esse tipo de infraestrutura, atravessa 4 regiões: a) linhas de recepção, onde liberam a via principal para serem encaminhados para a classificação; b) linhas de classificação, às quais os vagões são classificados em blocos, acessando-as através de uma separação por gravidade; c) linhas de *pullback*, para onde os blocos formados na linha de classificação são puxados para formarem um novo despacho; d) linhas de formação/expedição, que formam a composição ferroviária, a partir das linhas de *pullback*, para uma nova viagem. O objetivo desse trabalho foi o de apresentar algumas métricas de desempenho importantes na avaliação da capacidade desses tipos de pátios. Através de simulações no sistema, foi possível perceber que o gargalo do processo encontra-se nos processos compreendidos entre b) e c). De fato, a ordem com que os blocos de vagões são classificados interferem consideravelmente no tempo de viagem total dos trens, uma vez que atrasos nesses processos podem levar a adiamento no tempo de partida dos trens. Partindo desse pressuposto, constatou-se graficamente que um alto volume de vagões e uma alta heterogeneidade dos blocos conduzem a um grande número de má formações, impondo certos limites para uma operação eficiente.

4.1.2.11 Um simulador para o planejamento estratégico do sistema ferroviário nacional na Holanda

Middelkoop e Bouwman (2001) descrevem o uso de um simulador desenvolvido pelo setor de análise de capacidade do sistema ferroviário holandês e por uma consultoria de simulação internacional. De forma robusta, o SIMONE (nome dado à plataforma) tem a função principal de construir a programação anual de trens de acordo com o perfil de demanda definido para o período de interesse. Por outro lado, também é capaz de fornecer análises interessantes para a malha modelada, a partir de diversas características de infraestrutura e operacionais definidas inicialmente no modelo. Com uma interface bastante intuitiva, os autores puderam demonstrar algumas análises de resultado como o nível de atraso nos trechos visualizados a partir de gradiente de cor entre o vermelho e verde (pior e melhor cenário, respectivamente), além de permitir comparações entre diferentes políticas operacionais através dos seus resultados obtidos na simulação. Por fim, dois estudos de caso considerando a malha como um todo e um trecho específico foram ilustrados, elucidando as potencialidades de resolução de gargalos no sistema.

4.1.2.12 Modelagem de tráfego de alta intensidade em via de múltiplas configurações

Dessouky e Leachman (2002) desenvolveram um modelo do corredor Los Angeles-Inland Empire Trade caracterizado por trens de passageiros e de cargas em áreas metropolitanas de alta densidade e múltipla configuração de tráfego. A via se caracteriza por um misto de linhas singelas, duplas e até triplas, com diferentes prioridades e velocidades de trens. O objetivo principal foi o de verificar as melhores políticas de alteração na infraestrutura existente para melhoria da capacidade de tráfego existente, tendo em vista a perspectiva de duplicação da demanda por tráfego em um horizonte futuro de 10 anos. O sistema foi modelado em uma simulação de eventos discretos, considerando-se uma heurística de resolução de possíveis conflitos de trens por recursos de tráfego (estações e linhas). Desta maneira, para se atender a demanda futura com o mínimo atraso operacional, identificou-se uma expansão de infraestrutura de linhas duplas para triplas em 2 trechos, de linha singela para dupla em um outro trecho e a construção de um viaduto ferroviário. Desta forma, mostrou-se ser possível reduzir em 90% o atraso

total tanto para trens de passageiro quanto os de carga em relação a um cenário sem modificações na infraestrutura.

4.1.2.13 Interferências do transporte de passageiros em malhas de trens de carga

Com um aumento de 84% na demanda prevista até 2035 nas ferrovias norte-americanas, Sogin, Barkan e Saat (2011) avaliaram os impactos do incremento de trens de passageiros em um trecho caracterizado pelo transporte de cargas. Os autores lançaram mão da ferramenta *Railway Traffic Controller* (RTC), definindo a variável de interesse como o atraso para cada 100 milhas de tráfego por trem. Inicialmente, vários cenários homogêneos (contendo somente trens de carga) com circulação entre 8 e 40 trens foram estabelecidos como base de comparação. Neste primeiro caso, pôde-se observar um aumento exponencial dos atrasos, como esperado para o caso de ferrovias caracterizadas por linhas singelas. A partir de então, observou-se em duas etapas: a) os efeitos da heterogeneidade de prioridade dos trens, incrementando-se trens de passageiros com velocidades análogas aos trens de carga (50 mph) e b) os efeitos da heterogeneidade de velocidades dos trens, incremento de trens de passageiros a velocidades de 79 mph, 90 mph e 110 mph. No primeiro caso, pôde-se constatar que as diferentes prioridades entre os trens de passageiro e de carga exercem uma influência bastante negativa no tráfego para todos os casos (comparando-se adições iguais de trens de passageiros e de cargas). Isso ocorre em função de aumentarem-se os motivos de paradas de trens em desvios para realização de ultrapassagens. No segundo caso, observou-se que o aumento de velocidades produz um aumento na variabilidade do atraso, sem uma tendência clara de crescimento ou decréscimo para cada velocidade estudada em relação ao parâmetro inicial de 50 mph. Com isso, os autores propõem a separação do tráfego de passageiros e de cargas em turnos ao longo da jornada como uma possível solução para os problemas advindos da heterogeneidade da operação ferroviária.

4.1.2.14 Um *software* para planejamento de recursos humanos no setor ferroviário

Um caso especial do emprego da simulação no setor ferroviário é o de planejamento, análise e alocação de pessoal (tripulação) na operação. Guttkuhn,

Dawson e Trutschel (2003) descrevem as funcionalidades de um *software* desenvolvido para o sistema ferroviário canadense denominado *TrainSim*, baseado em simulação de eventos discretos. A alocação de recursos humanos na operação ferroviária tem implicações diversas no processo como um todo. Um bom ajuste na escala das tripulações pode acarretar ganhos em termos de fluidez e custos da operação, além da mitigação de riscos relacionados a violação de leis trabalhistas. Um outro retorno intangível, mas significativo segundo os autores, diz respeito à melhoria no desempenho dos colaboradores, devida ao estímulo psicológico resultante do atendimento aos requisitos de descanso entre jornadas e máxima jornada de trabalho. Desta maneira, a partir de três entradas de dados (lógica de tráfego de trens, custos e regras de regulamentação de tripulação e o cenário de alocação de recursos) a simulação é executada pelo programa *TrainSim*, obtendo algumas saídas úteis para o analista do processo. Dentre as principais variáveis dentro do horizonte de simulação definido, pode-se destacar o custo operacional (discriminado em produtivo e não-produtivo), o número de trens não-locados, o número de horas produtivas e a carga de trabalho total do cenário de alocação escolhido. Sendo assim, atestou-se a validade desta ferramenta para uma análise mais racional de políticas de gestão de recursos humanos no setor ferroviário.

4.1.2.15 Avaliação de políticas de atribuição de tripulações em um sistema ferroviário

Ainda tratando do problema de planejamento de alocação de recursos humanos, Chahar, Cheng e Pranoto (2011) desenvolveram um sistema com arquitetura semelhante ao *TrainSim* abordado por Guttkuhn, Dawson e Trutschel (2003). Em primeiro lugar, um esquema de programação de trens baseado em pares de rota origem-destino é adicionado ao modelo. Em seguida, as limitações de regulamentações trabalhistas são informadas e as condições operacionais de alocação desses recursos, segundo as regras do negócio, são estabelecidas. A partir de então, uma simulação de eventos discretos foi executada na plataforma DESMO-J (desenvolvida em linguagem java), produzindo resultados como a quantidade de movimentos entre alojamentos, custos e utilização de tripulação e a quantidade mínima de equipes necessárias para atender a demanda de transporte. Um estudo de caso foi conduzido em uma grande ferrovia norte-americana (Norfolk

Southern), onde, a partir de variações no percentual de desmarcação no processo de atribuição de tripulações, observou-se efeitos significativos principalmente no tempo médio de atraso dos trens.

4.1.2.16 Uma arquitetura orientada a serviços para a modelagem ferroviária

Analisando o processo de modelagem de sistemas ferroviários, Kanacilo e Verbraeck (2006) identificaram três entraves principais: a) falta de flexibilidade para ligar os sistemas de informação e bases de dados; b) existência de diversos usuários potenciais dos modelos, mas a maioria dos sistemas de simulação são elaborados e utilizados uma única vez; c) estrutura rígida dos modelos, que os torna de difícil reuso e manutenção. Deste modo, os autores desenvolveram uma arquitetura orientada a serviços no processo de modelagem, que consiste na disponibilidade de aplicações implementadas na forma de serviços, podendo ser acessadas em interface *web* ou outras formas de comunicação baseada nos princípios da computação distribuída. Em suma, essa arquitetura constitui uma biblioteca de simulação de componentes para representar a infraestrutura ferroviária (e.g. linhas, veículos, sensores, estações e sinais de tráfego), ordenadas em diferentes classes de objetos. Para testar e validar o modelo, 4 cenários foram modelados com diferentes quantidades de trens, comparando-os com outros 4 com essas mesmas quantidades, mas considerando-se prioridades para um certo grupo de veículos. A simulação permitiu concluir que o sistema mostrou-se capaz de comportar entre 88 e 132 veículos sem perdas significativas de capacidade. Além disso, a inclusão de prioridades não melhorou a performance de tempo de trânsito dos trens mais prioritários (uma conclusão inesperada para esse caso). De maneira geral, o sistema se mostrou apropriado para atender aos propósitos de ser um modelo distribuído, mas que necessita de mais desenvolvimentos para se tornar uma aplicação mais completa.

4.1.2.17 Simulação para avaliação de capacidade e validação de modelos analíticos

Reconhece-se na simulação um maior potencial de representação em relação às demais técnicas empregadas para modelagem do setor ferroviário. Partindo dessa premissa, Confessore e outros (2009) desenvolveram um método

empregando otimização e simulação para avaliação da capacidade da linha Verona-Brennero, na Itália, parte do corredor europeu de passageiros de Hamburgo-Nápoles. Primeiramente, um algoritmo de agendamento de tarefas é executado procurando atribuir os trens às rotas de partidas e chegadas em cada estação a um menor tempo possível. Em seguida, uma simulação é executada para verificar a qualidade atingida com o algoritmo inicial. Neste ponto, os autores puderam atestar a validade da representação, uma vez que as diferenças das variáveis analisadas entre os dois casos não foram superiores a 2%. Mais adiante, uma análise de capacidade permitiu avaliar que ganhos de até 50% na quantidade de trens/dia circulando nesse trecho podem ser atingidas com uma redução do *headway* (espaço de tempo entre trens no mesmo sentido) de 6 minutos para 1 minuto.

4.1.2.18 Avaliação de demanda flutuante em um sistema Maglev

Um trem de levitação magnética (Maglev) é um moderno sistema de transporte, no qual o veículo se mantém a uma pequena distância do trilho guia, induzido por ímãs. Este tipo de veículo é tracionado por um motor linear e tem a principal característica de ser não-tripulado. Uma vez configurado em um sistema em que os veículos estão extremamente sujeitos à via, suas restrições de tráfego são bastante similares a outras estruturas ferroviárias. Analisando uma linha ainda em fase de implementação na Coreia do Sul, Cha e Mun (2014) estudaram as perspectivas de sazonalidade da demanda ao longo de um período diário e semanal, para traçar medidas de controle de atrasos de tráfego. Desta forma, o transporte foi modelado sob o formalismo de uma especificação de sistema de eventos discretos, através da ferramenta DEVSIM++, implementada em linguagem C++. Foi possível observar que das 6 estações modeladas, sérios problemas de atraso ocorrem quando existem picos de demanda de passageiros nas estações mais ao sul. Sendo assim, os autores propõem mais cautela no desenho das linhas nessa região, do ponto de vista de qualidade de serviço do futuro transporte, que pode ser traduzida em satisfação dos passageiros.

4.1.3 Estudos com métodos híbridos de Simulação-Otimização

4.1.3.1 Simulação de trens de ciclo de minério em uma malha de grande extensão

No seu trabalho, Fioroni (2008) desenvolveu um modelo da movimentação de trens na malha nacional da MRS Logística, compreendendo os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. O foco da pesquisa foi a representação dos trens de ciclo, que são caracterizados como trens unitários (único tipo de carga) e de tamanho fixo que repetem continuamente os processos de carregamento, circulação e descarga ao longo de um período observado. Primeiramente, foi proposto um modelo para a movimentação de trens na malha, através de regras de decisão que reproduzem as decisões de controle de tráfego sobre avanço/parada dos trens ao longo de seus itinerários. Em um segundo momento, elaborou-se um modelo de otimização para a escolha dos terminais de carregamento existentes na malha para os trens recém-descarregados. Por fim, foram avaliados os impactos de algumas alterações no modelo sobre o desempenho do sistema (em termos da tonelagem útil transportada diariamente). Nesse processo, foram realizados experimentos computacionais variando-se a quantidade de vagões por composição, quantidade de trens no ciclo, indisponibilidade de terminais e investimentos em gargalos da malha. Os resultados se mostraram bastante satisfatórios com relação à validação do modelo, não sendo observadas diferenças maiores que 10% em relação às toneladas úteis médias diárias (em toneladas) do sistema real. Em síntese, foi possível desenvolver um modelo com geração de respostas úteis através de simulação e otimização para o gerenciamento do transporte ferroviário em uma malha de larga dimensão territorial.

4.1.3.2 Modelo híbrido de Simulação-Otimização para transporte de granéis agrícolas

Camargo (2010) desenvolveu um modelo de SED em um trecho ferroviário de alta intensidade de tráfego de composições de granéis agrícolas (soja) no sistema FCA-EFVM, nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Através da definição de certas figuras de mérito como nível de serviço em cada estação, tempo de espera de navios no porto, tempo de espera de caminhões nas estações de carregamento e taxa de utilização de material rodante, o autor desenvolveu cenários com diversos

perfis ótimos de resposta a partir de uma heurística implementada em linguagem de programação Visual Basic for Applications (VBA). Essa heurística foi necessária para no desenho de uma metodologia de superfície de resposta, já que existiam 200.000 possíveis combinações nos parâmetros de entrada a serem alterados. Desta maneira, foi possível observar quais as melhores combinações de parâmetros que otimizam variáveis importantes no negócio, a exemplo da minimização da demanda perdida nos processos de carregamento.

4.1.3.3 Uma particularidade interessante em um sistema ferroviário iraniano

Frequentemente, os trabalhos para representação e otimização da programação de trens apresentam peculiaridades interessantes. Esse é o caso da ferramenta de apoio a decisão desenvolvida por Sajedinejad e outros (2011) no sistema ferroviário iraniano (mesclado por linhas singelas e duplas) onde a restrição de paradas de trens para as orações diárias da cultura islâmica se juntam às demais. Para resolver o problema de minimização de atraso no planejamento diário de trens, os autores propuseram um algoritmo genético para geração de um diagrama de cruzamentos ótimo integrado em um ambiente de simulação de eventos discretos. Este algoritmo, baseado na lei natural da evolução das espécies por seleção natural, geram os horários de partida (cromossomos) onde cada trem (gene) possui seu horário específico. A partir de cada simulação (geração), as mutações tendem a reduzir os atrasos buscando uma solução ótima, verificando ao final se o critério de parada foi atendido. Os resultados mostraram-se satisfatórios, onde cerca de 400 gerações foram necessárias para atingir o atraso mínimo na geração de diagramas de horizonte de 24 horas com 152 estações e 148 trens em tráfego.

4.1.4 *Análise e Discussão dos Trabalhos*

Freitas (2001) explica que, diferentemente dos modelos de otimização, um modelo de simulação é executado ao invés de ser resolvido. Isso implica que, em uma simulação, análises possam ser realizadas quase que a todo instante, à medida que novos questionamentos sobre o processo sejam aludidos.

Grosso modo, os modelos de otimização e de simulação são antes complementares do que concorrentes no contexto ferroviário. Diante dos trabalhos

analisados, observou-se uma predominância da otimização na abordagem de problemas no nível operacional, compreendendo resoluções em pequenas extensões de malha e janelas de tempo mais curtas - períodos de planejamento de um dia ou até mesmo fração de hora. Por outro lado, nos trabalhos empregando simulação, prevaleceram aplicações no âmbito de projeto, descrevendo grandes sistemas ferroviários (e.g. Norfolk Southern, na América do Norte, e MRS Logística, no Brasil) em horizontes de tempo de planejamento mais longos, de médio e longo prazo.

Dentro do escopo das pesquisas analisadas, um problema muito comum abordado pelos modelos de otimização é o de traçar decisões de reprogramação de tráfego ótimas após uma ocorrência indesejável na circulação de trens. A maioria dos trabalhos elencados discutem essa temática e apresentam alguns métodos para contorná-la, nos respectivos contextos em que são aplicados (AFONSO; BISPO, 2011; CAIMI et al., 2012; CORMAN et al., 2010; KHALED et al., 2015; MENG; ZHOU, 2011). Como foi possível notar, este contratempo permeia o cotidiano dos controladores de tráfego do CCO, no qual as decisões devem ser tomadas de maneira adequada e célere para restabelecer o fluxo de trens. Entretanto, em um ambiente bastante dinâmico e de complexidade variável, que está sujeita à quantidade de variáveis e à natureza das restrições envolvidas, a resolução deste problema é altamente desafiadora. Uma consequência interessante desse fato é a preocupação no desenvolvimento de ferramentas de apoio que produzam respostas satisfatórias e em tempo comercial, uma escolha (*trade-off*) difícil de ser balanceada utilizando-se algoritmos de programação matemática (e.g. *branch-and-bound*), devido à complexidade computacional de resolução inerente a esses métodos. Como alternativa, boa parte dos autores utiliza meta-heurísticas que podem atingir (em tempo hábil de resposta) resultados ótimos ou satisfatórios para o contexto do problema abordado. Nestes casos, os métodos de otimização servem como parâmetros da qualidade dessas heurísticas. Outra aplicação interessante encontrada nos modelos de otimização foram as comparações entre diferentes sistemas de licenciamento e sinalização (CORMAN et al., 2009; HARROD; SCHLECHTE, 2013). Nestes casos, uma avaliação a nível mais tático da operação ferroviária é levada em conta e variáveis como a diferença entre os atrasos provocados por diferentes maneiras de controlar o tráfego são discutidas nos casos em que são aplicadas.

Os modelos em simulação, por sua vez, concentram-se na resolução de problemas de natureza mais investigativa, podendo representar de maneira mais precisa a operação sob uma perspectiva macroespacial e de longo prazo. Nestes trabalhos, os autores lançam mão de um processo experimental, avaliando o impacto dos parâmetros de entrada (definidos antes da execução da simulação) nas variáveis de saída, que caracterizam o desempenho do sistema modelado. Frequentemente, nesses casos, são analisadas diferentes estratégias nos processos de carregamento ou descarregamento (FIORONI, 2008; GUACHALA, 2012; MARINOV; VIEGAS, 2011; MEIRELES, 2010; MOTRAGHI; MARINOV, 2012), modificações na infraestrutura e operação de pátios ferroviários (LIN; CHENG, 2009, 2011; SYED; EASA, 2011), alterações na infraestrutura de linhas (DESSOUKY; LEACHMAN, 2002; MIDDELKOOP; BOUWMAN, 2001) e no planejamento de alocação de tripulação aos trens (CHAHAR; CHENG; PRANOTO, 2011; GUTTKUHN; DAWSON; TRUTSCHEL, 2003). Quanto à utilização de ferramentas para executar a simulação, observa-se o emprego de plataformas comerciais genéricas, a exemplo do Arena (CONFESSORE et al., 2009; FIORONI, 2008; GUACHALA, 2012; MEIRELES, 2010; MOTRAGHI; MARINOV, 2012), a utilização de simuladores específicos para o setor ferroviário (GUTTKUHN; DAWSON; TRUTSCHEL, 2003; LIN; CHENG, 2009, 2011; MIDDELKOOP; BOUWMAN, 2001; SAJEDINEJAD et al., 2011), além de ferramentas de elaboração própria dos autores em planilhas ou ambientes de desenvolvimento integrado livres, através das linguagens java e C++ (KANACILO; VERBRAECK, 2006).

Como os experimentos realizados em uma simulação não garantem que o desempenho do sistema (dado pelas variáveis de saída) seja ótimo, os autores costumam combinar a simulação a certas técnicas de otimização, pretendendo alcançar bons resultados em termos de tempo e custo em suas representações (CAMARGO, 2010; FIORONI, 2008; SAJEDINEJAD et al., 2011). Dessa forma, é possível reunir as vantagens de ambos os métodos, produzindo respostas de alta qualidade e confiáveis para implementação no sistema em estudo.

4.1.5 Trabalhos mais Relevantes para esta Pesquisa

O principal objetivo da pesquisa tratada nesta dissertação é o de construir um modelo válido (representativo) do transporte de cargas na FIOL. Em segundo plano,

pretende-se desenvolver análises que permitam averiguar melhores padrões de organização do sistema com relação a seu desempenho logístico. Dada a natureza de prioridades, os modelos desenvolvidos por uma estratégia de simulação exercem uma maior influência no delineamento deste trabalho, uma vez que permitem uma caracterização mais realística da operação ferroviária (ABRIL et al., 2008; KRUEGER et al., 2000). Em especial, as modelagens que consideram grandes extensões de malha operando com trens de ciclo (FIORONI, 2008; MEIRELES, 2010) foram direcionadoras nesta representação. Para o desafio de reproduzir as estratégias de resolução de conflitos de tráfego em linhas singelas, foram também importantes outros trabalhos que trataram minuciosamente desses aspectos (DESSOUKY; LEACHMAN, 2002; KANACILO; VERBRAECK, 2006; MEDANIC; DORFMAN, 2011).

Apesar de figurar em segundo plano, a modelagem por métodos de otimização contribuiu decisivamente para a análise do sistema em estudo. Nesse quesito, todos os modelos de otimização discutidos trazem consigo ideias avançadas no tocante à formulação de funções objetivo sejam de minimização de custos ou tempo ou de maximização de lucro ou rentabilidade do sistema. Além disso, nessas análises de otimização foram apresentadas considerações importantes sobre o tratamento de restrições peculiares a cada sistema ferroviário abordado.

5 MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGAS NA FIOLE

Este capítulo compreende a descrição da modelagem do transporte de cargas na FIOLE, da simulação executada nesse modelo e da análise de otimização empregada para estabelecer um desenho ótimo de infraestrutura do sistema. Na primeira seção é apresentado, resumidamente, como esses três processos estão interligados em torno de uma estrutura que está em linha com os objetivos específicos traçados para esta pesquisa. Nas seções posteriores, são abordados detalhadamente os aspectos da modelagem, simulação e otimização do sistema em estudo.

5.1 Estruturação do Método

Na seção 1.4 foram definidos 3 objetivos específicos a serem alcançados com o desenvolvimento deste trabalho que dizem respeito: a) à construção de um modelo representativo do futuro transporte de cargas na FIOLE; b) à flexibilidade dessa representação, permitindo seu reuso para futuras análises; e c) ao fornecimento de um portfólio de intervenções racionais na malha por meio de uma análise de otimização. Por conseguinte, o método foi delineado de forma a atender de forma satisfatória essas três perspectivas. A maneira como cada objetivo se inter-relaciona ao longo desse processo metodológico está apresentada na Figura 24.

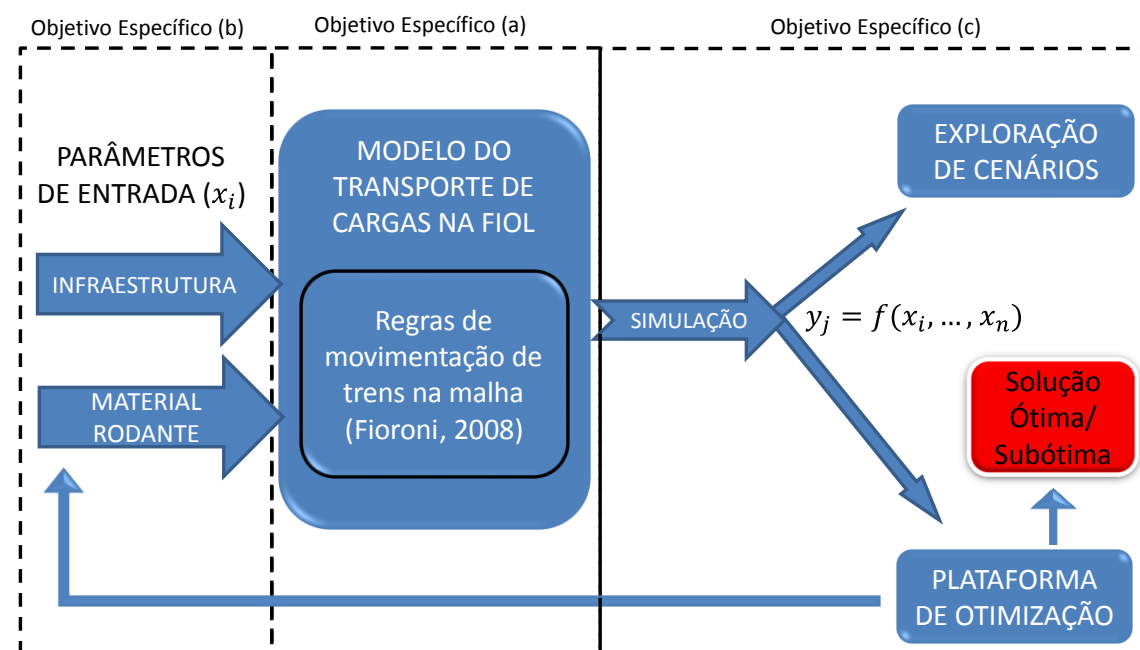


Figura 24 - Estrutura do método para a execução da modelagem, simulação e análise do sistema

Inicialmente, um modelo foi estabelecido contendo regras que reproduzem a movimentação dos trens na malha para representar o transporte de cargas na FIO. Esse modelo é caracterizado por parâmetros de infraestrutura e material rodante (variáveis de entrada $x_i \in X$, onde X é o conjunto de todos os parâmetros do modelo) que são definidos previamente à execução da simulação. Dessa forma, a simulação executa esse modelo dinamicamente, reproduzindo a movimentação dos trens durante um certo período e produzindo, ao final, resultados (variáveis de saída) para a análise do desempenho do sistema. Tais resultados ($y_j \in Y$, sendo Y o conjunto de todas as variáveis de saída) variam em função dos parâmetros que foram definidos inicialmente, ou seja, $y_j = f(x_i, \dots, x_n)$. A descrição dos parâmetros x_i e resultados da simulação y_j será melhor abordada nas seções seguintes.

Nesse estudo, os resultados da simulação foram obtidos com dois propósitos principais. No primeiro deles, através de uma exploração de cenários (alterando-se os valores x_i), procura-se identificar os processos que mais contribuem para a formação de gargalos do sistema, ou seja, aqueles que variando-se os parâmetros x_i (relativos a esses processos) afetam mais sensivelmente a capacidade de transporte na FIO, em termos dos resultados em y_j . Essa análise de sensibilidade é importante para direcionar a seleção das variáveis de decisão $x_i^* \in X^*$ em uma análise de otimização subsequente, onde $X^* \subset X$ ($x_i^* = x_i$, se o parâmetro de ordem i for escolhido como variável de decisão no modelo de otimização). Nesse contexto,

foi proposta a minimização de uma função objetivo de investimento total em infraestrutura, utilizando-se o próprio modelo e os resultados da simulação como restrições. Esse procedimento de otimização é executado por meio de um método meta-heurístico que visa obter, após sucessivas iterações (simulações), um valor ótimo da função objetivo alterando-se os valores das variáveis de decisão x_i^* .

Em síntese, essa estrutura permite a obtenção de um modelo representativo do transporte de carga na FIOLE (objetivo específico a), com grande flexibilidade para avaliar diferentes padrões de operação a partir de diversos parâmetros (objetivo específico b). Por fim, uma análise de otimização contribui na formação um portfólio de intervenções ótimo nesse sistema, baseado em uma racionalidade na escolha dos investimentos necessários para se atingir os objetivos comerciais do negócio (objetivo específico c)

5.2 Modelagem do transporte de cargas na FIOLE

Neste estudo, foi empregada uma estratégia de modelagem por processos, na qual especificou-se a sequência de ações que os trens devem executar ao longo do ciclo de transporte. Inicialmente, vale destacar quais são as fronteiras do sistema em estudo. Conforme explicado na seção 2.2, a FIOLE tem seu marco inicial no município de Figueirópolis – TO (FIG, km 0), estendendo-se 1527 km até o Porto Sul, localizado no município de Ilhéus (BA). Ao longo desse percurso, existem os seguintes polos de carregamento (BRASIL, 2010), a saber:

- Polo Intermodal Sudeste do Tocantins (PIST - km 349,2);
- Polo Intermodal Oeste da Bahia (PIOB - km 518,8);
- Polo Intermodal Sudoeste da Bahia (PISB - km 702,7);
- Polo de Caetité (PC - km 989,4);
- Polo de Tanhaçu (PT - km 1181,4);

Sabe-se que *commodities* agrícolas e outros produtos agroindustriais (principalmente complexo soja e etanol) serão provenientes do intercâmbio com a Ferrovia Norte Sul, no km 0 (Figueirópolis - TO), e dos três primeiros polos listados (PIST, PIOB e PISB). A seguir, já na região Centro-Sul do território baiano, entre Caetité e Tanhaçu, ocorrerão os carregamentos de minério de ferro, com destaque

P32	1.107,60	P48	1.348,50	P36	1175,736	P57	1485,643
P33	1.127,20	P50	1.380,00	P38	1200,893		
P34	1.145,60	P52	1.413,10	P41	1241,398		
P35	1.161,40	P54	1.443,20	P43	1271,713		
P37	1.190,00	P56	1.469,50	P45	1303,143		
P39	1.214,90	P58	1.500,90	P47	1333,228		
P40	1.229,10	P60	1520,39	P49	1363,963		

Fonte: BRASIL (2010)

Segundo estudos realizados pela VALEC (BRASIL, 2010), para o primeiro ano de operação, a previsão de movimentação de trens por sentido nos trechos a montante de Caetité é inferior 0,6 pares por dia (0,6 do PIOB, 0,4 do PISB, 0,24 do PIST e 0,1 de Figueirópolis), comparado com os valores de 3,2 pares entre Caetité e Tanhaçu e 4 pares entre Tanhaçu e Caetité. Apesar de não ser realizada uma modelagem do tráfego entre Figueirópolis e Caetité, a movimentação das cargas provenientes dessa região é representada dentro das fronteiras do sistema (como condições de contorno do problema). Isso foi possível devido às informações de quantidade prevista de carregamentos por polo de carga ao longo dos períodos modelados e dos tempos de percurso até a região de Caetité, permitindo representar a entrada desses trens a partir do primeiro pátio do modelo (P26, em Caetité).

A Figura 26 apresenta as origens das cargas de entrada no trecho considerado (intercâmbio com a Ferrovia Norte Sul, em Figueirópolis, PIST, PIOB e PISB para os produtos agroindustriais e Caetité (P26) e Brumado (P34) para o minério de ferro que seguem sentido Porto Sul, onde serão descarregados e exportados.

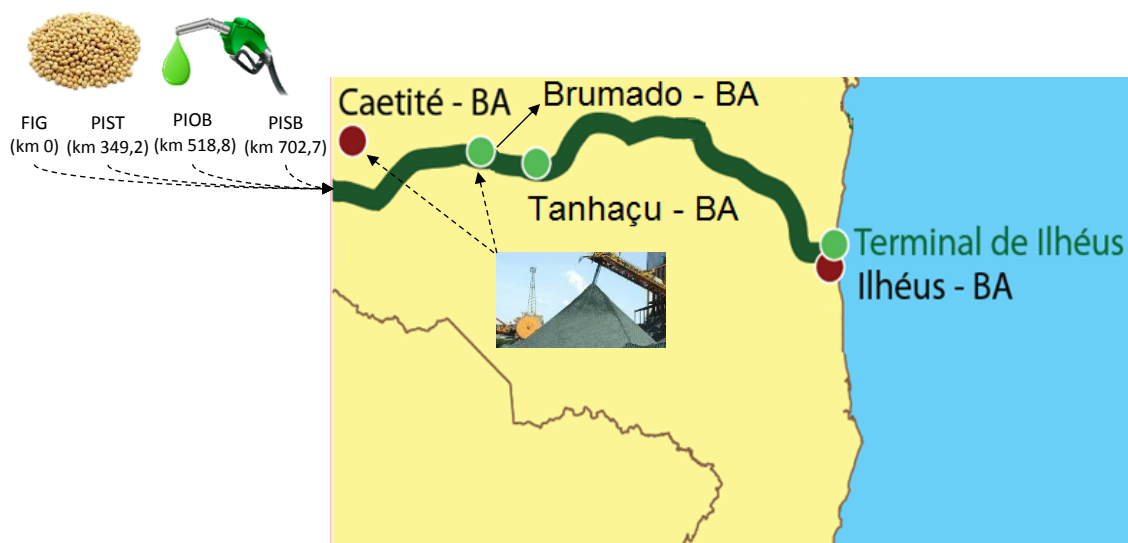


Figura 26 - Origem das cargas movimentadas no sistema FIOB

5.2.1 Representação dos trens de ciclo

Neste estudo, um maior foco é dado ao deslocamento dos trens de minério ferro que carregam em Caetité-BA (P26, no km 989,6) e Brumado (P34, km 1.145,6), em virtude da proporção mais significativa tanto em receita operacional quanto em volume de tráfego que representam para a FIOB. Esses trens apresentam peculiaridades como tamanho fixo (não anexam ou desanexam vagões em suas rotas), são dedicados a uma carga única e perfazerem o ciclo: carrega (mina) → movimenta → descarrega (porto) → movimenta, de forma contínua e repetida ao longo do tempo. As composições que realizam esse tipo de transporte denominam-se trens de ciclo (FIORONI, 2008). Meireles (2010) descreve que diversas interferências podem acontecer em sistemas que contenham esse tipo de trem. Por exemplo, caso haja atraso no processo de carregamento, haverá formação de fila de trens esperando para carregar nesta região. Em um segundo momento, os trens que estavam na fila, e foram carregados consecutivamente, podem originar uma nova zona de espera no descarregamento, ou seja, as interferências se propagam ao longo do ciclo (Figura 27).

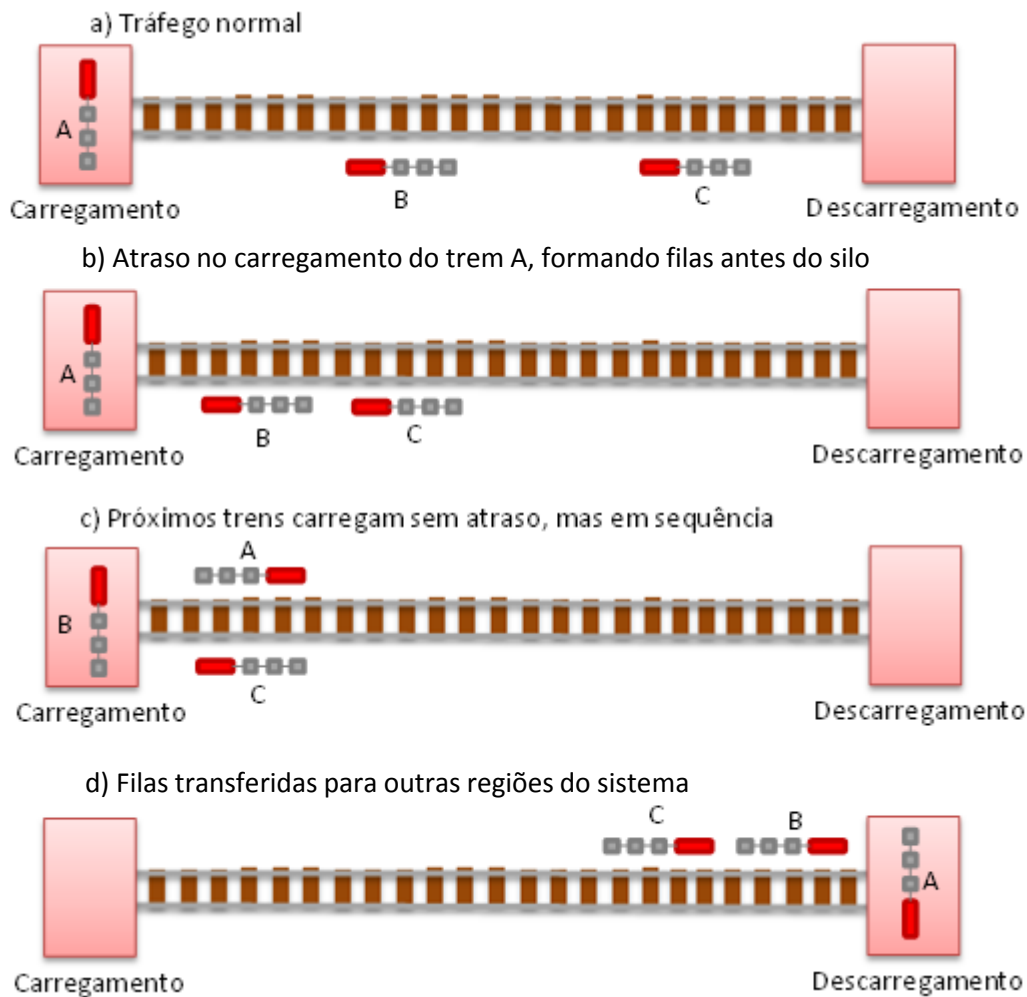


Figura 27 - Propagação de filas em um sistema ferroviário em circuito fechado (operando com trens de ciclo)

Para uma representação apropriada desse tráfego em circuito fechado, o modelo foi dividido em três macroprocessos principais que interagem entre si e contemplam todos os movimentos e atividades realizados pelos trens ao longo dos seus trajetos:

- a) Circulação de trens ao longo da FIOL;
- b) Carregamento de trens de minério nos pátios específicos;
- c) Descarregamento de trens de minério no porto.

No contexto dessa modelagem, os macroprocessos de carregamento e descarregamento representam as atividades realizadas pelos trens de minério de ferro nos terminais de carga (P26 e P34) e descarga (terminais de minério, no Porto Sul). Para o caso de outras cargas, o processo de transporte funciona baseado no conceito de trens de grade (MEIRELES, 2010). Nessa situação, os trens são formados com um conjunto de locomotivas e vagões disponível nos locais de

carregamento e partem em horários específicos para os seus destinos. Ao longo do percurso, pode ocorrer alteração do tamanho do trem (anexação ou desanexação de vagões) e, ao chegarem nas regiões de descarga, o trem é encerrado e os recursos de locomotiva e vagões são disponibilizados para formar um novo trem. Para representar esses trens, considerou-se um processo de geração nos locais de carregamento definidos (FIG, PIST, PIOB e PISB), indicando o sentido exportação, e outra geração de trens no Porto Sul, representando a movimentação desses trens no sentido importação. Ambas as gerações ocorrem através de um intervalo entre chegadas de trens pré-definido e de acordo com as previsões de movimentação adotadas pelos estudos operacionais (BRASIL, 2010). Ao atingirem as fronteiras do sistema (P26, para os trens de grade sentido importação, e Porto Sul, para os trens de grade sentido exportação) esses trens são desfeitos do modelo. Dessa forma, foi possível obter uma modelagem com foco nos trens de minério de ferro (trens de ciclo), sem perder a validade da representação do tráfego na FIOL, que contempla todas as cargas previstas nesse sistema.

5.2.2 Circulação de Trens na FIOL

Esse processo descreve a dinâmica do deslocamento dos trens, considerando os conflitos de tráfego, assim como acontece em situações reais de licenciamento baseado em bloqueio fixo. A lógica desenvolvida é bastante similar às regras de decisão de tráfego desenhadas no trabalho de Fioroni (2008), onde certas diretrizes devem ser seguidas no que concerne às possíveis situações de conflito que surgirem. Sempre que atingir uma linha de um pátio de cruzamento, essa estrutura condicional verificará a viabilidade do movimento do trem para o próximo pátio contido na sua rota (pátio de destino). Para tanto, um conjunto de questionamentos encadeados deve ser realizado para cada trem, diante da decisão de seguir adiante ou aguardar até uma condição ser atendida. Os questionamentos e suas respectivas decisões compõem essencialmente um conjunto de regras. A estrutura desse conjunto de regras está apresentada na Figura 28.

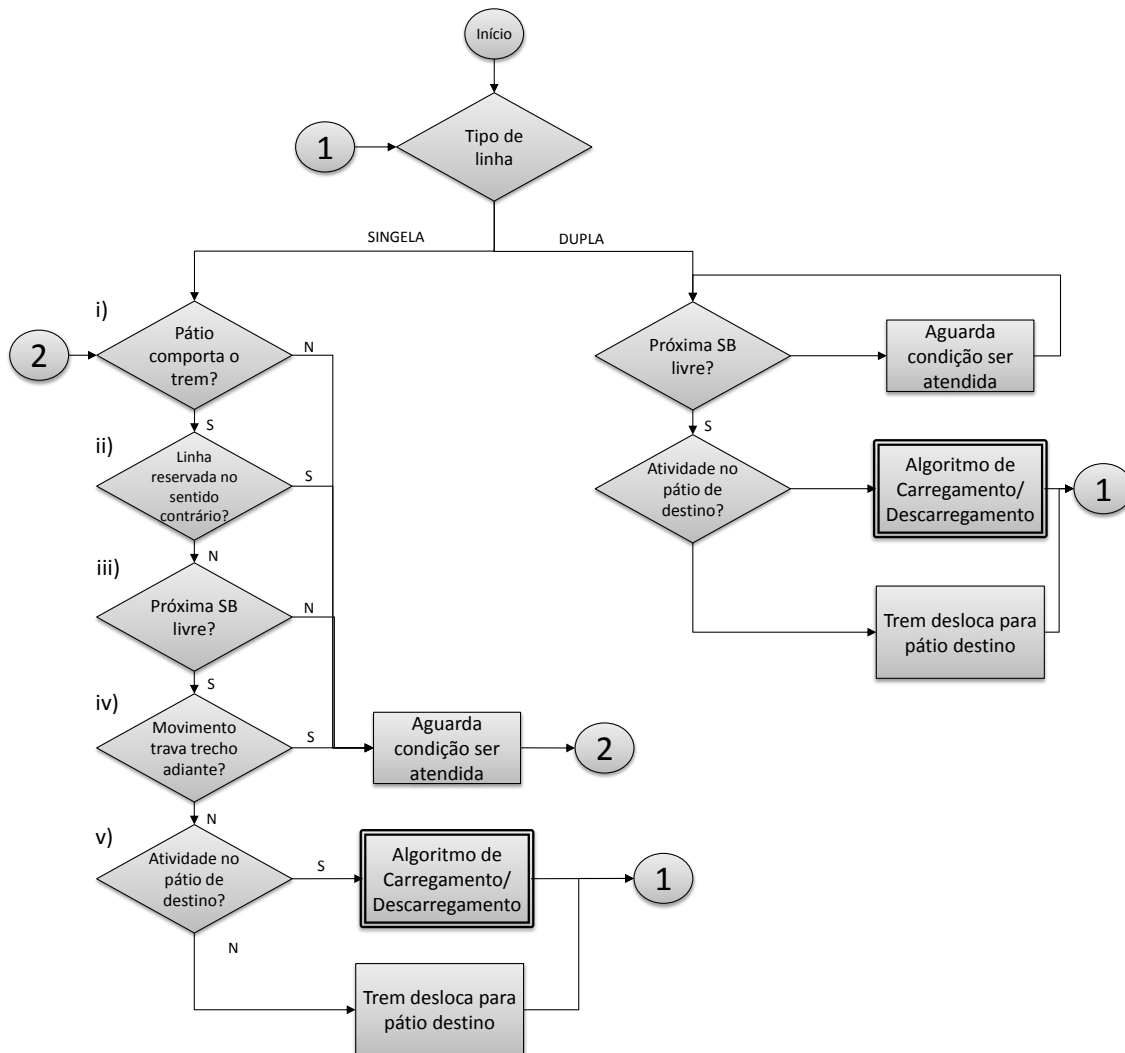


Figura 28 – Resolução de conflitos de movimento de trens na FIOLE

Inicialmente, ao acessar um pátio, a lógica de controle verifica se a linha à qual o próximo movimento destinará o trem, em questão, é singela ou dupla. É importante mencionar novamente que a infraestrutura da FIOLE não prevê nenhum trecho de tráfego duplicado. No entanto, como forma de investigação de melhoria de processos para cenários alternativos, o modelo foi construído com a possibilidade de avaliar essa perspectiva.

Sendo singelo o segmento de linha à frente, as seguintes restrições para o movimento do trem são analisadas:

- i. Capacidade do pátio de destino: a primeira limitação diz respeito à ocupação de espaços (linhas) do pátio de destino. O pátio de cruzamento seguinte só comportará o trem caso ambas as linhas (desviada e principal) estejam desocupadas ou se houver somente um trem no sentido contrário;

- ii. Ocupação da linha adiante: em um segundo momento, é verificado se uma das duas próximas sessões de bloqueio (SB) entre o pátio que o trem ocupa e o pátio de destino estão reservadas no sentido contrário ao do trem que verifica. Se isso acontecer, este trem não pode prosseguir;
- iii. Ocupação da próxima SB: essa restrição garante que o trem só prossiga se a SB seguinte estiver vazia, satisfazendo a premissa do licenciamento a bloqueio fixo;
- iv. Travamento de trecho: esse critério visa garantir que a quantidade de trens, no espaço compreendido entre o trem que verifica e o próximo trecho reservado no sentido oposto, é menor que o número de pátios de cruzamento. Este critério garante que não ocorra o travamento evidenciado na Figura 29, onde nenhum dos trens pode seguir adiante devido à não-observância dessa restrição;
- v. Atividade no pátio de destino: por fim, a última verificação identifica se o trem realizará alguma atividade no pátio de destino, devendo proceder de acordo com o tipo de algoritmo específico para cada tipo de atividade (carregamento ou descarregamento).

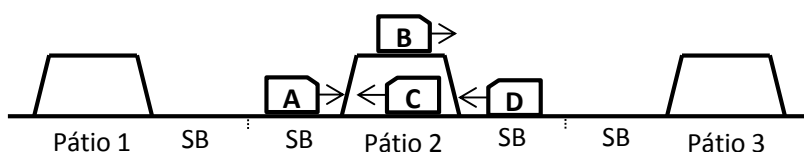
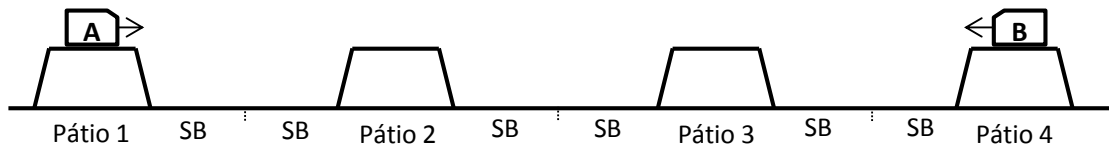


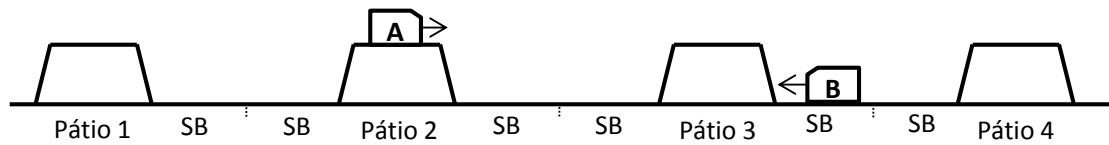
Figura 29 - Travamento de trens na malha

Para esclarecer melhor como a resolução destes conflitos é efetuada, alguns casos serão a seguir analisados. O primeiro deles, mais simples, é ilustrado pela Figura 30, onde dois trens acessam pátios consecutivos em sentidos contrários. Nesse caso, o primeiro trem a acessar um dos pátios deverá se deslocar ao longo da linha enquanto o outro aguarda a sua passagem.

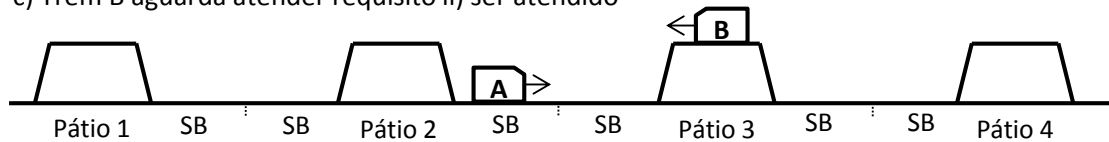
a) Iminência do conflito



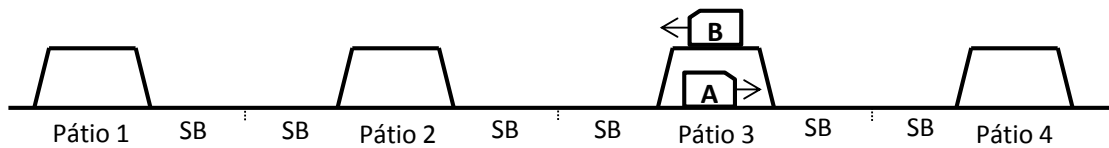
b) Trem A atende a todos os requisitos e prossegue



c) Trem B aguarda atender requisito ii) ser atendido



d) Trem A libera sentido do segmento entre os pátios 2 e 3



e) Trem B autorizado a prosseguir

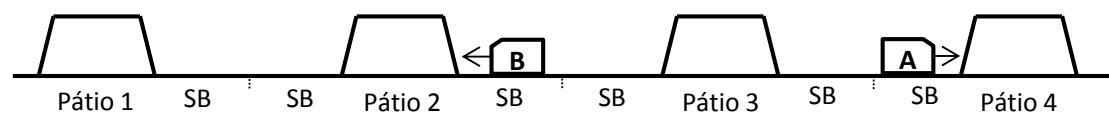
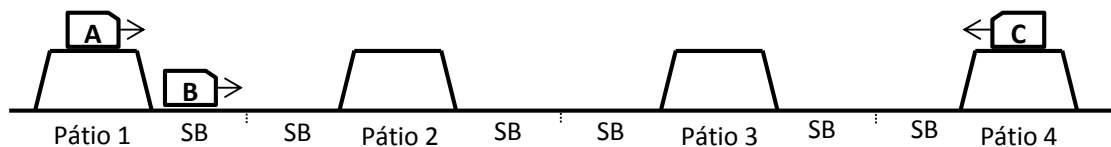


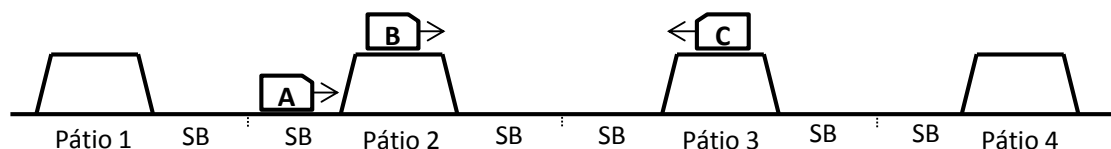
Figura 30 - Resolução de conflito para dois trens em sentidos contrários

Para o caso de três trens (dois em um determinado sentido e outro no sentido contrário), a resolução acontece de forma análoga à Figura 31.

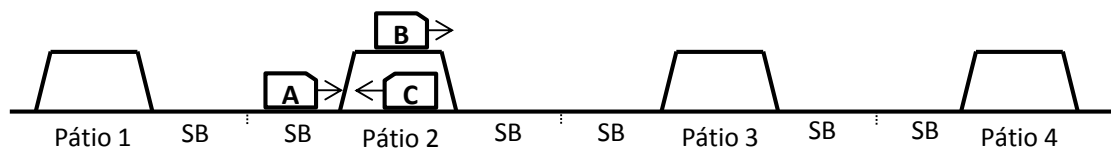
a) Iminência do conflito



b) Trem C acessa o pátio 3 imediatamente antes do trem B acessar o pátio 2



c) Trem B aguarda até o trem C liberar o sentido contrário do trecho à sua frente



d) Trem A ocupa o espaço liberado no pátio 2 pelo trem B, permitindo o trem C prosseguir

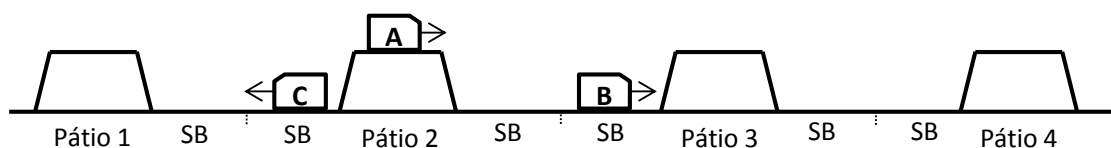
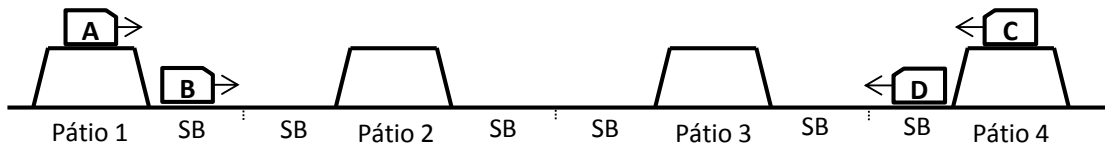


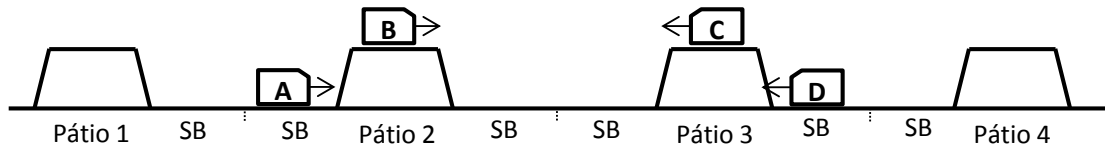
Figura 31 - Resolução do conflito para 3 trens

É possível observar que, em ambos os casos (Figuras 29 e 30), o item iv) da lógica de controle não é sinalizado como conflito. Entretanto, a verificação deste item torna-se bastante comum em situações de tráfego com 4 trens ou mais (dois grupos em sentidos contrários formados por mais de dois trens cada), conforme se nota na Figura 32.

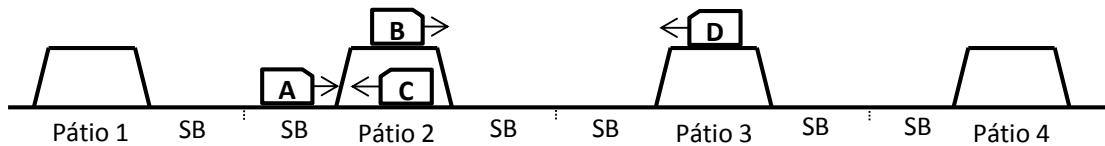
a) Iminência do conflito



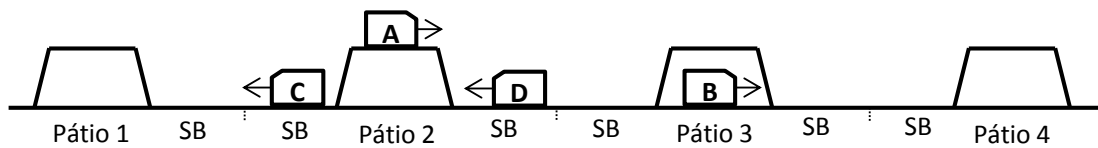
b) Trem C acessa o pátio 3 imediatamente antes do trem B acessar o pátio 2



c) Trem D aguarda a restrição iv) ser atendida



d) Trem A aguarda atender restrição ii)



e) O conflito de cruzamento para todos os trens é resolvido nesse trecho

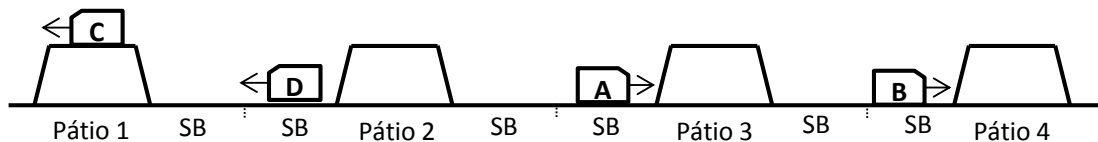


Figura 32 - Resolução de conflitos para 2 pares de trens em sentidos contrários

Na etapa c) da Figura 32, nota-se que todas as restrições são contornadas para o próximo deslocamento do trem D, à exceção da restrição iv). Com efeito, a quantidade de trens no mesmo sentido que D (trem D e trem C) não é menor que a quantidade de pátios entre o local onde ele está e o próximo trecho reservado no sentido contrário (pátios 2 e 3). Na hipótese de ocorrer uma violação dessa regra, o travamento na malha evidenciado na Figura 29 aconteceria, impedindo o movimento dos 4 trens no sistema. Como consequência, os pátios adjacentes também estariam afetados em um horizonte de tempo próximo, já que esse trecho encontrar-se-ia bloqueado para passagem em ambos os sentidos. Somente após o trem B livrar o segundo pátio e acessar o terceiro, a restrição pode ser contornada e, então, o trem D estará licenciado a continuar a sua rota.

Na situação em que o próximo trecho é composto por um segmento de linha duplicado, observa-se que somente a condição da próxima SB estar livre (iii) e a verificação da existência de alguma atividade no próximo pátio (v) são checadas. Isso decorre do fato de que em linhas duplicadas não existem entaves para cruzamentos de trens, sendo obstáculos unicamente as ocupações consecutivas em um mesmo sentido. Conseqüentemente, a estratégia de duplicação de linhas se apresenta como uma alternativa de grande impacto no aumento da capacidade de tráfego

A sequência de movimentos controlada pela regra de resolução de conflitos ocorrerá até os trens atingirem regiões de atividades, que estão inseridas nos contextos dos pátios de carregamento e descarregamento das mercadorias transportadas. Nas subseções posteriores, serão caracterizados os movimentos dos trens no interior dessas regiões de atividades, considerando-se as alterações que ocorreram no projeto desde a sua concepção inicial. As possíveis implicações dessas mudanças no desempenho logístico serão melhor detalhadas na discussão dos resultados das simulações de cenários alternativos, no capítulo seguinte.

5.2.3 Carregamento de Trens

O macroprocesso de carregamento de trens está baseado nas informações obtidas juntamente à gerência da BAMIN, única usuária a possuir estudos mais detalhado da operação de trens na FIOLE. Tomando-se como base as informações contidas nesses estudos, obtidos através de entrevistas com os gestores do negócio, foi possível adquirir compreensão sobre o funcionamento do processo como um todo, especialmente o de carregamento das composições.

Um recorte do trecho que compreende os pátios P26, onde ocorre o carregamento dos trens da BAMIN, e o P28, a jusante, pode ser observado na Figura 33. Doravante, nesse texto, convencionou-se denominar os sentidos de tráfego mina-a-porto de exportação e o seu inverso (porto-a-mina), importação.

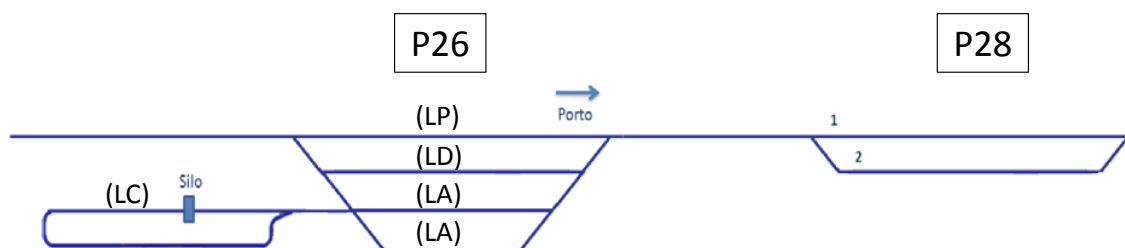


Figura 33 - Esquema dos pátios P28, P26, linhas de trânsito principal (LP) e desviada (LD), auxiliares (LA) e para carregamento (LC)

Na região do P26, nota-se que além das linhas principal (LP) e desviada (LD), existem uma linha de carregamento (LC) e mais duas linhas auxiliares (LA). O trem que acessa o P28 no sentido importação e deve carregar no P26 (BAMIN), passa pelo crivo das regras de decisão para movimentação no segmento entre pátios adiante e, tendo sua licença permitida, deve acessar um algoritmo de atividades (rever Figura 28). Neste ponto, inicia-se uma nova investigação sobre o atendimento às condições necessárias para que o trem possa ocupar uma das linhas auxiliares e, posteriormente, a linha de carregamento (onde se encontra o silo). Ao fim do processo de carregamento, verifica-se a disponibilidade uma linha auxiliar novamente para retornar à FIOL. A Figura 34 ilustra o resumo sequencial desse processo.

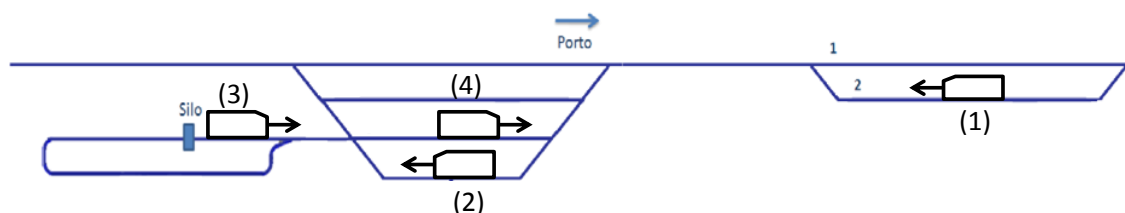


Figura 34 - Sequência de movimentos do trem BAMIN para carregar, acessando o P28 (1), movendo-se para uma linha auxiliar (2), carregando (3) e voltando por uma linha auxiliar (4) para retornar à FIOL

De modo a evitar travamentos na malha e no processo de carregamento, algumas condições são impostas no algoritmo de atividade de carregamento, conforme mostra a Figura 35.

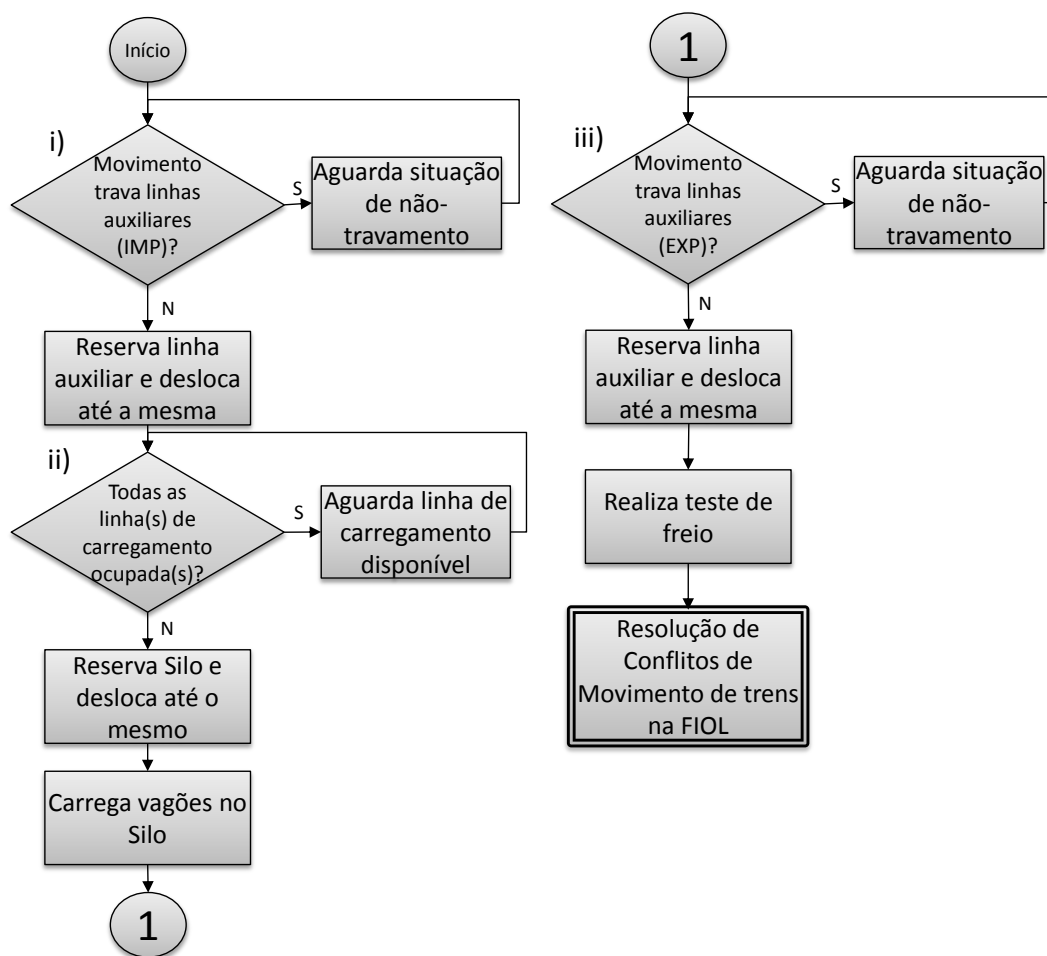


Figura 35 - Resolução de conflitos no processo de carregamento (trens de minério de ferro)

De forma detalhada:

- i. Travamento de linhas auxiliares (sentido importação): o trem, vazio e aguardando no P28, verifica a disponibilidade de acesso às linhas auxiliares. O seu deslocamento é permitido se e somente se

$$(NL_{Aux} - NL_{Aux(vazias)} \geq 1) \cap (NL_{Aux} - NL_{Aux(imp)} \geq 2)$$

onde N_{LA} é o número de linhas auxiliares, $NL_{Aux(vazias)}$ representa o número de linhas auxiliares vazias e $NL_{Aux(imp)}$ é o número de linhas auxiliares reservadas no sentido importação.

Uma vez atendida essa condição, o trem reserva uma linha auxiliar e se desloca para ocupá-la.

- ii. Ocupação da(s) linha(s) de carregamento: o acesso a uma das possíveis linhas de carregamento só acontecerá se pelo menos uma delas estiver disponível. Dessa forma, o trem reserva o silo e linha à qual ele pertence e posiciona os vagões para realizar o carregamento.

- iii. Travamento de linhas auxiliares (sentido exportação): uma vez carregado e atribuído ao sentido exportação, o trem deverá acessar novamente uma linha auxiliar para retornar à FIOLE se a seguinte condição for atendida:

$$(NL_{Aux} - NL_{Aux(vazias)} \geq 1) \cap (NL_{Aux} - NL_{Aux(exp)} \geq 2)$$

onde $NL_{Aux(exp)}$ representa o número de linhas auxiliares reservadas no sentido exportação.

Dessa forma, os testes de freios são realizados e o trem deve ser submetido novamente aos critérios das regras de resolução de conflitos de trens na malha Figura 28.

As expressões demonstradas nos itens i) e iii) são compostas por 2 elementos que, conforme a lógica *booleana*, devem ser considerados verdadeiros para que o trem avance. O primeiro elemento garante que pelo menos uma das linhas esteja vazia para que o trem possa acessar. O segundo, por sua vez, assegura que não ocorra a situação na qual todas as linhas de auxílio estejam reservadas em um mesmo sentido, travando o fluxo (Figura 36). Em ambos os casos os trens B e C bloqueiam o fluxo para o trem A e, conseqüentemente, para eles mesmos, em função de um possível não atendimento das condições i) e iii) do algoritmo Figura 35.

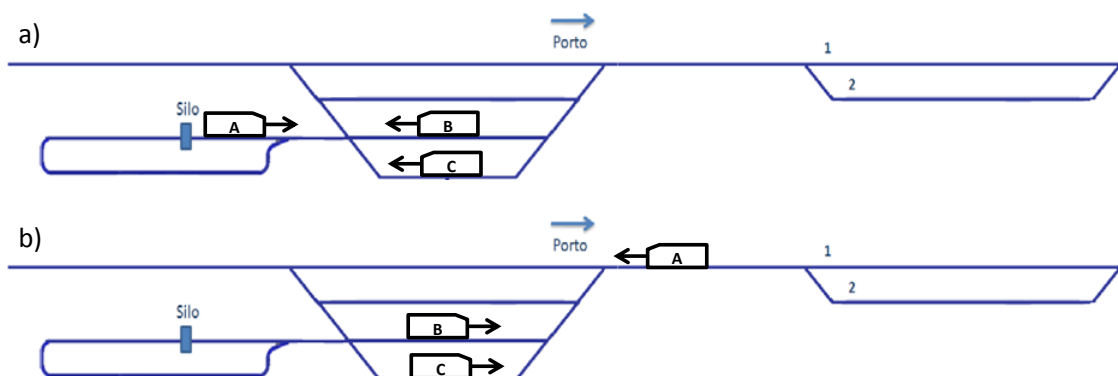


Figura 36 - Travamento causado pelo não atendimento das condições i) e iii), respectivamente, do algoritmo de atividade de carregamento (Figura 35)

Reforçando a premissa de flexibilidade de modelagem, essa lógica foi desenvolvida para atender a qualquer quantidade de linhas auxiliares de carregamento (2 ou mais) e não somente às duas apresentadas na Figura 36.

5.2.4 Descarregamento de Trens

Dentre todos os processos, o projeto do processo de descarregamento de trens foi o que mais sofreu alterações em relação à sua concepção inicial, relatada nos estudos para o licenciamento do Porto Sul (BAHIA, 2011). Este documento juntamente com algumas entrevistas com gestores da BAMIN foram os recursos principais para a descrição do modelo conceitual do movimento de trens nessa região da malha.

O início da modelagem desse processo é dado com a chegada do trem no P58, que antecede o Terminal de Ilhéus (P60). Este terminal, composto por 4 linhas (LT1, LT2, LT3 e LT4), é ligado à região portuária através de uma linha de acesso ao porto (LAP). Seguindo até a região *onshore* do porto, a LAP se estende por 4 km até ser bifurcada para atender a descarga de composições de cargas diversas ou de minério de ferro. Nesta última região, os trens podem chegar e acessar o virador de vagões (VV), diretamente, ou aguardar em uma linha de recepção (LR) até que ele esteja liberado para uso. Através de uma pera ferroviária (PF), o trem acessa o virador de vagões, descarrega e tem seus vagões e locomotivas inspecionados para seguir viagem novamente no sentido importação em uma linha de formação (LF). Na Figura 37, um esquema dessa representação pode ser observado.

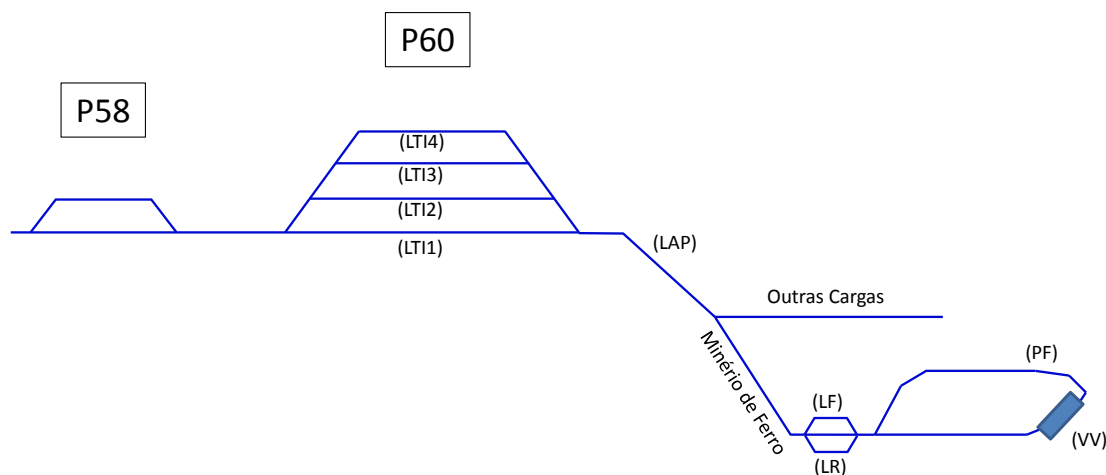


Figura 37 - Representação dos últimos dois pátios da FIOL e o acesso à região *onshore* do Porto Sul

Ao longo desse trajeto, existe um processo de controle de movimentação que deve ser respeitado de modo a permitir o fluxo contínuo de trens, bem como evitar situações de travamento. O fluxograma da Figura 38 exhibe a sequência de decisões, no descarregamento de minério de ferro, que atende a esses propósitos.

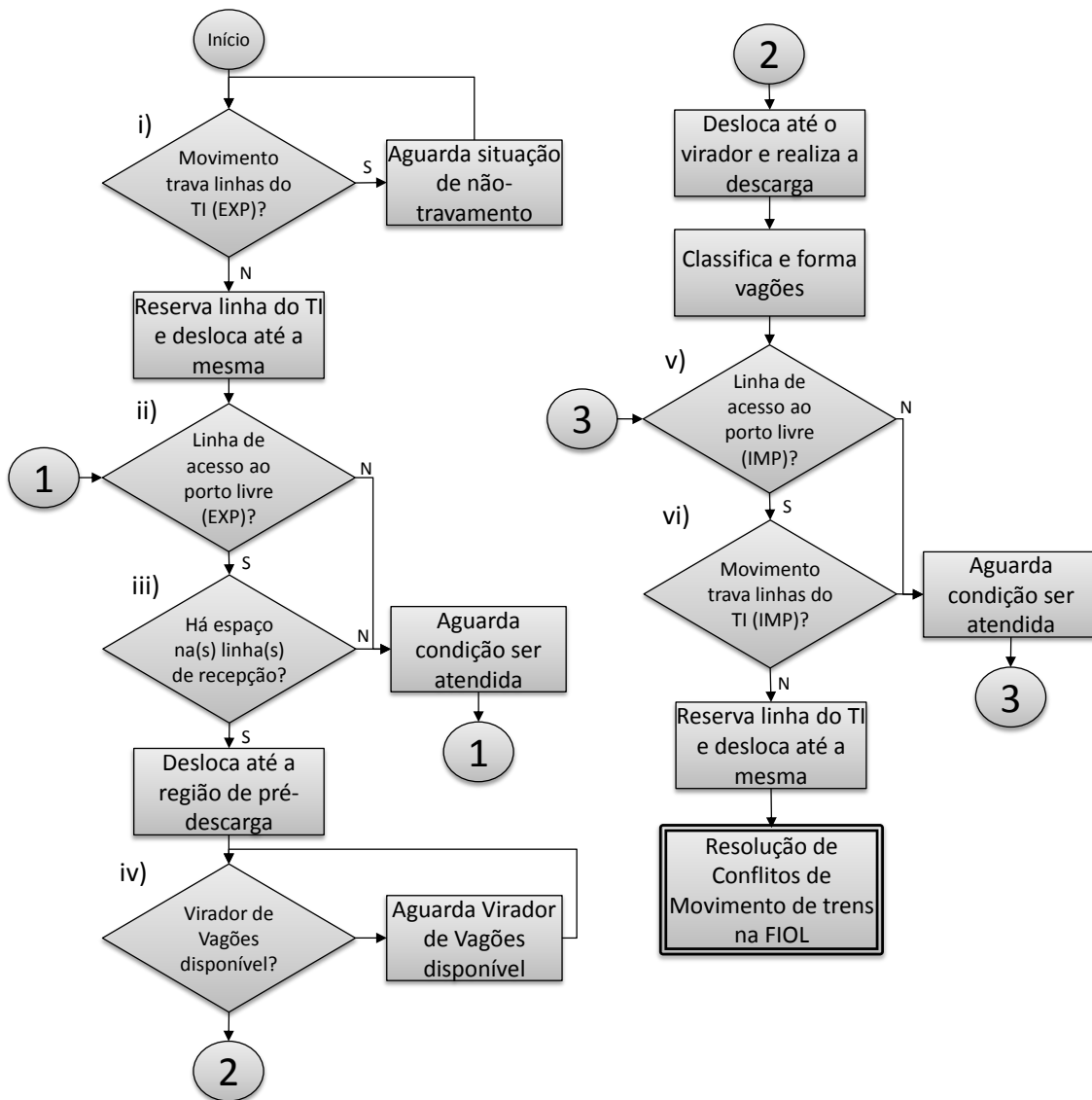


Figura 38 - Resolução de conflitos no processo de descarregamento dos trens de minério de ferro

- i. Travamento de linhas do TI (sentido exportação): o trem, vazio e aguardando no P58, verifica a disponibilidade de acesso às linhas do TI, estando permitido a deslocar se, e somente se:

$$(NL_{TI} - NL_{TI(vazias)} \geq 1) \cap (NL_{TI} - NL_{TI(exp)} \geq 2)$$

onde: NL_{TI} é o número de linhas do Terminal de Ilhéus (TI), $NL_{TI(vazias)}$ representa o número de linhas do TI vazias e $NL_{TI(exp)}$ é o número de linhas do TI reservadas no sentido exportação.

Uma vez atendida essa condição, o trem reserva uma linha do TI e desloca-se para ocupá-la.

- ii. Ocupação da LAP (sentido exportação): o acesso à LAP acontecerá de acordo com uma regra de movimentação em linha dupla, na qual é permitido prosseguir quando ela estiver vazia ou houver um único trem no sentido oposto;
- iii. Ocupação da(s) LR: verifica-se a disponibilidade de uma linha de recepção livre para o trem prosseguir e ocupá-la. Atendendo a essa condição, o trem prossegue até a região de pré-descarga (onde existem a LR e a LF);
- iv. Utilização do virador de vagões: caso o virador de vagões esteja sendo utilizado, o trem aguarda numa LR até ele se tornar disponível. Caso contrário, o trem se desloca até o mesmo e o processo de descarga é realizado. Posteriormente, o trem é inspecionado para verificar avaria em vagões e locomotivas, classificando qual material rodante formará uma nova composição;
- v. Ocupação da LAP (sentido exportação): funcionando como uma linha dupla, é verificada a possibilidade de acesso à LAP em direção ao TI;
- vi. Travamento de linhas do TI (sentido importação): o trem, vazio e aguardando na LF, verifica a disponibilidade de acesso às linhas do TI, estando permitido a deslocar se, e somente se:

$$(NL_{TI} - NL_{TI(vazias)} \geq 1) \cap (NL_{TI} - NL_{TI(imp)} \geq 2)$$

onde $NL_{TI(imp)}$ representa o número de linhas do TI reservadas no sentido exportação;

Dessa forma, o trem reserva uma linha vazia do TI e se desloca para ocupá-la, onde submetido novamente aos critérios das regras de resolução de conflitos de trens na malha para seguir no sentido importação.

5.2.5 Parâmetros do modelo

Os parâmetros ou variáveis de entrada x_i do modelo caracterizam quantitativamente os macroprocessos previamente definidos. De maneira geral, esses valores estão relacionados aos tempos de rota e permanência dos trens em diversos pontos ao longo da operação e ao dimensionamento da infraestrutura do

sistema. A Tabela 4 apresenta a relação dos parâmetros considerados na modelagem.

Tabela 4 - Parâmetros considerados na modelagem

Macroprocesso	Parâmetro (variável de entrada)	Tipo de variável
Circulação de Trens na FIOI	Tempos de rota entre pátios	Contínua
	Tempo de licenciamento	Contínua
	Número de linhas no Terminal de Ilhéus	Discreta
	Tipo de linha do segmento entre pátios*	Booleana
Carregamento	Tempo de rota entre linhas auxiliares e de carregamento	Contínua
	Tempo de inspeção e teste de freios	Contínua
	Tempo de carregamento	Contínua
	Número de silos	Discreta
	Número de linhas auxiliares	Discreta
	Número de trens que carregam no polo	Discreta
Descarregamento	Tempos de rota entre linhas do porto <i>onshore</i>	Contínua
	Tempo de descarga no virador de vagões	Contínua
	Tempo de inspeção, classificação e formação	Contínua
	Número de viradores de vagão	Discreta
	Número de terminais de minério de ferro	Discreta

(*) Definido como 0 (linha singela) ou 1 (linha dupla) para o segmento entre pátios em análise

Com relação aos parâmetros que se referem aos tempos de processo pode-se mencionar os tempos de rotas entre os pátios de cruzamento, de licenciamento (tempo entre o pedido e a concessão da licença) e de atividades no interior de zonas de carga e descarga. Este foi um dos grandes desafios dessa modelagem, uma vez que o sistema ainda não existe. Dessa forma, os valores relacionados a cada uma dessas variáveis de tempo foram obtidos a partir dos estudos operacionais e de licenciamento realizados previamente (BAHIA, 2011; BRASIL, 2010), com o suporte especialistas das operadoras que estarão possivelmente envolvidas no futuro transporte de cargas na FIOI. Em respeito a termos de sigilo de contrato aos quais algumas dessas operadoras estão sujeitas, alguns desses dados não serão apresentados nesse estudo. Os parâmetros de dimensionamento da infraestrutura existente foram também obtidos em Bahia (2011) e Brasil (2010) e representam um ponto chave para futura avaliação da capacidade de tráfego. De fato, espera-se que com uma maior oferta de infraestrutura (em termos de uma maior quantidade de linhas duplicadas e auxiliares aos processos de carga e descarga ou mais silos e viradores de vagão, por exemplo), menores sejam os conflitos para utilização dos

recursos. Logo, menos provável será a formação de filas no sistema, atingindo um melhor desempenho logístico (maior fluxo de mercadorias).

5.3 Simulação do modelo

Com a estrutura de processos definida, o comportamento do modelo ao longo do tempo pode ser estudado por meio de uma simulação computacional. Neste estudo, foi empregada uma simulação de eventos discretos (SED), uma vez que as variáveis de estado do sistema permanecem constantes sobre intervalos de tempo, alterando-se somente em pontos bem definidos, denominados eventos (BANKS, 1998).

São muitas as vantagens que podem ser auferidas com um estudo de simulação bem executado. Na literatura existente, diversos autores convergem ao elencar os seguintes benefícios (BANKS, 1998; SHEIKH; AJEELI; ABU-TAIEH, 2008; SOKOLOWSKI; BANKS, 2009):

- Exploração possibilidades sem comprometer recursos ou causar perturbações no sistema, através da avaliação de diferentes políticas operacionais no modelo computacional;
- Aumento da capacidade de diagnóstico do problema, uma vez que através de ferramentas como o controle sobre a passagem do tempo, a animação de cenários e os relatórios de análise de dados, é possível observar minuciosamente as interações entre as variáveis em sistemas complexos;
- Identificação de gargalos e restrições do processo, bem como suas causas e consequências;
- Levantamento requisitos operacionais para se atingir os objetivos do negócio (e.g. quais devem ser os parâmetros de confiabilidade de uma máquina para se atender a demanda de um certo período);
- Redução da necessidade de ferramentas analíticas para estudar o sistema, que podem se tornar computacionalmente e matematicamente complicadas na modelagem de sistemas com interações mais complexas;
- Formação de consenso no processo de tomada de decisão, uma vez que os resultados objetivos obtidos na simulação sobre o funcionamento do sistema são preferíveis em relação a inferências;

- Treinamento de equipes, quando em modelos desenhados para esse propósito, através de uma interface de inserção de dados que permita ao usuário aprender a partir dos seus erros e melhorar seu desempenho, sem causar perturbações no sistema real;
- Como consequência de todos os benefícios listados, realização de investimentos de forma mais racional, já que simular o sistema custa menos que alterá-lo e considerando que o dispêndio típico de um estudo de simulação é substancialmente menor que 1% da quantia total investida na implementação de melhorias no processo.

Evidentemente, algumas desvantagens também podem ser observadas no emprego desse método (BANKS, 1998). A primeira delas diz respeito à necessidade de um treinamento especial para a construção de modelos, tendo em vista a dificuldade de interpretação dos resultados obtidos, que exigem o rigor de certos procedimentos estatísticos e domínio da linguagem de programação do *software*. Além disso, o processo de modelagem pode ser demorado e custoso e a economia de recursos empregada nesse processo pode levar a análises incorretas. Por fim, a simulação pode ser utilizada inapropriadamente, quando modelos analíticos são viáveis ou até mesmo preferíveis. Contudo, todas essas dificuldades estão sendo cada vez mais contornáveis com os avanços computacionais observados nos últimos tempos (*hardware*) e com a melhoria dos pacotes de simuladores já existentes (*software*), contendo uma interface mais intuitiva e extensões de análise de dados poderosas. Ademais, encontrar problemas plenamente solucionáveis na estrutura pouco flexível dos modelos analíticos é bastante atípico em situações reais.

5.3.1 Avaliação do desempenho logístico do sistema

O propósito fundamental da simulação desenvolvida é o de analisar o desempenho logístico do sistema, em termos da quantidade média de minério de ferro que é entregue no Porto Sul em um determinado período. Pode-se dizer que, para cada mineradora, esse resultado varia em função da quantidade de trens de ciclo que essa mineradora utiliza, da carga líquida do trem-tipo (carga transportada pelo trem padrão definido pela mineradora, dado por um certo número de

locomotivas e vagões) e do número médio de ciclos realizado em um determinado período. Esse último, por sua vez, é dado pela razão entre o período escolhido (1 ano) e o tempo médio um ciclo (carrega → transporta → descarrega → transporta → carrega) observado na simulação. Durante esse ciclo o trem realiza as atividades previstas nos macroprocessos previamente definidos (Figuras 27, 34 e 37). Ao longo da simulação, são registrados diariamente os últimos valores dos tempos de ciclo dos trens de uma determinada mineradora, que compõem um tempo de ciclo médio diário dessa mineradora. Por fim, o valor do tempo de ciclo médio de uma mineradora é dado pela média desses tempos de ciclo médios diários registrados em toda a simulação. Dessa maneira, conforme se observa na Equação 5.1, a quantidade média de minério é dada por:

$$\overline{MF}_{ANO} = NT_{mineradora} \cdot C \cdot \frac{T}{\overline{TC}} \quad 5.1$$

onde \overline{MF}_{ANO} é a quantidade média de minério de ferro entregue no porto anualmente, $NT_{mineradora}$ representa o número de trens utilizados pela mineradora em análise, C é a carga unitária do trem (em t/trem), T é o período de operação analisado (em h/ano) e \overline{TC} é o tempo de ciclo médio dos trens (em h). É importante frisar que C e T são constantes e $NT_{mineradora}$ um parâmetro ($x_i \in X$) fornecidos previamente à execução da simulação, ao passo que \overline{TC} é uma variável de saída, resultado dessa simulação ($y_j \in Y$). Conseqüentemente, \overline{MF}_{ANO} é também um produto da simulação, uma vez que $\overline{MF}_{ANO} = f(\overline{TC})$.

Uma vez que pretende-se observar o desempenho anual de uma operadora ferroviária de minério, tem-se que $T = 8760 \text{ h/ano}$. É importante salientar que foi assumido um processo de manutenção da linha férrea realizado nos intervalos em que os segmentos entre pátios estão desocupados ao longo da operação anual. Sabe-se também que para o trem-tipo dimensionado da BAMIN (2 locomotivas e 140 vagões), a carga unitária transportada é de $C = 15.540 \text{ t}$ (cada vagão do modelo GDT transporta 111 t de minério).

Para um sistema ferroviário, principalmente em linhas singelas onde existe a necessidade de cruzamentos para trens que trafegam em sentidos opostos, o número de trens circulando na via e o tempo de ciclo são variáveis antagônicas no cômputo da quantidade de carga entregue no porto. Isso quer dizer que, apesar de haver um incremento na quantidade de cargas entregue com mais trens circulando na via, o número de cruzamentos que esses trens devem realizar também aumenta.

Logo, eleva-se o tempo de espera total dos trens aguardando em pátios de cruzamento, afetando, por sua vez, o tempo para se completar um ciclo de escoamento. Isso resulta em um conflito (*trade-off*) complexo de ser balanceado, requerendo uma atenção especial para as atividades que são gargalos ao longo de todo o processo.

É importante mencionar que os parâmetros x_i do modelo são determinísticos, do modo como foram obtidos nos estudos operacionais e de licenciamento (BAHIA, 2011; BRASIL, 2010). Logo, os resultados y_j da simulação realizada também serão determinísticos, prescindindo de procedimentos baseados em inferência estatística para a comparação dos resultados obtidos em diferentes simulações.

5.3.2 Implementação computacional



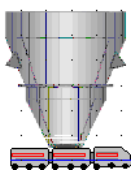
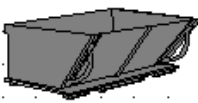


A implementação computacional do modelo permite que a sequência de ações previstas em cada macroprocesso seja executada em um horizonte de tempo pré-definido. Ao fim desse processo, os resultados y_j podem ser obtidos pelo tomador de decisões e uma nova simulação poderá ser iniciada, com alteração ou não dos parâmetros x_i que foram definidos na simulação anterior.

Para este fim, utilizou-se o *software* Arena[®], uma plataforma bastante difundida, tanto em empresas como em universidades, para estudos de modelagem e simulação de eventos discretos. Inicialmente produzido pela Systems Modeling (EUA) em 1992 (PRADO, 2010), sua versão atual é fornecida mundialmente pela Rockwell Software[®]. O Arena[®] pode ser descrito como um ambiente de simulação visual de propósito geral, orientado em blocos que representam comandos na linguagem SIMAN. Além disso, possui diversos módulos funcionais, ferramentas de análise de dados de entrada e saída, relatórios, animação e um console de controle sobre a passagem do tempo simulado (ALTIOK; MELAMED, 2010).

Alguns elementos compõem o processo de modelagem no Arena[®]. O elemento mais básico na simulação são as entidades, que representam os recursos a serem transformados em um típico sistema de produção. No caso da modelagem desenvolvida neste trabalho, essas entidades são representadas pelos trens que trafegam no sistema utilizando a infraestrutura de recursos disponíveis. Esses recursos, por sua vez, executam ações sobre as entidades, a exemplo dos silos de carregamento e viradores de vagões. Nas situações em que as entidades

necessitam utilizar os recursos, porém encontrando-os ocupados (em plena utilização da capacidade), elas formam filas no processo. Essas filas também podem ser formadas quando algumas condições para o movimento subsequente dos trens não são atendidas, tanto nos processos de circulação, como nos de carregamento e descarregamento. A Tabela 5 apresenta alguns desses elementos e o modo como eles são representados no modelo computacional.

Tabela 5 – Elementos do Arena® e associação com o modelo proposto

Entidade				
Recurso	Silo de Carregamento		Virador de Vagões	
	Livre	Ocupado	Livre	Ocupado
				
Fila				

Ao longo desse processo, diversas informações podem ser criadas e manipuladas. Para tanto, lança-se mão de atributos, variáveis e expressões. Os atributos dizem respeito a características que são específicas de cada entidade (e.g. tipo do trem, sentido de tráfego atual do trem), ao passo que as variáveis e expressões são globais e características do sistema como um todo. A diferença entre essas duas últimas é que as variáveis comportam somente valores numéricos (e.g. tempo de espera para utilização do virador de vagões), ao passo que as expressões além de valores numéricos, podem conter valores *string* (texto) ou expressões matemáticas envolvendo variáveis e atributos (e.g. soma dos tempos de espera no virador de vagões e no silo de carregamento).

A execução da lógica do modelo é realizada pelos blocos de comando do Arena®. Existem diversos exemplares desses blocos que possuem funções específicas e definem ações a serem tomadas em relação aos elementos da modelagem. Em se tratando de uma entidade, por exemplo, esse bloco estabelece se ela deve ser processada em um recurso, entrar em uma fila ou ser movida para outro local. Para um recurso, pode determinar que ele seja comprometido por uma entidade, fique inativo ou seja liberado do seu uso. Com relação aos atributos, variáveis e expressões, esses blocos podem modificar seus valores no momento em

que são acionados. É importante destacar também que alguns blocos contêm informações acerca da tarefa a ser realizada, principalmente com relação à sua duração.

Um outro aspecto importante no Arena[®] é a utilização da animação da lógica representada pelos blocos e elementos do modelo. Conforme mencionado anteriormente, a animação auxilia na capacidade de diagnóstico do problema, uma vez que se torna possível observar minuciosamente as interações entre as variáveis em sistemas complexos. Na Figura 39, a representação completa da malha ferroviária entre Caetité-BA e Ilhéus-BA pode ser observada, contendo os pátios, polos de carregamento e o Porto Sul.

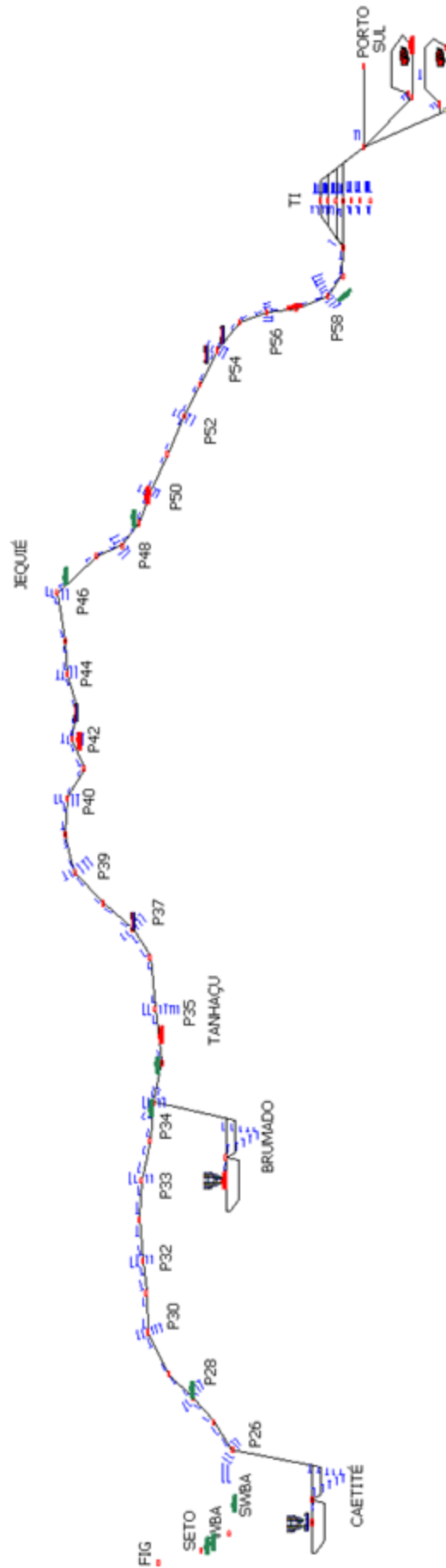


Figura 39 - Animação contendo a malha ferroviária modelada

5.4 Análise de Otimização

A etapa final deste trabalho consiste em uma análise de otimização para investigação de melhorias no sistema. Estabelecendo-se uma função objetivo e restrições contendo as variáveis de decisão x_i^* , um modelo de otimização foi resolvido por meio de algum algoritmo de otimização. Essas variáveis x_i^* são escolhidas com base nos parâmetros x_i identificados na simulação como os mais significativos na determinação do desempenho logístico do sistema. Nas duas próximas subseções são descritos o modelo de otimização desenvolvido e o método meta-heurístico empregado para a sua resolução.

5.4.1 Definição do modelo de otimização

Os resultados de uma exploração de cenários para identificação dos gargalos do sistema (Figura 24) direcionam a seleção das variáveis de decisão x_i^* do modelo de otimização. Conforme foi exposto, esse modelo visa a minimização de uma função de investimento total em infraestrutura, dada como a soma dos custos de aquisição/instalação de cada componente identificado pela variável x_i^* . Dessa maneira, tem-se uma função objetivo a ser minimizada na forma:

$$MIN F = \sum_i I_i = \sum_i c_i x_i^* \quad 5.2$$

Da Equação 5.2, I_i é o valor do investimento do componente em x_i^* , com custo unitário c_i . Caso o problema seja resolvido com a definição de 2 silos de carregamento, ter-se-ia o produto da quantidade de silos pelo custo unitário de instalação desse componente como parcela da soma relativa a esse componente no investimento do total. A função objetivo nesse modelo está sujeita a 3 tipos de restrição. A primeira delas diz respeito à oferta mínima de minério de ferro no porto para cada mineradora (baseada na Equação 5.1):

$$\frac{(NT_k \cdot C \cdot T)}{\overline{TC}_k} \geq O_k, \forall k = 1, \dots, m \quad 5.3$$

Na Equação 5.3, NT_k , \overline{TC}_k e O_k representam, para cada mineradora k (de um total de m mineradoras analisadas), o número de trens, o tempo de ciclo médio desses trens e a oferta mínima de minério a ser entregue no porto por ano, respectivamente.

Um outro tipo de restrição evita que sejam definidos valores conflitantes para certas variáveis de decisão x_i^* , em adequação ao modelo de transporte de cargas definido (Equação 5.5):

$$\sum x_i^* \geq A \quad 5.4$$

onde A é uma constante que varia caso a caso. Por exemplo, se x_1^* , x_2^* e x_3^* representam a quantidade de viradores de vagão dos tipos 1, 2 e 3 (diferentes capacidades) para o terminal de descarga de uma determinada mineradora, a equação $x_1^* + x_2^* + x_3^* \geq 1$ garante que exista pelo menos 1 virador nesse processo.

Por fim, existe ainda o intervalo de valores permitidos para cada variável x_i^* , pelo qual o método meta-heurístico deve restringir sua busca, dado pela Equação 5.5:

$$LI \leq x_i^* \leq LS, \forall i = 1, \dots, n \quad 5.5$$

onde LI e LS são, respectivamente, os limites inferior e superior do intervalo de variação permitido.

A definição de um conjunto de restrições para um problema de otimização configura uma região de soluções viáveis. Isso significa para uma certa solução $X^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ ser viável, os valores de cada x_i^* ($\forall i = 1, \dots, n$) devem respeitar as condições impostas pelas restrições dos tipos identificados nas Equações 5.3, 5.4 e 5.5.

5.4.2 Meta-heurística Scatter Search

A partir do final dos anos 1990, a maioria dos softwares comerciais de eventos discretos agregaram módulos de otimização que executam busca de valores ótimos a partir dos parâmetros de entrada de um modelo de simulação (APRIL et al., 2003). Segundo Fu (2002), desde então, notáveis saltos em processamento computacional vem contribuindo para que a integração entre otimização e simulação se torne cada vez mais proveitosa. De fato, essa hibridização tem permitido que problemas complexos e de larga escala, que podem ser modelados realisticamente com simulação, sejam beneficiados por um processo eficiente de tomada de decisão (análise de otimização). De acordo com April e colaboradores (2003), essa hibridização funciona como uma “caixa preta”, na qual uma meta-heurística escolhe os valores para as variáveis de decisão e utiliza as respostas geradas pela

simulação - desconsiderando o que ocorre nesse ínterim - para decidir sobre a próxima solução a ser testada. O procedimento ocorre através de um algoritmo iterativo, no qual cada iteração envolve a condução de uma busca por uma nova solução (HILLIER; LIEBERMAN, 2010). Nesse caso, as iterações são as próprias simulações realizadas que, eventualmente, podem conter uma solução mais otimizada que a melhor solução encontrada previamente. Ao término, a solução por ele fornecida é a melhor encontrada durante qualquer iteração.

Para resolver o problema de otimização, foi utilizado um algoritmo evolucionário conhecido como *Scatter Search*. Os princípios fundamentais dessa meta-heurística foram inicialmente propostos nos anos 1970 e, desde então, tem sido empregada com sucesso em problemas complexos de otimização (MARTÍ; LAGUNA; GLOVER, 2006). Dentre as principais aplicações do *Scatter Search*, pode-se mencionar a resolução de problemas como o roteamento de veículos, a programação de tarefas, a otimização em modelos de simulação e o treinamento de redes neurais (GLOVER, 1998). Em essência, essa meta-heurística busca melhores resultados da função objetivo combinando algumas soluções que são adicionadas sistematicamente a um conjunto referência de soluções, o qual é periodicamente atualizado. A implementação do *Scatter Search* consiste no emprego de 5 métodos (GLOVER, 1998):

- i. Geração de soluções diversificadas: a partir de uma solução inicial arbitrária X_0^* , desenvolvem-se outras soluções X_r^* , $\forall r = 1, \dots, p$, para compor um conjunto P de soluções diversificadas. O objetivo desse método é produzir p soluções que difiram significativamente entre si em termos dos valores em X^* , a fim explorar amplamente o espaço de soluções possíveis. O procedimento para essa geração varia de acordo com as características das variáveis de decisão envolvidas no problema (tipo *booleana* - 0 ou 1 -, contínua, discreta ou uma combinação destes tipos);
- ii. Melhoria de soluções: um método heurístico é utilizado promover uma melhoria em cada solução X_r^* do conjunto P (em termos do valor da função objetivo). Esse método varia de acordo com o tipo de problema abordado (e.g. heurística *shortest-path tree* para programação de tarefas) e caso não haja melhoria na solução X_r^* , a solução não é alterada;

- iii. Atualização do conjunto referência de soluções: a partir das p soluções obtidas, forma-se um conjunto de referência (*ConjRef*) escolhendo-se as b “melhores” soluções de P . Em geral, $b = \text{MIN}(20, p/10)$. O conceito “melhor”, nesse caso, refere-se a dois critérios: valor da função objetivo e nível de diversificação da solução. Dessa forma, forma-se um *ConjRef*₁ com as b_1 melhores soluções em termos de $f(X^*)$ e um *ConjRef*₂ com as b_2 soluções mais diversificadas em relação às b_1 soluções do *ConjRef*₁, tal que $b = b_1 + b_2$ (*ConjRef* = *ConjRef*₁ \cup *ConjRef*₂);
- iv. Geração de subconjuntos de soluções: formam-se subconjuntos de soluções a partir do conjunto de referência contendo b' soluções, tal que $b' < b$. Em geral, esse método é definido para gerar subconjuntos com as opções: $b' = 2$; $b' = 3$ (adicionando-se a solução com melhor valor da função objetivo aos subconjuntos de tamanho $b' = 2$); ou $b' = 4$ (adicionando-se a solução com melhor valor da função objetivo aos subconjuntos de tamanho $b' = 3$);
- v. Combinação de soluções: esse método produz uma ou mais soluções a partir de combinações das variáveis de decisão x_i^* dos b' elementos de cada subconjunto formado pelo método anterior. É importante pontuar que esse procedimento de combinação depende dos tipos de variáveis envolvidas no problema, assim como no método de geração de soluções diversificadas (e.g. uma combinação linear convexa pode ser empregada no caso de variáveis contínuas, ao passo que permutações entre as soluções são comumente empregadas em problemas com variáveis discretas). As novas soluções formadas são adicionadas a um conjunto P' .

Martí, Laguna e Glover (2006) afirmam que somente 4 dos 5 métodos são estritamente necessários para a execução do *Scatter Search*, uma vez que o algoritmo pode ser implementado sem um método de melhoria das soluções. Um procedimento básico do *Scatter Search* para um problema de minimização está apresentado no pseudocódigo da Figura 40:

```

1  Defina NovasSolucoes como Booleano
2  Defina P, P',  $X_0^*$ , ConjRef, ConjRef', Subconjuntos, s, SolucoesComb como Arranjo
3  P ← DiversificaSolucoes ( $X_0^*$ )
4  P ← MelhoraSolucao(P)
5  ConjRef = AtualizaConjRef(P)
6  NovasSolucoes ← VERDADEIRO
7  Enquanto (NovasSolucoes) Faça
8      Subconjuntos ← GeracaoSubconjuntos(ConjRef)
9      NovasSolucoes ← FALSO
10     Enquanto (Subconjuntos ≠ ∅) Faça
11         Para cada s em Subconjuntos Faça
12             P' = ∅
13             SolucoesComb ← CombinaSolucoes(Subconjuntos(s))
14             SolucoesComb ← MelhoraSolucao(SolucoesComb)
15             Adiciona SolucoesComb em P'
16             ConjRef' ← AtualizaConjRef(ConjRef ∪ P')
17             Se (ConjRef ≠ ConjRef') Então
18                 NovasSolucoes ← VERDADEIRO
19                 ConjRef = ConjRef'
20             Fim-Se
21             Retira Subconjuntos(s) de Subconjuntos
22         Próximo S
23     Fim-Enquanto
24 Fim-Enquanto
25 Retorna Min(ConjRef)

```

Figura 40 - Pseudocódigo do método *Scatter Search* para um problema de minimização
Fonte: Adaptado de Marti, Laguna e Glover (2006)

Na versão do *Scatter Search* apresentada na Figura 40, o método de geração de soluções diversificadas (“*DiversificaSolucoes*”) utiliza como parâmetro uma solução inicial X_0^* fornecida, produzindo soluções com certo grau de diversificação e armazenando-as em um conjunto *P*. Em seguida, utiliza-se uma heurística para melhorar cada uma das *p* soluções dentro do conjunto *P*, com relação ao valor da função objetivo que elas produzem. Posteriormente, forma-se um conjunto de referência *ConjRef* com as *b* melhores soluções de *P* através do método de atualização do conjunto de referência (“*AtualizaConjRef*”).

Subsequente à escolha das melhores soluções, o algoritmo executa um laço de repetição cuja condição de saída é a não constatação de melhorias no *ConjRef* após de uma série de combinações em suas soluções (por meio da avaliação de uma variável booleana *NovasSolucoes*). Nesse laço, produz-se uma lista denominada *Subconjuntos* que contém *s* subconjuntos do *ConjRef*, utilizando-se o método “*GeracaoSubconjuntos*” (se $b' = 2$, tem-se que $s = (b^2 - b)/2$, por exemplo). Cada

subconjunto s em *Subconjunto* possui soluções que são combinadas pelo método “CombinaSolucoes”, gerando uma ou mais soluções que podem ou não ser melhoradas por uma heurística no método “MelhoraSolucao”. Essas novas soluções são adicionadas a um conjunto P' e uma nova chamada do método de atualização do conjunto referência é feita, formando um novo *ConjRef*, contendo as b melhores soluções a partir de $ConjRef \cup P'$. Após a avaliação de todos os subconjuntos s em *Subconjuntos*, caso não sejam observadas melhorias no *ConjRef*, o algoritmo finaliza, retornando a solução com menor valor da função objetivo em *ConjRef*.

A metodologia do *Scatter Search* é bastante flexível, uma vez que cada um dos métodos que a compõem pode ser implementado de maneiras distintas e com diferentes graus de sofisticação. Segundo Martí, Laguna e Glover (2006), pelo fato de não haver uma concepção única e restrita é possível a exploração de estratégias que provam-se efetivas em diversas aplicações. De fato, reconhece-se dois tipos de estratégia para a busca de soluções por meio dessa meta-heurística: intensificação e diversificação. A intensificação da busca é tipicamente alcançada com a execução dos métodos de melhoria de soluções (ii) e combinação de soluções (v), permitindo explorar de forma mais intensa soluções nos entornos de uma região com ótimo local. Nesse caso, é comum o emprego de outras meta-heurísticas para melhorar soluções, a exemplo da Busca Tabu que utiliza uma memória adaptativa no processo de investigação de novas soluções. Em contrapartida, a estratégia de diversificação oportuniza a avaliação de outras regiões de soluções que apresentem melhores ótimos locais, aumentando-se as chances de encontrar um ótimo global. O método de geração de soluções diversificadas (i) é importante, nesse caso, para que sejam investigadas soluções representativas do espaço de soluções viáveis para o problema. Em síntese, deve haver um balanceamento do esforço computacional empregado nas duas estratégias, permitindo que as suas vantagens possam ser auferidas de forma que o valor ótimo possa ser encontrado (caso seja factível) com o menor tempo de convergência possível.

Para executar o *Scatter Search*, foi utilizado o *software* OptQuest, fabricado pela OptTek Systems[®], que acompanha o Arena[®]. Uma limitação desse trabalho é que, por razões comerciais, não foi possível identificar a estrutura do algoritmo que executa o *Scatter Search* no OptQuest, impossibilitando a configuração das estratégias de intensificação e diversificação no processo de busca. Por esse

mesmo motivo, os algoritmos executados nos métodos de melhoria e combinação de soluções também são desconhecidos.

É importante observar que os valores da função objetivo para cada solução é obtida diretamente pela substituição dos valores de c_i e x_i^* na Equação 5.2. Contudo, para garantir que as soluções em uma certa solução ótima X_{ot}^* seja viável (atenda a todas as restrições do problema), é necessário obter o resultado do tempo de ciclo, que é uma variável de saída y_j da simulação, e faz parte do cálculo das restrições de oferta mínima das mineradoras (Equação 5.3). Portanto, a proposta final desse trabalho é resolver um problema de otimização, utilizando alguns dos parâmetros da simulação como variáveis de decisão (bem como os resultados dessa simulação) para se atingir uma solução que seja viável e ótima (ou satisfatória) para o problema em estudo.

6 RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

É importante salientar que o modelo simulado apresenta um aspecto não-terminal. Diferentemente dos sistemas terminais, onde é possível precisar um período para o fim da simulação (a exemplo de um atendimento bancário, onde o sistema funciona entre 10:00 e 16:00, tendo sempre um novo começo a cada dia), em sistemas não-terminais, não existe um marco final para a simulação (CHWIF; MEDINA, 2006). Esse é o caso de um sistema ferroviário operando com trens de ciclo, onde a operação estabelece-se de forma contínua e ininterrupta ao longo do tempo. Nesse processo, é preciso capturar adequadamente o regime estacionário do sistema, eliminando o que acontece no período transiente, uma vez que ele não é representativo sobre o que acontece no sistema real. Dessa forma, eliminou-se o período transiente inicial através da escolha de um tempo apropriado de partida (*warm-up*), adotado como 200 horas (tempo suficiente para serem criados todos os trens de ciclo do sistema e as variáveis atingirem, dessa forma, o regime estacionário). Este tempo de partida foi definido a partir da observação gráfica dos valores do tempo de ciclo dos trens em relação ao tempo de simulação (Figura 41).

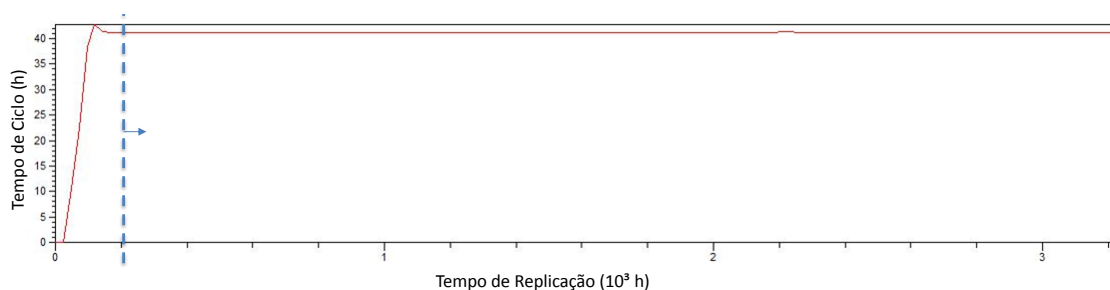


Figura 41 - Evolução dos valores de tempo de ciclo médio ao longo de uma replicação

É importante salientar que a replicação da simulação foi dimensionada em 135 dias. Esse valor se mostrou longo o suficiente para capturar os efeitos que possam ocorrer com os mais variados conflitos de movimentação sobre o tempo de ciclo.

Com essas configurações iniciais, foi possível iniciar apropriadamente o processo experimental. A primeira etapa trata-se da validação do modelo em relação ao sistema real (ou esperado). Com a confirmação da validação do modelo, foi possível identificar as implicações das alterações de infraestrutura (que ocorreram desde a concepção inicial do projeto) no desempenho logístico da malha, tido aqui como a entrega anual de minério de ferro no porto (vide Equação 5.1). A partir de então, testes de novos cenários propondo melhorias para os gargalos do sistema

foram realizados de forma localizada, sem considerar uma atuação sistêmica em todos os macroprocessos. Por fim, são apresentados os resultados do modelo de otimização desenvolvido para a escolha ótima da infraestrutura do sistema.

6.1 Validação do modelo

Sheikh, Ajeeli e Abu-Taieh (2008) afirmam que a validação é um procedimento-chave para usar os resultados do simulador de forma confiável. Esse processo ocorre através de comparações entre o funcionamento e as saídas obtidos na simulação com os valores observados no sistema real ($y_i^{sim} - y_i^{real}$). Espera-se, dessa forma, uma menor diferença possível entre esses resultados, permitindo concluir que o modelo é representativo do sistema em estudo. Todavia, é neste ponto que reside um dos principais entraves de um estudo de simulação aplicado a projetos em fase de concepção ou instalação, no qual o sistema ainda é inexistente. Para realizar esse procedimento de forma sistemática, em um primeiro momento foi averiguado se o comportamento dinâmico dos trens atende ao conjunto de regras descrito nos macroprocessos de circulação, carregamento e descarregamento (Figuras 27, 34 e 37). Em seguida, comparou-se os valores do tempo de ciclo dos trens de minério de ferro sob diferentes circunstâncias com os valores descritos em projeto (BRASIL, 2010).

6.1.1 Adequação às regras dos macroprocessos

Nessa instância de investigação, pretendeu-se avaliar a adequação da lógica de tráfego estabelecida no modelo conceitual. Para tanto, a animação do modelo no Arena[®] foi utilizada para rastrear se as decisões de aguardar ou avançar dos trens, quando em situações de conflito, correspondem ao processo de decisão descrito nos fluxogramas das Figuras 27, 34 e 37. Dessa forma, uma a uma, as condições foram avaliadas, conforme se segue:

- a) Linha dupla: como pode ser observado na Figura 42, os trens e A e B realizam deslocamentos em sentidos contrário em um mesmo segmento, entre os P42 e o P44, sem geração de conflito.

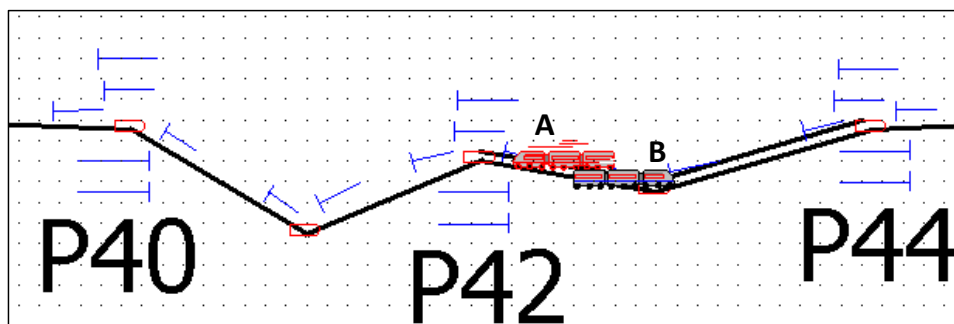


Figura 42 - Trens trafegando em sentidos opostos no mesmo segmento duplicado

- b) Ocupação de SB: na Figura 43, nota-se que o trem A aguarda no P40, enquanto o trem B trafega no sentido importação na SB logo adiante. Após a passagem desse último, o trem A prossegue em sua rota, sentido exportação.

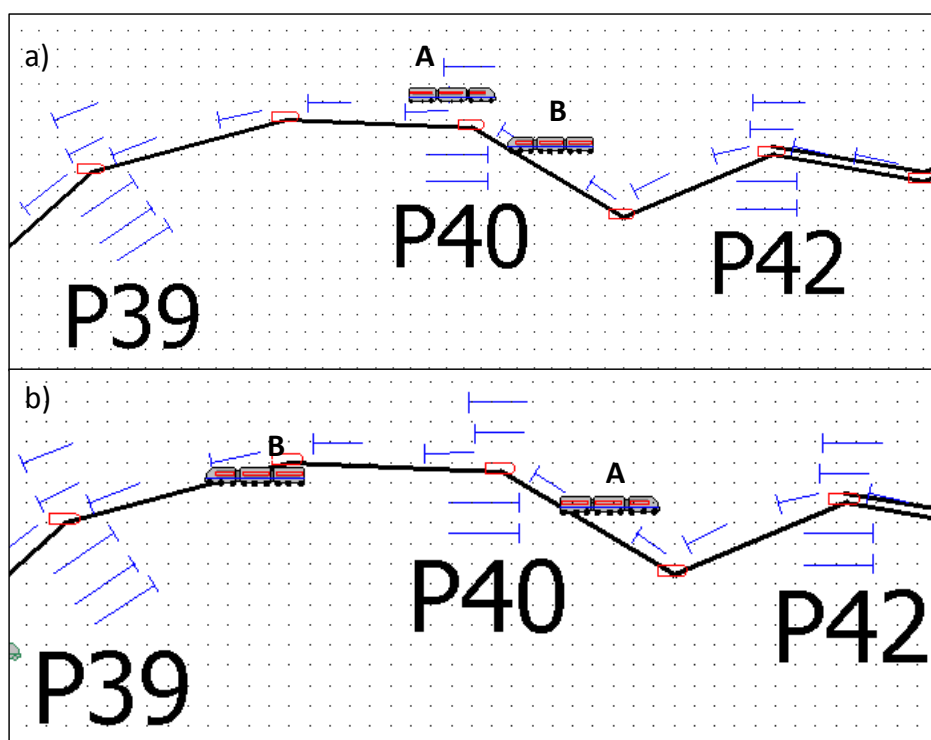


Figura 43 - Animação da resolução do conflito para 2 trens em sentidos contrários

- c) Travamento de trecho: como se evidencia na Figura 44, apesar de não haver um trem na sessão de bloqueio anterior ao trem A (que ocasionaria um travamento), o trem C, ainda assim, aguarda no P42. Isso ocorre em função de não haver uma quantidade menor de trens no mesmo sentido que o trem C em relação ao número de pátios, entre o local onde ele se encontra e o próximo trecho reservado no sentido contrário (P40) – condição iv) do algoritmo de resolução de conflitos de tráfego.

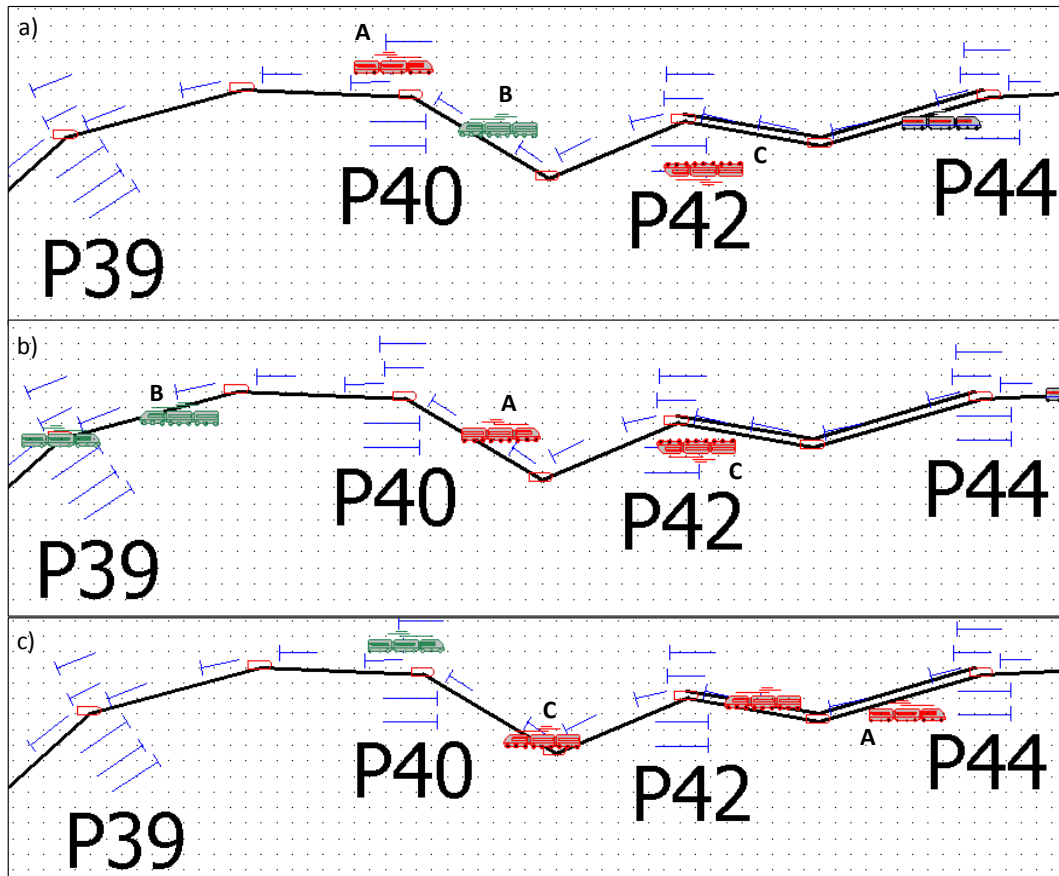


Figura 44 - Animação da resolução do conflito de travamento

- d) Carregamento: como demonstrado na Figura 45, o trem C permanece no P28 para não ocorrer travamento nas linhas auxiliares do pátio de Caetité. Logo após o carregamento do trem A, o trem B acessa a linha de carregamento e o trem C pode, finalmente, trafegar até uma linha auxiliar para ser carregado posteriormente. Todo o processo ocorre de acordo com o previsto no algoritmo de atividades de carregamento.

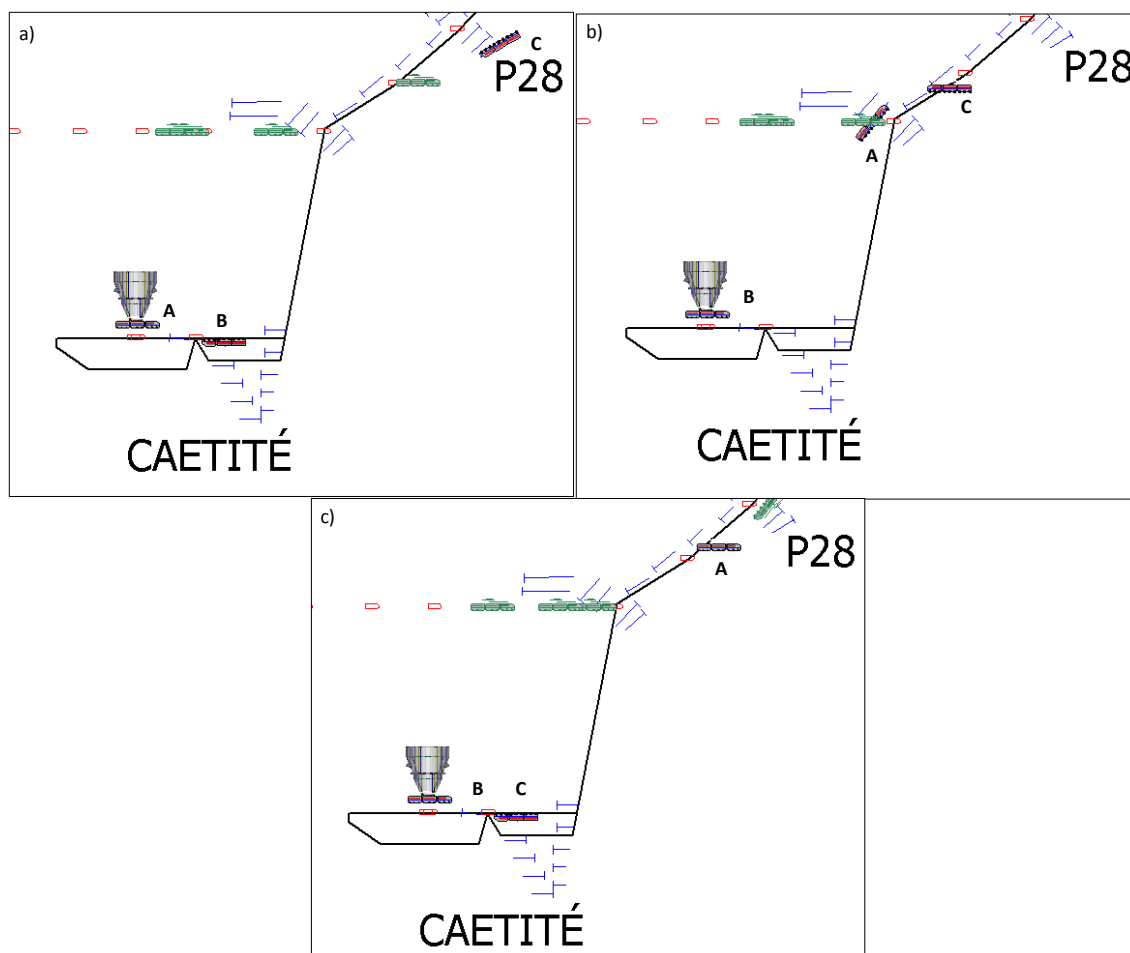


Figura 45 - Animação da sequência de movimento dos trens no carregamento

- e) Descarregamento: para o processo de descarregamento foi verificado o atendimento aos passos propostos no algoritmo de atividades de descarregamento. Na Figura 46, observa-se que o TI (com 4 linhas) não comporta mais do que 3 trens no mesmo sentido, o que inviabilizaria a volta, sentido importação, do trem D. Ao mesmo tempo, o trem E aguarda, em uma linha de recepção, o virador de vagões ficar disponível para realizar a descarga.

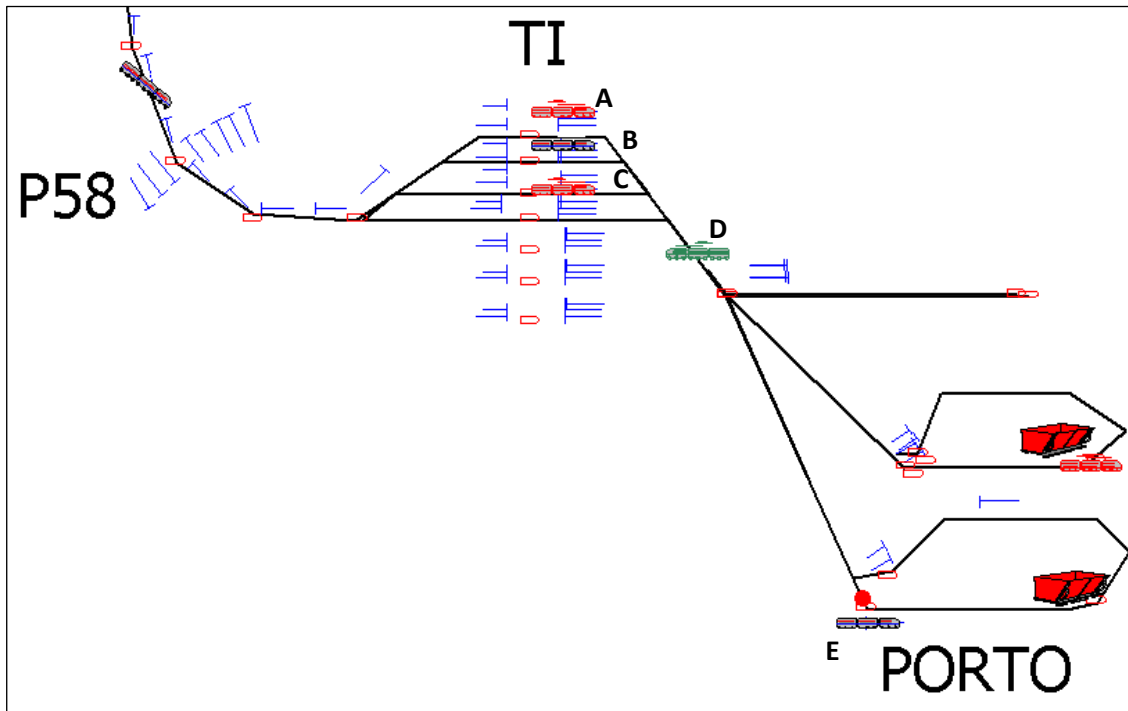


Figura 46 - Representação do processo de descarregamento na animação de cenários

6.1.2 Aderência às variáveis de saída da simulação

Algumas simulações de tráfego foram realizadas a pedido das operadoras interessadas no negócio e pelos entes públicos envolvidos nos empreendimentos ferroviário e portuário. Dessa forma, algumas informações como o tempo de ciclo dos trens de cada mineradora foram utilizadas como base para a comparação das simulações do modelo relatado neste documento. Neste trabalho serão demonstradas as diferenças, em percentual, entre os valores obtidos nas simulações deste trabalho e aqueles relativos aos estudos operacionais desenvolvidos anteriormente. Para fins de simplificação de linguagem, esses dois resultados serão referidos, a partir de então, como provenientes das Simulações ou dos Estudos Operacionais, respectivamente.

Um aspecto importante a ser mencionado é que, à época dos Estudos Operacionais, convencionou-se um tipo de sistema que não será o vigente no cenário atual. Desta maneira, as Simulações foram realizadas com uma definição de parâmetros conforme o que se previa nos Estudos Operacionais. O modelo foi construído sob a perspectiva de uma 1ª fase de operação, contendo 20 pátios, incluindo P26 (Caetitê) e o Terminal de Ilhéus. Nesse período, cerca de 5 anos, estará previsto um aumento na quantidade de cargas transportadas advindas de

regiões da ferrovia a montante de Caetité. De forma a tornar esse processo de validação mais robusto, foram considerados os dois patamares de carga circulando nesse sistema na 1ª fase, respectivos ao início e ao final da mesma.

A variável principal nesse processo de validação foi o tempo de ciclo das composições da BAMIN, que carregam em Caetité. Além desse tempo de ciclo, foram investigados os valores dos ciclos de carregamento e descarregamento para validação dos algoritmos de atividades. A Tabela 6 registra as diferenças entre os valores obtidos, para os dois patamares da 1ª fase.

Tabela 6 - Diferenças percentuais entre os tempos de ciclo, de carregamento e de descarregamento nos dois patamares da 1ª fase de operação da FIOL

	1ª Fase	
	Patamar 1	Patamar 2
$\frac{TC_{BM}^S - TC_{BM}^{EO}}{TC_{BM}^{EO}} 100\%$	3,54%	1,33%
$\frac{TC_C^S - TC_C^{EO}}{TC_C^{EO}} 100\%$	3,53%	5,83%
$\frac{TC_D^S - TC_D^{EO}}{TC_D^{EO}} 100\%$	3,55%	5,92%

Legenda: TC = Tempo de ciclo; Índices inferiores referem-se ao ciclo dos trens BAMIN (BM), do processo carregamento (C) e descarregamento (D); índices superiores apontam se o resultado foi obtido das Simulações (S) ou dos Estudos Operacionais (EO)

Como se pode notar, os valores obtidos nas Simulações aproximam-se consideravelmente daqueles evidenciados nos Estudos Operacionais, independente do patamar de carregamento da malha em análise. Com variações inferiores a 6 % em relação aos valores originais das principais variáveis da modelagem, atestou-se como razoável a capacidade de representação do modelo desenvolvido. Desta forma, a próxima fase do estudo considerou a simulação de uma série de cenários, modificando-se parâmetros presentes nos 3 macroprocessos, a fim de obter resultados de interesse para os diversos *stakeholders* envolvidos nessa cadeia de suprimentos.

6.2 Implicações das alterações no projeto original do sistema

Conforme tratado nesse texto em outra oportunidade, uma conjuntura de fatores acarretou o redesenho do sistema FIO/CLIPS em relação ao projeto original. Tendo em vista a inexistência de análises que calculem o impacto no desempenho do sistema FIO, essa seção apresenta as restrições que surgem nesses novos cenários e as possíveis soluções desenvolvidas para mitigá-las.

6.2.1 Alteração no volume de cargas movimentadas previsto

Os estudos de viabilidade do sistema (BRASIL, 2010) foram desenvolvidos com base nas demandas agroindustriais e nos projetos de exploração mineral na zona de influência da FIO. Em especial, destacam-se duas propostas de intenção das minas pertencentes à Bahia Mineração (BAMIN) e GERDAU, nas proximidades dos municípios de Caetité (BA) e Tanhaçu (BA), respectivamente. Com relação ao volume, o projeto da BAMIN contempla uma exploração de 20 milhões de toneladas por ano (MTPA) em uma primeira fase (aumentada para 45 MTPA em um período posterior), enquanto que a GERDAU estabelecerá sua operação em 25 MTPA. Contudo, a queda expressiva do preço do minério de ferro desestimulou o projeto de exportação por parte da GERDAU, que optou pela permanência no mercado de mineração limitada ao suprimento de suas próprias siderúrgicas em território nacional. Paralelamente, novos projetos próximos à região de Brumado (BA), com intenção de utilizar a FIO e o Porto Sul para o escoamento do minério de ferro, surgiram nesse ínterim. Vale destacar a exploração prevista das minas pertencentes às companhias Cabral Resources (produção de 15 MTPA) e Santa Fé Mineração (produção de 20 MTPA).

Em decorrência dessa mudança de cenário, um primeiro ponto de incerteza a respeito das previsões obtidas nas simulações dos estudos realizados se estabelece. Parte desse processo também explica o fato de somente a BAMIN, que permaneceu desde o início com sua proposta de intenção, possuir um estudo mais detalhado da operação de trens na FIO.

Para modelar o processo de carregamento previsto para essas possíveis novas operadoras, algumas premissas foram estabelecidas:

- Uma vez que as minas de Cabral Resources e Santa Fé Mineração encontram-se em municípios bastante próximos (Contendas do Sincorá-BA e Livramento de Nossa Senhora-BA, respectivamente), optou-se pela inclusão de um único terminal de carregamento gerenciado por uma única operadora ferroviária para atender ambas as demandas no P34 (Brumado);
- O pátio de carregamento no P34 será nos mesmos moldes do P26 em Caetité, da BAMIN, contendo duas linhas auxiliares e uma única linha de carregamento;
- O trem-tipo da operadora que servirá ambas mineradoras será composto por 2 locomotivas e 140 vagões (idem à BAMIN). Será convencionada a nomenclatura “trem CR/SF” para designá-lo, nesse texto.

Deste modo, foi possível estudar os efeitos da variação do número de trens operando a partir do P34. Considerou-se, nos cenários desenvolvidos, uma perspectiva de cargas agroindustriais advindas de Figueirópolis-TO, PIST, PIOB e PISB, de acordo com o patamar inicial da 1ª fase, correspondendo a 6 trens de ciclo a serviço da BAMIN. O efeito incremental dos trens CR/SF no tempo de ciclo médio da BAMIN (TC_{BM}) e dos próprios trens CR/SF ($TC_{CR/SF}$) pode ser evidenciado na Figura 47.

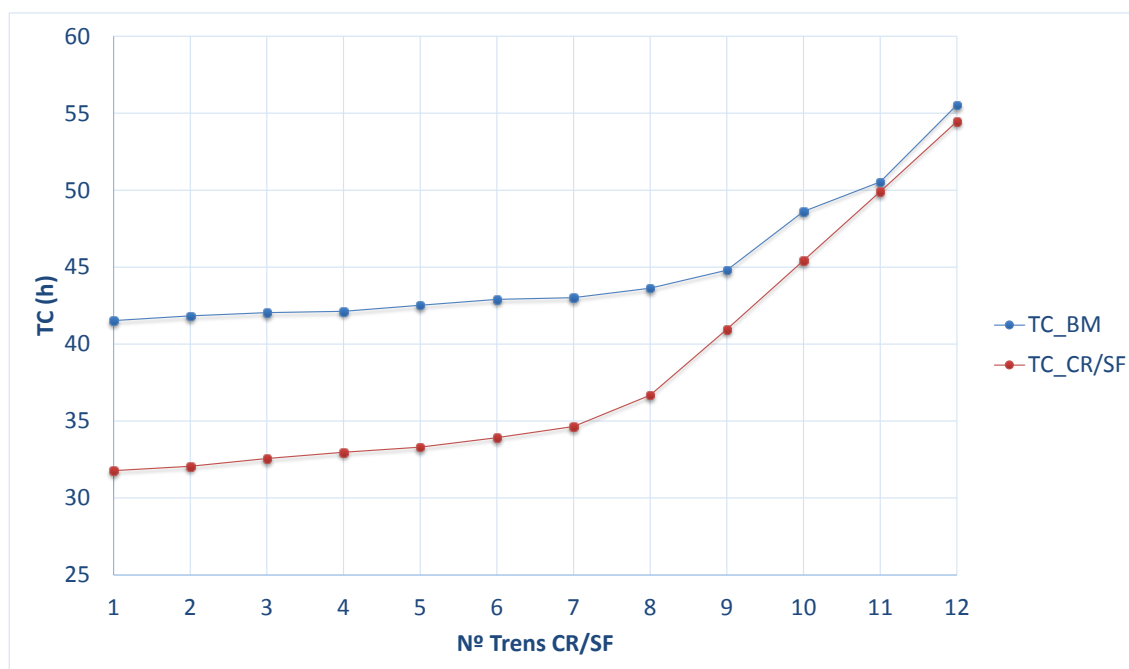


Figura 47 - Impacto do aumento do número de trens CR/SF carregando no P34

Como se pode notar, os incrementos CR/SF ocasionam uma elevação dos tempos de ciclo médio dos trens BAMIN e CR/SF (mais acentuada a partir de 7 trens), comprovando o antagonismo das variáveis número de trens e tempo de ciclo no cálculo da quantidade média de minério entregue anualmente no porto. Pela Figura 48, pode-se concluir que, sem qualquer melhoria no sistema, a quantidade ótima de minério no porto ($MF_{Total/Ano}$), a partir da soma das quantidades entregues pela BAMIN ($MF_{BM/Ano}$) e CR/SF ($MF_{CRSF/Ano}$), é atingida com 8 trens CR/SF operando na malha (18,7 MTPA da BAMIN + 29,7 MTPA CR/SF = 48,4 MTPA total).

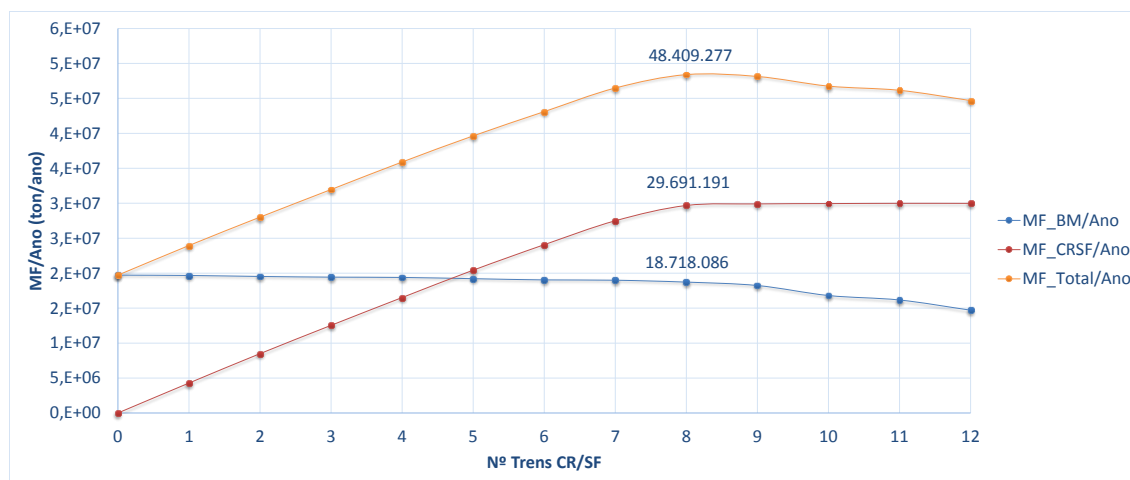


Figura 48 – Curvas do total de minério entregue no porto anualmente (Total, BAMIN e CR/SF) com a variação no número de trens CR/SF

Apesar de ótimo, o valor obtido não é suficiente para suprir as ofertas planejadas para as operadoras envolvidas no negócio (20 MTPA para BAMIN e 35 MTPA para as somas de Cabral Resources e Santa Fé Mineração).

Uma investigação sobre as possíveis causas do aumento expressivo no tempo de ciclo dos trens foi realizada a partir das observações do tempo diário de espera em fila médio. Esses valores foram estratificados por causa, no intuito de viabilizar a compreensão dos impactos mais significativos no aumento do tempo de ciclo dos trens. Essas causas são divididas em 5 tipos, a saber:

- a) Licenciamento: quando trens aguardam devido ao não atendimento das condições previstas no algoritmo de resolução de conflitos de trens na malha (ocupação de SB, travamentos);
- b) Carregamento (externo): ocasião em que os trens, no sentido importação, aguardam nos pátios a jusante do carregamento por não poderem acessá-lo (não atendimento à condição i) do algoritmo de carregamento - Figura 35);

- c) Carregamento (interno): situação na qual os trens, no interior dos pátios de carregamento, aguardam em filas para serem processados (não atendimento às condições ii) e iii) do algoritmo de carregamento - Figura 35);
- d) Descarregamento (externo): todas as circunstâncias de filas na qual o trem espera na FIOL (P58 ou Terminal de Ilhéus) para poder acessar a região *onshore* do porto (condições i), ii) e iii) do algoritmo de descarregamento não são atendidas - Figura 38);
- e) Descarregamento (interno): quando, na região *onshore* do porto, o trem não atende às condições iv), v) e vi) do algoritmo de descarregamento (Figura 38).

Dessa forma, a variação de cada um desses tempos médios de espera diário com relação ao incremento dos trens CR/SF pode ser observada na Figura 49.

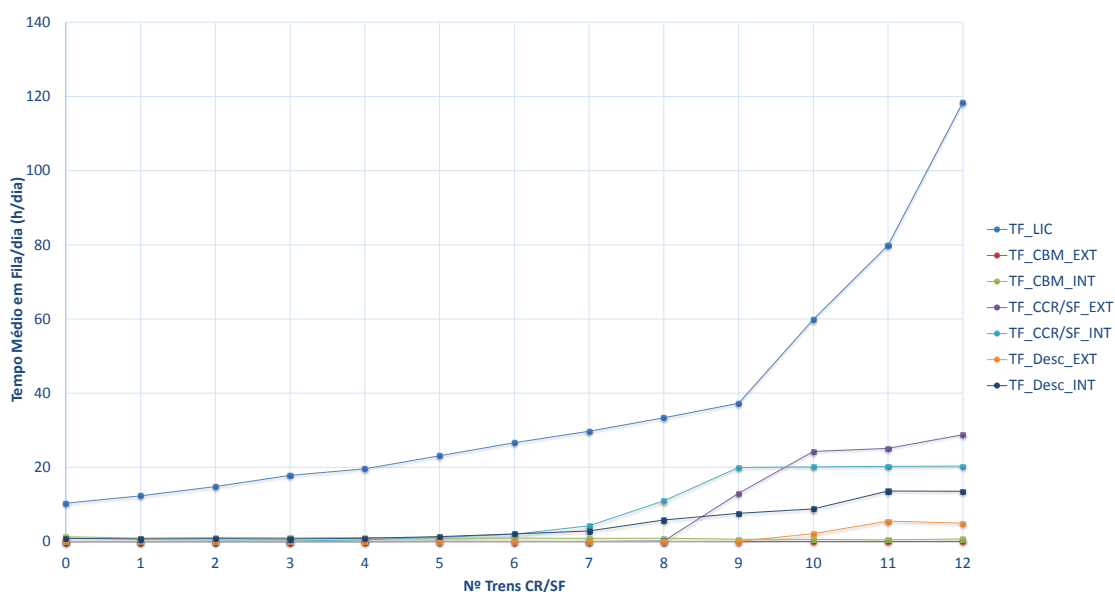


Figura 49 – Curvas dos tempos médios em filas/dia por causa. Legenda dos motivos: TF_{LIC} = licenciamento; TF_{CBM_EXT} = Carregamento BAMIN (externo); TF_{CBM_INT} = Carregamento BAMIN (interno); TF_{CCR/SF_EXT} = Carregamento CR/SF (externo); TF_{CCR/SF_INT} = Carregamento CR/SF (interno); TF_{Desc_EXT} = Descarregamento (externo); TF_{Desc_INT} = Descarregamento (interno).

Da Figura 49, evidencia-se que: a) o principal motivo de incremento nos tempos de ciclo ocorre por motivos de espera para conflitos de circulação de trens na malha (licenciamento); b) a partir de 7 trens CR/SF, os tempos de espera para carregar (tanto interno como externo) seguidos da espera para descarregar (idem, interno e externo) se tornam significativos no processo, apesar de bem inferiores ao primeiro motivo. No entanto, observando-se o sistema através da animação construída, nota-se que a razão subjacente a essa escalada no tempo de espera em

filas por motivo de licenciamento ocorre principalmente em função do aumento expressivo nos tempos de espera para carregar. Analisando-se as taxas de ocupação do silo CR/SF para os cenários de 8, 9, 10 e 11 trens CR/SF (mantendo-se constante os 6 trens BM), observa-se que as mesmas se encontram próximas de 100%, acarretando o surgimento de filas para utilização desse silo no sistema. Na Figura 50, pode-se observar que o trem A, em processo de carregamento, ocasiona a espera do trem B numa linha auxiliar (motivo carregamento – interno) que, por sua vez, exige que o trem C aguarde no P35 (motivo carregamento – externo). Deste modo, o fluxo é travado para as composições aguardando a jusante de P35 (trens D, E e F), em espera por motivo de licenciamento.

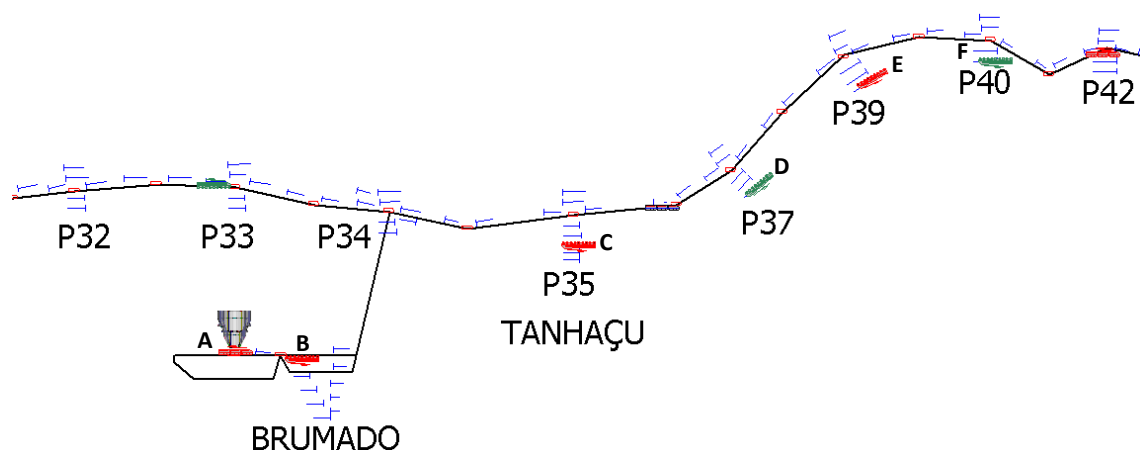


Figura 50 – Efeito da espera no carregamento na circulação pela FIOI

O diagnóstico das causas, portanto, permite inferir que deve haver uma melhoria no processo de carregamento, de forma a evitar o efeito em cadeia deletério de filas no sistema ferroviário – conhecido como *knock-on effect* (CAIMI et al., 2012). Desta maneira, algumas soluções são propostas para se atingir esse objetivo.

6.2.2 Solução para o gargalo no carregamento CR/SF

Identificada a causa-raiz do problema como o tempo de carregamento no silo que ocasiona filas em cadeia na malha, duas soluções foram propostas para melhoria nesse processo. A primeira delas considera uma melhoria na capacidade do silo, avaliando reduções consecutivas de 45 minutos sobre o valor original do

tempo de carregamento dos trens CR/SF (4,32 h). Em seguida, foi verificado o impacto do aumento no número de silos para carregamento. Os resultados para o tempo de ciclo dos trens, considerando-se uma variação de 8 a 11 trens CR/SF na malha, estão apresentados na Figura 51 (melhoria na capacidade) e na Figura 52 (aumento do número de silos).

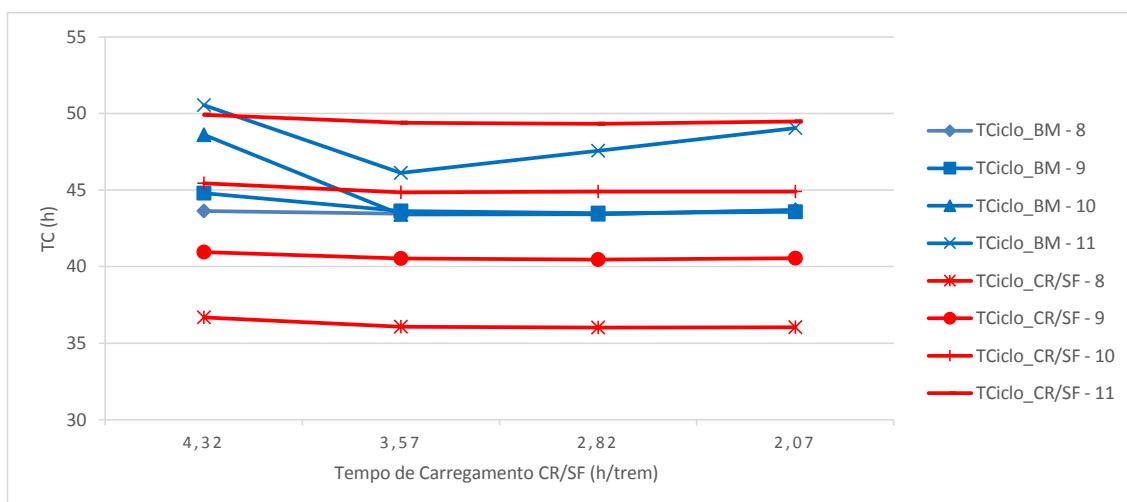


Figura 51 - Impacto da melhoria do tempo de carregamento CR/SF no tempo de ciclo dos trens

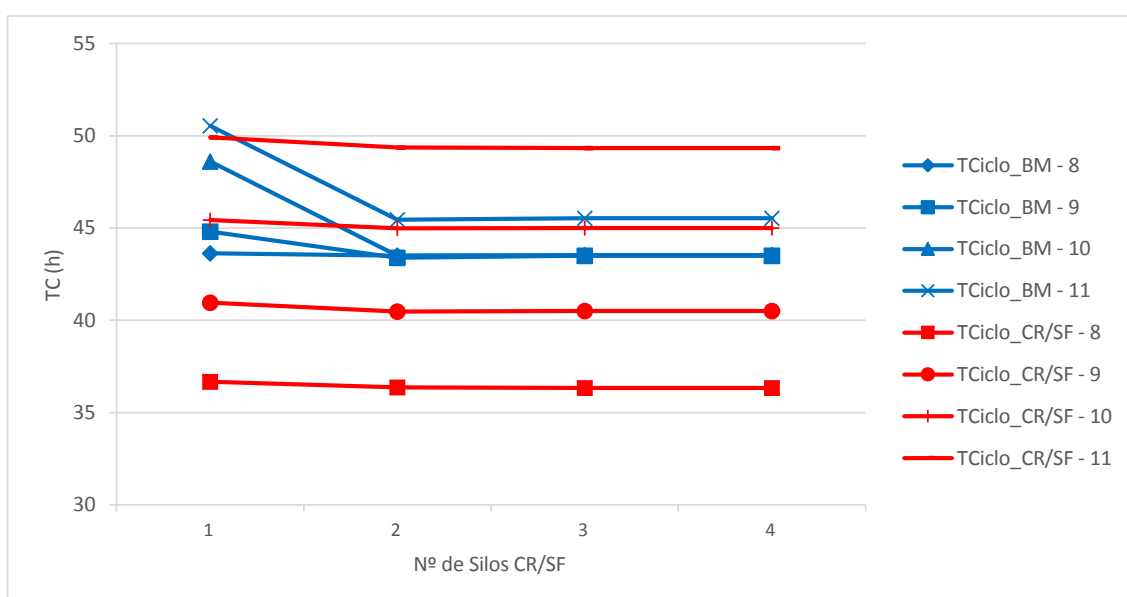


Figura 52 - Impacto do aumento no número de silos CR/SF no tempo de ciclo dos trens

Em uma análise preliminar, pode parecer contra-intuitivo que ambas as melhorias no processo de carregamento CR/SF não produzam um melhor desempenho nos tempos de ciclo dos trens CR/SF para nenhum dos casos de 8 a 11 trens trafegando na malha. De fato, a espera em filas no processo de carregamento (externo e interno) são reduzidas consideravelmente, o que permite uma melhoria do fluxo na FIOLE e, conseqüentemente, menores valores de tempo de

espera por motivo licenciamento naquela região. No entanto, na observação do comportamento das filas pela Figura 53, percebe-se que a diminuição da espera na região de carregamento CR/SF (linhas contínuas) ocorre concomitantemente a um aumento das filas nas vizinhanças e interior ao porto por motivo descarregamento, interno e externo (linhas pontilhadas), para todos os casos entre 8 e 11 trens CR/SF.

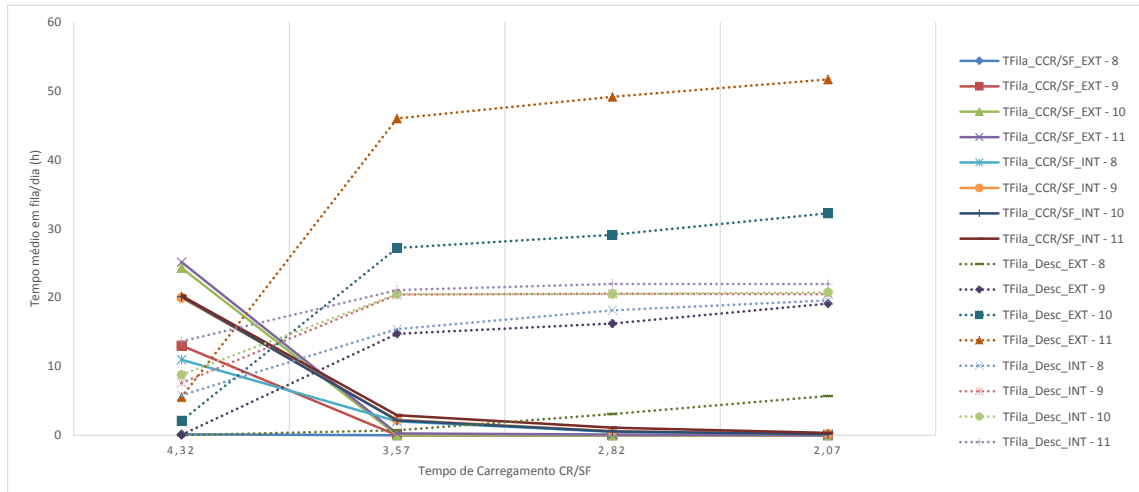


Figura 53 - Tempo médio em filas/dia por motivo carregamento CR/SF decrescendo (linhas contínuas) e motivo descarregamento crescendo (linhas pontilhadas) com a melhoria da capacidade do silo CR/SF

Da Figura 54, percebe-se que essa transferência de filas é razão direta das alterações ocorridas nas taxas de ocupação do virador de vagões e do silo de carregamento CR/SF.

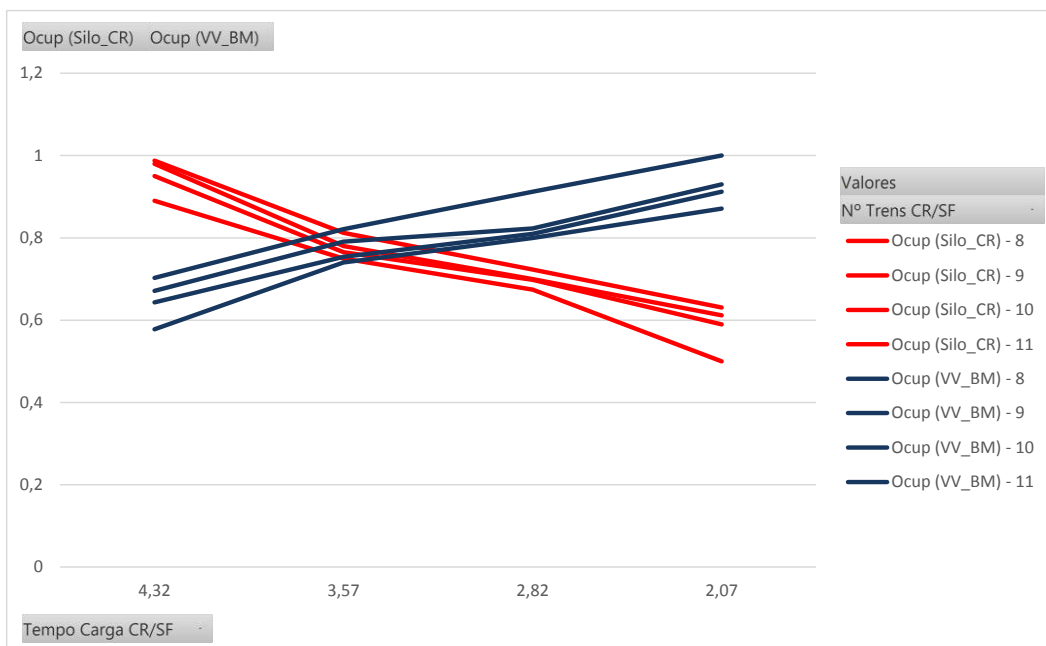


Figura 54 - Taxa de ocupação do virador de vagões (azul) e do silo CR/SF (vermelho) com alteração no tempo de carga do silo CR/SF

Essa é uma importante constatação de um processo acontecendo em circuito fechado (Fioroni, 2008), a exemplo dos trens de ciclo de minério tratados neste estudo. De fato, a ausência de uma atuação coordenada para a melhoria de desempenho no sistema pode significar investimentos inócuos ou mesmo com retornos negativos, como é o caso do tempo de ciclo da BAMIN (com 11 trens CR/SF), quando se efetua diminuições no tempo de carregamento CR/SF a partir de 3,52 h/trem (Figura 51). É válido salientar também que a melhoria inicial para os trens BAMIN (aumento de um silo ou de tempo para carregar CR/SF de 4,32 h para 3,57 h) ocorre em função da diminuição da espera dos trens na FIOL causada pelo *knock-on effect* evidenciado na Figura 50.

6.2.3 Alteração na região onshore do Porto Sul

Duas alterações no projeto original da região *onshore* do porto podem ser destacadas. A principal dessas mudanças foi a proposta de redução (numa primeira fase do projeto) da área total dessa região, com a supressão do espaço a ser ocupado pelo Porto Público. Neste novo molde, onde a retroárea se limita ao Terminal de Uso Privativo (TUP) da BAMIN, as cargas de BAMIN e CR/SF seriam descarregadas em um mesmo terminal, compartilhando a infraestrutura de linhas de recepção, virador de vagões e, possivelmente, empilhadeiras e recuperadoras de minério no pátio de estocagem. A Figura 55 ilustra essa redução de infraestrutura do Porto Sul, na qual a porção descolorida representa a área suprimida para uma primeira etapa de operação.

que foi concebido no projeto original ($TC_{BM(Orig)}$ e $TC_{CR/SF(Orig)}$), que considera os trens CR/SF carregando em um terminal distinto do TUP BAMIN, na região do Porto Público.

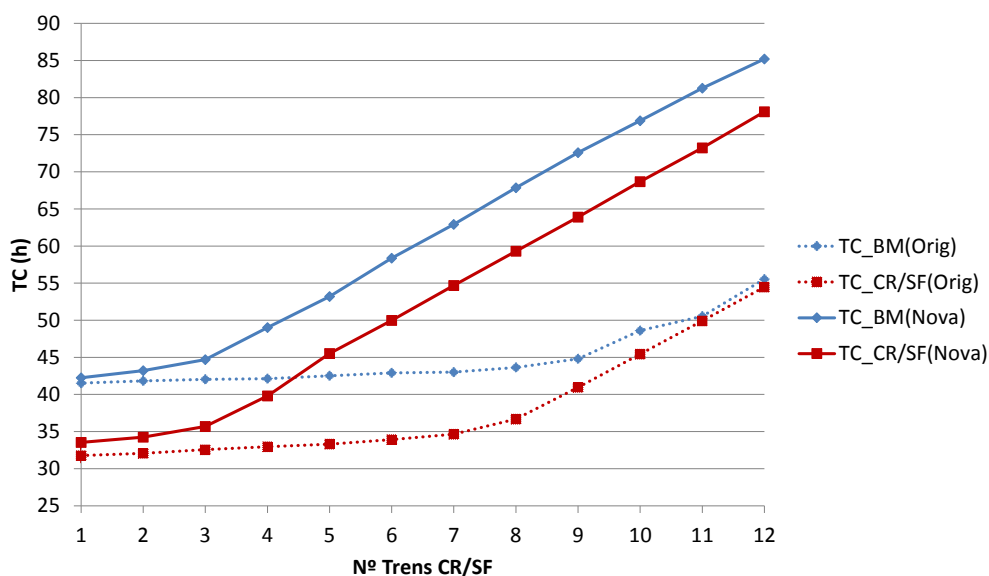


Figura 56 - Impacto do aumento do número de trens CR/SF nos tempos de ciclo na nova perspectiva (linhas contínuas) em relação à original (linhas pontilhadas)

Com efeito, caso essa nova perspectiva seja implementada sem nenhuma melhoria no processo, a logística seria inviabilizada, uma vez que o máximo de minério entregue no porto seria de aproximadamente 30,4 MTPA (11,2 MTPA da BAMIN e 19,2 MTPA de CR/SF), com 9 trens CR/SF. Isso implica em uma redução de 37% em relação ao previsto com a ideia do projeto original (48,4 MTPA, maximizado com 8 trens CR/SF, e que já se encontra aquém da oferta planejada pelas mineradoras, conforme Figura 48). Similarmente ao caso do carregamento, os efeitos da espera para descarregar no virador de vagões, as filas se propagam ao longo do sistema (*knock-on effect*), afetando a circulação em direção à FIOLE, a partir do terminal de Ilhéus, como se pode evidenciar na Figura 57. Na ordem, o trem A aguarda o virador ficar livre, o que impede a entrada dos trens B, C e D, no Terminal de Ilhéus. Consequentemente, o trem E não pode seguir para o TI, evitando conflito de ocupação de linhas, o que, por sua vez, provoca esperas por motivos de licenciamento a montante do P58 para os trens F, G e H. É importante salientar que esse incremento nas filas é claramente consequência direta da taxa de ocupação do virador de vagões, que para todos os cenários (8, 9, 10 e 11 trens CR/SF) se manteve em 100%.

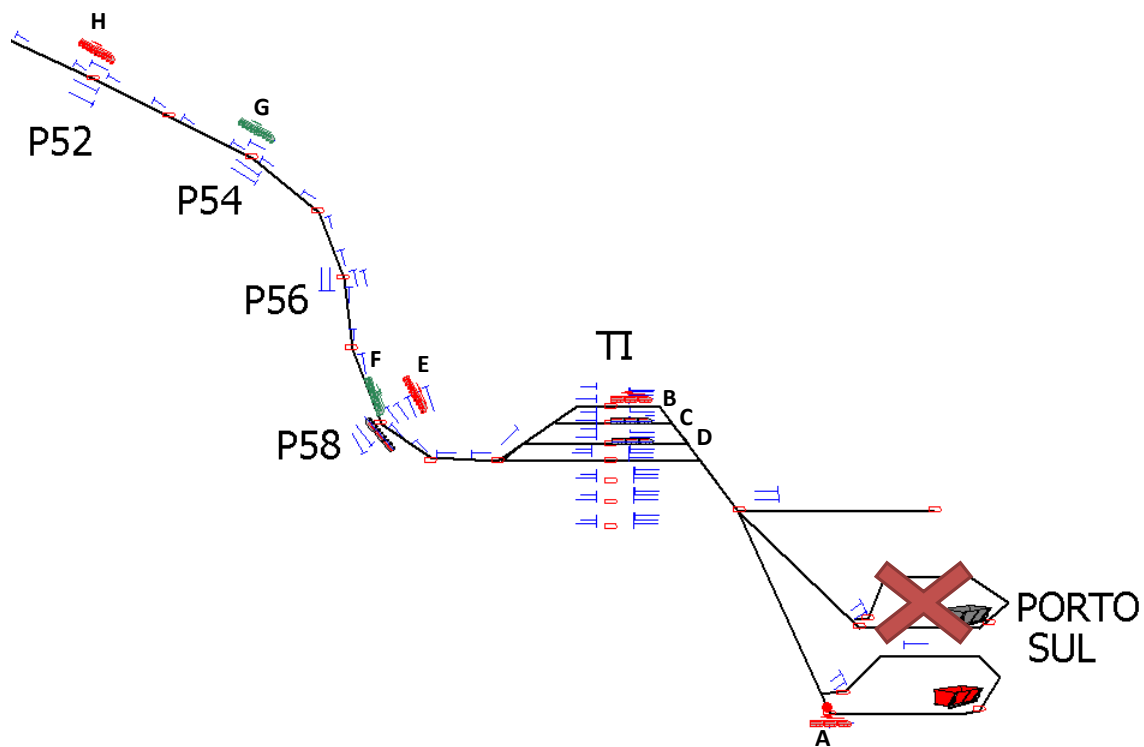


Figura 57 - *Knock-on effect* na FIOI devido à espera para descarregar no porto, quando se desconsidera o terminal de descarga de minério no porto público e utiliza-se um virador de vagões simples no TUP B AMIN

Essa é uma consequência razoavelmente esperada, tendo em vista que a quantidade de trens servida por dois viradores de vagões simples passa a ser atendida por somente um. Deste modo, algumas melhorias no processo de descarga foram testadas e seus efeitos avaliados através de simulações no Arena[®]

6.2.4 Soluções para o gargalo na região de descarregamento

Pensando-se na resolução desse entrave, duas alternativas iniciais foram previstas: melhoria na capacidade do virador de vagões ou aumento no número de viradores no TUP B AMIN. No primeiro caso, foram considerados incrementos de capacidade, na forma de reduções sucessivas de 45 minutos no tempo para descarregar (3,57 h, 2,82 h e 2,07 h). Na situação de aumento do número de viradores, observou-se os efeitos com 1, 2, 3 e 4 viradores no processo. Os resultados para ambas melhorias, com variação entre 8 e 11 trens CR/SF trafegando na malha, estão descritos nas Figuras 58 e 59, respectivamente.

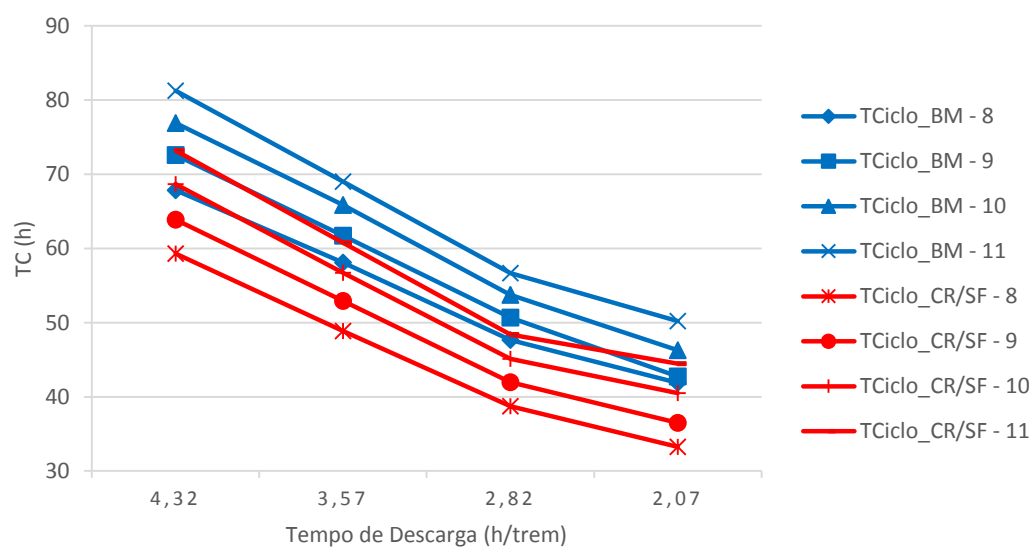


Figura 58 - Impacto da variação no tempo de descarga do virador de vagões (VV) sobre o tempo de ciclo dos trens

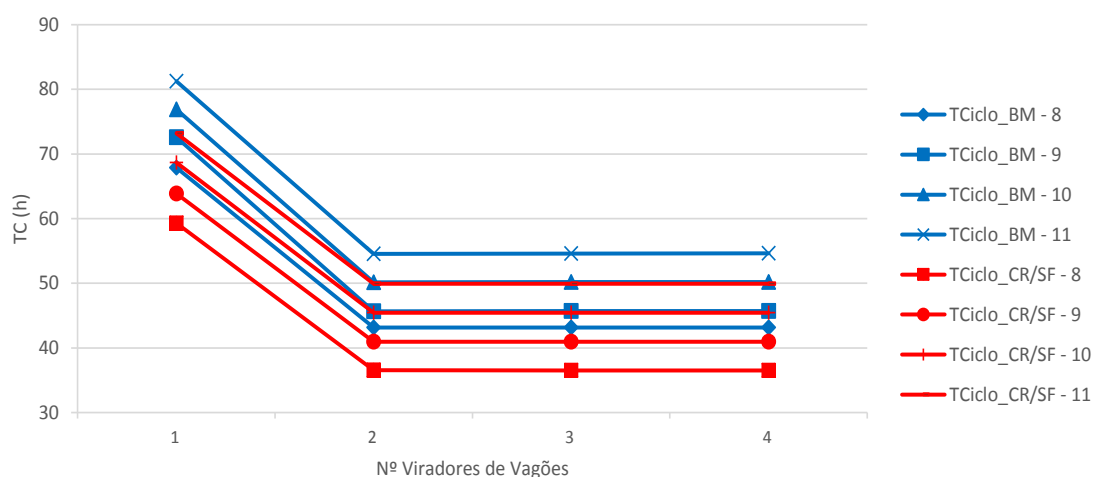


Figura 59 - Impacto do aumento do número de virador de vagões no tempo de ciclo dos trens

Intuitivamente, o aumento de capacidade interfere de forma direta (e linear) nos tempos de ciclo dos trens, tanto BAMIN quanto CR/SF, com todos os dimensionamentos dos trens CR/SF previstos (8 a 11), uma vez que ambos os tipos são servidos pelo mesmo virador. Com relação ao aumento do número de viradores de vagões, evidencia-se um decréscimo significativo nos tempos de ciclo quando se aumenta de 1 para 2 viradores. Entretanto, a partir de 2 viradores não acontecem melhorias nos tempos de ciclo, demonstrando que o número médio de trens em atendimento pelos viradores é menor ou igual a 2 em qualquer dimensionamento de frota CR/SF entre 8 e 11 trens.

Assim como nas propostas de melhoria para o processo de carregamento, uma porção das filas locais é transferida para outras regiões da malha. Na Figura 60, as

curvas indicadas registram os comportamentos das filas por motivos carregamento CR/SF (interno e externo) – linhas pontilhadas – e de descarregamento (interno e externo) – linhas contínuas –, quando alterada a capacidade do virador de vagões no processo.

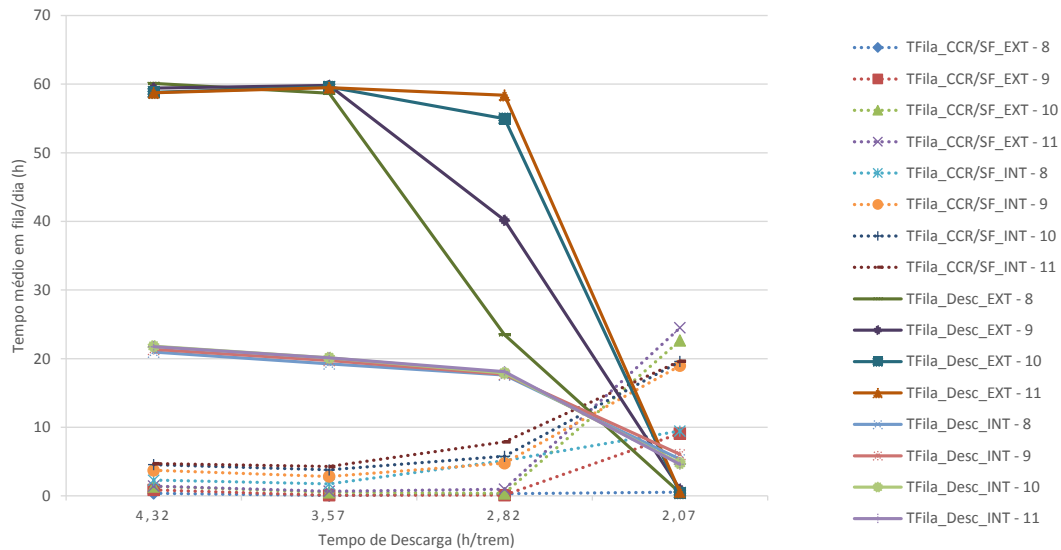


Figura 60 - Tempo médio em filas/dia por motivo carregamento CR/SF aumentando (linhas pontilhadas) e motivo descarregamento decrescendo (linhas contínuas) com a melhoria da capacidade do virador de vagões

Da Figura 61, pode-se notar que essa transferência de filas é consequência direta da alteração das taxas de ocupação do virador de vagões e do silo de carregamento CR/SF.

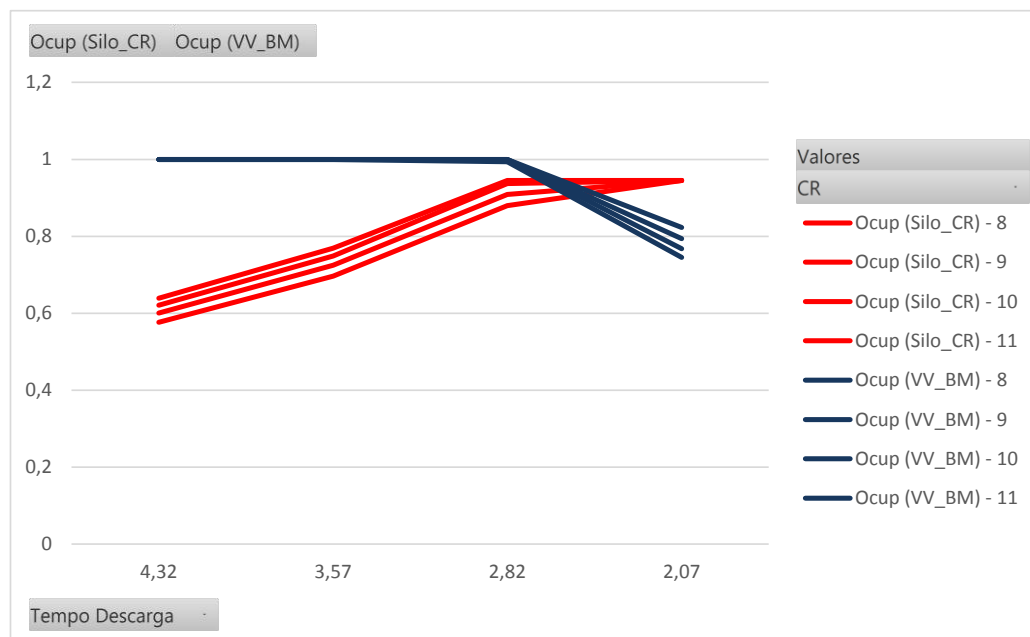


Figura 61 - Taxa de ocupação do virador de vagões (azul) e do silo CR/SF (vermelho) com alteração no tempo de descarga do virador de vagões

Novamente, essa é mais uma evidência de que ações de melhoria de capacidade em um sistema ferroviário, especialmente em linhas singelas e operando com trens de ciclo, devem ser conduzidas de forma coordenada e abrangendo a totalidade dos processos.

6.3 Efeitos de melhorias no macroprocesso de circulação de trens

A melhoria da capacidade dos sistemas ferroviários pode ser investigada a partir da Equação 5.5, que calcula o número de pares de trens/dia que um determinado trecho entre dois pátios de cruzamento pode suportar. Analisando-se sua composição, pode-se inferir que o aumento desse valor pode ocorrer através da diminuição dos tempos de manutenção (T_m), dos tempos de rota entre esses pátios (t_e e t_i) e do tempo de licenciamento (θ). Também é possível obter melhores resultados via aumento da eficiência operacional (K). No caso em estudo, como não foi possível dimensionar os tempos de manutenção de via, essa variável não foi considerada na modelagem. Na prática, a melhoria de capacidade pode ser atingida consideravelmente com a diminuição dos tempos de rota entre pátios, que pode ocorrer na forma de aumento de velocidade ou inclusão de mais pátios no trecho onde se calcula a capacidade. Reduções ainda maiores no tempo de ciclo podem ser alcançadas quando o segmento de linhas entre os pátios é duplicado, permitindo

que cada linha sirva a um único sentido (exportação ou importação). Nesse caso, a Equação 3.1 deixa de representar a capacidade de pares de trens/dia de um trecho e a noção de *headway* (espaçamento temporal entre trens no mesmo sentido) passa a valer no cômputo dessa capacidade (BRINA, 1988). Deste modo, métodos de licenciamento que permitam um menor espaçamento temporal entre esses trens conduzirão a uma maior capacidade de tráfego, uma vez que mais trens por dia trafegarão no trecho em estudo. Em contrapartida, pode-se aumentar os riscos de acidentes com a diminuição desse espaço entre trens, exigindo maiores investimentos que garantam um nível minimamente aceitável de segurança operacional. Nas simulações desenvolvidas, permaneceu-se com o mesmo sistema de licenciamento a bloqueio fixo adotado previamente, com duas seções de bloqueio por segmento entre pátios.

Em um primeiro momento, foi constatado que a estratégia de duplicação no cenário básico não promove melhorias significativas no processo. Isso ocorre em função da configuração atual do sistema (com a quantidade de pátios e tempos de rota previstos) não representar gargalo em comparação aos processos de carregamento e descarregamento. Esse fato foi constatado realizando-se uma simulação para comparar o tempo de ciclo do cenário básico com a malha totalmente duplicada entre o P34 e o TI. Foi observado uma redução de tempo de ciclo entre 1% e 2% para as instâncias investigadas de 9, 10 e 11 trens CR/SF e uma superior para 8 trens CR/SF, de 6%. De fato, são valores pouco significativos tendo em vista o custo médio de duplicação com as especificações técnicas da via permanente da FIOL (R\$ 5 milhões/km, segundo informações obtidas em entrevista com funcionários da Gerência de Transporte Ferroviário de Cargas - GPFER - da ANTT). Dessa forma, para melhor avaliar os efeitos da duplicação, considerou-se como cenário básico um sistema com melhorias nos gargalos (processos de carga e descarga), optando-se por dois silos BAMIN, dois silos CR/SF e dois viradores de vagão, com maiores capacidades de processamento (2,07h/trem, cada). De fato, além do processo de circulação não se apresentar como gargalo, os efeitos da duplicação são melhor percebidos com o aumento da circulação de trens que está prevista para acontecer no longo prazo.

Um projeto de duplicação de linha, além de bastante custoso, exige um cronograma prolongado, variando, obviamente, com a extensão de malha afetada por essa expansão. Com isso, deve-se priorizar as regiões que deverão receber os

primeiros trechos duplicados, de modo que as principais restrições sejam sanadas o mais breve possível no decorrer desse projeto. Baseado nessa racionalidade, propôs-se, então, conhecer quais os pátios com maior formação de filas por motivo licenciamento no processo, de modo a definir quais são esses primeiros segmentos de linha entre pátios a serem duplicados. Conforme esperado, o gráfico da Figura 62 expressa, para 8, 9, 10 e 11 trens CR/SF, uma grande concentração de filas nas regiões vizinhas ao pátio de carregamento CR/SF (P34 ao P42), bem como na proximidade da entrada do porto (P52 ao P58).

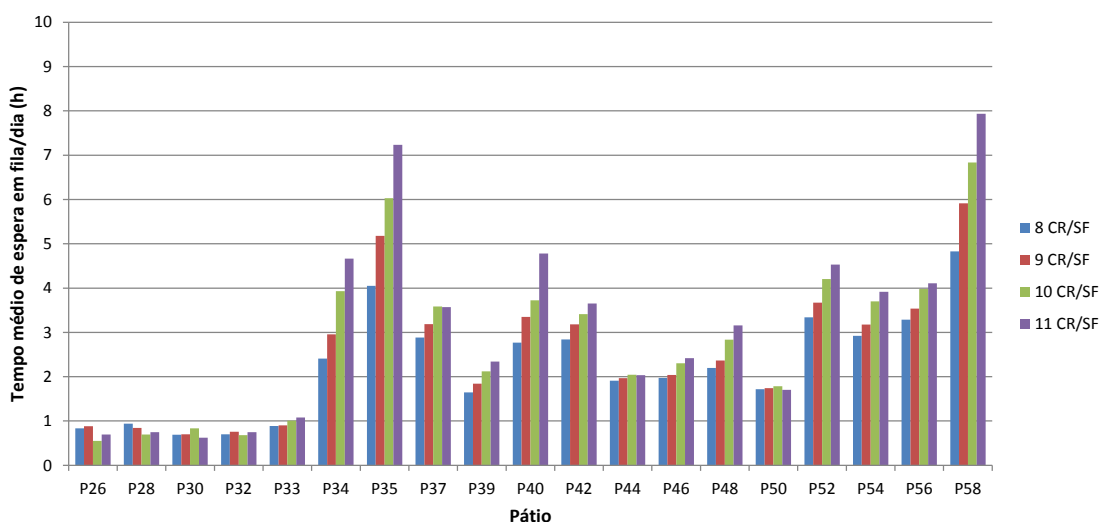


Figura 62 – Cenário básico de formação de filas por motivo licenciamento para cada pátio, considerando-se entre 8 e 11 trens CR/SF

Pela indicação dos valores de espera em filas no processo, foram desenhados 4 cenários de duplicação. Simulou-se um cenário 1 (CEN1) com os trechos entre o P52 e o TI duplicados, um cenário 2 (CEN2) com os trechos entre o P34 e o P40 duplicados, um cenário 3 (CEN3) combinando os dois cenários anteriores, além de uma perspectiva final de duplicação completa entre o P34 e o TI. Em virtude dos tempos de espera em filas entre o P26 e o P33 serem bastante inferiores em relação outros pátios, eles foram desconsiderados para um possível projeto de duplicação. Os resultados das simulações, em termos das reduções nos tempos de ciclo dos trens BAMIN e CR/SF, podem ser identificados no quadro da Tabela 7.

Tabela 7 – Redução dos tempos de ciclo (em %) de BAMIN e CR/SF para cada cenário de duplicação para 8, 9, 10 e 11 trens CR/SF

Cenário	Trechos Duplicados	Redução no TC (%) - BAMIN e CR/SF			
		p/ 8 CR/SF	p/ 9 CR/SF	p/ 10 CR/SF	p/ 11 CR/SF
CEN1	P52-P54; P54-P56; P56-P58; P58-TI	2,2 e 2,6	2,2 e 2,4	2,4 e 2,9	1,5 e 2,6
CEN2	P34-P35; P35-P37; P37-P39; P39-P40	2,5 e 2,8	2,5 e 3,5	3,0 e 4,2	2,9 e 4,1
CEN3	CEN1 + CEN2	5,0 e 5,5	4,9 e 6,5	5,0 e 6,8	4,4 e 6,3
CEN4	Todos os segmentos entre o P34 e o TI	11,5 e 14,0	12,3 e 15,5	13,4 e 17,1	14,2 e 18,7

Da Tabela 7, é possível afirmar que considerando-se somente o fator redução nos tempos de ciclo dos trens de minério, um cronograma ideal de projeto de duplicação consideraria iniciar os trabalhos a partir do P34 em direção ao P40 (CEN2), posteriormente do TI ao P52 (CEN1) e, por fim, o restante dos pátios a serem duplicados (P40 ao P52) entre o P34 e o TI (CEN4). Essa decisão ocorre em função de se obterem melhores resultados para os tempos de ciclo dos trens BAMIN e CR/SF no CEN2 em relação ao CEN1, para todos os casos entre 8 e 11 trens CR/SF, garantindo um melhor desempenho logo no início do projeto de duplicação.

Percebe-se também que os ganhos no CEN4 são bastante relevantes para o aumento da quantidade média de minério de ferro entregue anualmente no porto. Para 8 trens CR/SF, obtém-se um aumento superior a 8,6 MTPA (em torno de 2,6 MTPA BAMIN e 6 MTPA CR/SF), ao passo que no melhor caso (11 trens CR/SF) esse aumento é aproximadamente 14,2 MTPA (quase 3,3 MTPA BAMIN e 10,9 MTPA CR/SF).

É importante notar que quanto maior o carregamento da malha (maior quantidade de trens trafegando), mais significativo os ganhos com a duplicação. Com efeito, considerando-se 10 trens BAMIN e 15 trens CR/SF, pode-se alcançar reduções de até 50% nos tempos de ciclo dos trens BAMIN e 29,5% para os ciclos das composições CR/SF. Essa é uma constatação interessante que assegura a extrema eficácia desse tipo de investimento quando grandes aumentos de capacidade de tráfego na malha se fazem necessários.

6.4 Desenho ótimo de infraestrutura

6.4.1 Variáveis de decisão do modelo

A análise de otimização desenvolvida teve o intuito de propor uma solução para a principal problemática desse estudo: os problemas de capacidade que surgem com as mudanças nas perspectivas de infraestrutura e operação. Como demonstrado no gráfico da Figura 48 (quantidade de minério entregue anualmente no porto), com essas novas condições, os objetivos comerciais dos possíveis futuros *players* (BAMIN, Cabral Resources e Santa Fé Mineração) não serão atingidos. Nas análises precedentes, algumas soluções em infraestrutura de carregamento e descarregamento foram desenvolvidas, apresentando certas limitações como a transferência de filas para outras regiões do sistema (devido às características de circuito fechado inerentes ao processo). Esse inconveniente sugere que combinações entre os parâmetros que estão contemplados no modelo sejam testadas, a fim de promover uma melhoria coordenada no sistema. Conforme foi mencionado, para os patamares de tráfego do início da operação, melhorias de infraestrutura na FIOLE (relacionada ao macroprocesso de circulação de trens, a exemplo da duplicação de linhas) oferece poucos ganhos em comparação a intervenções nos processos de carga e descarga (gargalos para o desempenho logístico). Dessa forma, optou-se por selecionar as variáveis de decisão x_i^* , a partir dos parâmetros x_i (variáveis de entrada), compreendidas no âmbito dos macroprocessos de carregamento e descarregamento. São elas:

- a) Número de silos de carregamento: quantidade de silos disponíveis nos terminais de carregamento BAMIN e CR/SF. São considerados 3 tipos de silos para carregamento com capacidades distintas disponíveis no mercado. São denotados por silo tipo I (4.000t/h \rightarrow 4,32 h/trem), tipo II (6.000t/h \rightarrow 2,88 h/trem) e tipo III (16.000 t/h \rightarrow 1,08 h/trem);
- b) Número de viradores de vagão: quantidade de viradores que os trens BAMIN e CR/SF podem utilizar para realizar a descarga. São considerados dois tipos de virador de vagões: tipo I (simples: 4.000t/h \rightarrow 4,32 h/trem) e tipo II (duplo: 9.400 t/h \rightarrow 2,16 h/trem);
- c) Terminal de descarregamento CR/SF: variável que considera a possibilidade de um terminal de descarregamento somente para CR/SF, correspondendo

ao terminal de minério do porto público que estava previsto no projeto *onshore* original do Porto Sul;

- d) Número de linhas auxiliares no carregamento: quantidade de linhas auxiliares utilizadas como *buffer* do processo de carregamento (fazendo com que os trens esperem para carregar no terminal de carregamento ao invés de aguardar na FIOI).
- e) Número de linhas no TI: quantidade de linhas no TI (ideia semelhante às linhas auxiliares de carregamento, só que para o processo de descarga no Terminal de Ilhéus que antecede a entrada do porto);
- f) Número de trens: dimensionamento da frota de trens BAMIN e CR/SF no sistema.

6.4.2 Modelo de otimização desenvolvido

A melhor combinação dos valores dessas variáveis foi feita de acordo com uma racionalidade financeira, minimizando uma função de investimento total na infraestrutura planejada para o funcionamento do sistema. Os dados de investimento de cada componente dessa função foram principalmente obtidos através dos estudos operacionais da FIOI (BRASIL, 2010). Informações complementares foram fornecidas pela Gerência de Transporte Ferroviário de Cargas (GPFER) da ANTT, além da superintendência comercial da fabricante de equipamentos industriais Thyssenkrupp®, ambas por meio de requisição de orçamentos. A partir das Equações 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, definiu-se o problema de otimização de acordo com a seguinte estrutura:

$$MIN F = \sum_i I_i, \quad S. A.: \quad 6.1$$

$$\frac{(NT_{BM} \cdot 15540 \cdot 8760)}{TC_{BM}} \geq 20 \text{ MTPA} \quad 6.2$$

$$\frac{(NT_{CR/SF} \cdot 15540 \cdot 8760)}{TC_{CR/SF}} \geq 35 \text{ MTPA} \quad 6.3$$

$$N_{SILO(BM)}^I + N_{SILO(BM)}^{II} + N_{SILO(BM)}^{III} \geq 1 \quad 6.4$$

$$N_{SILO(CR/SF)}^I + N_{SILO(CR/SF)}^{II} + N_{SILO(CR/SF)}^{III} \geq 1 \quad 6.5$$

$$N_{VV(BM)}^I + N_{VV(BM)}^{II} \geq 1 \quad 6.6$$

$$LI \leq x_i^* \leq LS, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad 6.7$$

onde I_i é o valor do investimento no componente de infraestrutura i , $NT_{mineradora}$ é o número de trens e $TC_{mineradora}$ representa o tempo de ciclo resultante da simulação dos trens de uma mineradora específica. $N_{SILO(mineradora)}^{tipo}$ diz respeito ao número de silos (tipos I, II ou III) presentes no processo de carregamento e $N_{VV(mineradora)}^{tipo}$ é o número de viradores de vagão (tipos I ou II) presentes no terminal de descarga da mineradora analisada.

A Equação 6.1 descreve minimização da função objetivo dada como a soma dos investimentos em cada componente de infraestrutura i . O cálculo desses valores varia para cada variável de decisão, de tal forma que:

a) Material rodante:

$$(NT_{BM} + NT_{CR/SF})(140C_{VAG} + 2C_{LOCO})$$

onde C_{Vag} é o custo unitário de um vagão e C_{Loco} é o custo unitário de uma locomotiva;

b) Silos de carregamento:

$$\sum_{i=I}^{III} (N_{SILO(BM)}^i + N_{SILO(CR/SF)}^i)(C_{SILO}^i + 2,024C_{LAux})$$

onde C_{SILO}^i representa o custo unitário do silo tipo i e C_{LAux} é o custo por km de uma linha auxiliar.

c) Linhas auxiliares no carregamento:

$$(NL_{Aux(BM)} + NL_{Aux(CR/SF)})(2,024C_{LAux} + 2C_{AMV})$$

onde $N_{LAux(Mineradora)}$ é o número de linhas auxiliares no carregamento da mineradora e C_{AMV} diz respeito ao custo unitário de um aparelho de mudança de via (AMV).

d) Terminal de descarregamento:

$$(C_{REC} + C_{EMP})(B_{TERM} + 1)$$

onde C_{REC} é o custo unitário de uma recuperadora de minério, C_{EMP} representa o custo unitário de uma empilhadora de minério e B_{TERM} é uma variável binária que define se o terminal CR/SF existe (1) ou não (0). É importante frisar que a empilhadeira e a recuperadora de minério foram definidas como o valor do terminal de estoque de minério, uma vez que representam a porção mais significativa do investimento. O segundo termo $(B_{TERM} + 1)$ define se serão construídos 1 terminal (somente TUP BAMIN) ou 2 terminais (TUP BAMIN + TUP CR/SF).

e) Viradores de vagão:

$$\sum_{i=1}^H (N_{VV(BM)}^i + N_{VV(CR/SF)}^i)(C_{VV}^i + 2,024C_{LAux})$$

onde C_{VV}^i é o custo unitário de um virador de vagões do tipo i ;

f) Linhas no Terminal de Ilhéus:

$$(2,024C_{LAux} + 2C_{AMV})NL_{TI}$$

onde NL_{TI} é o número de linhas no Terminal de Ilhéus.

As equações 6.2 e 6.3 (baseadas na equação 5.1) representam a oferta mínima anual no porto para cada mineradora. Em seguida, as equações 6.4, 6.5 e 6.6 garantem que todos os trens sejam atendidos por pelo menos 1 silo em seus respectivos processos de carregamento (6.4 e 6.5) e por pelo menos 1 virador de vagões no descarregamento do terminal da BAMIN (6.6). Essa restrição não foi considerada para os viradores CR/SF em virtude da existência desses viradores estar condicionada à existência de um terminal CR/SF. Essa relação condicional foi resolvida por meio de uma variável binária interna da simulação que invalida o resultado do modelo quando as duas situações seguintes acontecem: a) há o terminal CR/SF, mas não existem viradores CR/SF e b) não há o terminal CR/SF, mas existe pelo menos um virador CR/SF. Por fim, para a definição da Equação 6.7,

deve-se considerar ainda a caracterização dos dados das variáveis de decisão manipuladas (contínuo, discreto ou binário), bem como os intervalos de variação dessas variáveis pelo OptQuest. A Tabela 8 apresenta essas informações.

Tabela 8 - Caracterização dos variáveis de decisão do modelo

Variável de decisão	Mineradora	Tipo	Intervalo de Variação
Número de Silos Tipo I	BAMIN	Discreto	Entre 0 e 2
	CR/SF		
Número de Silos Tipo II	BAMIN		
	CR/SF		
Número de Silos Tipo III	BAMIN		
	CR/SF		
Número de Viradores de Vagão Tipo I	BAMIN		
	CR/SF		
Número de Viradores de Vagão Tipo II	BAMIN		
	CR/SF		
Número de Trens	BAMIN	Entre 6 e 9	
	CR/SF	Entre 8 e 12	
Número de Linhas Auxiliares Carregamento	BAMIN	Entre 2 e 5	
	CR/SF		
Número de Linhas no TI	-	Entre 4 e 7	
Terminal CR/SF	-	Binário	0 ou 1

Neste ponto, é importante mencionar que o número de soluções viáveis é de 37.791.360, dado pelas possíveis combinações entre os valores contidos nos intervalos de variação de cada variável de decisão. Em função da quantidade de soluções a serem testadas (simuladas) ser bastante considerável, o emprego desta análise de otimização é justificado.

Definidos o modelo, com função objetivo e restrições, a caracterização dos dados a serem testados e os intervalos de variação, deve-se configurar a execução, estabelecendo-se um critério de parada das iterações (simulações) conduzidas pelo OptQuest. Uma alternativa possível é verificar se existem diferenças significativas (dado por um nível de tolerância arbitrado) entre os resultados da função objetivo após uma quantidade sucessiva de iterações pré-determinada. Contudo, nesse estudo foi definido um número fixo e suficientemente grande de iterações (2.000), com o objetivo de avaliar o desempenho do processo de busca pelas combinações que geram melhores resultados. A existência de um critério de parada em meta-heurísticas se justifica pelo fato de que, apesar de ser realizada uma busca

sistemática ao longo de sucessivas iterações, não há garantia de obtenção de um valor ótimo da função objetivo (HILLIER; LIEBERMAN, 2010). Logo, o critério de parada determina um limite para a execução do programa, que rodaria indefinidamente se esse critério não existisse.

6.4.3 Resultados da otimização

O modelo foi executado em uma CPU Intel Core i5, com capacidade de processamento de 3,2GHz, memória RAM de 4,0 GB e um sistema operacional de 64 bits. O gráfico da Figura 63 registra a evolução do melhor valor encontrado da função objetivo ao longo das iterações realizadas. A solução inicial foi definida como 1 silo BM tipo I, 1 silo CR/SF tipo II, 3 linhas auxiliares para ambos carregamentos, 4 linhas no TI, existe terminal de descarregamento CR/SF, 1 virador de vagões BM, 1 virador de vagões CR/SF 6 trens BM e 9 trens CR/SF.

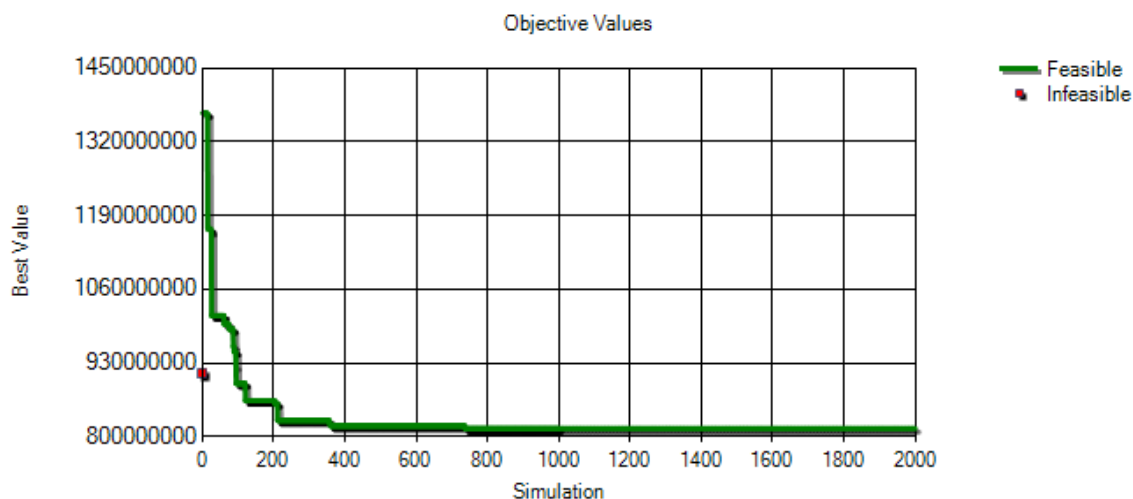


Figura 63 - Evolução do valor da função objetivo ao longo das iterações

O método de busca pelo valor ótimo ao longo de 2.000 iterações foi processado durante 288 minutos, aproximadamente. Nota-se que logo após a 737ª simulação, a meta-heurística não consegue promover alterações nas variáveis de forma a encontrar melhores valores da função objetivo. Dessa forma, o melhor valor encontrado foi de um investimento total de R\$814.268.000,00 nos componentes de infraestrutura descritos. Esse resultado foi alcançado com os seguintes valores das variáveis de decisão em cada macroprocesso:

- a) Carregamento: 1 silo tipo I para BAMIN, com duas linhas auxiliares, e 2 silos tipo I para CR/SF, também com duas linhas auxiliares;

- b) Descarregamento: utilização somente do TUP BAMIN para todas as mineradoras, com um virador de vagões duplo e somente 4 linhas no Terminal de Ilhéus que antecede a região *onshore* do porto;
- c) Dimensionamento da frota: atingiu-se o melhor valor com 7 trens BAMIN e 9 trens CR/SF.

Vale salientar que todas as restrições foram atendidas, especialmente às de oferta mínima de minério no porto com cerca 21,8 MTPA para BAMIN e 36,2 MTPA para CR/SF.

Analisando-se os resultados fornecidos pelo programa, foi possível verificar uma limitação no método de busca, quando da definição de 2 silos tipo I para o carregamento CR/SF. De fato, com uma simples substituição desses 2 silos tipo I por 1 silo tipo II é possível alcançar um menor valor de investimento (R\$784.420.000,00), atendendo-se às restrições operacionais e de oferta das mineradoras (21,8 MTPA, BAMIN, e 36,8 MTPA, CR/SF). Analisando-se o relatório final da otimização no OptQuest, confirmou-se que essa solução não foi encontrada mesmo depois de muitas iterações (1263, da 737^a até a 2.000^a). Em razão dessa modificação na solução envolver uma permutação simples na variável de decisão, uma possível hipótese é de que a heurística do método de melhoria de soluções do *Scatter Search* tenha uma estratégia de intensificação ineficaz para o problema em estudo. É importante reiterar que o método de melhoria de soluções não é um componente obrigatório na implementação de um algoritmo *Scatter Search* (MARTÍ; LAGUNA; GLOVER, 2006), sendo um outro possível motivo para a solução sugerida não ter sido encontrada. Infelizmente, por razões comerciais, não é possível identificar as estratégias de diversificação, intensificação, bem como as heurísticas utilizadas no algoritmo da meta-heurística *Scatter Search* empregada pelo OptQuest.

Promovendo-se um novo ciclo de processamento no modelo com a sugestão de solução inicial dada pela solução modificada, foi possível observar que o método não promove melhorias, sendo um possível indício de ótimo local encontrado. Na Figura 64, é possível observar que mesmo após 2.000 iterações não existem melhorias na função objetivo.

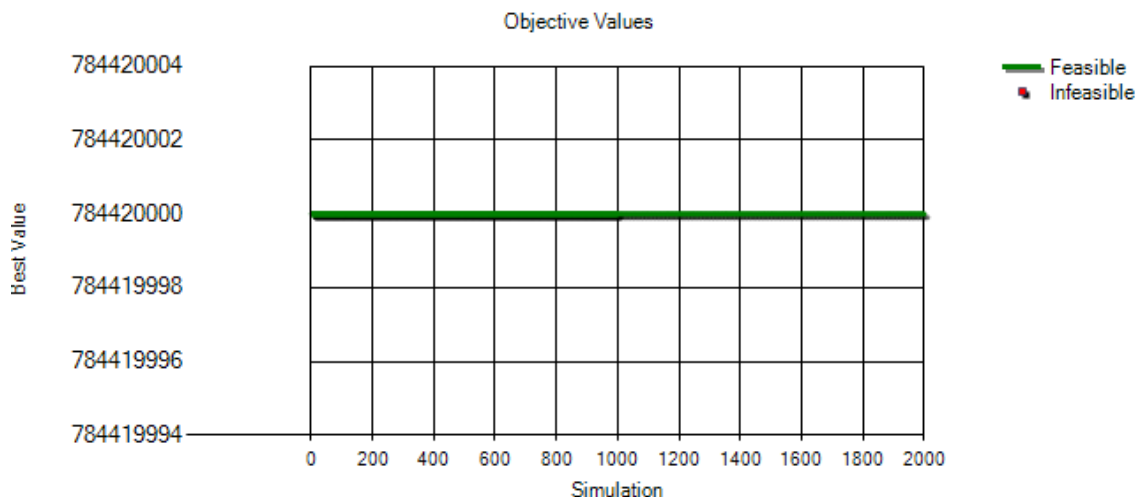


Figura 64 - Nova execução da simulação com solução inicial modificada

Intuitivamente, além da evidência da estabilidade gráfica, pode-se inferir que a solução encontrada é, com grande probabilidade, ótima dentro do escopo de variáveis testadas. À exceção da escolha do silo tipo II para o carregamento CR/SF, do virador de vagões duplo no TUP BAMIN e do dimensionamento da frota (que ficou um valor acima do mínimo para ambas mineradoras – 7 e 9 trens para BAMIN e CR/SF, respectivamente), as demais variáveis foram definidas como as opções menos custosas para o cômputo do investimento total. De fato: a) o silo BAMIN foi definido como tipo I (mais barato); b) não foi necessário um terminal de carregamento à parte para os trens CR/SF (e logo, não foram necessários viradores de vagão nesse terminal); c) as linhas auxiliares para carregamento e as linhas no TI foram definidas como as mínimas necessárias (2 para o carregamento de ambas mineradoras e 4 linhas no TI).

Considerando-se possíveis imprecisões de modelagem, é interessante realizar uma análise de sensibilidade em alguns parâmetros do modelo de otimização. Nesse caso, testou-se a resolução do problema incrementando a oferta mínima de minério no porto O_k de cada mineradora k em 5%, 10% e 20%. Na Tabela 9, estão apresentados os resultados relativos a cada variável de decisão, às variáveis de saída da simulação, ao valor da função objetivo (FO) e à iteração na qual o melhor valor foi encontrado.

Tabela 9 - Resultados da otimização com incrementos de 5%, 10% e 20% dos O_k de cada mineradora

		Incremento em O_k		
		5%	10%	20%
x_i^*	$N_{SILO(BM)}^I$	1	1	1
	$N_{SILO(BM)}^{II}$	0	0	0
	$N_{SILO(BM)}^{III}$	0	0	0
	$N_{SILO(CR/SF)}^I$	0	0	0
	$N_{SILO(CR/SF)}^{II}$	1	1	1
	$N_{SILO(CR/SF)}^{III}$	0	0	0
	$N_{VV(BM)}^I$	0	0	0
	$N_{VV(BM)}^{II}$	1	2	2
	$N_{VV(CR/SF)}^I$	0	0	0
	$N_{VV(CR/SF)}^{II}$	0	0	0
	NT_{BM}	7	7	8
	$NT_{CR/SF}$	9	10	11
	B_{TERM}	0	0	0
	$NL_{Aux(BM)}$	2	2	2
	$NL_{Aux(CR/SF)}$	2	2	2
NL_{TI}	4	4	4	
y_j	\overline{TC}_{BM} (h)	43,74	42,83	44,27
	$\overline{TC}_{CR/SF}$ (h)	33,31	33,04	34,87
	$\overline{MF}_{Ano(BM)}$ (t)	21.785.844	22.248.723	24.600.027
	$\overline{MF}_{Ano(CR/SF)}$ (t)	36.780.955	41.201.695	42.943.344
Valor da FO		R\$784.420.000,00	R\$897.858.000,00	R\$ 958.638.000,00
Iteração do melhor valor da FO		808	874	863

Conforme previsto nas análises preliminares, em todos os casos, a solução encontrada promove ajustes essenciais nos gargalos do processo (carregamento e descarregamento), permitindo que os objetivos comerciais dos prováveis usuários da FIOI sejam atingidos. Percebe-se que a solução modificada (permutação de 2 silos tipo 1 por 1 silo tipo 2 no terminal de carregamento CR/SF na solução fornecida) foi encontrada para o caso da variação de 5% na oferta mínima de minério. Nessa circunstância, o resultado do modelo resolvido anteriormente (com 2 silos tipo 1 no terminal CR/SF) não produziria uma solução viável para um aumento da oferta de 5%, uma vez que $\overline{MF}_{Ano(CR/SF)}$ é igual a 36,2 MTPA (menor que o mínimo de 36,75 MTPA para o caso de um acréscimo de 5% em $O_{CR/SF}$). Outro ponto importante é que à medida em que exigência de oferta mínima aumenta, as soluções encontradas tendem a favorecer um aumento do número de trens, em detrimento de outras possíveis alterações. Isso pode ser justificado pelo fato de que ter uma frota maior é

mais barato do que boa parte das melhorias nos processos de carga e descarga. Também é possível identificar a escolha de 2 viradores de vagão duplo na transição de 5% para 10% de incremento de cada o_k , muito provavelmente para obter um melhor processo de descarregamento com o aumento do número de trens descarregamento. Por fim, nota-se também que o número de linhas auxiliares no carregamento e no Terminal de Ilhéus (combinadas ou não a outras variáveis) são sempre escolhidas nos seus valores mínimos, ou seja, não são significativas para promover melhores resultados da função objetivo.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nas últimas duas décadas, o Brasil presenciou uma forte retomada do planejamento logístico em torno do modal ferroviário. Por meio das privatizações nos anos 1990 e das novas ferrovias sendo implementadas pelo Governo Federal, almeja-se aumentar a participação do modal ferroviário em relação ao rodoviário na matriz de transportes nacional, uma formulação mais competitiva para um país de dimensões continentais. Conforme evidenciado nesse texto, não só vantagens econômicas podem ser auferidas nesse processo de transição, mas também benefícios sob a ótica ambiental e social. Nesse sentido, este trabalho propôs uma análise em um futuro corredor logístico ferroviário, com função principal de escoamento de *commodities* minerais e agrícolas a ser implantado nos estados do Tocantins e Bahia: a Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL). Esse estudo se justificou em função das alterações no cenário em que esse empreendimento foi planejado que criaram dificuldades para o seu estabelecimento em um futuro próximo. Pode-se destacar a queda vertiginosa dos preços do principal componente da receita operacional da FIOL: o minério de ferro, quase 70% menor em relação à época em que os estudos de viabilidade foram conduzidos. Também é possível evidenciar os entraves orçamentários decorrentes de uma política fiscal mais restritiva iniciada em 2015, causando sucessivas paralisações e modificações em projetos de infraestrutura sob responsabilidade federal, especialmente a FIOL.

As principais consequências desse estado de coisas foi a mudança no conjunto de mineradoras interessadas em utilizar a capacidade dessa ferrovia (saída da GERDAU e possível entrada de Cabral Resources e Santa Fé Mineração) e das reduções na infraestrutura do projeto original, na tentativa de manter o projeto viável. Nesse cenário configuram-se muitas incertezas para a futura operação que ainda não foram avaliadas, mais especificamente no que concerne a capacidade de movimentação de cargas.

Dessa forma, uma análise de Modelagem, Simulação e Otimização foi empregada visando representar satisfatoriamente o futuro transporte de cargas na FIOL, permitindo, *a posteriori*, desenvolver soluções para esses possíveis entraves. Para tanto, foram definidos 3 macroprocessos principais: circulação de trens na FIOL, carregamento e descarregamento de trens. O modelo foi validado de acordo com critérios objetivos, por meio de comparação dos movimentos resultantes das

regras de tráfego e dos valores obtidos nas simulações em relação à expectativa do funcionamento do processo real descritos nos estudos operacionais sobre o sistema. A partir dessa modelagem, foi possível investigar os gargalos da operação, levantar soluções e, finalmente, fornecer um desenho ótimo (ou subótimo) de infraestrutura, baseado no investimento mínimo necessário para se atender as ofertas planejadas das mineradoras. Diante dos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes ponderações:

- Os experimentos variando quantidade de trens na malha evidenciam problemas de capacidade com o projeto de infraestrutura atual. Por meio de uma investigação das filas, estratificadas por causa, foi possível identificar os macroprocessos de carregamento e descarregamento como principais gargalos do processo de movimentação de cargas, aumentando consideravelmente o tempo de ciclo dos trens de minério de ferro. Especialmente, a redução do terminal ferroviário na região *onshore* do Porto Sul ao TUP da BAMIN e a escolha de um virador de vagões simples inviabilizaria a operação, com um aumento expressivo do tempo de ciclo dos trens de todas as mineradoras envolvidas;
- Propostas de solução empregadas de forma isolada nos gargalos do processo (somente carregamento ou descarregamento) tendem a gerar resultados inócuos (ou até deletérios) na logística de transporte, em função da transferência de filas dentro do sistema. Esse resultado, denominado *knock-on effect*, é bastante característico de sistemas funcionando em circuito fechado, demandando ações que promovam melhorias de forma coordenada no processo;
- As melhorias no macroprocesso de circulação de trens não produzem efeitos significativos nos tempos de ciclos dos trens, corroborando com o fato de que carregamento e descarregamento são realmente os gargalos do sistema. Todavia, em um futuro cenário operacional com maior quantidade de trens circulando na malha, essas intervenções podem se tornar muito mais significativas. De fato, atingiu-se uma redução da ordem de 50% no valor do tempo de ciclo dos trens BAMIN em uma situação de duplicação completa entre os pátios P34 e o Terminal de Ilhéus, considerando-se mais trens trafegando na malha em relação às simulações estabelecidas até então (10

BAMIN e 15 CR/SF, comparados com 6 BAMIN e 8 CR/SF, caso da melhor configuração do sistema sem melhorias);

- A otimização apresentou-se como uma abordagem eficaz para a implementação de melhorias de forma coordenada no sistema, abrangendo possíveis fatores críticos para o desempenho logístico na FIOI. Foi possível encontrar, por meio da meta-heurística *Scatter Search*, soluções com menores aportes de investimento, respeitando restrições operacionais e de oferta mínima de cada mineradora;
- Destaca-se a importância de se analisar criticamente os resultados fornecidos pela otimização. Esse processo é particularmente importante nesse caso, porque não existe garantia de determinação da solução ótima através de métodos meta-heurísticos. De fato, a qualidade da solução final depende do escopo do problema modelado, da qualidade da solução inicial fornecida e das estratégias de diversificação e intensificação utilizadas. Foi possível observar, por exemplo, que uma pequena modificação na solução final fornecida pelo OptQuest (após 1200 iterações sem melhorias) gerou um melhor valor da função objetivo, sem comprometimento de qualquer restrição do modelo. Esse resultado atesta a importância de uma visão crítica sobre os resultados produzidos na resolução do problema, principalmente quando não é possível identificar as estratégias de busca promovidas pelo método em questão (*Scatter Search*);

Apesar de resultados relevantes, o estudo possui algumas limitações que merecem ser melhor endereçadas em trabalhos futuros. Vale salientar um levantamento mais minucioso da situação atual do mercado agrícola e de produtos industrializados (contêineres) nas regiões influenciadas pela FIOI e no intercâmbio de cargas com outros eixos logísticos que a interceptam (FNS, Hidrovia do São Francisco e FCA, por exemplo). Com essas informações, avaliar os obstáculos para os possíveis operadores estabelecerem suas ofertas em uma situação de capacidade ferroviária restrita, agregando novos fatores às análises de desenho ótimo de infraestrutura. Essa é uma análise particularmente importante no contexto regulatório ferroviário atual, tendo em vista a perspectiva de um modelo de concessão mais competitivo, com o *open access* e a separação das funções de infraestrutura da operação ferroviária na FIOI. Diferentemente dos modelos de

concessão verticalizados que foram empregados até então, qualquer empresa poderá pleitear o uso da ferrovia, caso haja folga de capacidade para realizar suas operações.

Em relação à modelagem desenvolvida, com o aumento do tráfego no sistema, novas flexibilidades deverão ser inseridas no modelo como a consideração de desvios para cruzamento e pátios de triagem (classificação e formação de trens), além da própria duplicação já contemplada nesta análise. Pode-se mencionar também a necessidade de formulação própria dos métodos para resolução do problema de otimização que permitam a comparação com os resultados fornecidos pelos *softwares* disponíveis. Dessa forma, será possível investigar qual a melhor configuração das estratégias de busca em função do tempo de convergência para respostas de qualidade.

Ainda no tocante à análise de otimização, deve-se considerar também uma modelagem econômico-financeira mais completa e robusta. Isso significa contemplar não só os dispêndios com investimentos (CAPEX), como também custos operacionais (OPEX) e as receitas do negócio. Consequentemente, com um custo de capital e horizonte de planejamento característicos desse tipo de projeto de infraestrutura, a função objetivo seria representada por um valor presente líquido a ser maximizado. Levando-se em consideração, por exemplo, custos com combustíveis nesse fluxo de caixa (maior componente de custos de uma ferrovia), o método poderia tender a outros tipos de solução que não o aumento do número de trens, caso observado com a elevação da oferta mínima no modelo (de 5%, 10% e 20%).

Por fim, espera-se contribuir de forma ainda mais significativa para a logística ferroviária de cargas que se apresenta como grande potencializador da competitividade brasileira tanto no mercado interno e quanto no cenário global.

8 REFERÊNCIAS

ABRIL, M. et al. An assessment of railway capacity. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 44, n. 5, p. 774–806, set. 2008.

AFONSO, P. A.; BISPO, C. F. Railway Traffic Management : Meet and Pass Problem. **Journal of System and Management Science**, v. 1, n. 6, p. 1–26, 2011.

AHUJA, R.; CUNHA, C.; SAHIN, G. Network models in railroad planning and scheduling. **TutORials in operations research**, 2005. Disponível em: <http://f3.tiera.ru/2/M_Mathematics/MOc_Optimization and control/Smith J>. Acesso em: 29 jul. 2015

ALTIOK, T.; MELAMED, B. **Simulation Modeling and Analysis with Arena**. London: Academic Press (Elsevier), 2010.

ANDREONI, A. **The Industrial Competitiveness of Nations - Looking back, forging ahead**. Vienna: UNIDO, 2013.

ANTAQ. **Relatório Executivo - Bacia do São Francisco**. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH/BaciaSaoFrancisco.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

ANTT. **Produtos Transportados nas Ferrovias Brasileiras**. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4971/Caracteristicas.html>>. Acesso em: 25 abr. 2015a.

ANTT. **MAPA FCA - Ferrovia Centro Atlântica S.A.**, 2015b. Disponível em: <http://appweb2.antt.gov.br/concessaofer/fca/mapa_fca.asp>

ARNT, R. **O que os economistas pensam sobre sustentabilidade**. São Paulo: Editora 34, 2010.

ARVIS, J.-F. et al. **Connecting to compete**. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/Trade/LPI2014.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2015.

AZEVEDO NETO, V. DE. Portos e ferrovias: projeções para o III milênio. **Revista Politécnica**, v. 2, p. 8–14, 2006.

BAHIA. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Porto Sul - Tomo 1 Caracterização do Empreendimento**. Salvador, 2011.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BANKS, J. (ED.). **Handbook of Simulation**. 1^a. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

BARRENA, E. et al. Exact formulations and algorithm for the train timetabling problem with dynamic demand. **Computers & Operations Research**, v. 44, p. 66–74, abr. 2014.

BONNETT, C. F. **Practical Railway Engineering**. 2nd Editio ed.London: Imperial College Press, 2005.

BRASIL. **EF-334 - Volume I - Estudo Operacional da Ferrovia de Integração Oeste Leste - EF-334**. Disponível em:

<<http://www.valec.gov.br/FerroviasEstudos.php>>. Acesso em: 14 maio. 2015.

BRASIL. **Programa de Investimentos em Logística**. Disponível em: <<http://www.logisticabrasil.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio. 2015a.

BRASIL. **Plano Nacional de Logística de Transportes**. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/56-acoes-e-programas/2815-conheca-o-pnlt.html>>. Acesso em: 25 mar. 2015b.

BRASIL. **Exportação brasileira por fator agregado: 1964 a 2013**. Disponível em:

<<http://www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=5&menu=1161&refr=5031>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

BRASIL. **Balança Comercial Brasileira - Dados Consolidados**. Disponível em:

<<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=5&menu=567>>. Acesso em: 14 jun. 2015.

BRASIL. **EF-334 - Ferrovia de Integração Oeste Leste**, 2015. Disponível em: <http://www.valec.gov.br/acoes_programas/FerrovialIntegracaoOesteLeste.php>

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 2**. 2^a Edição ed.Belo Horizonte: Editora UFMG, 1988.

CAIMI, G. et al. A model predictive control approach for discrete-time rescheduling in complex central railway station areas. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 11, p. 2578–2593, nov. 2012.

CAMARGO, P.V. **Análise de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas através de uma abordagem integrada simulação-otimização**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CHA, M. H.; MUN, D. Discrete event simulation of Maglev transport considering traffic waves. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 1, n. 4, p. 233–242, out. 2014.

CHAHAR, K.; CHENG, C.; PRANOTO, Y. **Strategic crew planning tool in railroad: A discrete event simulation**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). **Anais...IEEE**, dez. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6148062>>. Acesso em: 29 jul. 2015

CHANDRA, S.; AGARWAL, M. M. **Railway engineering**. 1st Editio ed. New Delhi: Oxford University Press, 2007. v. 1

CHENG, Y. Hybrid simulation for resolving resource conflicts in train traffic rescheduling. **Computers in Industry**, v. 35, n. 3, p. 233–246, abr. 1998.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos - Teoria e Aplicações**. São Paulo: Bravarte, 2006.

CNT. **Transporte e Economia - O Sistema Ferroviário Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Transporte-e-Economia.aspx>>. Acesso em: 10 maio. 2015.

CNT. **Plano CNT de Transporte e Logística**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Plano-CNT-de-Logística.aspx>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

CNT. **Boletim Estatístico - Março 2015**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins_Detalhes.aspx?b=3>. Acesso em: 10 maio. 2015.

CONAB. **Série Histórica da Safra de Soja (Bahia)**, 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>

CONFESSORE, G. et al. **A simulation-based approach for estimating the commercial capacity of railways**. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC). **Anais...IEEE**, dez. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5429664>>. Acesso em: 29 jul. 2015

CORMAN, F. et al. Evaluation of green wave policy in real-time railway traffic management. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 17, n. 6, p. 607–616, dez. 2009.

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

CUDDINGTON, J. T.; JERRETT, D. Super cycles in real metals prices? **IMF Staff Papers**, p. 541–565, 2008.

DESSOUKY, M. M.; LEACHMAN, R. C. **Using simulation modeling to assess rail track infrastructure in densely trafficked metropolitan areas**. Proceedings of the Winter Simulation Conference. **Anais...IEEE**, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1172953>>. Acesso em: 29 jul. 2015

DOTOLI, M. et al. **A periodic event scheduling approach for offline timetable optimization of regional railways**. 2013 10th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL (ICNSC). **Anais...IEEE**, abr. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6548849>>. Acesso em: 29 jul. 2015

FDC. **Brasil perde três posições no ranking mundial de competitividade do IMD 2014**, 2014. Disponível em: <http://www.fdc.org.br/blogespacodialogo/Documents/indice_competitividade_mundial2014.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2015

FERNANDES, R. C. **Carga Extra na Indústria Brasileira, Parte 2: Custos com Logística**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/carga-extra-na-industria-brasileira-parte-2-custos-com-logistica/>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

FIORONI, M.M. **Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: Avaliação de alternativas para o direcionamento de composições**. 2008. 216 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. Florianópolis: Visual Books, 2001.

GLOVER, F. **A Template for Scatter Search and Path Relinking**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998. v. 1363

GUALCHALA, W.F. **Avaliação dos reflexos da operação do virador de vagões em produção e na fila de trens para descarga de produtos**. 2012. 101 f.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

GUTTKUHN, R.; DAWSON, T.; TRUTSCHEL, U. **A discrete event simulation for the crew assignment process in North American freight railroads.**

Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.03EX693). **Anais...IEEE**, 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1261620>>. Acesso em: 29 jul. 2015

HARROD, S.; SCHLECHTE, T. A direct comparison of physical block occupancy versus timed block occupancy in train timetabling formulations. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 54, p. 50–66, ago. 2013.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: McGraw Hill, 2010.

HONGSHENG, S.; JING, C.; SHIMING, H. Simulation System Engineering for Train Operation Based on Cellular Automaton. **Systems Engineering Procedia**, v. 3, p. 13–21, 2012.

HUMPHREYS, D. Comment: Unravelling the causes of the mineral price boom. **Resources Policy**, v. 34, n. 3, p. 103–104, 2009.

HUMPHREYS, D. The great metals boom: A retrospective. **Resources Policy**, v. 35, n. 1, p. 1–13, 2010.

ILOS. **Panorama ILOS - Custos Logísticos no Brasil**. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/ilos_2014/wp-content/uploads/PANORAMAS/PANORAMA_brochura_custos.pdf>. Acesso em: 25 set. 2015.

INDEX MUNDI. **Iron Ore Monthly Price - US Dollars per Dry Metric Ton**, 2015. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore&months=180>>

JORNAL INOVAÇÃO - UNICAMP. **Papel da Embrapa é coordenar sistema de pesquisa agropecuária; sozinha não gera todo conhecimento necessário, diz presidente**, 2006. Disponível em:

<<http://www.inova.unicamp.br/inovacao/report/entre-crestana.shtml>>

KANACILO, E.; VERBRAECK, A. **Simulation Services to Support the Control Design of Rail Infrastructures**. Proceedings of the 2006 Winter Simulation

Conference. **Anais...IEEE**, dez. 2006. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4117761>>. Acesso em: 29 jul. 2015

KHALED, A. A. et al. Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 71, p. 71–84, jan. 2015.

KRUEGER, H. **Parametric modeling in rail capacity planning**. WSC'99. 1999 Winter Simulation Conference Proceedings. "Simulation - A Bridge to the Future". **Anais...IEEE**, 1999. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=816840>>. Acesso em: 11 maio. 2015

KRUEGER, H. et al. **Simulation within the railroad environment**. 2000 Winter Simulation Conference Proceedings. **Anais...IEEE**, 2000. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=899085>>. Acesso em: 29 jul. 2015

LIN, E.; CHENG, C. **YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S.** Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC). **Anais...IEEE**, dez. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5429654>>. Acesso em: 29 jul. 2015

LIN, E.; CHENG, C. **Simulation and analysis of railroad hump yards in North America**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). **Anais...IEEE**, dez. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6148064>>. Acesso em: 29 jul. 2015

MARINOV, M. et al. Railway operations, time-tabling and control. **Research in Transportation Economics**, v. 41, n. 1, p. 59–75, maio 2013.

MARINOV, M.; VIEGAS, J. A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 19, n. 1, p. 516–539, jan. 2011.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. Principles of scatter search. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 2, p. 359–372, mar. 2006.

MEDANIC, J.; DORFMAN, M. J. Efficient Scheduling of Traffic on a Railway Line. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 115, n. 3, p. 587–602, 2011.

MEIRELES, R.P.L. **Modelagem e simulação de malha ferroviária em circuito fechado na Estrada de Ferro Vitória a Minas**. 2010. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

MENG, L.; ZHOU, X. Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: A scenario-based rolling horizon solution approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 7, p. 1080–1102, ago. 2011.

MIDDELKOOP, D.; BOUWMAN, M. **Simone: Large scale train network simulations**. Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference. **Anais...IEEE**, 2001. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=977412>>. Acesso em: 29 jul. 2015

MITRA, S.; TOLLIVER, D.; MITRA, S. Estimation of Railroad Capacity Using Parametric Methods. **Journal of the Transportation Research Forum**, v. 49, n. 2, p. 111–126, 2010.

MOTRAGHI, A.; MARINOV, M. V. Analysis of urban freight by rail using event based simulation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 25, p. 73–89, jun. 2012.

NG, J. Goldman Calls End to Iron Age After “Dramatic” Drop in Ore Price. **Bloomberg Business**, 2014.

NG, J. Goldman Sees Many Iron Mine Closures as ABN Flags \$40 Risk. **Bloomberg Business**, 2015.

OIKOS. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) das Obras de Implantação da Ferrovia de Integração Oeste Leste (EF334) entre Figueirópolis (TO) e Ilhéus (BA)**. Disponível em:
<http://www.oikos.com.br/site_ok/adobados/EIA_RIMA_FIOL/88FOL_2009_11_27_VOL1/88FOL_2009_11_EIA_VOL1_V11.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2015.

OIKOS. **Ferrovia de Integração Oeste Leste - Alternativas Locacionais Avaliadas no Trecho Brumado--Ilhéus**. Disponível em:
<<http://www.valec.gov.br/download/GEPROG/EVTEA/2008-2010/EVTE-FIOL->

Ilheus_Figueiropolis/FIOLAbril2010/EstudosdeAlternativasLocacionaisAvaliadasnoTr
echoBrumadolIlheus.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2015.

PRADO, D. S. DO. **Usando Arena em Simulação**. Belo Horizonte: Falconi, 2010.

RADETZKI, M. et al. The boom in mineral markets: How long might it last? **Resources Policy**, v. 33, n. 3, p. 125–128, 2008.

SAJEDINEJAD, A. et al. **SIMARAIL: Simulation based optimization software for scheduling railway network**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC). **Anais...IEEE**, dez. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=6148066>>. Acesso em: 29 jul. 2015

SCHWAB, K.; OTHERS. **The global competitiveness report 2013-2014**. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalCompetitivenessReport_2014-15.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2015.

SHEIKH, A. EL; AJEELI, A. T. AL; ABU-TAIEH, E. M. **Simulation and Modeling: Current Technologies and Applications**. 1^a. ed. New York: IGI Publishing, 2008.

SOGIN, S.; BARKAN, C. P. L.; SAAT, M. R. Simulating the effects of higher speed passenger trains in single track freight networks. p. 3684–3692, 11 dez. 2011.

SOKOLOWSKI, J. A. .; BANKS, C. M. **Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach**. 1^a. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2009.

SYED, S.; EASA, S. **Development of simulation model for evaluating operational performance of railroad networks**. Proc., Canadian Society for Civil Engineering - General Conference. **Anais...14 jun. 2011**. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/274253669_Development_of_simulation_model_for_evaluating_operational_performance_of_railroad_networks>. Acesso em: 29 jul. 2015

TELLES, P. C. S. **História da Engenharia Ferroviária no Brasil**. Barueri: Notícia & Cia, 2011.

WILSON, J. D. Chinese resource security policies and the restructuring of the Asia-Pacific iron ore market. **Resources Policy**, v. 37, n. 3, p. 331–339, 2012.

WORLD BANK. **Gross Domestic Product**. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>>. Acesso em: 12 set. 2015.