Campus de São Carlos

*MODELO PARA ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE TRECHOS
FERROVIÁRIOS EM LINHA SINGELA*

JORGE ANTONIO CURY SAAD

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

MODELO PARA ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE TRECHOS FERROVIÁRIOS EM LINHA SINGELA

JORGE ANTONIO CURY SAAD

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Transportes.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti

São Carlos
1999

Class.	TESE-EEYC
Cutt.	5038
Tombo	0150/99

SYS 1048622

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S111m Saad, Jorge Antonio Cury
Modelo para análise da operação de trechos
ferroviários em linha singela / Jorge Antonio Cury
Saad. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti.

1. Linhas singelas. 2. Operação ferroviária.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **JORGE ANTONIO CURY SAAD**

Dissertação defendida e aprovada em 13-08-1999
pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado **JOSE REYNALDO ANSELMO SETTI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Titular **JOÃO ALEXANDRE WIDMER**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **TELMO GIOLITO PORTO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Prof. Associado **ANTÔNIO NELSON R. DA SILVA**
Coordenador da Área de Transportes

Prof. Associado **RENATO VAIRO BELHOT**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC
em exercício

À minha esposa e filhas,
razão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pela educação, exemplo e apoio.

Ao Prof. Dr. José Reynaldo Anselmo Setti, pela orientação, estímulo e confiança depositada na realização desta dissertação.

Ao Eng. João Gouveia Ferrão Neto, superior e amigo, idealizador e responsável pela viabilização deste trabalho, possibilitando, perante a empresa, a liberação para cursar as disciplinas, incentivando e opinando na realização da dissertação.

Ao Eng. Walter Napoleão Mattar, pelo incentivo e autorização para cursar as disciplinas.

Ao Sr. Braz Francisco de Araujo, pela ajuda na coleta dos dados dos trens.

Aos Professores do Departamento de Transportes, pela compreensão, orientação e ajuda em função das dificuldades que enfrentei.

Ao Prof. Dr. Antonio Nelson Rodrigues da Silva, coordenador do curso, pela compreensão, auxílio e viabilização dos cumprimentos das etapas legais.

Aos Profs. Drs. Eiji Kawamoto e João Alexandre Widmer, pelo estímulo e auxílio.

A Sra. Heloisa Helena Morgado Belo, pela orientação e auxílio nas atividades acadêmicas.

Aos colegas de mestrado, pela ajuda e estímulo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Aspectos Gerais	03
1.2. Objetivos.....	10
1.3. Estrutura da Dissertação	11
2. MODELOS	13
2.1. Modelos Analíticos	13
2.2. Modelos de Simulação	15
2.3. Modelos de Otimização.....	18
2.4. Modelos para determinação das capacidades máximas e práticas.....	19
2.5. Objetivos e premissas dos modelos existentes	22
2.6. Conclusões sobre os modelos existentes.....	29
3. MÉTODO PROPOSTO	30
3.1. Porque simulação	31
3.2. O Simulador	34

3.3. Variáveis envolvidas	48
3.4. Medidas de Desempenho	52
3.5. Coleta de dados	53
3.6. Teste e Validação do Modelo	59
4. ROTEIRO DA SIMULAÇÃO.....	64
4.1. Cenários a serem simulados.....	65
4.2. Medidas de desempenho	70
4.3. Cálculo do número máximo teórico de trens em cada trecho	71
4.4. Horários dos trens	73
5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	77
5.1. Cenário 1: influência dos horários de partida dos trens.....	77
5.2. Cenário 2: com todas as estações abertas, aumentando-se a velocidade e os tempos de paradas dos trens nas estações.....	79
5.3. Cenário 3: com três estações fechadas, aumentando-se a velocidade e os tempos de paradas dos trens nas estações.....	82
5.4. Cenário 4: com quatro estações fechadas, aumentando-se a velocidade e os tempos de paradas dos trens nas estações	84
5.5. Cenário 5: com todas as estações abertas, com o número máximo de trens e retirando-se dois trens.....	87
5.6. Cenário 6: com três estações fechadas e alternando-se as estações fechadas.....	88
5.7. Cenário 7: circular o número máximo de trens, variando-se o número de estações abertas.....	90

6- CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES.....	93
6.1. Conclusões	93
6.2. Recomendações para estudos futuros	95
ANEXOS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
GLOSSÁRIO	113
APÊNDICE	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Encontro de trens circulando em sentidos opostos (cruzamento).....	05
Figura 1.2: Resolução do encontro de trens (cruzamento).....	06
Figura 1.3: Encontro de trens circulando em um mesmo sentido(ultrapassagem).....	07
Figura 1.4: Resolução do encontro de trens (ultrapassagem).....	07
Figura 3.1: Esquema dos componentes do trecho simulado	35
Figura 3.2: Esquema das estações.....	39
Figura 3.3: Fluxograma do Simulador.....	43
Figura 3.4: Mapa com a localização do trecho simulado	54
Figura 3.5: Distribuição acumulada de tempos de percursos – trecho RJ-TL - sentido importação.....	57
Figura 3.6: Histograma dos tempos de percursos – trecho RJ-TL – sentido importação.....	57
Figura 3.7: Gráfico espaço x tempo dos trens reais que circularam no dia 3.....	62
Figura 3.8: Gráfico espaço x tempo dos trens gerados pelo simulador, para o dia 3.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados de entrada do Simulador.....	51
Tabela 3.2 – Características do trecho simulado.....	53
Tabela 3.3: Distribuição de frequência dos tempos de percursos entre estações, com todas as estações abertas, para trens no sentido importação.....	56
Tabela 3.4: Distribuição de frequência dos tempos de percursos entre estações, com todas as estações abertas, para trens no sentido exportação.....	58
Tabela 3.5: Horários dos trens reais e dos gerados pelo simulador.....	60
Tabela 4.1: Modas dos tempos de percursos.....	71
Tabela 4.2: Horários de partidas dos trens para o trecho com todas as estações abertas e 10 trens por sentido.....	74
Tabela 4.3: Horários de partidas dos trens para o trecho com todas as estações abertas e 8 trens por sentido.....	75
Tabela 4.4: Horários de partidas dos trens para o trecho com três estações fechadas e 6 trens por sentido.....	75
Tabela 4.5: Horários de partidas dos trens para o trecho com quatro estações fechadas e 5 trens por sentido.....	76
Tabela 5.1: Influência dos horários de partida nos desempenhos dos trens.....	77
Tabela 5.2: Influência dos métodos de partidas de trens nos tempos de ocupações das linhas das estações.....	78
Tabela 5.3: Desempenho médio dos trens para o cenário 2.....	79

Tabela 5.4: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 2.....	81
Tabela 5.5: Desempenho médio dos trens para o cenário 3.....	82
Tabela 5.6: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 3.....	84
Tabela 5.7: Desempenho médio dos trens para o cenário 4.....	85
Tabela 5.8: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 4.....	86
Tabela 5.9: Desempenho médio dos trens para o cenário 5.....	87
Tabela 5.10: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 5.....	88
Tabela 5.11: Desempenho médio dos trens para o cenário 6.....	89
Tabela 5.12: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 6.....	90
Tabela 5.13: Desempenho médio dos trens para o cenário 7.....	91
Tabela 5.14: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 7.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS

CTC – Centralized Traffic Control

LEF – Lista de Eventos Futuros

MCR – Modelo para Capacitação de Rotas (em Inglês RCM, Route Capacity Model)

RCT – Regulamento de Circulação de Trens

SIMTRAC – Simulator Tracks

AO – Sigla da estação de Agudos

FE – Sigla da estação de Bauru

LN – Sigla da estação de Lençoes Paulista

RA – Sigla da estação de Rodrigues Alves

RJ – Sigla da estação de Rubião Júnior

SN – Sigla da estação de São Manoel

TL – Sigla da estação de Toledo

XN – Sigla da estação de Paranhos

LISTA DE SÍMBOLOS

C – capacidade do trecho, trens/dia/sentido

I – headway entre trens em um mesmo sentido, h

N – número de trens

t – instante em que se completa a atividade corrente na simulação

T – tempo de percurso entre duas estações, min

RESUMO

SAAD, J. A. C. (1999). Modelo para análise da operação de trechos ferroviários em linha singela. São Carlos, 1999. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos.

O objetivo da pesquisa aqui relatada é desenvolver um modelo de simulação estocástica capaz de reproduzir a circulação de trens em trechos de linha singela. O modelo é usado para avaliar o impacto que determinadas alterações podem provocar sobre o desempenho do sistema. Os fatores estudados são o número de estações existentes, os horários de partida dos trens, os tempos de parada nas estações e a velocidade média dos trens, que foram combinados em sete cenários diferentes. Os efeitos das alterações propostas são avaliados em termos do tempo total de percurso dos trens, o tempo médio de espera nas estações, a fila média, o tempo em que os trens ficam parados e circulando, os tempos de ocupação dos desvios e a velocidade média dos trens.

Palavras-chave: linhas singelas; operação ferroviária.

ABSTRACT

SAAD, J. A. C. (1999). Stochastic simulation model to assess the circulation of trains on a single track line. São Carlos, 1999. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos.

The objective of this research is to develop a stochastic simulation model capable to reproduce the circulation of trains on a single track line. The proposed model is used to assess the impact of certain changes on the overall performance of the system. Seven different scenarios are used with this purpose. These scenarios include changes in the number of stations, train departure times, duration of stopping times at the stations and the train average speeds. The overall effect of these changes on the system is assessed by means of the trains total travel times, average waiting times at the stations, average queue lengths, running and stopping times, occupation times for sidings and the overall average speed for trains.

Keywords: single track line; railway operations.

Capítulo 1

1- Introdução

O movimento de trens têm sido um tópico de considerável análise nos últimos 20 anos. Os objetivos têm sido:

- (a) avaliar o desempenho dos trens e a capacidade da linha;
- (b) avaliar diferentes instalações no trecho;
- (c) avaliar procedimentos e regras de despacho.

Mais recentemente, modelos matemáticos de programação têm sido desenvolvidos para gerar soluções otimizadas ou soluções possíveis, de boa qualidade, para o problema da circulação de trens. Eles estão particularmente relacionados ao problema de “encontro-passagem”, em que trens viajando em direções opostas irão se encontrar ou passar em pontos denominados desvios, localizados e espaçados ao longo de linhas singelas.

Uma linha singela é o trecho da via férrea em que a circulação normal dos trens é feita em apenas uma via e um desvio (“siding”) em uma linha singela é um pequeno segmento de linha dupla entre longos trechos de linha singela (simples).

Os modelos para determinação da capacidade de linhas singelas podem ser utilizados para planejamento ou para operação "on-line" de trens.

Na utilização para operação de trens, os programas existentes servem como ferramentas para despacho, para auxiliar no propósito de que os trens cheguem no horário, minimizando o atraso total. São uma ferramenta de suporte para os controladores de trens, conhecidos como despachadores, programarem trens em tempo real de modo otimizado.

Com um modelo de otimização disponível, o operador é capaz de atualizar rapidamente uma programação se um evento não previsto ocorrer.

O segundo uso dos modelos relaciona-se com o planejamento da operação em termos de planejamento de trens e da infra-estrutura associada com a operação dos mesmos. Servem como ferramenta de planejamento para avaliar o impacto de mudanças, no horário e na infra-estrutura, sobre o horário de chegada de trens e atraso dos mesmos.

Os modelos podem ser usados para avaliar a implicação na mudança de horários em termos de mudança na partida de trens, trens adicionais e mudanças na velocidade.

Em termos de planejamento, pode-se otimizar o programa de trens usando uma priorização dinâmica de trens individuais ou desenvolver um modelo para determinar a localização ótima dos desvios.

O método convencional para análise de capacidade de linhas férreas é a simulação por computador ou gráfica. Na simulação por computador, o modelo é desenvolvido incorporando regras e procedimentos de despacho pré-definidas; dados de entrada para o modelo definem horário de partida de trens, configuração da via, tempo de circulação entre desvios, etc. A simulação gráfica, manual, têm os mesmos dados de

entrada, mas resolve os conflitos entre trens com decisões humanas, idealmente através daqueles com experiência em despacho de trens.

As análises a serem efetuadas neste trabalho enquadram-se no planejamento da operação de trens.

1.1- Aspectos Gerais

De acordo com Carey e Lockwood (1995), o despacho ou circulação de trens ou “passar trens” é o problema de alocar trens a linhas disponíveis (linhas, plataformas, desvios, etc) em uma rede ferroviária, de modo a minimizar atrasos ou custos de atrasos de trens, satisfazer a demanda de tráfego e assegurar que todos os trens no trecho e nas estações satisfaçam as condições de espaçamento entre trens (headways) e tenham tempo suficiente para atravessar os trechos, esperar nas estações, etc.

Durante mais de um século a circulação de trens têm sido feita à mão, usando diagrama tempo-distância (conhecido como “gráfico”). No processo tradicional, a rede é inicialmente decomposta em um conjunto de corredores. Cada um deles consiste tipicamente de um conjunto de linhas conectando uma sequência de estações, junto com ramais menores. Os planejadores passam os trens de cada corredor separadamente, passando um trem de cada vez de acordo com o estabelecido no programa, verificando e eliminando conflitos causados pelos trens que estejam próximos no espaço e no tempo. Resolver conflitos deve envolver a repassagem de outros trens e também pode incluir negociações e escolha entre diferentes trens a serem atendidos.

De acordo com Carey e Lockwood (1995), vários gráficos computadorizados, sistemas de informações e bancos de dados têm sido desenvolvidos para auxiliar na construção de planos de

circulação de trens.

Uma linha singela entre duas estações ou pátios é composta de segmentos delimitados por pátios onde é permitido a um trem passar de uma linha para outra. Segmentos com duas linhas permitem o encontro e ultrapassagens de trens.

A linha é dividida em segmentos representando os trechos de linha entre estações ou pátios adjacentes. Assim, cada segmento representa uma seção de linha entre desvios.

A programação ferroviária em linha singela requer a existência de um conjunto de desvios onde trens podem cruzar ou ultrapassar outros. Quando dois trens aproximam-se um do outro em uma linha singela, um deles deve entrar no desvio para operação segura do sistema. A determinação de quais trens devem entrar no desvio deve levar em conta fatores como prioridade, distância, atraso e custo de operação de trens.

Uma das principais considerações na modelagem dos sistemas de transporte ferroviário está relacionada com as questões de segurança no tráfego de trens. Isto ocorre porque trens circulam em linhas singelas com tráfego em uma ou em duas direções, tornando possível que ocorram colisões se precauções de segurança não forem tomadas pelas autoridades de transporte. A precaução mais utilizada para manter a segurança é assegurar que somente um trem ocupe o trecho entre duas estações. Isto significa que como o trem passa de uma instalação para a próxima (trecho para desvio ou desvio para trecho), ambas devem estar reservadas para uso exclusivo pelo trem durante o intervalo de tempo apropriado para assegurar que não ocorrerão colisões. Trens podem então seguir outros se for mantida uma separação conveniente. Separações mínimas entre trens ocupando instalações também devem ser mantidas. Isto é alcançado manualmente pelos despachadores que controlam o tráfego nessas estações ou automaticamente usando sistemas de sinalização que

proíbem um trem de entrar em um trecho se ele estiver ocupado por um outro trem.

Em conflitos entre trens, a escolha a ser feita irá depender do objetivo que está se tentando alcançar, isto é, atender primeiro o trem de maior prioridade, reduzir o atraso total no sistema ou assegurar que os trens mantenham o programa vigente.

O despacho de trens é uma tarefa trabalhosa e complexa. Os despachadores monitoram e controlam os movimentos dos trens nas linhas férreas e resolvem conflitos potenciais entre trens. Os principais conflitos (representam 90% dos casos nos EUA) que surgem em linhas singelas, com desvios para passagem e com poucos trechos de linha dupla, são encontros de trens circulando em sentidos opostos: não é permitido que dois trens viajando em sentidos opostos ocupem o mesmo segmento de linha singela ao mesmo tempo, pois colisões podem ocorrer (Jovanovic e Harker, 1991a). Encontros são resolvidos colocando-se um dos trens em uma linha paralela à linha principal em um pátio (ou desvio), onde ele irá parar e esperar que o trem no sentido oposto passe. Nas Figuras 1.1 e 1.2 tem-se a representação de um encontro de trens circulando em sentidos opostos.

Figura 1.1: Encontro de trens circulando em sentidos opostos (cruzamento)

Figura 1.2: Resolução do encontro de trens (cruzamento)

Na Figura 1.1 tem-se um conflito entre os trens 1 e 2 no segmento entre as estações A e B, pois somente um trem por vez pode ocupar o segmento. O conflito está resolvido na Figura 1.2, onde o trem 1 aguarda na estação B, a liberação do segmento pelo trem 2. Este conflito é conhecido como “cruzamento de trens”.

Em linhas totalmente duplas ou com múltiplas linhas, não há conflitos entre trens em sentidos opostos, mas eles surgem entre um trem rápido e outro mais lento viajando no mesmo sentido e à frente. Tal conflito é resolvido através de uma ultrapassagem, isto é, colocando o trem rápido em uma linha paralela onde ele possa passar pelo trem mais lento, verificando se essa linha paralela não está ocupada por um trem em sentido contrário (Jovanovic e Harker, 1991a). A ultrapassagem também pode ser realizada em uma linha singela, colocando-se o trem mais lento em uma linha fora da linha principal, em um pátio ou desvio, onde ele irá parar e esperar ser ultrapassado pelo trem mais rápido. O número de maneiras em que conflitos entre trens em movimento podem ser resolvidos é uma função exponencial do número de trens e segmentos de linha. Nas Figuras 1.3 e 1.4 tem-se a representação de um encontro de trens circulando no

mesmo sentido, onde um trem mais rápido passa por um mais lento.

Figura 1.3: Encontro de trens circulando em um mesmo sentido (ultrapassagem)

Figura 1.4: Resolução do encontro de trens (ultrapassagem)

Na Figura 1.3 tem-se um conflito entre os trens 1 e 2 no segmento entre as estações A e B, pois somente um trem por vez pode ocupar o segmento. O conflito está resolvido na Figura 1.4, onde o trem 1 é ultrapassado pelo trem 2 na estação B e aguarda nessa a liberação do segmento pelo trem 2, que ocorre quando este chega na estação A. Este conflito é conhecido por “ultrapassagem de trens”.

Considere-se uma longa linha singela com um número de desvios localizados em posições fixas da linha. Alguns desvios podem ser muito pequenos para um trem particular, enquanto outros desvios podem acomodar mais do que um trem, desde que menores que um certo comprimento. Pode-se assumir que a linha seja representada por uma reta ligando o Norte ao Sul, e que a posição exata na linha pode ser descrita por uma coordenada unidimensional. Um número N de trens com posição inicial e horário de partida fixados, viajam em direção ao Norte ou ao Sul para alguma localização final. Obviamente a estes trens são permitidos cruzamentos somente nos desvios de passagem e, por razões de segurança, um dos trens deve parar no desvio durante o cruzamento. Refere-se a esta condição como restrição de cruzamento. O problema é então, dados os parâmetros relevantes (velocidade do trem, custo de parada e atraso, etc), calcular o programa dos trens para minimizar o custo total devido as paradas e atrasos, satisfazendo-se as restrições de cruzamento.

Um exemplo de instabilidade em linhas singelas é o caso em que o número de desvios onde trens podem passar ou cruzar são suficientes apenas para atender à demanda planejada. Quando um trem é atrasado (devido a quebra ou outros problemas como sinalização, clima ou manutenção de via), atrasos consideráveis devem ocorrer no sistema. Há duas razões para isto, a saber:

- o programa tem pouca folga e o atraso de um trem irá causar atrasos nos outros trens;
- o espaçamento entre desvios pode ser grande, desde que existam poucos desvios. Neste caso, pode ser mais demorado para mover um trem quebrado ou mais lento para o próximo desvio. Grandes atrasos irão ocorrer para mais trens devido ao grande espaçamento entre desvios. Analogamente, quando

vários desvios são utilizados mas estão concentrados em uma parte da via, haverá um grande risco de atraso devido a outras partes da via terem grandes distâncias entre desvios. O risco é mínimo quando há muitos desvios igualmente espaçados (considerando que os conflitos eventualmente estão dispersos).

Para Higgins, Ferreira e Kozan (1995a; 1996), se a operação de trens é realizada em linha singela, a confiabilidade no tempo em trânsito é função de um conjunto de fatores: grau de folga com que a programação é construída, o número e posição dos conflitos entre trens, prioridade de cada trem, congestionamento dos terminais, número e natureza das paradas programadas e velocidade dos trens.

Muitas ferrovias deparam-se com a necessidade urgente de expandir a capacidade de segmentos de linhas singelas. É importante fornecer capacidade adequada para manter custos operacionais sob controle e evitar perda de tráfego. Ao mesmo tempo, considerando-se a magnitude dos investimentos de capital necessários para o aumento da capacidade, deseja-se otimizar esses investimentos para maximizar o retorno do capital investido.

Antes de planejar qualquer expansão de capacidade, é necessário primeiramente medir a capacidade das instalações existentes. Então, se a capacidade de um segmento específico de linha for insuficiente, os administradores devem decidir sobre o melhor caminho para aumentar a capacidade, assim como dimensionar quanto de capacidade deve ser fornecido.

A capacidade pode ser expandida de dois modos: o tempo de circulação entre dois desvios pode ser reduzido ou a capacidade das instalações para acomodar frotas múltiplas de trens pode ser melhorada. Tempos de circulação podem ser reduzidos aumentando a velocidade limite, adicionando

locomotivas ou dividindo longas seções de linhas singelas através da construção de desvios intermediários.

1.2- Objetivos

A meta é propor um modelo de simulação estocástica que permita estudar a operação de trechos ferroviários em linha singela. O modelo proposto será usado para estudar a influência de diversos fatores na operação ferroviária. Entre esses fatores, estão incluídos o número de estações existentes no trecho em estudo, os horários de partida dos trens, a velocidade média dos trens e os tempos de parada dos mesmos nas estações.

Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- 1- Análise dos modelos existentes;
- 2- Proposta, codificação, teste e validação de um modelo de simulação estocástica baseado em eventos;
- 3- Análise e escolha dos fatores cuja influência na operação ferroviária deverá ser estudada; e
- 4- Escolha dos cenários e avaliação da influência de fatores sobre a operação de um trecho ferroviário por meio de um estudo de caso.

O objetivo prático deste trabalho é criar um modelo para avaliar o impacto que determinadas ações podem provocar na operação de trens em linhas singelas, permitindo sua utilização nas ferrovias como ferramenta de auxílio para tomada de decisões estratégicas.

Se o objetivo for reduzir custos com pessoal, o modelo poderá ser utilizado para analisar o impacto que medidas como o fechamento de estações e a localização das mesmas podem provocar no desempenho dos trens no trecho.

Poderá ser avaliado o efeito do aumento da velocidade dos trens no desempenho do sistema, como consequência da realização de serviços de manutenção e melhoria da via permanente, retirando-se restrições de velocidade e aumentando-se a velocidade máxima autorizada (VMA) para cada segmento entre estações. Pode-se aumentar a velocidade dos trens pela alteração do trem-tipo, isto é, melhorando-se o desempenho das locomotivas através da redução da carga a ser transportada por cada locomotiva.

Finalmente, pode-se estudar o que irá ocorrer com os trens se houver um aumento ou diminuição do tempo de parada nas estações, visando avaliar tipos de licenciamento e utilização de sistemas de detecção do último vagão do trem ("end of train").

1.3- Estrutura da Dissertação

Este texto está organizado em 6 capítulos, o primeiro dos quais é esta introdução, onde se define os componentes de um trecho ferroviário em linha singela e se discute os principais conflitos que surgem entre trens, ressaltando-se os aspectos de segurança. Apresenta-se o objetivo principal deste trabalho, que é propor um modelo para analisar a operação de trens em linhas singelas.

O capítulo 2 trata da análise dos modelos existentes para trechos ferroviários, classificando-os em três categorias. Descreve-se as finalidades dos modelos, suas premissas e dados de entrada.

O capítulo 3 apresenta o método proposto para análise do trecho ferroviário. Discute as regras para despacho de trens, as suposições sobre a operação, a lógica do sistema, a estrutura do simulador, procedimentos para utilização do simulador, medidas de desempenho geradas pelo simulador, os dados coletados e o teste para validação do modelo.

O capítulo 4 traz o roteiro da simulação e os cenários a serem simulados, que são uma composição dos supostos fatores que interferem no desempenho dos trens. Apresenta as medidas de desempenho a serem analisadas. Mostra o cálculo teórico do número de trens a serem simulados em cada cenário e define os horários de partida dos trens.

O capítulo 5 trata dos resultados da simulação para cada cenário. Discute as medidas de desempenho obtidas e a influência, no desempenho dos trens, de cada fator analisado.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações para estudos futuros. Verifica-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que conseguiu-se, com o modelo proposto, analisar a operação de trens em um trecho ferroviário, estudando-se a influência de alguns fatores no desempenho dos trens. São apresentadas sugestões e recomendações para estudos futuros que visem melhorar o modelo e aprofundar a análise dos fatores que exercem influência no desempenho dos trens em um trecho ferroviário em linha singela.

Capítulo 2

2- Modelos

No Brasil, pouco ou quase nenhum trabalho têm sido feito no sentido de avaliar o planejamento da operação de trens. Entretanto, na literatura internacional existem vários trabalhos e modelos desenvolvidos.

Segundo Petersen e Taylor (1982), os modelos existentes para linhas ferroviárias podem ser classificados em três categorias: analíticos (descritivos), de simulação e modelos de otimização, embora possa-se considerar que os modelos de otimização são um subconjunto dos modelos analíticos.

Independente dessa classificação, existem muitos modelos que foram desenvolvidos com o objetivo de determinar as capacidades máximas e práticas de linha singelas.

2.1. Modelos Analíticos

Os modelos analíticos desenvolvem uma estrutura fechada ou expressões algébricas para o tempo em transito de cada tipo de trem como função das características de operação do trem e configuração da via. Modelos típicos são o de Petersen (1974, 1977c), Elbrond e Da Costa (1970) e English (1978).

Petersen (1974, 1975) desenvolveu modelos analíticos para quantificar atrasos resultantes de encontros e cruzamentos de trens em estações intermediárias ao longo de linhas singelas em estudo. O modelo é aplicável nos casos de densidade de tráfego relativamente baixa e quando são dadas diferentes prioridades às categorias de trens.

Petersen está entre os primeiros a desenvolverem modelos analíticos para calcular o atraso médio e o tempo médio de circulação para trens em ferrovias com linhas singelas ou parcialmente duplas. São permitidos trens operando em várias velocidades diferentes em cada direção. O modelo inclui sistemas de prioridades para controlar o comportamento de trens quando encontros e ultrapassagens ocorrem e calcula os tempos de atrasos em razão da implantação desse cenário de prioridades. Seu estudo envolveu regras de prioridades para encontros e ultrapassagens para três classes de tráfego: carga, carga expressa e passageiro. Supôs que os trens dentro de cada classe são independentes e uniformemente distribuídos em um dado período de tempo. As premissas do modelo são:

- os horários de partida dos trens são variáveis randômicas independentes, que são uniformemente distribuídas sobre o período de tempo de interesse;
- os desvios possuem dimensões suficientes para acomodar os encontros e ultrapassagens resultantes;
- os trens em cada classe são uniformemente distribuídos ao longo do período de interesse (identicamente distribuídos sobre a via) e essa distribuição, para cada classe de velocidade, é independente; e

- encontros e ultrapassagens ocorrem somente entre dois trens por vez.

Os tempos médios de circulação resultantes, para cada classe de trens em cada direção, incluindo atrasos, são encontrados resolvendo-se um conjunto de equações lineares.

Os resultados foram estendidos por English (1977), que refinou essa aproximação e desenvolveu expressões para os atrasos com grande detalhe para incluir múltiplos encontros e ultrapassagens.

Esses modelos são usados para prever atrasos como função da intensidade de tráfego sobre a linha. Entretanto, somente são apropriados para tráfegos de baixa a moderada intensidade. Se a intensidade aumenta, atrasos de despacho tornam-se predominantes com relação a atrasos de manobras. Isto significa que os trens tendem a formar filas para despacho nos pátios esperando que a linha torne-se disponível.

2.2. Modelos de Simulação

Os modelos de simulação têm a vantagem de poder incluir grandes detalhes e estudar o comportamento transitório. Vários modelos de simulação foram desenvolvidos, sendo os mais notáveis: SIMTRAC (Lach e Skelton, 1968; Peat, Marwick e Mitchell, 1975); Australian Single Track Simulator (Rudd e Storry, 1976); CN Route Schedule (Dubé e Belshaw, 1975) e o Burlington Northern Simulator (Kehr, 1977), todos tendo considerável uso e aceitação. Esses modelos têm três limitações principais que em grau variado restringem seu uso continuado:

- uma estrutura inflexível em razão do modelo ter sido elaborado para um problema específico da ferrovia;
- necessidade excessiva de dados para operar o modelo;
- dificuldade em operar tráfegos de grande intensidade em razão do bloqueio da linha.

A modelagem da operação de trens têm uma história quase tão antiga quanto a da pesquisa operacional. No caso particular da modelagem da operação de linhas singelas, três abordagens têm sido empregadas: simulação Monte Carlo, programação inteira mista (“mixed integer”) e puramente inteira (“pure integer”). Os modelos de simulação tentam descrever a operação da malha através de uma representação detalhada da linha e de eventos randômicos que têm possibilidade de ocorrer nesse trecho de linha (Bongaardt et al, 1980).

O propósito principal da aproximação por simulação é verificar o resultado provável de uma política particular de operação no desempenho da malha. Um dos primeiros modelos é descrito por Frank (1966) e o trabalho de Petersen e Taylor (1982) fornece uma estrutura geral do modelo para uso na simulação da operação ferroviária.

Ramsey, Hutchinson e Rilett (1986), elaboraram um modelo de análise de capacidade de ferrovias, que permite uso interativo em microcomputadores. A dinâmica dos trens é calculada de maneira simplificada e o programa de computador mostra continuamente a trajetória de cada trem, em um diagrama “espaço x tempo”, permitindo ao usuário parar a simulação e ignorar decisões de encontros e ultrapassagens tomadas pelo programa de computador.

Harker e Hallowell (1996) desenvolveram um modelo para prever o desempenho de chegadas de trens no horário, em uma linha parcialmente dupla com tráfego programado. Em tal linha, interferências em razão de encontros e passagens são a maior causa de atrasos.

O modelo desenvolvido incorpora os seguintes aspectos do “mundo real” da operação ferroviária:

- utilização de prioridades para determinar a probabilidade com que um trem é atrasado por outro. No modelo, as prioridades dos trens são dependentes da expectativa de atrasos (ou custos de atrasos);
- permite que trens entrem e saiam em qualquer ponto ao longo da linha. Isto é necessário para operar ramais, manutenção de via, etc;
- a expectativa de atraso irá relacionar-se a um segmento em particular, com expressões separadas para casos de linha singela e linha dupla. Decisões de despacho dependem da seção particular da via em que encontros e ultrapassagens ocorrem.

As premissas usadas na construção do modelo são:

- o horário em que um trem está pronto para partir de seu ponto de origem é randômicamente distribuído em um intervalo finito que contém o horário programado de partida;
- encontros e ultrapassagens ocorrem somente entre dois trens de cada vez e um trem pode interferir com outro somente uma vez;

- todos os trens tem um horário programado (objetivo) de chegada no seu destino;
- a probabilidade de um trem ser atrasado por outro é uma função do atraso estimado no ponto de destino do trem; e
- desvios e segmentos de linha dupla estão uniformemente distribuídos dentro da linha.

Os dados de entrada necessários para o modelo incluem o layout físico da via, a programação para todos os trens, a estimativa de desempenho dos trens e as funções que especificam as penalidades (custos) associadas com o objetivo de alcançar o desempenho programado. Os resultados do modelo são os atrasos esperados e os horários estimados para partida e chegada.

Os aspectos estocásticos da simulação encontram-se nos horários de partida. Na operação de cargas, a maior fonte de incertezas no processo de planejamento de encontros e ultrapassagens relaciona-se aos horários em que os trens estão prontos para partir de suas origens. É uma simulação estocástica com eventos discretos.

Os modelos de simulação desenvolvidos por Wilson e Hudson (1963, 1967) têm sido adotados pela Canadian National Railways; os resultados desses modelos são razoavelmente precisos pois simulam as atividades na linha com grande detalhe.

2.3. Modelos de Otimização

Modelos de otimização têm sido direcionados para o problema da programação de trens na linha para otimizar algum

critério, como por exemplo capacidade, atraso total, etc. Estes modelos têm fornecido valiosos "insights" e são interessantes teoricamente, mas ainda têm tido pouca aplicação prática.

Frank (1966) desenvolveu uma análise muito interessante de tráfego nos dois sentidos em uma linha singela. Brettman (1970), Chernyavskii (1971a, 1971b), Otway e Salzborn (1979) e Muller (1979) trabalharam com o problema de programação de trens na linha. Maiores esforços são necessários para tornar essas aproximações operacionais.

Existe uma literatura razoável para esse problema, tanto de natureza analítica quanto de simulação numérica. Petersen (1977c), Assad (1980b), Crainic (1988) e Crainic & Querin (1987), realizaram muitas pesquisas com esse objetivo.

O modelo de otimização para o planejamento de encontros e passagens de trens, publicado e de maior sucesso, é o sistema desenvolvido pela Norfolk-Southern Railroad (Sauder e Westerman, 1983). O sistema de despacho auxiliado por computador da Norfolk-Southern foi implementado em uma grande parte da ferrovia e estima-se que trouxe uma economia anual de três milhões de dólares para a companhia. Este modelo é um projeto de enumeração parcial para gerar uma programação otimizada de encontros-passagens para uma linha singela.

2.4. Modelos para determinação das capacidades máximas e práticas

Problemas de determinação das capacidades máxima e prática de uma linha singela têm sido um tópico importante de pesquisa nos últimos 30 anos.

A capacidade máxima, em condições ideais de utilização, pode ser expressa pelo número máximo de trens que podem

circular pela linha em um determinado período de tempo. Neste caso, atrasos não são levados em consideração.

A capacidade de congestionamento é definida como a máxima taxa, em um período de pico, em que a linha é capaz de comportar o tráfego, depois que condições de congestionamento tenham sido desenvolvidas. É o limite superior teórico da capacidade da linha e determinado apenas pelas características físicas da linha e dos trens. Entretanto, esta taxa de fluxo de tráfego, normalmente não pode ser mantida, porque os atrasos podem tornar-se tão grandes que as equipes dos trens poderão exceder seus limites de tempo em serviço, podendo gerar um efeito dominó e levando a um bloqueio completo da linha.

Pode ser muito oneroso e desnecessário fornecer capacidade suficiente para que condições de congestionamento nunca ocorram. Capacidades de congestionamento podem ser operadas pela linha somente durante curtos períodos de tempo.

Define-se a capacidade prática como sendo uma porcentagem da capacidade de congestionamento, normalmente 85%, pois critérios práticos determinaram que condições de congestionamento são aceitáveis somente por períodos inferiores a 15% do tempo (Kraft, 1983).

Rallis (1977) usou modelos desenvolvidos com base na teoria das filas para determinar a capacidade prática de linhas singelas. Entretanto, ele não categorizou os trens no sentido de associar diferentes prioridades para o processamento na linha.

Assad (1980b) fez uma descrição geral dos conjuntos de modelos que tratam dos problemas relacionados às capacidades máximas e práticas de uma linha singela. Ele dividiu os modelos em dois grupos. No primeiro há modelos que analisam somente os atrasos imprevistos resultantes de cruzamentos e encontros de trens ao longo da linha. No segundo grupo há os modelos que consideram que os atrasos dos trens ocorrem como consequência

do impacto mútuo entre trens que demandam serviço no segmento congestionado da linha singela.

Janic (1984) desenvolveu um modelo para calcular a capacidade máxima de uma linha singela e analisar os parâmetros que a influenciam, sob condições de saturamento e demanda constante. Pode servir para planejamento de tabelas comerciais de horários, decisões sobre construção parcial ou total de uma linha paralela e planejamento da localização de estações intermediárias.

Os parâmetros que exercem influência na capacidade são: comprimento do trecho, distribuição do tráfego por sentido, composição e velocidade dos trens e regulamento de espaçamento entre trens. Trens de várias categorias (expresso, carga, passageiro, etc) movem-se de acordo com uma prioridade pré-determinada.

Janic (1988) desenvolveu um outro modelo em que a determinação da capacidade prática de uma linha singela é baseada na teoria das filas e os trens podem ser considerados como usuários servidos nos trechos. O servidor é o segmento de linha que é definido pela distância entre duas estações ao longo da linha. O modelo quantifica os atrasos médios de categorias individuais de trens, as quais são dadas diferentes prioridades em função da intensidade de tráfego na linha em um dado intervalo de tempo.

O fluxo de categorias individuais de trens tem características de Poisson e os tempos de serviços (atendimento) são randômicos com função de distribuição conhecida.

Modelos de linha analisam o movimento dos trens e atividades de despacho sobre a seção de linha. Eles investigam a capacidade das seções de linha, identificam o trecho congestionado e avaliam regras de prioridade em encontros e ultrapassagens entre trens na linha. A capacidade de uma linha

férrea pode ser avaliada através dos atrasos encontrados pelos trens sob diferentes condições operacionais.

Kraft (1983), propôs um modelo de simulação capaz de lidar com pequenos picos nas linhas, denominados “capacidade de congestionamento”. Entretanto, em termos médios de um dia real, a capacidade de congestionamento não é atingida. A capacidade de congestionamento em termos de volume de trens não pode ser mantida ao longo do dia. A capacidade prática será estimada como uma porcentagem da capacidade de congestionamento.

Como dados de entrada, o programa requer a configuração da via, tempo de circulação entre pontos, velocidade nos desvios e descrição dos trens a serem operados em cada direção. Os resultados incluem as capacidades de congestionamento e prática da linha, com um diagrama espaço x tempo opcional.

2.5. Objetivos e premissas dos modelos existentes

Higgins, Ferreira e Kozan (1995 e 1996), elaboraram modelos que tratam dos seguintes aspectos de programação em linha singela:

- programação on-line de trens em linha singela com vários desvios, onde o problema da determinação da prioridade de um trem em um ponto particular da viagem envolve a consideração da prioridade inicial, atraso atual (corrente) do trem e uma estimativa de possíveis conflitos à frente. Prioridades são utilizadas para resolução de conflitos entre trens;

- localização ótima dos desvios, para minimizar atraso de trens e custo total de operação dos mesmos, com relação a uma dada programação de horários;
- planejamento da operação ferroviária. Pode ser usado para avaliar implicações na mudança de horários em função de mudanças de partida de trens, trens adicionais e alterações na velocidade dos trens.

As premissas dos modelos são:

- trens podem seguir outros, em um segmento, com um headway mínimo;
- para seções de linha dupla, supõe-se que cada linha é alocada para um sentido de circulação de trens;
- somente um trem pode ocupar um desvio de cada vez, exceto nos pátios de início e fim que são supostos como sendo de capacidades infinita;
- a programação de trens é cíclica e repete-se diariamente ou semanalmente.

Os dados de entrada do modelo são a prioridade inicial dos trens, as velocidades máxima e mínima para cada trem (dependente das características físicas da linha e do trem), a extensão dos segmentos e identificação de linha singela ou dupla e o tempo de parada programada dos trens, que inclui manobra para pegar ou deixar vagões, abastecimento, troca de tripulação.

O critério para resolução de conflitos inclui a prioridade

de cada trem, atraso atual e expectativa do atraso que irá permanecer em função de ultrapassagens e cruzamentos.

O trabalho de Higgins e Ferreira (1996), trata da programação de trens, minimizando tempos de viagem e maximizando a confiabilidade dos horários de chegada. A soma dos riscos de atrasos associados com a programação é usada como sendo a componente confiabilidade de um modelo limitado de otimização de programas. O modelo de risco, que trata da operação em linha singela, pode ser usado para estimar o impacto provável na confiabilidade dos horários de chegada, mudanças nas frequências dos trens e em práticas operacionais, estratégias de investimentos na infra-estrutura da via e de estações e melhoria na tecnologia dos trens.

Para Kraay, Harker e Chen (1991), em ferrovias dominadas por linhas singelas, o planejamento e execução de encontros e passagens de trens são fatores críticos nos seguintes casos: economia de combustível, confiabilidade no horário de chegada de trens e portanto na conexão de vagões em trens e satisfação dos clientes através da confiabilidade do tempo em trânsito. As considerações básicas do modelo são:

- o território do despachador consiste de linhas singelas com desvios para passagem; segmentos de linha dupla são tratados como uma linha singela com um longo desvio;
- considerações de segurança são manipuladas fixando-se margens de segurança em termos de tempo mínimo permitido entre trens (headways);
- existe linha de capacidade infinita nos finais de trecho do território do despachador;

- no máximo, um trem pode ocupar um segmento de linha singela em um determinado período de tempo; e
- em um segmento com desvio, no máximo dois trens podem estar presentes em um dado intervalo de tempo.

Dados pressupostos como conhecidos pelo sistema de despacho de trens auxiliado por computador são:

- intervalo de tempo para partida e chegada dos trens que irão circular no território do despachador durante o horizonte de planejamento;
- velocidades limites para cada trem em cada segmento;
- função objetivo para cada trem, que depende da velocidade e horário de chegada. Os componentes dessa função podem incluir consumo de combustível e atrasos; e
- prioridade de cada trem, na forma de pesos que são atribuídos a função objetivo de cada trem.

O modelo de Harker e Chen (1990), para operação de trens, tem por objetivo calcular o atraso para diferentes tipos de trens em uma seção específica da linha como função da topologia da via, da programação de trens, política de despacho e outros fatores. Pode ser usado para avaliar o desempenho de diferentes regras de prioridade no planejamento de encontros e ultrapassagens na linha, identificar trechos congestionados, etc.

Este modelo estima a média e a variância do tempo total de

viagem de trens em um trecho de linha singela.

A análise do tráfego programado em linha singela requer alguma medida do atraso para verificar a viabilidade de um dado conjunto de programas. As premissas do modelo são:

- desvios estão igualmente distribuídos dentro da seção de linha considerada;
- somente um trem mais rápido pode ultrapassar um trem mais lento;
- encontros e ultrapassagens ocorrem entre dois trens somente uma vez;
- a programação de trens é cíclica; o horário de partida de cada trem é uma variável randômica centrada sobre o programa de horário de partida; e
- a probabilidade de um trem ser atrasado por outro é função das características físicas dos trens, da mercadoria sendo transportada e do programa relativo de cada trem (folgado ou apertado).

Como, no modelo, o horário de partida de cada trem é uma variável randômica, o número de interferências entre trens, para um trem particular, também é randômico, o que implica que o tempo total de viagem é uma variável randômica. A prioridade é função:

- do tipo do trem;

- do grau de flexibilidade da programação dos trens: idealmente, em um desvio, quanto maior a razão entre o tempo de viagem remanescente (hora de chegada corrente exigida) e o tempo remanescente de percurso livre, maior a prioridade do trem.

Harker e Hong (1990), usam um modelo com o propósito de estimar a média e a variância do tempo de circulação para cada tipo de trem sob várias configurações de via e políticas de operação. Tal modelo pode ser usado em muitos contextos: análise de política de programação, análises para decisões de investimento de capital, etc.

O modelo de Harker e Hong calcula explicitamente a média e a variância dos atrasos para cada trem na linha. A maioria dos modelos anteriores computava simplesmente o atraso médio (ou tempo de viagem). Entretanto, para a confiabilidade e a qualidade do serviço ferroviário de carga deve ser incluída a variância. Assim a variância, ou desvio padrão do tempo de viagem, é crucial se o modelo for uma ferramenta para planejamento ou previsão.

Nesse modelo a partida dos trens não é suposta aleatória, mas os trens entram em uma linha com, ou próximo de, algum horário de partida programado. As premissas são:

- as seções de linha singela têm comprimento igual; as seções de linha dupla também são de igual comprimento, embora este comprimento geralmente seja diferente dos de linha singela;
- o encontro de dois trens pode ocorrer em um desvio ou em qualquer ponto ao longo da seção de linha dupla. O trem que

chegar primeiro deve parar e então irá sofrer um atraso enquanto a manobra é realizada (atraso de manobra); e

- quando uma ultrapassagem ocorre, somente o trem ultrapassado irá sofrer atraso de manobra;

Greenberg, Leachman e Wolff (1988) apresentam modelos baseados em filas para prever atrasos no despacho de trens em linhas singelas, com baixa velocidade e com desvios de passagem muito espaçados.

Para estimar o atraso em toda a linha, são calculadas estimativas de atrasos para cada segmento entre desvios.

O modelo supõe que as chegadas de trens aos segmentos são afetadas pelos atrasos que os mesmos experimentam em segmentos anteriores.

O modelo de capacidade de rota (MCR) usado pela Canadian National é um programa de computador usado para análise de capacidade de ferrovias (Ramsey, Hutchinson e Rillet, 1986).

Os trens são movidos entre desvios por um algoritmo de despacho que seleciona a melhor resolução de cada encontro considerando somente os dois trens envolvidos. A separação de trens é modelada em termos de headways que são estabelecidos por um modelo de sinalização. O programa de partidas deve ser explicitamente estabelecido e os horários de partidas devem ser randomizados para refletir melhor a realidade diária da operação.

Para Harker (1990), o propósito de modelos em tempo real é desenvolver planos de operação que permitam cumprir a maior parte possível do programa estabelecido, dado que eventos que perturbam o plano de operação (quebras, falta de equipagens, etc) poderão ocorrer. Para os trens, o objetivo é desenvolver um

plano de horários de partidas e chegadas para os pátios principais e para os de início e fim de trecho.

Depois de definir os horários de partida e chegada dos trens nos pátios de início e fim de trecho, o sistema informatizado de auxílio ao despacho tenta programar os encontros e passagens ao longo da linha com horários de partida e chegada nos pontos intermediários (desvios, inícios e terminos de linha dupla, etc).

2.6- Conclusões sobre os modelos existentes

Os modelos analíticos analisados calculam os atrasos resultantes de conflitos entre trens. Incluem sistemas de prioridades para resolução desses conflitos e os horários de partida e o número de trens em cada classe são uniformemente distribuídos ao longo do período de interesse.

Os modelos de simulação tem por objetivo verificar o resultado provável de uma política particular de operação no desempenho da malha. Servem também para calcular a capacidade de ferrovias. Incorporam vários aspectos do mundo real e utilizam prioridades para resolução de conflitos entre trens. Os aspectos estocásticos estão nos horários de partida dos trens.

Os modelos de otimização são direcionados à programação de trens, otimizando critérios como capacidade da linha e atraso total dos trens na malha. Têm ainda pouca aplicação prática.

Os modelos para determinação das capacidades máximas e práticas tem grande aplicação pois os investimentos necessários para aumentar a capacidade de linhas singelas são vultuosos e esses modelos, além de determinar a capacidade, identificam os trechos congestionados.

Capítulo 3

3- Método proposto

A análise dos fatores que influenciam a capacidade de um trecho de linha singela e a operação de trens foi efetuada através de simulação, com o desenvolvimento de um simulador próprio, em Clipper, para o planejamento da operação de trens.

O programa foi elaborado para utilização na área de planejamento, isto é, para simular a circulação de trens verificando o efeito produzido no desempenho dos trens por alterações no sistema, como número de estações, horários de partida dos trens, tempos de parada nas estações e velocidade média dos trens.

O motivo de ter sido desenvolvido um simulador próprio em vez de utilizar os simuladores existentes (GPSS-H, por exemplo), resultou do objetivo de se ter um simulador que pudesse ser utilizado para qualquer trecho ferroviário (sem ramais) e que permitisse alterar facilmente as variáveis de entrada e os fatores a serem analisados. Ao utilizar-se as linguagens de simulação existentes, para cada novo trecho a ser estudado ou fator a ser analisado, seria necessário e trabalhoso alterar o programa elaborado na linguagem do simulador.

3.1- Porque simulação

De acordo com Banks e Carson (1984), simular é um imitar a operação de um processo ou sistema real durante um certo tempo. Apesar de ser realizada à mão ou por um computador, a simulação requer a geração de uma história artificial do sistema. A partir da observação desta história artificial do sistema, pode-se extrair inferências a respeito das características operacionais do sistema real.

A história artificial do sistema é criada a partir de um *modelo* do sistema. Este modelo é uma representação simbólica, lógica, matemática ou computacional do sistema real que, normalmente, tem a forma de um conjunto de suposições relativas à operação e ao funcionamento do sistema real.

3.1.1. Quando a simulação é a ferramenta adequada?

Banks e Carson (1984) citam que a simulação pode ser usada para estudo e experimentação das interações internas de um sistema complexo ou de um subsistema dentro de um sistema complexo ou estudo dos efeitos de mudanças informacionais, organizacionais e ambientais em sistemas complexos.

Ao realizar uma simulação, pode-se variar os valores das variáveis de entrada e observar as variações nos valores das variáveis de saída correspondentes, podendo-se ter uma noção do grau de importância de cada fator no sistema sob estudo. O aumento de conhecimento a respeito do sistema e do seu funcionamento, causado pelas observações necessárias à elaboração

do modelo, pode ser de grande valor para sugestões de melhorias nos processos sendo observados.

Pode-se utilizar a simulação para a avaliação e experimentação de novos projetos e políticas operacionais, antes da sua implementação, assim como para preparação de alternativas de ação que possam ser necessárias quando as novas instalações ou política operacional estiverem em funcionamento ou ainda para verificação de soluções analíticas.

3.1.2. Vantagens e desvantagens

As principais vantagens da simulação são:

- Uma vez que o modelo esteja pronto, ele pode ser usado repetidamente para analisar propostas de alterações no funcionamento e na estrutura do sistema;
- Com cuidado, analistas experientes podem usar modelos de simulação para ajudar a analisar uma proposta para um sistema, ainda que os dados de entrada sejam um tanto quanto inacurados;
- Dados obtidos através de simulação são muito mais baratos que dados coletados no campo;
- Modelos de simulação são mais simples de serem dominados e usados que modelos analíticos, o que aumenta o número de possíveis usuários;

- Enquanto que modelos analíticos exigem um grande número de hipóteses simplificadoras para torná-los matematicamente tratáveis, modelos de simulação não têm tais restrições. Com modelos analíticos, pode-se computar apenas um número limitado de medidas de desempenho do sistema; com modelos de simulação, a história gerada para o sistema pode ser usada para calcular quaisquer medidas de desempenho imagináveis;
- A simulação é, muitas vezes, a única maneira de se obter uma solução para o problema.

As suas principais desvantagens são:

- Os modelos podem ser caros, consumindo um longo tempo para a sua elaboração e validação;
- Necessitam de um grande número de replicações para garantir a qualidade dos dados de saída do modelo, o que pode significar custos elevados em alguns casos;
- Abandono de ferramental analítico por parte dos usuários, que utilizam simulação para casos onde soluções analíticas expeditas e adequadas existem.

O advento dos microcomputadores e a ampla disponibilidade de software para simulação abrandam as desvantagens listadas nos dois primeiros itens.

3.2 - O simulador

Existem dois tipos de abordagem em simulação: *event-scheduling* (programação de eventos) e *process-interaction* (interação de processos). *Event-scheduling* é aquela que se concentra em eventos e nos seus efeitos sobre o estado do sistema; *process-interaction* é baseada em processos, que são coleções cronológicas de eventos, atividades e esperas que se relacionam de alguma forma através de uma entidade. Neste trabalho, a abordagem utilizada será a de programação de eventos.

O modelo elaborado baseou-se nas premissas de alguns dos modelos de simulação analisados no capítulo 2. Os principais são os de Higgins, Ferreira e Kozan (1995 e 1996), baseando-se também nos modelos de Harker e Hallowell (1996) e Kray, Harker e Chen (1991).

O programa simula um trecho ferroviário em linha singela, limitado por duas estações (estações extremas do trecho) e possuindo várias estações entre as extremas, onde cada segmento entre as estações somente pode ser ocupado por um trem de cada vez. Os trens podem encontrar-se nos pátios (estações) que são compostas por duas linhas: a linha principal que é uma continuação da linha entre estações e a linha de cruzamento (desvio). Cada linha do pátio somente pode ser ocupada por um trem por vez também. Assim, nos pátios cabem no máximo dois trens. Exceção feita aos pátios de destino e origem que são considerados de capacidade ilimitada. Na Figura 3.1 tem-se um esquema dos componentes do trecho simulado.

Figura 3.1: Esquema dos componentes do trecho simulado

Os tempos de percursos entre estações referem-se ao tempo que um trem leva para deslocar-se do ponto central de um pátio ao ponto central de outro pátio e variam para cada trecho e para cada sentido de circulação dos trens.

O tempo de viagem em um trecho entre duas estações (tempo de percurso) é composto pelos tempos necessários para acelerar até a velocidade de cruzeiro, circular na velocidade de cruzeiro e desacelerar nas estações.

Com os dados levantados, foram obtidas curvas de distribuição acumulada dos tempos de percursos, para cada trecho e sentido de circulação dos trens.

Para determinar o tempo de percurso para um determinado trem em um certo trecho, o simulador gera um número aleatório e determina o tempo de percurso correspondente a esse número na curva de distribuição acumulada relativa a esse trecho e sentido de circulação através da função inversa da distribuição da variável aleatória.

3.2.1. Regras de Despacho

As regras de despacho consideradas no simulador referem-se a situação de linha singela e licenciamento por “staff” elétrico ou licença escrita, contidas no Regulamento de Circulação de Trens da FEPASA (RCT), como por exemplo:

Art. 74: nos trechos de licenciamento por estafe elétrico, cujo controle da circulação é feito pelo Centro de Comando, através de telefone ou rádio, qualquer trem para partir, além do estafe, deverá ter autorização verbal do Despachador (“Pode”), dada ao Chefe da Estação ou funcionário designado pelo último.

Art. 75: não é permitido o recuo de trem no trecho, sem a devida autorização do Despachador, que antes deverá certificar-se de que as eventuais passagens de nível estão protegidas.

Art. 76: se houver interrupção no funcionamento normal dos aparelhos de estafe elétrico, nos trechos onde o controle da circulação é feito pelo telefone ou rádio, o licenciamento passará a ser feito por Ordem Especial Escrita, com autorização do Centro de Comando.

Foram consideradas, também, outras regras de despacho, inerentes à linha singela mas não citadas explicitamente no Regulamento, como:

- o território do despachador consiste de linhas singelas com desvios para passagem;
- existe linha de capacidade infinita nos finais de trecho do território do despachador;

- no máximo um trem pode ocupar um segmento de linha singela em um determinado período de tempo; e
- em um segmento com desvio, no máximo dois trens podem estar presentes em um dado intervalo de tempo.

Algumas condições para evitar bloqueio da linha, isto é, para garantir que os trens poderão circular sempre em direção ao destino sem terem que recuar em razão de congestionamento ou falta de linha para passagem ou acomodação estão contempladas na lógica do sistema, e estão descritas no item 3.2.3.

Para resolução de conflitos de trens, as restrições do problema de viabilidade que relacionam-se com a partida, mínimo tempo de viagem, headway, ultrapassagens e encontros, deverão sempre serem satisfeitas. Estas restrições previnem a geração de um plano que levaria a um bloqueio da linha - condição em que os trens ficam presos e que não pode ser superada a menos que pelo menos um dos trens reverta sua direção de circulação temporariamente.

3.2.2. Suposições sobre a Operação

Os trens circulam sempre da origem até o destino, entrando no sistema através do registro inicial contido na lista de eventos futuros (LEF) e saem do sistema ao chegarem ao destino. Seus horários de partidas e chegadas ficam registrados em um arquivo. Os percursos em um trecho podem variar de trem para trem por serem randômicos.

Do modo como foi elaborado, o simulador somente permite cruzamentos entre trens circulando em sentidos opostos, não permitindo ultrapassagens para trens circulando no mesmo sentido pois os trens são subdivididos em dois grupos

(exportação e importação) tendo a mesma prioridade dentro de cada grupo.

Estabeleceu-se que, para efeito de resolução de conflitos entre trens em sentido contrário, neste modelo os trens circulando no sentido exportação têm prioridade sobre os trens no sentido importação.

A circulação de trens é simulada para um período igual à soma dos períodos de inicialização e simulação. Os trens que constam da LEF inicial irão ingressar no sistema repetidamente a cada 24 h (tempo de ciclo) até ser atingido o tempo total de simulação.

3.2.3. Lógica do Sistema

A lógica do sistema foi elaborada respeitando-se as regras de despacho e as condições para se evitar o bloqueio da linha. As condições necessárias para que um trem circule de uma estação A para uma estação B são:

- a) o trecho entre as estações A e B deverá estar livre;
- b) deverá haver pelo menos uma linha livre na estação B;
- c) se houver somente uma linha livre na estação B, deverão ser observadas as seguintes condições:
 - não pode haver trem circulando da estação C para a estação B, em sentido contrário;
 - não pode haver na estação C, dois trens que irão circular de C para B (em sentido contrário);

- não pode haver na estação C um trem para circular de C para B (em sentido contrário) e um trem circulando de D para C (em sentido contrário).

O esquema das estações está mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Esquema das estações

O tempo é avançado no modelo pela ocorrência de eventos discretos ao se completar a atividade corrente de um trem. A simulação consiste em gerar eventos e executá-los nos instantes apropriados. O sistema é dinâmico e estocástico.

Numa simulação baseada em eventos discretos, a modelagem do sistema é feita através de um conjunto de "retratos" do sistema em instantes diferentes - aqueles instantes onde ocorrem eventos. O "retrato" correspondente a um certo instante "t" inclui, além do estado do sistema (os valores das variáveis de estado), uma lista de todas as atividades em progresso naquele momento e o tempo em que cada uma deverá terminar (lista de eventos futuros, LEF).

O mecanismo que avança o relógio da simulação e que garante que todos os eventos ocorram na cronologia correta é baseado na lista de eventos futuros (LEF), que contém todos os eventos programados para acontecerem após o tempo indicado no relógio da simulação. Programar um evento futuro significa que, no instante em que uma atividade inicia-se, sua duração é calculada (possivelmente através da geração de uma variável

aleatória) e um evento que marca o fim da atividade é inserido na lista de eventos futuros.

3.2.3.1. O fluxograma

O fluxograma mostrado na Figura 3.3 descreve a execução da atividade referente ao evento iminente (próximo evento na LEF), verificando inicialmente se o evento refere-se a chegada ou a partida de um trem:

a) se for chegada:

Os procedimentos a serem executados pelo simulador, quando um trem chega em um pátio, são:

- ocupar uma linha livre do pátio;
- liberar o segmento entre dois pátios, que estava sendo ocupado pelo trem;
- excluir da LEF o evento referente a chegada do trem;
- gerar o próximo evento, ou seja, a partida para o próximo pátio e incluí-lo na LEF;
- ordenar a LEF (por dia e horário);
- atualizar as estatísticas.

b) se for partida:

Para que um trem possa partir de um pátio em direção ao próximo, deverão ser verificadas as condições citadas no item 3.2.3 (Lógica do Sistema).

Se o trem estiver habilitado a partir, os procedimentos a serem executados são:

- ocupar o próximo segmento, entre o pátio atual e o próximo à frente;
- liberar a linha do pátio que estava sendo ocupada pelo trem;
- excluir da LEF o evento referente a partida do trem;
- gerar o próximo evento, ou seja, a chegada no próximo pátio e incluí-lo na LEF;
- ordenar a LEF;
- atualizar as estatísticas.

Se o trem não puder partir, os procedimentos a serem executados são:

- alterar, na LEF, o dia e o horário do evento iminente (referente a partida do trem), igualando-os ao horário e dia da liberação do trecho ou pátio que estiver impedindo a partida do trem;
- ordenar a LEF;

- atualizar as estatísticas.

Após a execução dos procedimentos acima, avança-se o relógio da simulação para o próximo evento iminente.

Por partida ou chegada de um trem, entende-se como sendo o instante da ocorrência de um evento referente a passagem de um trem de um bloco para outro. A partida ocorre quando o trem passa do bloco “pátio” para o bloco “segmento” (linha singela entre dois pátios). A chegada é o inverso, isto é, a passagem do trem do bloco “segmento” para o bloco “pátio”.

Bloco é uma das subdivisões de um trecho, limitada por dois pontos característicos, que neste caso são aparelhos de mudança de via (amv) e que podem ser ocupados por apenas um trem por vez no bloco segmento ou por um trem em cada via no caso do bloco pátio.

O fluxograma da simulação está mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Fluxograma do Simulador

3.2.4. Estrutura do Simulador

O simulador é composto de seis módulos:

1. geração de números aleatórios;
2. distribuição dos tempos de percursos;
3. cadastro de estações;
4. lista de eventos futuros;
5. simulação da circulação dos trens;
6. resultados (relatórios).

Cada módulo permite a inclusão, alteração e exclusão de dados, listagem no vídeo dos dados cadastrados e deleção de todos os dados.

Módulo 1: Geração de números aleatórios

O módulo "geração de números aleatórios" cria um arquivo de números aleatórios utilizando o Método Congruente Linear de Lehmer (Banks e Carson, 1984), onde:

$$X_{i+1} = (a x_i + c) \bmod m \quad \text{onde } i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

X_0 = semente

a = constante multiplicadora

c = incremento

m = módulo

$$a = b \bmod m \quad (3.2)$$

se $(a - b)$ é divisível por m e o resto é zero.

No simulador foram adotados os seguintes valores:

$$a = 7^5 = 16.807$$

$$m = 2^{31} - 1 = 2.147.483.647$$

$$c = 0$$

Os dados a serem incluídos são a semente X_0 e a quantidade de números aleatórios a serem gerados.

Os números pseudo-aleatórios gerados foram submetidos ao teste de frequência de Kolmogorov-Smirnov, para verificação de sua uniformidade, e aprovados.

Foi incluído no simulador um módulo para geração de números pseudo-aleatórios pois não foi encontrada nenhuma função que gerasse esses números na linguagem em que o simulador foi elaborado (Clipper).

Módulo 2: Distribuição dos tempos de percursos

Este módulo permite o cadastramento dos tempos de percursos coletados, por trecho e sentido de circulação, para elaboração das curvas de distribuição acumulada dos tempos de percursos.

Os dados de entrada são o trecho, o sentido de circulação, o tempo de percurso e a probabilidade correspondente.

Módulo 3: Cadastro de estações

Tem por objetivo definir as estações que compõem o trecho a ser simulado, as quais serão ordenadas pela sua posição quilométrica (coordenada unidimensional).

Os dados a serem incluídos são o nome da estação, sua sigla e sua posição quilométrica.

Módulo 4: Lista de eventos futuros

É o cadastro dos dados iniciais dos trens que irão compor a simulação.

Os dados de cada trem a serem incluídos são seu prefixo, o evento inicial (chegada ou partida), o local em que o trem entrará no sistema (origem), o dia do evento e o horário correspondente e o destino do trem (estação em que o trem deixará o sistema).

Módulo 5: Simulação da circulação dos trens

É o módulo "simulação" que efetua a circulação dos trens, utilizando-se dos dados cadastrados nos módulos anteriores.

O trem entrará no sistema na estação, dia e horário estabelecidos na LEF inicial e deixará o sistema ao chegar na estação de destino.

Todos os seus eventos serão cadastrados para determinação

das medidas de desempenho do sistema.

Os dados de entrada do módulo simulação são o período de inicialização e de simulação (em dias), a posição do número aleatório inicial a ser utilizado, o tempo para licenciamento dos trens nas estações e o tempo para conferência do último vagão.

O tempo mínimo de permanência dos trens nas estações refere-se ao período para efetuar o despacho do trem, isto é, conferência do número do último vagão da composição e entrega da licença para circulação (autorização para passar para o próximo bloco). O tempo mínimo de permanência nos pátios é um dos dados de entrada do programa (soma dos dois tempos citados).

A conferência do último vagão é necessária para assegurar que toda a composição chegou na estação seguinte, não tendo ficado nenhum vagão no trecho entre as estações. É uma condição necessária para liberar o trecho para o próximo trem. O tempo entre a chegada do trem no pátio e a liberação do trecho (após conferência da cauda) é um dado de entrada do programa.

Módulo 6: Resultados (relatórios de saída)

Este módulo lista na impressora as medidas de desempenho do sistema, os horários gerados para os trens, os períodos de ocupação dos trechos e pátios e os dados iniciais utilizados na simulação, para permitir que a simulação possa ser reproduzida.

3.2.5. Procedimentos para utilização do simulador

Para utilização do simulador, deve-se inicialmente definir o trecho a ser simulado, através do cadastramento das estações

que compõe o trecho.

Definidas as estações, deve-se incluir os tempos de percursos dos trens entre elas, nos dois sentidos, com as respectivas probabilidades de ocorrência. Isto serve para o simulador definir as curvas de distribuição acumulada dos tempos de percursos, caracterizando a aleatoriedade dos tempos de percursos dos trens.

Pode-se utilizar o simulador com os tempos médios de percursos entre estações ou a moda, excluindo-se assim o caráter aleatório da circulação. Nesse caso, ao cadastrar-se os tempos de percursos, incluir-se-á apenas os tempos correspondentes as médias ou modas, para cada trecho e sentido, com a probabilidade correspondente a 100%.

Pode-se utilizar os números aleatórios já gerados ou criar uma nova seqüência, definindo-se a semente X_0 e a quantidade de números a serem gerados.

Assim, para cada simulação a ser realizada, deve-se definir os trens que irão circular, isto é, que serão simulados, definindo-se o evento inicial de cada um deles, que constará da Lista de Eventos Futuros (LEF) inicial.

3.3. Variáveis envolvidas

Considerando-se que a capacidade do trecho é medida pelo número de trens que passam pelo mesmo em um determinado período de tempo e que, em linha singelas, somente um trem por vez pode ocupar cada segmento entre duas estações, só havendo encontro entre trens nos pátios, as variáveis escolhidas foram aquelas que direta ou indiretamente influenciam na capacidade do trecho.

As variáveis envolvidas na análise da capacidade do trecho são:

- **Número de estações:** o número de estações em que trens podem encontrar outros trens têm influência direta no tempo total de percurso e no número total de trens que podem estar no trecho em um dado instante para que não ocorram congestionamentos e bloqueio da linha.
- **Localização das estações:** a localização das estações, isto é, a distância entre elas, influencia no tempo de percurso dos trens, no número de trens que podem estar no trecho e na interferência que um trem pode causar em outro. Estações concentradas em uma determinada região, tendem a melhorar a circulação nessa região e piorar no restante do trecho. Idealmente, as estações devem estar localizadas da tal forma que os tempos de percurso entre estações sejam aproximadamente iguais.
- **Tempo de percurso entre estações:** o tempo de percurso entre estações depende do greide da linha (topografia do trecho), distância entre estações (localização), velocidade permitida, condições climáticas, condução do maquinista, etc. Considerando que teoricamente a capacidade é inversamente proporcional ao percurso, quanto maior o tempo de percurso menor será a capacidade do trecho:

$$C = \frac{12}{T} \quad (3.3)$$

- **Sentido de circulação do trem:** o greide da linha (topografia) atua de maneira diferenciada para cada sentido de circulação dos trens, influenciando no tempo de percurso, na capacidade de tração das locomotivas, etc.
- **Headway entre trens na origem:** o número de trens na linha em um dado instante depende da separação entre trens na origem (headway), influenciando no número de conflitos de trens, no tempo total de percurso e assim na capacidade do trecho.
- **Ocorrências randômicas:** certas linhas ferroviárias têm sua capacidade afetada por interferências randômicas como efeitos climáticos, avarias em locomotivas e vagões, acidentes, manutenção inadequada ou insuficiente. Pode-se, através dos dados coletados, verificar a probabilidade de ocorrência de uma interferência randômica. O percurso de um trem em um determinado segmento poderá, então, ser acrescido de um tempo correspondente a uma interferência randômica se, o número aleatório gerado corresponder a probabilidade de ocorrência de uma interferência.
- **Interferências com outros trens:** como o tempo de percurso de um trem consiste do tempo de percurso livre mais o atraso provocado por interferências com outros trens, a capacidade é afetada pelos conflitos entre trens provocados por diferentes prioridades de trens, número de trens por sentido, tipos de trens, etc. A verificação da interferência com outros trens é obtida no simulador através da análise dos tempos de permanências dos trens nos pátios aguardando linha, pois, em um cruzamento, um dos trens deve tomar o desvio e aguardar

a passagem do outro. A determinação de qual trem deve entrar no desvio depende da prioridade de cada trem, atrasos, etc.

As variáveis envolvidas entram no sistema como dados de entrada para o programa e variam para cada módulo conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados de entrada do Simulador

Módulo	Dados de entrada
Geração de números aleatórios	Semente X_0
	Variável indicativa da quantidade de números aleatórios a serem gerados
Distribuição dos tempos de Trecho percursos	Sentido de circulação
	Porcentagem
	Tempo de percurso
Cadastro de estações	Nome da estação
	Sigla
	Posição quilométrica
LEF inicial	Prefixo do trem
	Evento inicial
	Local (origem)
	Dia
	Horário
Simulação	Destino do trem
	Período de inicialização
	Período de simulação
	Posição do número aleatório inicial
	Tempo mínimo de permanência na estação
	Tempo para conferência do ultimo vagão

3.4. Medidas de Desempenho

As medidas de desempenho geradas pelo simulador são divididas entre medidas para trens, medidas para pátios e trechos e medidas globais.

As medidas para cada trem são:

- tempo total no sistema;
- tempo parado (e porcentagem);
- tempo circulando (e porcentagem);
- velocidade média;
- espera total e espera média.

As medidas para cada pátio e trecho são:

- tempo total de ocupação (e porcentagem);
- espera máxima, média e mínima que os trens sofreram em cada pátio.

As medidas de desempenho globais do sistema são:

- filas máxima e média;
- número máximo de trens no sistema;
- velocidade média global dos trens;
- tempo médio de cada trem no sistema;
- espera máxima, média e mínima dos trens.

3.5- Coleta de dados

O trecho escolhido para a simulação é conhecido como Ramal de Bauru. Compreende oito estações, sendo limites de trecho as estações de Bauru e Rubião Júnior (distrito de Botucatu). A estação de Rubião Júnior é uma estação de entroncamento do Ramal de Bauru com a linha tronco que liga São Paulo à Presidente Epitácio. É um trecho em bitola estreita (1,0 m).

Este trecho foi escolhido por ter operação própria, não ter ramificações e ser conhecido pelo autor, física e operacionalmente, o que facilitou a coleta dos dados e a escolha dos fatores que se supôs influenciarem no desempenho dos trens.

As siglas e as localizações das estações que compõem o trecho escolhido estão mostrados na tabela 3.2 e na figura 3.4 tem-se um mapa com a indicação do trecho simulado, compreendido entre Rubião Júnior e Bauru.

Tabela 3.2: Características do trecho simulado

Estação	Sigla	Posição Quilométrica	Distâncias (km)
Rubião Júnior	RJ	274.591	12.191
Toledo	TL	286.782	13.328
São Manoel	SN	300.110	11.547
Rodrigues Alves	RA	311.657	12.669
Paranhos	XN	324.326	16.630
Lençóis Paulista	LN	340.956	25.696
Agudos	AO	366.652	21.150
Bauru	FE	387.802

Figura 3.4: Mapa com a localização do trecho simulado

Os trens circulam nos sentidos importação e exportação. Por importação, define-se o sentido de circulação de trens da capital (e do Porto de Santos) para o interior; para o trecho em estudo, de Rubião Júnior para Bauru. Por exportação, o sentido de circulação do interior para a capital (e para o Porto de Santos); de Bauru para Rubião Júnior.

Os dados obtidos foram utilizados para validar o simulador desenvolvido e para gerar os bancos de dados do mesmo.

Os tempos de percursos entre estações foram obtidos através de levantamentos dos desempenhos dos trens da FEPASA no período de dez (10) meses.

O levantamento dos tempos reais de circulação em vez de uma determinação através da mecânica de locomoção são decorrentes de dois fatores:

- é o método prático utilizado nas ferrovias em razão da facilidade e rapidez de obtenção dos tempos. Os valores obtidos resultam da média ou moda dos tempos de percursos e passam a serem adotados como constantes para cada trecho e sentido;
- os tempos de percursos entre estações variam em função do clima, da composição do trem (número de vagões, de locomotivas, peso do trem, potência das locomotivas, estado das locomotivas) e principalmente do desempenho do maquinista. Ou seja, o tempo de percurso é randômico (ou heurístico).

Na Tabela 3.3, tem-se a distribuição de frequência dos tempos de percurso entre estações, para o trecho com todas as estações abertas, para trens circulando no sentido importação e, na Tabela 3.4, para os trens circulando no sentido exportação. Na Figura 3.5 tem-se a distribuição acumulada dos tempos de percursos para um dos segmentos entre estações do trecho simulado e, na Figura 3.6, o histograma correspondente. As curvas de distribuição dos tempos dos demais segmentos estão no apêndice.

Tabela 3.3: Distribuição de frequência dos tempos de percursos entre estações, com todas as estações abertas, para trens no sentido importação

Percurso (min)	Número de eventos						
	RJ-TL	TL-SN	SN-RA	RA-XN	XN-LN	LN-AO	AO-FE
15	1						
16	3						
17	3						
18	7						
19	10						
20	61						
21	9						
22	12						
23	14		1				
24	12		1				
25	40	7	15	10			1
26	7	2	1	1			
27	5	3	3	1			
28	1	6	3	3			
29			2				
30	3	24	27	44	10		6
31		1	2	1	2		
32		4		5	4	1	2
33				1	1		2
34				2	2		4
35		12	5	14	38	14	28
36		1		3	2	3	7
37		1		2	2	1	1
38				1	2	2	6
39					1	3	2
40	1	1		4	29	31	32
41					2	4	1
42						1	1
43						2	2
44						1	1
45					2	28	9
46					2	5	
47						2	
48						1	
49							
50						11	2
51						1	
52						1	
53							
54							
55						2

Figura 3.5: Distribuição acumulada de tempos de percursos – trecho RJ-TL - sentido importação

Figura 3.6: Histograma dos tempos de percursos – trecho RJ-TL – sentido importação

Tabela 3.4: Distribuição de frequência dos tempos de percursos entre estações, com todas as estações abertas, para trens no sentido exportação

Percurso (min)	Número De Eventos						
	FE-AO	AO-LN	LN-XN	XN-RA	RA-SN	SN-TL	TL-RJ
15							1
16							3
17							5
18							7
19							8
20							57
21							8
22							11
23							3
24					1		4
25				13	9	3	20
26				4	1	1	3
27				3	2	1	1
28				3	3		
29						2	
30	2	1	8	32	22	15	5
31				1		2	
32	2	2		3	1		
33	1	1	2				
34	1		1	2			
35	16	17	27	11	3	11	
36	4	7	2	1		2	
37	2	3	5				
38	5	1	2				
39	3	1		1			
40	36	27	22	2		4	
41	3	4					
42	2	4	1				
43		3	1		1		
44		1					
45	3	15	8	1		1	
46	8	1					
47		1					
48							
49							
50	3	5					
51							
52							
53	1						
54							
55							
60		1					

3.6. Teste e validação do modelo

3.6.1 Método

O método adotado para a validação do modelo implica em testar o simulador repetidamente com os dados reais da circulação de trens no trecho a ser simulado, em dias aleatoriamente escolhidos. Os resultados obtidos pelo simulador são comparados com os dados reais dos trens que circularam nos dias escolhidos.

Para o modelo ser validado, deve-se analisar os resultados obtidos com a comparação entre os dados gerados pelo simulador e os dados reais dos trens:

- comparação dos horários de partida e chegada dos trens, analisando-se a relação entre a diferença entre os tempos de chegada e o tempo total real de percurso do trem no trecho;
- comparação entre os gráficos dos trens, isto é, dos diagramas espaço x tempo, verificando se os conflitos entre trens foram resolvidos de modo análogo ao ocorrido na prática.

3.6.2 Validação

Foram escolhidos para comparação os dados de três dias reais e de um dia que corresponde a circulação teórica planejada dos trens (“Plano de Transportes”).

Os resultados obtidos são discutidos a seguir:

3.6.2.1 Comparação dos horários

Na Tabela 3.5 tem-se os horários reais e os obtidos pelo simulador para os trens nos dias escolhidos.

Tabela 3.5: Horários dos trens reais e dos gerados pelo simulador

Dia	Trem	Orig	Dest	Real		Simul.		Difer.	% erro
				Part.	Cheg.	Part.	Cheg.		
Plano	L2241	RJ	FE	01:00	07:00	01:00	05:25	01:35	26,4
	D2243	RJ	FE	06:20	11:00	06:20	10:28	00:32	11,4
	D2245	RJ	FE	10:35	15:00	10:35	14:40	00:20	7,5
	D2247	RJ	FE	15:00	19:15	15:00	19:25	00:10	3,9
	D2249	RJ	FE	18:15	22:35	18:15	22:26	00:09	3,5
	D2251	RJ	FE	21:00	01:55	21:00	01:34	00:21	7,1
	D2242	FE	RJ	00:15	04:30	00:15	04:23	00:07	2,7
	D2244	FE	RJ	03:40	08:10	03:40	08:15	00:05	1,9
	D2246	FE	RJ	07:55	12:25	07:55	12:26	00:01	0,4
	D2248	FE	RJ	12:00	16:50	12:00	16:07	00:43	14,8
	L2250	FE	RJ	16:20	22:10	16:20	21:16	00:54	15,4
	D2252	FE	RJ	21:10	01:55	21:10	01:39	00:16	5,6
Dia 1	D2241	RJ	FE	01:25	05:50	01:25	05:36	00:14	5,3
	D2245	RJ	FE	11:55	16:25	11:55	16:00	00:25	9,2
	D2251	RJ	XN	22:40	00:22	22:40	00:45	00:23	22,5
	D2244	FE	RJ	02:25	07:10	02:25	06:55	00:15	5,3
	L2248	FE	RJ	13:10	18:00	13:10	17:34	00:26	8,9
	D2252	FE	AO	23:25	00:10	23:25	23:59	00:11	24,4
Dia 2	D2243	RJ	LN	04:15	07:20	04:15	07:05	00:15	8,1
	D8263	RJ	FE	06:35	11:15	06:35	11:01	00:14	5,0
	L2249	RJ	FE	11:15	16:50	11:15	16:22	00:28	8,3
	D2251	RJ	LN	21:20	00:15	21:20	00:02	00:13	7,4
	D2253	SN	FE	23:40	03:08	23:40	02:45	00:23	11,1
	D2254	LN	RJ	00:07	03:35	00:07	02:49	00:46	28,4
	S2270	FE	RJ	03:30	07:40	03:30	07:32	00:08	3,2
	S2272	LN	RJ	09:50	12:20	09:50	12:32	00:12	8,0
	D2248	FE	RJ	13:45	18:00	13:45	17:59	00:01	3,9
	D2252	FE	RA	21:30	00:15	21:30	00:01	00:14	8,5
Dia 3	D2241	RJ	FE	01:12	05:30	01:12	05:16	00:14	5,4
	D8263	RJ	FE	06:35	10:45	06:35	10:45	00:00	0
	D2249	RJ	FE	12:30	16:55	12:30	16:31	00:24	9,0
	D2251	RJ	LN	18:40	21:40	18:40	21:25	00:15	8,3
	D2253	RJ	AO	20:15	00:30	20:15	23:45	00:45	17,6
	S2270	FE	RJ	01:10	05:02	01:10	05:22	00:20	8,6
	S2272	FE	RJ	07:50	12:20	07:50	12:08	00:12	4,4
	D2248	FE	RJ	12:30	16:55	12:30	16:39	00:16	6,0
	L2252	FE	RJ	20:25	00:40	20:25	00:31	00:09	3,5

Os horários de chegada e partida em cada estação dos trens reais estão no anexo 1 e dos trens simulados no anexo2.

Verifica-se que todos os trens simulados tiveram o mesmo horário de partida que os trens reais, significando que o trecho entre a estação de origem e a próxima estava livre na hora da partida, fato este que era uma condição necessária para os trens reais partirem da origem.

As principais divergências entre os horários de chegada devem-se ao fato que na simulação todos os trens sofreram nas estações uma espera mínima preestabelecida e uniforme, que corresponde ao tempo de conferência da cauda e de licenciamento. Na prática, tal tipo de espera pode ser maior ou menor e variar de estação para estação.

No simulador, o tempo de espera (ou atraso) de um trem em uma estação corresponde a soma dos tempos de conferência da cauda, de licenciamento e aguardando linha (espera correspondente a liberação do trecho). O simulador não permite preestabelecer determinados tipos de atrasos aos trens nas estações, como tempos para manobras, troca de locomotivas, troca de tripulação, etc.

Os trens reais utilizados para validação do modelo, sofreram atrasos em determinadas estações pelos motivos acima citados, que fizeram com que o tempos de permanências dos trens nessas estações fossem superiores aos da soma dos tempos de conferência da cauda e de licenciamento.

Estas diferenças ocorridas nas estações ao longo dos trajetos dos trens, provocaram divergências entre os horários de chegada dos trens reais e dos simulados, de poucos minutos para alguns e significativas para outros trens.

Analisando-se a Tabela 3.5, verificamos que 83,7% dos trens tiveram erro inferior a 15% em relação ao percurso total, isto é, a diferença entre o horário real de chegada no destino e o gerado pelo simulador em relação ao percurso total real do trem foi inferior a 15% para 83,7% dos trens simulados. Essa diferença pode ser considerada aceitável, em função das premissas e simplificações adotadas na elaboração do modelo.

3.6.2.2 Gráficos espaço x tempo

Analisando-se primeiramente o gráfico espaço x tempo dos trens gerados pelo simulador (Figura 3.8), verifica-se que os conflitos foram resolvidos nas estações, não existindo encontro entre trens nos trechos entre duas estações, fato não permitido em linhas singelas pois somente um trem por vez pode ocupar o trecho.

Verifica-se também que foi cumprida a prioridade dada aos trens circulando no sentido exportação (de Bauru para Rubião Júnior), premissa estipulada para o simulador e descrita no item 3.2.2.

Comparando-se o gráfico dos trens reais (Figura 3.7) com o dos gerados pelo simulador (Figura 3.8), observa-se que apesar de existirem pequenas divergências de horários, os conflitos foram resolvidos de modo análogo.

Figura 3.7: Gráfico espaço x tempo dos trens reais que circularam no dia 3

Figura 3.8: Gráfico espaço x tempo dos trens gerados pelo simulador, para o dia 3

3.6.2.3 Conclusão da validação

Pelo exposto nos dois itens anteriores, o simulador pode ser validado por estar reproduzindo de modo satisfatório o que ocorreu na realidade.

Capítulo 4

4. Roteiro da Simulação

O objetivo da simulação é comparar o desempenho dos trens em vários cenários, verificando-se a influência do número de estações abertas, horários de partida dos trens, velocidade dos trens e tempos de parada nas estações.

Para ter-se a mesma metodologia para cada cenário simulado e evitar o bloqueio do trecho, adotou-se as seguintes premissas para a simulação:

- **Majoração do tempo T:** para evitar o bloqueio do trecho, será determinado teoricamente através da equação 3.3, o número máximo de trens que poderão circular. O tempo T, que corresponde ao maior tempo de percurso entre duas estações no trecho em estudo, será majorado em 50%, acréscimo correspondente ao tempo médio que um trem espera em uma estação se o trecho à frente estiver ocupado, pois sendo as chegadas aos pátios aleatórias, um trem pode esperar até T minutos para liberação do trecho à frente ou não ter que esperar se o trecho estiver livre. Assim, em média, um trem espera $T/2$ minutos para entrar no segmento seguinte. A esse tempo majorado em 50%, será acrescido o tempo mínimo de parada dos trens nas estações, que é a soma dos tempos para conferência do número do último vagão e licenciamento do trem.

- **Headway na partida:** como o número máximo de trens calculado teoricamente corresponde a cada sentido de circulação e para ter-se a mesma metodologia para cada cenário para efeito de comparação, será adotado um espaçamento uniforme entre os horários de partida dos trens em cada sentido.
- **Duração da simulação:** corresponde a soma dos períodos de inicialização e de simulação. Adotou-se o período de cinco dias para a duração da simulação. As medidas de desempenho serão obtidas para os trens que entrarem no sistema no terceiro dia, para levar em consideração a influência que os trens de um determinado dia sofrem dos trens do dia anterior. Assim, os trens do terceiro dia sofrem influência dos trens que entraram no sistema no segundo dia e saíram no terceiro.
- **Critério para retirada de estações:** as estações a serem retiradas (fechadas) foram escolhidas de modo a não se ter duas estações consecutivas fechadas e mantendo-se abertas as de início e fim de trecho. No caso de retirar quatro estações, procurou-se ainda evitar grandes diferenças de tempos de percurso entre as estações abertas.

4.1 Cenários a serem simulados

Foram escolhidos sete cenários para serem simulados. Os cenários são composições dos fatores que se supõe exercerem influência no desempenho dos trens.

Na escolha desses fatores levou-se em consideração as suposições e premissas dos modelos já existentes e também o sentimento do autor sobre o assunto em função do conhecimento do trecho em estudo.

Os fatores escolhidos foram o número de estações existentes no trecho, os horários de partida dos trens, a velocidade média dos trens e os tempos de parada nas estações.

Os cenários a serem simulados são descritos a seguir.

Cenário 1: Influência dos horários de partida dos trens

O objetivo da simulação é verificar a influência dos horários de partida dos trens na operação do trecho com todas as estações abertas, com base nas seguintes condições:

- Cenário 1.1: com um tempo de defasagem entre os horários de partida dos trens em sentido contrário correspondente ao tempo de percurso máximo acrescido de 50% (T). O primeiro trem a partir terá o sentido exportação (de FE para RJ), partindo o primeiro trem importação após T minutos. Após T minutos em relação a partida deste último trem, partirá o segundo trem exportação e assim sucessivamente, até partirem todos os trens.
- Cenário 1.2: repetir a simulação, iniciando-se a passagem dos trens desta vez por um trem no sentido importação (de RJ para FE).
- Cenário 1.3: com os trens partindo simetricamente de suas origens, isto é, para cada trem que partir no sentido exportação, haverá um trem correspondente partindo no mesmo horário no sentido importação.

Pretende-se com esse cenário, detectar qual é o método para definição dos horários de partida dos trens que corresponde ao melhor desempenho dos trens no sistema. O método escolhido será utilizado em todos os demais cenários.

Cenário 2: com todas as estações abertas

O objetivo é, com todas as estações abertas, verificar como a operação dos trecho ocorre nos seguintes casos:

- Cenário 2.1: circular o número máximo de trens calculados teoricamente;
- Cenário 2.2: circular o mesmo número de trens do item anterior, mas aumentando-se a velocidade dos mesmos em 15%; e
- Cenário 2.3: circular o número máximo de trens mas aumentando-se o tempo de parada nas estações.

Cenário 3: Com três estações fechadas

O objetivo é realizar as mesmas simulações do item anterior (cenário 2), mas com três estações fechadas (ou cinco abertas). As estações a serem fechadas foram escolhidas de modo a não se ter duas estações consecutivas fechadas e mantendo-se abertas as de início e fim de trecho. Em relação a sequência original (RJ, TL, SN, RA, XN, LN, AO e FE) retirou-se TL, RA e LN.

Assim, sem três estações, será verificada a operação do trecho para os seguintes casos:

- Cenário 3.1: circular o número máximo de trens calculados teoricamente;
- Cenário 3.2: circular o mesmo número de trens do item anterior, mas aumentando-se a velocidade dos mesmos em 15%; e
- Cenário 3.3: circular o número máximo de trens mas aumentando-se o tempo de parada nas estações.

Cenário 4: Com quatro estações fechadas

Serão efetuadas as mesmas simulações dos cenários 2 e 3, mas retirando-se quatro estações, que foram escolhidas de modo a se manter as estações de início e

fim de trecho e evitar grandes diferenças de tempos de percurso entre as estações abertas.

Da sequência original de estações, optou-se por fechar TL, SN, XN e AO. Adotando-se as modas dos tempos de percurso (Tabela 4.1), obteve-se 80 minutos de percurso para os dois trechos extremos e 65 minutos para o trecho central.

A operação do trecho sem quatro estações será analisada para os seguintes casos:

- Cenário 4.1: circular o número máximo de trens calculados teoricamente;
- Cenário 4.2: circular o mesmo número de trens do item anterior, mas aumentando-se a velocidade dos mesmos em 15%; e
- Cenário 4.3: circular o número máximo de trens mas aumentando-se o tempo de parada nas estações.

Cenário 5: Com todas as estações abertas

Pretende-se comparar o desempenho dos trens no trecho com todas as estações abertas, para os seguintes casos:

- Cenário 5.1: circular o número máximo de trens calculados teoricamente;
- Cenário 5.2: circular dois trens a menos que o número máximo de trens calculado, isto é, retirar um trem por sentido.

Os horários de partida dos trens serão recalculados, em função do número de trens a passar pelo trecho.

Cenário 6: Com três estações fechadas

O objetivo desse cenário é verificar se a escolha das estações a serem retiradas do trecho exerce alguma influência no desempenho dos trens. Para o trecho sem três estações, será verificado o desempenho dos trens para os seguintes casos:

- Cenário 6.1: circular o número máximo de trens calculados teoricamente, para o trecho sem as três estações do cenário 3.1;
- Cenário 6.2: circular o mesmo número de trens do cenário 6.1 mas alterando-se as três estações a serem fechadas.

Novamente, as estações a serem fechadas foram escolhidas de modo a não se ter duas estações consecutivas fechadas e mantendo-se abertas as de início e fim de trecho. Em relação a sequência original (RJ, TL, SN, RA, XN, LN, AO e FE) retirou-se SN, XN e AO.

Cenário 7: Variando-se o número de estações

Para o número máximo de trens calculado teoricamente para o trecho sem quatro estações, será analisada a operação do trecho nos seguintes casos:

- Cenário 7.1: com todas as estações abertas;
- Cenário 7.2: retirando-se três estações, as mesmas do cenário 3; e
- Cenário 7.3: retirando-se quatro estações, as mesmas do cenário 4.

4.2. Medidas de Desempenho

As medidas de desempenho a serem consideradas para comparação entre os cenários simulados são:

- velocidade média dos trens (km/h): média da velocidade de todos os trens que circularam no trecho em estudo. A velocidade considerada para cada trem é a velocidade comercial, isto é, a velocidade correspondente a relação entre a distância total percorrida pelo trem e o tempo decorrido entre a partida da origem e a chegada no destino;
- tempo total no sistema (h:min): média dos tempos gastos pelos trens no sistema, desde a entrada na estação de origem até a saída na estação de destino;
- tempo parado (h:min): média da soma dos tempos em que os trens ficaram parados nas estações para licenciamento, conferência do último vagão e aguardando a liberação do trecho;
- fila média (em número de trens): média das filas de trens nas linhas das estações, isto é, do número de trens parados simultaneamente nas estações aguardando liberação do trecho à frente para partir;
- fila máxima (em número de trens): número máximo de trens parados em um determinado período (simultaneamente), nas linhas das estações, aguardando a liberação do trecho à frente;
- fila máxima (em minutos): tempo de duração da fila máxima;

- espera máxima (em minutos): tempo máximo em que um trem ficou parado em uma estação aguardando a liberação do trecho à frente; e
- espera média (em minutos): média dos tempos em que os trens ficaram parados nas estações aguardando a liberação do trecho à frente.

4.3 Cálculo do número máximo teórico de trens em cada trecho

Para efeito dos tempos de percursos entre estações serão considerados os tempos correspondentes a moda de cada trecho, relacionados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Modas dos tempos de percursos

Trecho	Exportação	Importação
RJ-TL	20	20
TL-SN	30	30
SN-RA	30	30
RA-XN	30	30
XN-LN	35	35
LN-AO	40	40
AO-FE	40	40

Assim, o número máximo teórico de trens para cada cenário será:

- Para todas as estações abertas

$$T = (40 * 1,5) + 10 = 70 \text{ minutos, onde:}$$

$$\text{Tempo de percurso máximo} = 40 \text{ minutos}$$

$$\text{Tempo de espera} = 10 \text{ minutos}$$

$$C = (12 / 70) * 60 = 10 \text{ trens por sentido}$$

- Para três estações fechadas

Considerando-se fechadas as estações de TL, RA e LN, conforme já descrito no item 4.1, cenário 3, tem-se:

$$T = (75 * 1,5) + 10 = 122 \text{ minutos}$$

$$C = (12 / 122) * 60 = 6 \text{ trens por sentido}$$

- Para quatro estações fechadas

Considerando-se fechadas as estações de TL, SN, XN e AO, item 4.1, cenário 4, tem-se:

$$T = (80 * 1,5) + 10 = 130 \text{ minutos}$$

$$C = (12 / 130) * 60 = 5 \text{ trens por sentido}$$

- Hipótese alternativa: para três estações fechadas

Considerando-se fechadas as estações de SN, XN e AO, item 4.1, cenário 6, tem-se:

$$T = (80 * 1,5) + 10 = 130 \text{ minutos}$$

$$C = (12 / 130) * 60 = 5,5 \text{ trens por sentido}$$

Serão adotados 6 trens por sentido para efeito de comparação com o cenário 3, onde retirou-se as estações de TL, RA e LN.

4.4 Horários dos trens

Os horários de partida dos trens, para cada cenário e com defasagem entre os trens em sentido contrário, serão:

- Para o trecho com todas as estações abertas

$$T = 70 \text{ minutos}$$

$$\text{Trens} = 10 \text{ por sentido}$$

Intervalo entre trens em um mesmo sentido:

$$I = 24 / 10 = 2,4 \text{ h} = 2:24$$

Os horários de partidas dos trens estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Horários de partidas dos trens para o trecho com todas as estações abertas e 10 trens por sentido

Trem	Horário de Partida	
	Exportação	Importação
1	00:01	01:12
2	02:24	03:36
3	04:48	06:00
4	07:12	08:24
5	09:36	10:48
6	12:00	13:12
7	14:24	15:36
8	16:48	18:00
9	19:12	20:24
10	21:36	22:48

O motivo de ter sido adotado o horário de partida referente a 00:01 h em vez de 00:00 h, deve-se a um costume ferroviário de não adotar tal horário para não gerar dúvida quanto ao dia em questão, isto é, utiliza-se 23:59 h ou 00:01 h em vez de 00:00 h.

- Para o trecho com todas as estações abertas, mas com dois trens a menos

$$\text{Trens} = 10 - 2 = 8 \text{ por sentido}$$

Intervalo entre trens em um mesmo sentido:

$$I = 24 / 8 = 3,0 \text{ h}$$

Os horários de partidas dos trens estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Horários de partidas dos trens para o trecho com todas as estações abertas e 8 trens por sentido

Trem	Horário de Partida	
	Exportação	Importação
1	00:01	01:30
2	03:00	04:30
3	06:00	07:30
4	09:00	10:30
5	12:00	13:30
6	15:00	16:30
7	18:00	19:30
8	21:00	22:30

- Para o trecho com três estações fechadas

$T = 122$ minutos

Trens = 6 por sentido

Intervalo entre trens em um mesmo sentido:

$$I = 24 / 6 = 4 \text{ h}$$

Os horários de partidas dos trens estão na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Horários de partidas dos trens para o trecho com três estações fechadas e 6 trens por sentido

Trem	Horário de Partida	
	Exportação	Importação
1	00:01	02:00
2	04:00	06:00
3	08:00	10:00
4	12:00	14:00
5	16:00	18:00
6	20:00	22:00

- Para o trecho com quatro estações fechadas

$$T = 130 \text{ minutos}$$

$$\text{Trens} = 5 \text{ por sentido}$$

Intervalo entre trens em um mesmo sentido:

$$I = 24 / 5 = 4,8 \text{ h} = 4:48$$

Os horários de partidas dos trens estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Horários de partidas dos trens para o trecho com quatro estações fechadas e 5 trens por sentido

Trem	Horário de Partida	
	Exportação	Importação
1	00:01	02:24
2	04:48	07:12
3	09:36	12:00
4	14:24	16:48
5	19:12	21:36

Capítulo 5

5- Resultados da simulação

5.1. Cenário 1: influência dos horários de partida dos trens

Neste cenário foram simuladas a circulação dos trens para três métodos diferentes de partidas de trens, isto é, com defasagem em relação aos horários de partida em cada sentido (em um, o primeiro trem tem sentido exportação e em outro o primeiro trem tem sentido importação) e simetricamente.

Para partidas simétricas, considerou-se que os trens em ambos os sentidos irão cumprir os horários de partida dos trens exportação. Os valores das medidas de desempenho escolhidas estão na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Influência dos horários de partida nos desempenhos dos trens

Medidas de desempenho		Cenário 1.1	Cenário 1.2	Cenário 1.3
Velocidade média (km/h)		24,16	24,68	24,85
Tempo total no sistema (h:min)		04:46	04:40	04:39
Tempo parado (h:min)		01:34	01:31	01:29
Fila média (trens)		1,97	1,96	1,96
Fila máxima	trens	4	4	6
	tempo (min)	5	4	3
Espera máxima (min)		31	36	31
Espera média (min)		6,3	6,2	6,3

Onde:

Cenário 1.1: partidas defasadas, com o primeiro trem no sentido exportação.

Cenário 1.2: partidas defasadas, com o primeiro trem no sentido importação.

Cenário 1.3: partidas simétricas.

Conforme pode ser visto na Tabela 5.1, os resultados obtidos são similares, mas no caso de partidas simétricas os desempenhos são iguais ou um pouco melhores que nos casos de partidas defasadas, tanto na velocidade média dos trens, quanto no tempo parado, duração da fila máxima e espera máxima.

Na tabela 5.2 tem-se um quadro comparativo entre os tempos de ocupações das linhas das estações para cada método de partida dos trens.

Tabela 5.2: Influência dos métodos de partidas de trens nos tempos de ocupações das linhas das estações

Estação	Linha	Cenário 1.1		Cenário 1.2		Cenário 1.3	
		Tempo	%	Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	0:48	3,33	0:48	3,33	1:01	4,24
	2					0:05	0,35
TL	1	3:27	14,37	2:58	4,03	3:14	13,47
	2	1:42	7,08	1:42	7,08	0:10	0,69
SN	1	3:24	14,17	3:24	14,17	3:25	14,24
	2					1:22	5,69
RA	1	1:57	8,12	2:08	8,89	3:40	15,28
	2	1:42	7,08	1:42	7,08	0:10	0,69
XN	1	3:24	14,17	3:24	14,17	4:55	20,49
	2					1:42	7,08
LN	1	5:38	23,47	5:02	20,97	3:53	16,18
	2	1:42	7,08	1:42	7,08	0:51	3,54
AO	1	5:31	22,99	5:34	23,19	4:16	17,78
	2	1:42	7,08	1:32	6,39	0:51	3,54
FE	1	0:48	3,33	1:12	5,0	2:08	8,89
	2			0:05	0,35	0:14	0,97

Onde a variável “tempo” equívale ao período (em um dia) em que a linha do pátio esteve ocupada por trens (em h:min) e a “%” corresponde a relação entre o tempo de ocupação da linha e o período de 24 h.

Quanto a ocupação das linhas das estações, há uma maior ocupação das linhas dos pátios no caso de partidas simétricas, onde todas as linhas foram ocupadas por pelo menos um trem, sendo que na soma dos tempos de ocupação das duas linhas dos pátios, os trens param menos no caso de partidas simétricas.

Verifica-se assim que, de modo geral, o melhor desempenho dos trens ocorre quando os horários de partida são simétricos, isto é, quando existe sempre um trem exportação partindo simultaneamente com um trem importação.

Todos os demais cenários serão simulados, portanto, com os trens partindo simetricamente.

5.2. Cenário 2: com todas as estações abertas, aumentando-se a velocidade e os tempos de paradas dos trens nas estações

O objetivo deste cenário é verificar os desempenhos dos trens em três casos: passando-se pelo trecho o número máximo de trens calculado teoricamente, aumentando-se a velocidade dos trens em 15% e aumentando-se o tempo de parada dos trens nas estações de 10 para 20 minutos.

Os resultados obtidos estão nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3: Desempenho médio dos trens para o cenário 2

Medidas de Desempenho		Cenário 2.1	Cenário 2.2	Cenário 2.3
Velocidade média (km/h)		24,85	29,69	24,16
Tempo total no sistema (h:min)		04:39	03:54	04:46
Tempo parado (h:min)		01:29	01:20	01:35
Fila média (trens)		1,96	1,92	1,97
Fila máxima	Trens	6	4	4
	Tempo (min)	3	5	5
Espera máxima (min)		31	37	31
Espera média (min)		6,3	6,4	6,3

Onde:

Cenário 2.1: número máximo de trens calculado teoricamente

Cenário 2.1: aumento de 15% na velocidade média dos trens

Cenário 2.3: aumento do tempo de parada dos trens

Em relação a circulação do número máximo teórico de trens (cenário 2.1), um aumento de 15% na velocidade de cada trem gera:

- aumento de 19,5% na velocidade média dos trens, de 24,85 para 29,69 km/h;
- redução de 16,1% no tempo de permanência dos trens no sistema, de 4:39 para 3:54 h;
- redução de 33,3% na fila máxima, de 6 para 4 trens;
- aumento de 19,3% na espera máxima, de 31 para 37 minutos; e
- aumento de 1,59% na espera média, de 6,3 para 6,4 minutos.

O aumento da velocidade gerou um aumento da espera máxima e média. Isto deve-se ao fato que o trem circulando mais rápido, chegou mais cedo em uma determinada estação, o que deve ter provocado um aumento no tempo de espera para liberação do trecho. Entretanto, o efeito do aumento do tempo de espera foi compensado e superado pelo da diminuição do tempo de percurso entre estações.

Se forem alterados os horários de partida dos trens, pode-se obter um melhor aproveitamento do desempenho dos trens, com uma diminuição do tempo parado e consequentemente da espera.

Se o tempo mínimo de permanência dos trens nos pátios é aumentado de 10 para 20 minutos (cenário 2.3), a simulação indica que os efeitos dessa mudança sobre a operação do sistema incluem:

- uma redução de 2,8% na velocidade média dos trens, de 24,85 para 24,16 km/h;

- um aumento de 2,5% no tempo médio de permanência dos trens no sistema, de 4:39 para 4:46 h; e
- aumento de 6,7% no período em que os trens ficam parados, de 1:29 para 1:36 h.

Verifica-se assim, que as medidas de desempenho pioraram de maneira geral com o aumento do tempo de parada dos trens nas estações.

Tabela 5.4: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 2

Estação	Linha	Cenário 2.1		Cenário 2.2		Cenário 2.3	
		Tempo	%	Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	1:01	4,24	1:03	4,37	0:48	3,33
	2	0:05	0,35	0:05	0,35		
TL	1	3:14	13,47	3:52	16,11	3:27	14,37
	2	0:10	0,69	1:32	6,39	1:42	7,08
SN	1	3:25	14,24	3:24	14,17	3:24	14,17
	2	1:22	5,69				
RA	1	3:40	15,28	2:00	8,33	1:57	8,12
	2	0:10	0,69	1:42	7,08	1:42	7,08
XN	1	4:55	20,49	3:24	14,17	3:24	14,17
	2	1:42	7,08				
LN	1	3:53	16,18	1:38	6,80	5:38	23,47
	2	0:51	3,54	1:52	7,78	1:42	7,08
AO	1	4:16	17,78	3:24	14,17	5:31	22,99
	2	0:51	3,54			1:42	7,08
FE	1	2:08	8,89	2:06	8,75	0:48	3,33
	2	0:14	0,97	0:48	3,33		

Quanto a ocupação das linhas, há uma maior ocupação das linhas dos pátios no cenário 2.3, onde houve aumento dos tempos de parada dos trens, mas nem todas as linhas foram ocupadas por trens, fato que ocorreu no cenário 2.1, significando que, além das linhas terem sido ocupadas por menos tempos, houve um melhor aproveitamento das mesmas.

5.3. Cenário 3: com três estações fechadas, aumentando-se a velocidade e os tempos de paradas dos trens nas estações

O cenário 3 pressupõe que três das oito estações serão fechadas. O objetivo da simulação é verificar os desempenhos dos trens, passando-se pelo trecho o número máximo de trens calculado teoricamente (cenário 3.1), aumentando-se a velocidade dos trens em 15% (cenário 3.2) e aumentando-se o tempo de parada dos trens nas estações de 10 para 20 minutos (cenário 3.3). Os resultados obtidos estão nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: Desempenho médio dos trens para o cenário 3

Medidas de desempenho		Cenário 3.1	Cenário 3.2	Cenário 3.3
Velocidade média (km/h)		27,69	35,44	24,00
Tempo total no sistema (h:min)		04:13	03:17	05:00
Tempo parado (h:min)		01:07	00:36	01:54
Fila média (trens)		1,30	1,20	1,53
Fila máxima	Trens	2	2	4
	Tempo (min)	6	8	5
Espera máxima (min)		5	7	72
Espera média (min)		4,8	4,8	14,3

Onde:

Cenário 3.1: número máximo de trens calculado teoricamente

Cenário 3.1: aumento de 15% na velocidade média dos trens

Cenário 3.3: aumento do tempo de parada dos trens

Em relação à circulação do número máximo teórico de trens (cenário 3.1), um aumento de 15% na velocidade dos trens provoca:

- aumento de 28% na velocidade média total dos trens, de 27,69 para 35,44 km/h;
- redução de 22,1% no tempo médio total dos trens no sistema, de 4:13 para 3:17 h;

- aumento no tempo de duração da fila máxima, de 6 para 8 minutos;
- aumento da espera máxima, de 5 para 7 minutos;
- redução de 7,7% na fila média, de 1,3 para 1,2 trens; e
- redução de 46,26% no tempo em que os trens ficaram parados, de 1:07 para 0:36 h.

A exemplo do que ocorreu para o trecho com todas as estações abertas (cenário 2), um aumento de 15% na velocidade de cada trem em cada segmento, provoca um aumento na velocidade média dos trens no sistema e consequentemente uma redução no tempo total dos trens no trecho.

O aumento do tempo de duração da fila máxima deve ser um fato isolado pois há uma redução expressiva no tempo em que os trens ficam parados no sistema (46,26%) e também na fila média.

No cenário 3.3, aumentando-se o tempo mínimo de permanência dos trens nas estações de 10 para 20 minutos, verifica-se em relação ao cenário 3.1:

- redução de 13,3% na velocidade média total dos trens, de 27,69 para 24,00 km/h;
- aumento de 18% no tempo médio total dos trens no sistema, de 4:13 para 5:00 h;
- aumento da fila média, de 1,3 para 1,53 trens;
- aumento da espera máxima, de 5 para 72 minutos; e
- aumento de 380% na espera média, de 4,8 para 14,3 minutos.

Observa-se que o aumento do tempo de parada nas estações provoca um reflexo negativo em todas as medidas de desempenho dos trens.

Tabela 5.6: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 3

Estação	Linha	Cenário 3.1		Cenário 3.2		Cenário 3.3	
		Tempo	%	Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	0:29	2,01	0:29	2,01	1:01	4,24
	2						
TL	1						
	2						
SN	1	2:02	8,47	1:08	4,72	4:37	19,24
	2			1:01	4,24	1:19	5,49
RA	1						
	2						
XN	1	1:01	4,24	2:02	8,47	6:55	28,82
	2	1:01	4,24			1:19	5,49
LN	1						
	2						
AO	1	2:02	8,47	1:01	4,24	4:56	20,56
	2			1:01	4,24	1:19	5,49
FE	1	0:29	2,01	0:29	2,01	1:07	4,65
	2					0:10	0,69

Em relação a ocupação das linhas dos pátios, aumentando-se em 15% a velocidade dos trens não há reflexos nos tempos de ocupação dos pátios, apenas uma alteração na distribuição das linhas dos pátios utilizadas em cada caso. Isto significa que houve uma alteração dos locais onde os trens se encontraram, provocada pelo aumento da velocidade.

Para o caso de aumento do tempo de parada nas estações (cenário 3.3), há um aumento significativo dos tempos de ocupação das linhas em todos os pátios.

5.4. Cenário 4: com quatro estações fechadas, aumentando-se a velocidade e os tempos de paradas dos trens nas estações

Nesse cenário, deseja-se comparar os desempenhos dos trens, passando-se pelo trecho o número máximo de trens calculado teoricamente, aumentando-se a velocidade dos trens em 15% e aumentando-se o tempo de parada dos trens nas

estações de 10 para 20 minutos. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7: Desempenho médio dos trens para o cenário 4

Medidas de desempenho		Cenário 4.1	Cenário 4.2	Cenário 4.3
Velocidade média (km/h)		31,87	34,00	24,12
Tempo total no sistema (h:min)		03:39	03:26	04:53
Tempo parado (h:min)		00:58	01:04	01:47
Fila média (trens)		1,16	1,30	1,36
Fila máxima	Trens	2	2	2
	Tempo (min)	5	5	10
Espera máxima (min)		55	51	76
Espera média (min)		9,0	10,4	18,1

Onde:

Cenário 4.1: número máximo de trens calculado teoricamente

Cenário 4.2: aumento de 15% na velocidade média dos trens

Cenário 4.3: aumento do tempo de parada dos trens

Em relação à circulação do número máximo teórico de trens (cenário 4.1), um aumento de 15% na velocidade dos trens gera:

- aumento de 12,5% na velocidade média dos trens, de 31,87 para 34,00 km/h;
- redução de 6% no tempo médio total dos trens no sistema, de 3:39 para 3:36 h;
- redução de 7,3% na espera máxima, de 55 para 51 minutos; e
- aumento de 15,5% na espera média, de 9,0 para 10,4 minutos.

Como nos dois cenários anteriores, para todas as estações abertas e retirando-se três, o aumento da velocidade de cada trem implica em melhoria nos índices de desempenho dos trens, exceção feita a espera média, que como já citado no caso do cenário 2, pode ter ocorrido em função de trens terem chegado em certas estações e aguardarem tempo maiores pela liberação do trecho à frente, fatos que podem ser minimizados pela alteração dos horários de partida dos trens na origem.

Entretanto, verifica-se que os ganhos com o aumento de velocidade foram maiores para o trecho sem três estações em relação ao trecho com todas as estações. Já para o trecho sem quatro estações, os ganhos com o aumento de velocidade foram inferiores aos dois cenários anteriores (com todas as estações e sem três). Isto significa que existem limites para retirada de estações (fechamento).

Aumentando-se de 10 para 20 minutos o tempo mínimo de permanência dos trens nos pátios (cenário 4.3), pode-se notar que, como mostrado nas Tabelas 5.7 e 5.8, ocorre:

- redução de 24,3% na velocidade média dos trens, de 31,87 para 24,12 km/h;
- aumento de 33,8% no tempo médio total dos trens no sistema, 3:39 para 4:53 h;
- aumento de 100% na espera média, de 9,0 para 18,1 minutos; e
- aumento de 17,2% na fila média, de 1,16 para 1,36 trens.

Novamente observa-se que o desempenho dos trens piora com o aumento do tempo de parada nas estações.

Tabela 5.8: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 4

Estação	Linha	Cenário 4.1		Cenário 4.2		Cenário 4.3	
		Tempo	%	Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	0:24	1,67	3:42	15,42	0:51	3,54
	2			0:24	1,67		
TL	1						
	2						
SN	1						
	2						
RA	1	5:06	21,25	1:42	7,08	7:28	31,11
	2	0:51	3,54			1:39	6,87
XN	1						
	2						
LN	1	1:42	7,08	3:35	14,93	5:28	22,78
	2			0:51	3,54	1:39	6,87
AO	1						
	2						
FE	1	0:24	1,67	0:24	1,67	0:51	3,54
	2						

Como indica a Tabela 5.8, com o aumento da velocidade dos trens há alterações significativas na ocupação dos pátios, com uma maior ocupação dos pátios de início e fim do trecho para o cenário onde houve aumento da velocidade (4.2) e de maior ocupação dos pátios intermediários para o cenário 4.1.

Verifica-se mais uma vez que, aumentando-se o tempo de parada dos trens nas estações, ocorrem aumentos significativos nos tempos de ocupação das linhas dos pátios.

5.5. Cenário 5: com todas as estações abertas, com o número máximo de trens e retirando-se dois trens

O objetivo do cenário 5 é comparar os desempenhos dos trens, passando-se pelo trecho com todas as estações abertas o número máximo de trens calculado teoricamente (cenário 5.1) e retirando-se dois trens, um por sentido (cenário 5.2). Os resultados obtidos estão nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9: Desempenho médio dos trens para o cenário 5

Medidas de Desempenho		Cenário 5.1	Cenário 5.2
Velocidade Média (km/h)		24,85	25,43
Tempo total no sistema (h:min)		04:39	04:34
Tempo Parado (h:min)		01:29	01:26
Fila média (trens)		1,96	1,64
Fila máxima	Trens	6	4
	Tempo (min)	3	4
Espera Máxima (min)		31	31
Espera Média (min)		6,3	5,9

Em relação à circulação do número máximo teórico de trens (cenário 5.1), retirando-se dois trens do sistema tem-se:

- aumento de 2,3% na velocidade média dos trens, de 24,85 para 25,43 km/h;
- redução de 16,3% na fila média, de 1,96 para 1,64 trens;
- redução de 33,3% na fila máxima, de 6 para 4 trens; e

- redução de 6,35% na espera média, de 6,3 para 5,9 minutos.

A retirada de dois trens (um por sentido), influenciou positivamente todas as medidas de desempenho dos trens, exceto no caso de duração da fila máxima, que passou de 3 para 4 minutos, devendo entretanto ser um caso isolado, pois ocorreram reduções no tempo médio de espera dos trens nas estações.

Tabela 5.10: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 5

Estação	Linha	Cenário 5.1		Cenário 5.2	
		Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	1:01	4,24	0:38	2,64
	2	0:05	0,35		
TL	1	3:14	13,47	3:30	14,58
	2	0:10	0,69	0:41	2,85
SN	1	3:25	14,24	3:33	14,79
	2	1:22	5,69	0:41	2,85
RA	1	3:40	15,28	2:57	12,29
	2	0:10	0,69	0:10	0,69
XN	1	4:55	20,49	2:37	10,90
	2	1:42	7,08	1:11	4,93
LN	1	3:53	16,18	3:01	12,57
	2	0:51	3,54	0:10	0,69
AO	1	4:16	17,78	2:04	8,61
	2	0:51	3,54	1:01	4,24
FE	1	2:08	8,89	0:38	2,64
	2	0:14	0,97		

Retirando-se dois trens há uma redução nos tempos de ocupação dos pátios.

5.6. Cenário 6: com três estações fechadas e alternando-se as estações fechadas

O cenário 6 visa comparar os desempenhos dos trens, passando-se pelo trecho com três estações fechadas o número máximo de trens calculado teoricamente e

alterando-se as estações abertas. O objetivo é verificar se a escolha das estações a serem retiradas do trecho exerce alguma influência no desempenho dos trens. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11: Desempenho médio dos trens para o cenário 6

Medidas de Desempenho		Cenário 6.1	Cenário 6.2
Velocidade Média (km/h)		27,69	28,56
Tempo total no sistema (h:min)		04:13	04:01
Tempo Parado (h:min)		01:07	01:06
Fila média (trens)		1,30	1,32
Fila máxima	Trens	2	3
	Tempo (min)	6	2
Espera Máxima (min)		5	60
Espera Média (min)		4,8	8,3

Onde:

Cenário 6.1: sem as estações de TL, RA e LN.

Cenário 6.2: sem as estações de SN, XN e AO.

Alterando-se as estações abertas (ou as três fechadas), ocorre:

- aumento de 3,14% na velocidade média dos trens, de 27,69 para 28,56 km/h;
- redução de 66,7% no tempo de duração da fila máxima, de 6 para 2 minutos;
- aumento de 5 para 60 minutos na espera máxima; e
- aumento de 72,9% na espera média, de 4,8 para 8,3 minutos.

Verifica-se que as alterações na localizações das estações retiradas (fechadas), afetam sensivelmente as medidas de desempenho referentes a espera máxima e ao tempo de duração da fila máxima, pois como não foram alterados os horários de partida dos trens na origem, os tempos de espera dos trens em alguns pátios foram significativamente afetados pela posição da estação, o que pode ter

levado alguns trens a terem que aguardar muito tempo pela liberação do segmento à frente.

Tabela 5.12: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 6

Estação	Linha	Cenário 6.1		Cenário 6.2	
		Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	0:29	2,01	0:29	2,01
	2				
TL	1			1:32	6,39
	2			0:31	2,15
SN	1	2:02	8,47		
	2				
RA	1			4:02	16,81
	2			0:31	2,15
XN	1	1:01	4,24		
	2	1:01	4,24		
LN	1			3:08	13,06
	2			0:31	2,15
AO	1	2:02	8,47		
	2				
FE	1	0:29	2,01	2:17	9,51
	2			0:14	0,97

Verifica-se também que ocorreram aumentos significativos nos tempos de ocupação das linhas dos pátios em razão das alterações nas posições das estações fechadas (retiradas).

5.7. Cenário 7: circular o número máximo de trens, variando-se o número de estações abertas

O cenário 7 tem por objetivo comparar os desempenhos dos trens nos trechos com todas as estações abertas, com três e com quatro estações fechadas, para o número máximo de trens calculado teoricamente para o trecho com quatro estações fechadas.

A finalidade é, dado o número máximo teórico dos trens que podem circular num trecho com quatro estações fechadas, verificar o que ocorre com o desempenho desses trens se for aumentado o número de estações abertas. Os resultados obtidos estão nas Tabelas 5.13 e 5.14.

Tabela 5.13: Desempenho médio dos trens para o cenário 7

Medidas de Desempenho		Cenário 7.1	Cenário 7.2	Cenário 7.3
Velocidade Média (km/h)		27,52	31,10	31,87
Tempo total no sistema (h:min)		04:12	03:43	03:39
Tempo Parado (h:min)		01:06	00:35	00:58
Fila média (trens)		1,15	1,33	1,16
Fila máxima	Trens	2	2	2
	Tempo (min)	6	4	5
Espera Máxima (min)		4	4	55
Espera Média (min)		4,8	4,8	9,0

Onde:

Cenário 7.1: trecho com todas as estações abertas

Cenário 7.2: trecho sem três estações

Cenário 7.3: trecho sem quatro estações

Apesar de circular o número de trens calculado para o trecho com quatro estações fechadas, o pior desempenho ocorreu para o cenário 7.1 (trecho com todas as estações abertas), no qual tem-se:

- redução de 13,6% na velocidade média dos trens, de 31,87 para 27,52 km/h;
- aumento de 15,1% no tempo total dos trens no sistema, de 3:39 para 4:12 h;
- redução da espera máxima de 55 para 4 minutos; e
- redução da espera média de 9 para 4,8 minutos.

Isso explica-se pelo fato de que havendo mais estações abertas e que os trens tem obrigatoriamente que cumprir um tempo mínimo de permanência nos pátios,

quanto mais pátios maior o tempo que os trens permanecem parados no sistema. Entretanto, em cada pátio o tempo de espera é menor.

Fato semelhante ocorre comparando-se o trecho com três estações fechadas em relação ao com quatro fechadas.

Tabela 5.14: Tempos de ocupações das linhas das estações para o cenário 7

Estação	Linha	Cenário 7.1		Cenário 7.2		Cenário 7.3	
		Tempo	%	Tempo	%	Tempo	%
RJ	1	0:24	1,67	0:24	1,67	0:24	1,67
	2						
TL	1	1:42	7,08				
	2						
SN	1	1:42	7,08	1:42	7,08		
	2						
RA	1	1:42	7,08			5:06	21,25
	2					0:51	3,54
XN	1	0:51	3,54	0:51	3,54		
	2	0:51	3,54	0:51	3,54		
LN	1	1:42	7,08			1:42	7,08
	2						
AO	1	1:42	7,08	1:42	7,08		
	2						
FE	1	0:24	1,67	0:24	1,67	0:24	1,67
	2						

Quanto à ocupação dos pátios, verifica-se que há uma distribuição de tempos similar para os cenários 7.1 e 7.2, mas um aumento significativo do tempo de permanência na estação central do trecho para o caso de quatro estações retiradas.

Capítulo 6

6- Conclusões e recomendações

6.1- Conclusões

A meta principal desta pesquisa é propor um modelo de simulação estocástica que permita estudar a operação de trechos ferroviários em linha singela. Os objetivos estabelecidos para atingir essa meta foram a escolha e análise de fatores que exercem influência no desempenho dos trens no trecho.

Essa meta foi alcançada na medida em que a análise de sete cenários, que são composições de alguns fatores que se supõem afetarem o desempenho dos trens, permitiu verificar a influência de cada fator na operação do trecho.

Os fatores estudados foram o número de estações existentes no trecho, os horários de partida dos trens, os tempos de parada nas estações e a velocidade média dos trens.

Em relação aos horários de partida dos trens, verificou-se que os trens tem melhor desempenho quando adota-se o método de partidas simétricas em vez de partidas defasadas, isto é, quando existe sempre um trem no sentido exportação partindo da origem simultaneamente com um trem em sentido importação.

Para o fator que considera o número de estações existentes no trecho, verificou-se que para um mesmo trecho, quanto maior o número de estações existentes, maior a capacidade do trecho, pois menor será o tempo de percurso no segmento entre estações que influi diretamente na capacidade (equação 3.3).

Verificou-se que para um mesmo número de estações, existe influência da localização dessas estações no desempenho dos trens, isto é, se para um determinado trecho forem retiradas certas estações, há diferenças no desempenho dos trens em função da escolha das estações retiradas.

Constatou-se que no cenário 7, em que procurou-se para um certo número de trens, comparar o desempenho desses trens para três trechos diferentes, isto é, com todas as estações abertas, retirando-se três e retirando-se quatro estações, a análise foi prejudicada pelo fato do simulador prever que os trens tem obrigatoriamente que cumprir um tempo mínimo de parada nas estações, aumentando-se o tempo de permanência dos mesmos no sistema, resultado contrário ao esperado. Entretanto, em termos de espera máxima e média, verificou-se que quanto maior o número de estações, menores esses tempos.

Com relação ao tempo de parada nas estações, notou-se de modo geral que aumentando-se o tempo mínimo de parada nas estações, ocorrem sempre piores desempenhos dos trens, com redução da velocidade média no sistema e conseqüente aumento do tempo no sistema, aumento da fila e espera médias. Verifica-se, portanto, que o tipo de licenciamento a ser adotado para o trecho, seja através de staff elétrico, CTC ou através de satélite, exerce influência significativa no desempenho dos trens, pois para cada sistema existe um tempo mínimo diferente para os trens permanecerem nas estações cumprindo procedimentos de licenciamento.

O último fator analisado, a velocidade média dos trens, indica que um aumento da velocidade de cada trem nos segmentos, corresponde a melhores desempenhos globais dos trens, permitindo que os trens permaneçam menos tempo no sistema, mantendo-se ou reduzindo a fila máxima e reduzindo o tempo parado.

Portanto, melhorias nas condições da via ou no desempenho das locomotivas, que permitam aos trens desenvolverem maiores velocidades nos segmentos entre estações, correspondem a melhores desempenhos globais dos trens no sistema.

Verificou-se, portanto, que os fatores escolhidos exercem algum tipo de influência no desempenho dos trens e que o modelo proposto possibilita a análise da operação de um trecho ferroviário em linha singela.

6.2- Recomendações para estudos futuros

Em função dos resultados obtidos neste estudo, podem ser apresentadas as seguintes sugestões e recomendações para estudos futuros, que visem aprofundar a análise dos fatores que exercem influência na operação de trechos ferroviários em linha singela e melhoria do modelo proposto:

- Em relação ao modelo e simulador
 - incluir no simulador a possibilidade de ultrapassagens de trens, isto é, definição de prioridades entre trens em um mesmo sentido, que permita que um trem de menor prioridade pare em uma estação para ser ultrapassado por outro trem no mesmo sentido e de maior prioridade na circulação;
 - alterar o simulador para que somente seja cumprido o tempo mínimo de parada em uma estação se ocorrer um cruzamento entre trens nessa estação, ou seja, se um trem chegar em uma estação e nela não houver outro trem circulando em sentido contrário e forem satisfeitas as condições para partida do trem, o tempo mínimo de parada a ser cumprido na estação será apenas o de licenciamento, ficando o tempo para conferência do último vagão a ser utilizado apenas para liberação do trecho anterior (trecho que o trem acabou de desocupar);

- Em relação aos fatores e cenários
 - estudar a influência de circular os trens em comboios, isto é, circular um determinado número de trens em um mesmo sentido para depois inverter o sentido de circulação, passando vários outros trens em sentido contrário;
 - incluir, no trecho de linha singela, um segmento de linha dupla, possivelmente no segmento de maior tempo de percurso, verificando o impacto no número de trens suportado pelo trecho e no desempenho global dos trens;
 - verificar o que ocorre com o sistema e com os trens, se for permitido acomodar mais de dois trens nas estações, isto é, levar em consideração o comprimento dos trens e das linhas.

Anexos

Anexo 1: Horários dos trens reais (plano)

- Sentido importação

Local	L2241		D2253		D2245	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
RJ		1:00		6:20		10:35
TL	1:20	1:40		6:40		10:55
SN		2:10		7:10	11:25	11:35
RA	2:40	3:40		7:40		12:05
XN		4:10		8:10		12:35
LN	4:50	5:40	8:50	9:40	13:15	13:40
AO		6:25		10:25		14:25
FE	7:00		11:00		15:00	

Local	D2247		D2249		D2251	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
RJ		15:00		18:15		21:00
TL		15:20		18:35	21:20	21:40
SN		15:50		19:05		22:10
RA		16:20	19:35	19:45		22:40
XN		16:50		20:15	23:10	23:40
LN	17:30	17:55		20:55		0:20
AO		18:40	21:40	22:00	1:05	1:20
FE	19:15		22:35		1:55	

- **Sentido exportação**

Local	D2242		D2244		D2246	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
FE		0:15		3:40		7:55
AO	0:55	1:10		4:20		8:40
LN		1:55	5:05	5:20	9::25	9:45
XN		2:35		6:00		10:25
RA		3:05		6:30		10:55
SN		3:35	7:00	7:15	11:25	11:30
TL		4:10		7:50		12:05
RJ	4:30		8:10		12:25	

Local	D2248		L2250		D2252	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
FE		12:00		16:20		21:10
AO		12:40		17:00	21:50	22:10
LN	13:25	14:05	17:45	18:30		22:55
XN		14:45		19:10		23:35
RA		15:15	19:40	20:25		0:05
SN	15:45	15:55		20:55		0:35
TL		16:30	21:30	21:50	1:10	1:35
RJ	16:50		22:10		1:55	

Anexo 2: Horários dos trens gerados pelo simulador

Sentido importação

Local	L2241		D2243		D2245	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
RJ		1:00		6:20		10:35
TL	1:19	1:29	6:39	6:49	10:52	11:02
SN	1:55	2:05	7:14	7:24	11:27	11:37
RA	2:29	2:49	7:47	7:57	12:01	12:11
XN	3:17	3:27	8:22	8:32	12:36	12:46
LN	3:57	4:07	9:02	9:12	13:16	13:26
AO	4:45	4:55	9:44	9:54	13:58	14:08
FE	5:25		10:28		14:40	

Local	D2247		D2249		D2251	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
RJ		15:00		18:15		21:21
TL	15:15	15:45	18:34	18:44	21:40	21:50
SN	16:12	16:22	19:09	19:19	22:15	22:25
RA	16:46	16:56	19:43	19:53	22:49	22:59
XN	17:24	17:34	20:19	20:29	23:24	23:34
LN	18:04	18:14	21:00	21:10	0:07	0:17
AO	18:50	19:00	21:42	21:52	0:52	1:02
FE	19:25		22:26		1:34	

Sentido exportação

Local	D2242		D2244		D2246	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
FE		0:15		3:40		7:55
AO	0:49	0:59	4:10	4:50	8:29	8:39
LN	1:29	1:39	5:22	5:32	9:12	9:22
XN	2:09	2:19	6:02	6:12	9:56	10:06
RA	2:44	2:54	6:37	6:47	10:31	10:41
SN	3:18	3:28	7:11	7:21	11:05	11:32
TL	3:57	4:07	7:48	7:58	11:57	12:07
RJ	4:23		8:15		12:26	

Local	D2248		L2250		D2252	
	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu	Chegou	Partiu
FE		12:00		16:20		21:10
AO	12:34	12:44	16:54	17:04	21:40	21:50
LN	13:14	13:24	17:37	18:09	22:23	22:33
XN	13:54	14:04	18:43	18:53	23:07	23:29
RA	14:29	14:39	19:18	19:48	23:54	0:04
SN	15:03	15:13	20:12	20:22	0:28	0:38
TL	15:40	15:50	20:49	20:59	1:07	1:23
RJ	16:07		21:16		1:39

Referências Bibliográficas

- ⇒ Arditi, D.; Asce, M.; Krieter, D. S. (1985). Railway Route Rationalization: A Valuation Model. *Journal of Transportation Engineering*, v. 111, n. 2, p. 105-113.
- ⇒ Assad, A. A. (1980a). Modelling of Rail Networks: Toward a Routing/Makeup Model. *Transportation Research Part B*, v. 14B, p. 101-114.
- ⇒ Assad, A. A. (1980b). Models for Rail Transportation. *Transportation Research Part A*, v. 14A, p. 205-220.
- Banks, J.; Carson, J. S. (1984). *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall, Inc, New Jersey, 514 páginas.
- Banks, J.; Carson, J. S.; Sy, J. N. (1989). *Getting Started with GPSS/H*. Wolverine Software Corporation, Annandale, 311 páginas.
- ⇒ Bodin, L. D.; Golden, B. L.; Schuster, A. D. (1980). A Model for the Blocking of Trains. *Transportation Research Part B*, v. 14B, p. 115-120.

- Bongaardt Jr. et al (1980). Railroad Network Modelling: Recent Practical Applications. In Proceedings of the Transportation Research Forum , p. 499-512. Citado por Kraay, Harker e Chen (1991).
- ↘ Bourachout, J. (1985). Computer Aided Design of the Operation and the Track Layout of the Passenger Railway Stations: Interactive-Graphic Model Afaig. Transportation Planning and Technology, v. 9, p. 271-283.
- ↘ Brettman, C. (1970). Computerized Supervision and Control of Operations on Single and Double-Track Lines. The Third International Symposium on Railway Cybernetics. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Brown, D. G. (1992). Freight Service Quality Cost Economics and a Hypothetical Railroad Example. Transportation Research Record, n. 1341, p. 39-52.
- Bruun, E.; Salpeas, P. T. (1991). Train Operations Computer Simulation Case Study: Single-Tracking Operations for Philadelphia's Market - Frankford Subway Elevated Rail Rapid Transit Line. Transportation Research Record, n. 1308, p. 8-15.
- Cai, X.; Goh, C. J. (1994). A Fast Heuristic for the Train Scheduling Problem. Computers & Operations Research, v. 21, n. 5, p. 499-510.
- Carey, M. (1994a). A Model and Strategy for Train Pathing with Choice of Lines, Platforms, and Routes. Transportation Research Part B, v. 28B, n. 5, p. 333-353.

- Carey, M. (1994b). Extending a Train Pathing Model from One-way to Two Way Track. *Transportation Research Part B*, V. 28B, n. 5, p. 395-400.
- Carey, M.; Kwiecinsky, A. (1994a). Stochastic Approximation of the Effects of Headways on Knock-on Delays of Trains. *Transportation Research Part B*, v. 28B, n. 4, p. 251-267.
- Carey, M.; Kwiecinsky, A. (1994b). Swapping the Order of Scheduled Services to Minimize Expected Costs of Delays. *Transportation Research Part B*, v. 28B, n. 6, p. 409-428.
- Carey, M.; Lockwood, D. (1995). A Model, Algorithms and Strategy for Train Pathing. *Journal of the Operational Research Society*, v. 46, n. 8, p. 988-1005.
- Chernyavskii, A. L. (1971a). Heuristic program for Railway Timetable Composition, Part I. *Ovtomatike i Telemekhanika*, n. 1, p. 90-96. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Chernyavskii, A. L. (1971b). Heuristic program for Railway Timetable Composition, Part II. *Ovtomatike i Telemekhanika*, n. 1, p. 69-75. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Crainic, T. G. (1988). Rail Tactical Planning: Issues, Models and Tools. Department of Science Administratives, University of Quebec at Montreal, Montreal, Canada. Citado por Harker e Chen (1990).
- Crainic, T. G.; Ferland, J.; Rousseau, J. (1984). A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation. *Transportation Science*, v. 18, n. 2, p. 165-184.

- ⇒ Crainic, T. G.; Florian, M.; Leal, J. E. (1990). A Model for the Strategic Planning of National Freight Transportation by Rail. *Transportation Science*, v. 24, n. 1, p. 1-24.
- ↘ Crainic, T. G.; Roy, J. (1988). Operational Research Tools for Tactical Freight Transportation Planning. *European Journal of Operational Research*, n. 33, p. 290-297.
- Crainic, T. G.; Querin, L. (1987). Approximation of Over-the-Line Delay for Single Line, Single Speed Freight Rail Transportation. Publication n. 519, Centre de recherche sur les transports, University of Montreal, Montreal, Canada. Citado por Harker e Chen (1990).
- Curry, G. L.; Deuermyer, B. L.; Feldman, R. M. (1989). *Discrete Simulation: Fundamentals and Microcomputer Support*. Holden-Day, Inc, Oakland, 297 páginas.
- Dubé, L.; Belshaw, P. N. (1977). The Route Scheduler: A Marco Planning Model for the Analysis of Train Interference and Scheduling. Presented at the Canadian Operational Research Society Annual Conference. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Elbrond, J.; Da Costa, C. A. (1970). Single Line Rail Traffic. O. R. Symposium, São Paulo, Brazil. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- ⇒ English, G. W. (1978). An Analytic Model for the Analysis of Congested Rail Lines. *Proceedings of the Biennial CIGGT Seminar on Railway Research*, CIGGT Report 78-5, p. 203-218, Kingston. Citado por Petersen e Taylor (1982).

- English, G. W. (1978). An Analytic Model for the Analysis of Single Track Railroad Capacity. International Symposium of Travel Supply Models, Centre de recherche sur les transports, University of Montreal, Montreal, Canada. Citado por Harker e Chen (1990).
- Ferreira, L. (1997). Planning Australian Freight Rail Operations: An Overview. *Transportation Research Part A*, v. 31, n. 4, p. 335-348.
- Forbes, M. A.; Holt, J. N.; Watts, A. M. (1991). Exact Solution of Locomotive Scheduling Problems. *Journal of the Operational Research Society*, v. 42, n. 10, p. 825-831.
- Frank, O. (1966). Two-Way Traffic on a Single Line of Railway. *Operations Research*, n. 14, p. 801-811.
- Fu, Z.; Wright, M. (1994). Train Plan Model for British Rail Freight Services Through the Channel Tunnel. *Journal of the Operational Research Society*, v. 45, n. 4, p. 384-391.
- Greenberg, B. S.; Leachman, R. C.; Wolff, R. W. (1988). Predicting Dispatching Delays on a Low Speed, Single Track Railroad. *Transportation Science*, v. 22, n. 1, p. 31-38.
- Haghani, A. E. (1989). Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model. *Transportation Research Part B*, v. 23B, n. 6, p. 433-452.
- Harker, P. T. (1995). Services and Technology: Reengineering the Railroads. *Interfaces*, n. 25, p. 72-80.

Harker, P. T. (1990). Use of Advanced Train Control Systems in Scheduling and Operating Railroads: Models, Algorithms, and Applications. *Transportation Research Record*, n. 1263, p. 101-110.

→ Harker, P. T.; Chen, B. (1990). Two Moments Estimation of the Delay on Single-Track Rail Lines with Scheduled Traffic. *Transportation Science*, v. 24, n. 4, p. 261-275.

Harker, P. T.; Hallowell, S. F. (1996). Predicting On-Time Line-Haul Performance in Scheduled Railroad Operations. *Transportation Science*, v. 30, n. 4, p. 364-378.

Harker, P. T.; Hong, S. (1990). Two Moments Estimation of the Delay on a Partially Double-Track Rail Line with Scheduled Traffic. *Journal of the Transportation Research Forum*, v. 31, p. 38-49.

Harker, P. T.; Hong, S. (1994). Pricing of Track Time in Railroad Operations: An Internal Market Approach. *Transportation Research Part B*, v. 28B, n. 3, p. 197-212.

Harker, P. T.; Ward, J. (1991). Management and Information System Components of Successful ATCS. *Transportation Research Record*, n. 1314, p. 21-30.

Higgins, A.; Ferreira (1996). Modeling Reliability of Train Arrival Times. *Journal of Transportation Engineering*, v. 122, n. 6, p. 414-420

- Higgins, A.; Ferreira, L.; Kozan, E. (1995a). Modelling Delay Risks Associated with Train Schedules. *Transportation Planning and Technology*, v. 19, p. 89-108.
- Higgins, A.; Ferreira, L.; Kozan, E. (1995b). Modelling Single-Line Train Operations. *Transportation Research Record*, n. 1489, p. 9-16.
- Higgins, A.; Ferreira, L.; Kozan, E. (1996). Optimal Scheduling of Trains on a Single Line Track. *Transportation Research Part B*, v. 30B, n. 2, p. 147-161.
- Janic, M. (1984). Single Track Line Capacity Model. *Transportation Planning and Technology*, v. 9, n. 2, p. 135-151.
- Janic, M. (1988). A Practical Capacity Model of a Single Track Line. *Transportation Planning and Technology*, v. 12, p. 301-318.
- Jovanovic, D.; Harker, P. T. (1991a). Decision Support System for Train Dispatching: An Optimization-Based Methodology. *Transportation Research Record*, n. 1314, p. 31-40.
- Jovanovic, D.; Harker, P. T. (1991b). Tactical Scheduling of Rail Operations: The Scan I System. *Transportation Science*, v. 25, n. 1, p. 46-64.
- Keaton, M. H. (1989). Designing Optimal Railroad Operating Plans: Lagrangian Relaxation and Heuristic Approaches. *Transportation Research Part B*, v. 23B, n. 6, p. 415-431.

- Keaton, M. H. (1992). Designing Railroad Operating Plans: A Dual Adjustment Method for Implementing Lagrangian Relaxation. *Transportation Science*, v. 26, n. 4, p. 263-279.
- ⇒ Kehr, C. L. (1977). Estimating Railroad Line Capacity. Burlington Northern Inc.. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Kikuchi, S. (1985). Relationship between the Number of Stops and Headway for a Fixed-Route Transit System. *Transportation Research Part A*, v. 19A, n. 1, p. 65-71.
- Koskosidis, Y. A.; Powell, W. B.; Solomon, M. M. (1992). An Optimization-Based Heuristic for Vehicle Routing and Scheduling with Soft Time Window Constraint. *Transportation Science*, v. 26, n. 2, p. 69-85.
- Kraay, D. R.; Harker, P. T. (1995). Real-Time Scheduling of Freight Railroads. *Transportation Research Part B*, v. 29B, n. 3, p. 213-229.
- Kraay, D. R.; Harker, P. T.; Chen, B. (1991). Optimal Pacing of Trains in Freight Railroads: Model Formulation and Solution. *Operations Research*, v. 39, n. 1, p. 82-99.
- Kraft, E. R. (1983). Jam Capacity of Single Track Rail Lines. *Transportation Research Forum Proceedings*, v. 23, p. 461-471.
- Kraft, E. R. (1987). A Branch and Bound Procedure for Optimal Train Dispatching. *Journal of the Transportation Research Forum*, v. 28, p. 263-276.

Lach, D. C.; Skelton, G. R. (1968). SIMTRAC – A Simulation of Train Dispatching on Single-Track Railway. Presented at the CORS National Conference, Toronto, Canada. Citado por Petersen e Taylor (1982).

Lansdowne, Z. F. (1981). Rail Freight Traffic Assignment. *Transportation Research Part A*, v. 15A, p. 183-190.

Laport, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, p. 345-358.

Magnanti, T. L.; Wong, R. T. (1984). Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms. *Transportation Science*, v. 18, n. 1, p. 1-55.

Mills, R. G. J.; Perkins, S. E.; Pudney, P. J. (1991). Dynamic Rescheduling of Long-Haul Trains for Improved Timekeeping and Energy Conservation. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, v. 8, n. 2, p. 146-165.

Muller, E. R. (1979). Towards Optimization in Single Rail Line Scheduling. Department of Mathematics Report, Brock University, St. Catherine, Ontario. Citado por Petersen e Taylor (1982).

➤ Odjik, M. A. (1996). A Constraint Generation Algorithm for the Construction of Periodic Railway Timetables. *Transportation Research Part B*, v. 30, n. 6, p. 455-464.

- Otway, N. J.; Salzborn, F. J. M. (1979). Generating Feasible Schedule for a Single Track Railway Line. Working Paper, Department of Applied Mathematics, University of Adelaide. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Ozekici, S.; Sengor, S. (1994). On a Rail Transportation Model with Scheduled Services. *Transportation Science*, v. 28, n. 3, p. 246-255.
- Peat, Marwick, Mitchell (1975). Parametric Analysis of Railway Line Capacity. Prepared for the Federal Railroad Administration, DOT-FR-4-5014-2. Citado por Petersen e Taylor (1982).
- Petersen, E. R. (1974). Over-the-Road Transit Time for a Single Track Railway. *Transportation Science*, v. 8, p. 65-74.
- Petersen, E. R. (1975). A Primal-Dual Traffic Assignment Algorithm. *Man. Science*, n. 22, p. 87-95. Citado por Assad (1980b).
- Petersen, E. R. (1977a). Railyard Modeling: Part I. Prediction of Put Through Time. *Transportation Science*, v. 11, n. 1, p. 37-49.
- Petersen, E. R. (1977b). Railyard Modeling: Part II. The Effect of Yard Facilities on Congestion. *Transportation Science*, v. 11, n. 1, p. 50-59.
- Petersen, E. R. (1977c). Capacity of a Single Track Rail Line. School of Business Working Paper n. 77-38, Queen's University, Kingston.

Petersen, E. R.; Taylor, A. J. (1982). A Structured Model for Rail Line Simulation and Optimization. *Transportation Science*, v. 16, n. 2, p. 192-206.

Petersen, E. R.; Taylor, A. J. (1987). Design of Single-Track Rail Line for High-Speed Trains. *Transportation Research Part A*, v. 21A, n. 1. p. 47-57.

Petersen, E. R.; Taylor, A. J. (1988). An Optimal Scheduling System for the Welland Canal. *Transportation Science*, v. 22, n. 3, p. 173-185.

Petersen, E. R.; Taylor, A. J.; Martland, C. D. (1986). An Introduction to Computer-Assisted Train Dispatch. *Journal of Advanced Transportation*, v. 20, p. 63-72.

Pulat, P. S. (1989). On the Relation of Max-Flow to Min-Cut for Generalized Networks. *European Journal of Operational Research*, v. 39, p. 103-107.

Rallis, T. (1977). *Intercity Transport, Engineering and Planning*. The McMillan Press Ltd, London and basingstoke, p. 232. Citado por Janic (1988).

→ Ramsey, G. R. S.; Hutchinson, B. G.; Rilett, L. R. (1986). Simplified Railroad Capacity Analysis Model. *Journal of Transportation Engineering*, v. 112, n. 4, p. 358-368.

Rudd, D. A; Storry, A. J. (1976). Single Track Railway Simulation – New Models and Old. *Rail International*. Citado por Petersen e Taylor (1982).

- Salhi, S. (1993). Incorporating Vehicle Routing into the Vehicle Fleet Composition Problem. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 313-330.
- Sauder, R. L.; Westerman, W. M. (1983). Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization. *Interfaces*, v. 13, p. 24-37.
- Solomon, M. M. (1988). Time Window Contrained Routing and Scheduling Problems. *Transportation Science*, v. 22, n. 1, p. 1-13.
- Turnquist, M. A.; Daskin, M. S. (1982). Queuing Models of Classification and Connection Delay in Railyards. *Transportation Science*, v. 16, n. 2, p. 207-230.
- Welty, G. (1996). Advanced Train Control Systems: Three under test, two on the way. *Rail Age*, p. 31-35 e 50-51.
- Wilson, P. B.; Hudson, C. J. (1963). Simulation of Over-the-Road Operations. *CNR Proc.*, p. 142-149. Citado por Harker e Chen (1990).
- Wilson, P. B.; Hudson, C. J. (1967). Computer Simulation Developments. *CNR Proc.*, p. 176-182. Citado por Harker e Chen (1990).
- Yee, R. J. F. (1993). Computer-Assisted Optimization of Train Crew Size for On-Board Fare Collection. *Transportation Research Record*, n. 1402, p. 74-81.

GLOSSÁRIO

Aparelho de Mudança de Via (AMV): mecanismo destinado a possibilitar a passagem de veículos ferroviários de uma via para outra.

Centro de Comando: sala onde estão situadas as mesas de comando, os painéis de indicação e o registrador gráfico, de onde emanam os comandos para o controle da circulação dos trens do trecho correspondente.

Circulação de Trens: movimentação do trem entre locais de licenciamento.

Desvio: é a via que está ligada por AMV à via corrida, à via principal ou a qualquer outra.

Desvio de Cruzamento: é o desvio de um pátio ou da via corrida, em trecho de via singela, utilizado para o cruzamento de dois trens que circulam em sentido contrário, ou para a ultrapassagem de um trem pelo outro.

Estação: estabelecimento da ferrovia, aberto ou não ao público, destinado à execução de serviços ligados à operação e circulação de trens.

Estafe Elétrico: é um sistema de bloqueio eletro-mecânico, em que retirado um bastão de um dos aparelhos, o sistema fica bloqueado, impedindo a retirada de um segundo bastão, até que o primeiro seja recolocado no próprio aparelho ou no aparelho correspondente da estação colateral.

Licenciamento de Trens: conjunto de regras e procedimentos destinados a promover a circulação de trens, em via corrida com segurança.

Pátio: é o conjunto das vias principais, desvios e travessões de uma estação, compreendido entre os respectivos sinais ou AMV de entrada.

Regulamento de Circulação de Trens - RCT: é o conjunto das normas básicas que regem a circulação de trens na FEPASA.

Rota: é o itinerário a ser percorrido pelo trem.

Rota Divergente: é a rota no qual pelo menos um dos aparelhos de mudança de via (AMV) está na posição reversa.

Rota Principal: é a rota na qual todos os AMV estão na posição normal.

Seção de Estafe: trecho de via compreendido entre o sinal ou AMV de saída de um pátio e o sinal ou AMV de entrada de outro pátio, cujo licenciamento de trens é executado pelo sistema de estafe elétrico.

Sinal: meio de informação que transmite ao condutor de um veículo ferroviário, instruções referentes ao movimento do trem.

Via Corrida: é o trecho da via, singela ou dupla, compreendida entre os sinais ou AMV de entrada de dois pátios de estações contíguas, utilizado para a circulação normal de trens.

Via Dupla: é o trecho da via férrea em que a circulação normal é feita em duas vias com sentido preestabelecido.

Via Livre: é o trecho da via, de qualquer comprimento, no qual não há trem, veículo ou obstáculo, de qualquer natureza, que impeça a circulação normal dos trens.

Via Ocupada ou Via Impedida: é o trecho da via, ocupada por trem ou veículo ou impedido por outro obstáculo qualquer, tal como trilho partido, defeito na via, etc., que impeça a circulação de outros veículos com segurança.

Via Principal ou Reta: é o prolongamento da via corrida, dentro do pátio.

Via Singela: é o trecho da via férrea em que a circulação normal dos trens é feita apenas em uma via.

Apêndice

O apêndice contém as curvas de distribuição acumulada de tempos de percursos entre estações do trecho simulado.

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho TL-SN (sentido importação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho SN-RA
(sentido importação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho RA-XN
(sentido importação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho XN-LN
(sentido importação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho LN-AO
(sentido importação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho AO-FE
(sentido importação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho FE-AO
(sentido exportação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho AO-LN
(sentido exportação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho LN-XN
(sentido exportação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho XN-RA
(sentido exportação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho RA-SN
(sentido exportação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho SN-TL
(sentido exportação)

Distribuição acumulada de tempos de percursos do trecho TL-RJ
(sentido exportação)